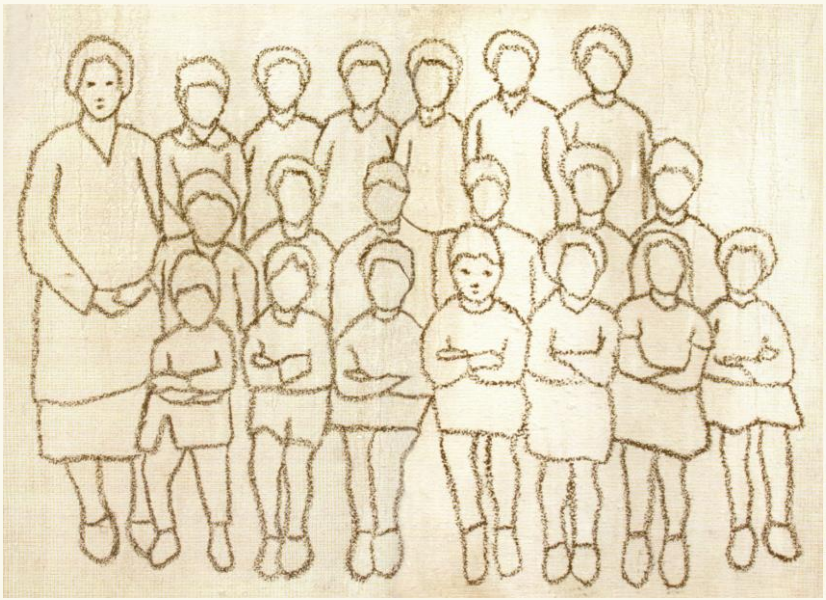
CATERINA MOSCA



EDILIZIA SCOLASTICA:
L'EREDITÀ DEL PASSATO VERSO NUOVI SCENARI.

INTERVENTI INTEGRATI E OTTIMIZZAZIONE MULTIDISCIPLINARE

SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



Dottorato in Ingegneria dell'Architettura e dell'Urbanistica
XXXVII Ciclo
Coordinatore del Dottorato: Prof. Carlo Cellamare
Curriculum: Ingegneria Edile-Architettura

Sapienza Università di Roma
Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale
Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale (DICEA)

Tutti i diritti riservati

L'immagine di copertina è una riproduzione dell'opera *Primary, 2005, affresco su iuta* di Valerio Berruti, gentilmente concessa dall'autore.

EDILIZIA SCOLASTICA:
L'EREDITA' DEL PASSATO VERSO NUOVI SCENARI

Interventi integrati e ottimizzazione multidisciplinare

Tesi di dottorato 2025

Dottoranda
Caterina Mosca

Relatori
Prof.ssa Marina Pugnaletto
Prof.ssa Cesira Paolini

Ai miei genitori

INDICE

ABSTRACT 10

1. INTRODUZIONE 13

1.1. Inquadramento 13

1.2. Le ragioni della ricerca 16

1.3. Obiettivi, metodo e strumenti 18

1.4. Domande aperte 23

1.5. Struttura dei contenuti 25

2. L'EVOLUZIONE STORICO-TIPOLOGICA DELL'EDILIZIA SCOLASTICA ITALIANA 29

2.1. Le architetture per la formazione in Italia: contesto storico e caratteri salienti 29

2.1.1. Dall'Unità d'Italia al 1900 29

2.1.2. Il ventennio 1900-1920 35

2.1.3. Dalla vigilia della seconda guerra mondiale al 1945 38

2.1.4. Il periodo post bellico: 1946-1960 42

2.1.5. Il boom economico: 1961-1974 47

2.1.6. Dal 1975 ad oggi 53

2.2. Le nuove tendenze 58

2.2.1. Gli indirizzi internazionali 61

2.2.2. Le proposte italiane 69

3. LA SITUAZIONE ATTUALE DELL'EDILIZIA SCOLASTICA IN ITALIA 85

3.1. Aspetti strutturali 95

3.2. Aspetti energetici 105

3.3. Aspetti funzionali 110

4. RIQUALIFICAZIONE DELL'EDILIZIA SCOLASTICA 117

4.1. Modalità di intervento 118

4.2. Proposta di riqualificazione integrata in ambito sismico ed energetico 123

4.3. Esoscheletro 129

5. NUOVA PROPOSTA PER L'OTTIMIZZAZIONE DEGLI INTERVENTI 139

5.1. Multidisciplinary Design Optimization 139
5.2. Applicazioni nella progettazione edilizia 148
5.3. Tecniche di modellazione 159
5.3.1. Modelli di ordine ridotto basati sulla fisica 161
5.3.2. Modelli di ordine ridotto basati sui dati 171
6. FORMALIZZAZIONE DELLA METODOLOGIA MDO IN AMBITO EDILIZIO 183
6.1. Ottimizzazione con modello di simulazione 3D 183
6.2. Ottimizzazione con modelli di ordine ridotto 202
6.2.1. ROM basato sulla fisica 203
6.2.2. ROM basato sui dati mediante software commerciale 206
6.2.3. ROM basato sui dati mediante un codice Python 219
6.3. Risultati e discussioni 227
7. CASO STUDIO: L'EDILIZIA SCOLASTICA A TERNI 233
7.1. Evoluzione della città e dell'edilizia scolastica 234
7.1.1. Il periodo preunitario 234
7.1.2. Terni diventa una città industriale (1860-1920) 237
7.1.3. Dall'età del fascismo alla fine del secondo conflitto mondiale (1921-1945) 249
7.1.4. Dal periodo postbellico alla metà degli anni Settanta 261
7.1.5. Dal 1975 ad oggi 271
7.2. Situazione attuale e caratterizzazione del campione di studio 274
8. APPLICAZIONE DELL'ESOSCHELETRO ALL'EDIFICIO CASO DI STUDIO 281
8.1. Edificio di riferimento 281
8.1.1. Analisi funzionale 286
8.1.2. Caratteristiche costruttive 289
8.1.3. Analisi strutturale 290
8.1.4. Analisi energetica 310
8.2. Intervento integrato di riqualificazione 314
8.2.1. Progetto strutturale 317
8.2.2. Progetto funzionale 332

8.2.3. Progetto energetico 336
8.3. Applicazione della metodologia MDO 339
9. CONCLUSIONI 363
APPENDICI 371
Appendice A – Design of Experiment 371
Appendice B – Codice Matlab per applicazione MDO all'aula con modello 3D 379
Appendice C – Reti neurali 385
Appendice D - Schede 393
Appendice E – Analisi dei carichi 417
Appendice F – Calcolo delle azioni della neve e del vento 423
Appendice G – Combinazioni di carico 428
Appendice H – Codice Matlab per applicazione MDO al caso di studio 435
Appendice I – Rete neurale output binari 446
Appendice L – Rete neurale output scalari 451
Appendice M – Codice Python 453
Appendice N – Modello TwinActivate 456
BIBLIOGRAFIA 459
INDICE DELLE FIGURE 480
INDICE DELLE TABELLE 491
PUBBLICAZIONI E ATTIVITÀ SVOLTE DURANTE IL DOTTORATO 493
RINGRAZIAMENTI 497

ABSTRACT

La ricerca si concentra sulla riqualificazione dell'edilizia scolastica esistente in Italia, motivata dalla centralità che la scuola ricopre nella società e dalla condizione critica in cui verte il patrimonio scolastico. Questo studio analizza l'evoluzione morfologico-costruttiva degli edifici per la formazione al fine di comprenderne lo stato attuale, approfondendo gli aspetti strutturali, energetici e funzionali e le recenti tendenze progettuali. Vengono inoltre esaminati programmi di finanziamento e interventi realizzati, evidenziando l'urgenza di un piano strategico organico e coordinato per affrontare le problematiche dell'edilizia scolastica. Particolare attenzione è dedicata all'integrazione tra adeguamento sismico ed efficientamento energetico come strumento per migliorare la qualità complessiva degli edifici. La ricerca esplora la fattibilità, i limiti e i vantaggi di un approccio integrato alla riqualificazione delle scuole esistenti, attraverso l'analisi e l'applicazione dell'esoscheletro e l'uso della metodologia di ottimizzazione multidisciplinare (MDO).

Attraverso l'analisi di un caso di studio applicativo scelto tra le scuole primarie di Terni, vengono dimostrati i benefici di un approccio integrato basato sull'esoscheletro e il valore aggiuntivo derivante dall'applicazione della MDO nella fase iniziale della progettazione, che consente di ampliare lo spazio progettuale, generare numerose alternative e individuare compromessi tra obiettivi contrastanti di più discipline. Le simulazioni condotte, supportate da tecniche di intelligenza artificiale, hanno confermato l'efficacia dell'approccio proposto. Nonostante la sperimentazione sia stata sviluppata sull'esoscheletro, l'applicazione dell'MDO non è vincolata a questa soluzione costruttiva, ma può essere estesa ad altri interventi capaci di integrare obiettivi multidisciplinari nel settore edile. Sebbene questa metodologia abbia mostrato risultati promettenti, vengono suggeriti ulteriori sviluppi necessari per renderla operativa in modo efficace nel settore dell'edilizia scolastica.

Parole chiave: edifici scolastici, intervento integrato, esoscheletro, multidisciplinary design optimization, apprendimento automatico

ABSTRACT

The present research focuses on retrofit of the existing school buildings in Italy, motivated by the central role that schools play in society and the critical condition of the school infrastructure. The study analyzes the morphological and constructive evolution of educational buildings to understand their current state, exploring structural, energy, and functional aspects as well as recent design trends. It also examines funding programs and completed interventions, highlighting the urgency of a coordinated and strategic plan to address the issues facing school buildings. Special attention is given to the integration of seismic upgrading and energy efficiency as a mean to improve the overall quality of the buildings. The research investigates the feasibility, limitations, and benefits of an integrated approach to the rehabilitation of existing schools through the analysis and application of exoskeletons and the use of Multidisciplinary Optimization (MDO).

By analyzing a case study selected from the primary schools in Terni, the benefits of an integrated exoskeleton-based approach are demonstrated, as well as the added value derived from applying MDO in the early design phase. This allows for an expanded design space, the generation of multiple alternatives, and the identification of trade-offs between conflicting goals of different disciplines. Simulations, supported by artificial intelligence techniques, have confirmed the effectiveness of the proposed approach. While the case study focused on the use of an exoskeleton, the MDO framework is not inherently tied to this specific solution; rather, it can be extended to a variety of retrofit strategies that involve the coordinated integration of multidisciplinary objectives. Although this methodology has shown promising results, further developments are suggested to make it effectively operational within the field of school building retrofit.

Key Words: school buildings, integrated intervention, exoskeleton, multidisciplinary design optimization, machine learning

1. INTRODUZIONE

1.1. Inquadramento

La ricerca si colloca nell'ambito della riqualificazione dell'edilizia scolastica esistente e, più nello specifico, nel campo delle strategie integrate per il recupero degli edifici dal punto di vista sismico, energetico e, quando possibile, funzionale.

Per edilizia scolastica si intende l'attività di progettazione e costruzione finalizzata alla realizzazione di edifici destinati esclusivamente a soddisfare le esigenze educative e formative, tenendo conto di criteri architettonici, normativi, igienici e pedagogici; essa si evolve in risposta ai cambiamenti sociali, tecnologici e culturali. Nel corso degli anni, dalla nascita dello Stato unitario all'epoca contemporanea, la progettazione degli edifici scolastici ha subito significativi cambiamenti riflettendo le trasformazioni degli scenari politici, i mutamenti ideologici e le evoluzioni pedagogiche. Ogni epoca ha influenzato l'organizzazione spaziale e funzionale degli edifici scolastici, traducendo le esigenze educative in soluzioni architettoniche, strutturali e costruttive specifiche. In particolare, si è assistito a un progressivo passaggio dalla centralità esclusiva dell'aula alla necessità di creare nuovi spazi dedicati alla collaborazione, alla socialità e alla sperimentazione didattica. Contestualmente, la scuola è passata da una concezione chiusa, spesso isolata dal contesto territoriale, a una visione più inclusiva e integrata, in cui questa diventa un centro aperto alla comunità. Queste trasformazioni sottolineano come l'edilizia scolastica rappresenti non solo una risposta alle necessità didattiche, ma anche un riflesso dei valori culturali e sociali di ogni periodo storico.

A partire dal 2009, con la riforma Gelmini, sono state introdotte novità rilevanti sul tema, infatti da essa in poi le strutture si differenziano per ordine e grado delle scuole che ospitano. Di conseguenza, l'edilizia scolastica si distingue per rispondere alle esigenze specifiche della scuola dell'infanzia, primaria, superiore di primo e di secondo grado, adattandosi alle istanze educative e formative di ciascuna fase del percorso scolastico.

Dai dati dell'Anagrafe dell'edilizia scolastica, che offre un quadro della situazione attuale, si evince l'obsolescenza e l'inadeguatezza strutturale ed energetica del patrimonio nazionale di edilizia scolastica e, in rapporto all'evoluzione del concetto di educazione, emergono i limiti che questo presenta nell'ospitare i modelli educativi innovativi, sempre più diffusi. Infatti, l'età media degli edifici sul territorio nazionale è di circa 52 anni e l'organizzazione degli spazi didattici spesso risponde non solo a orientamenti pedagogici risalenti all'epoca di costruzione, ma anche a standard ormai superati in termini di sicurezza strutturale e prestazioni energetiche [1].

In questo scenario, il patrimonio edilizio scolastico deve confrontarsi con le nuove esigenze e con le priorità stabilite dalle moderne politiche scolastiche a livello nazionale, europeo [2] ed internazionale, come l'obiettivo 4 dell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite sullo Sviluppo Sostenibile, che stabiliscono la necessità di assicurare un'istruzione di qualità, permanente e inclusiva. La Commissione Nazionale Italiana per l'UNESCO ha condotto uno studio sull'impatto che una riforma del sistema educativo potrebbe avere nel favorire il rilancio sociale ed economico del paese [3]. Tra i venti principi indicati per ispirare le specifiche azioni e riforme, l'obiettivo 9 relativo all'edilizia scolastica si declina per realizzare una scuola accogliente, moderna, sicura e sostenibile dove sia bello ed entusiasmante vivere e operare.

I fattori che influenzano le politiche di evoluzione nell'ambito dell'edilizia scolastica sono molteplici e interconnessi. Tra questi, la contrazione demografica, come risulta dalle proiezioni statistiche che indicano una significativa riduzione della popolazione scolastica nei prossimi anni [4], i cambiamenti nelle modalità di insegnamento, che richiedono un'organizzazione degli spazi più flessibile e capace di adattarsi nel tempo alle nuove esigenze educative, la crisi energetica, che spinge a considerare anche le scuole come potenziali comunità energetiche sulle quali investire per ridurre i consumi, e la crescente attenzione al comfort interno, per garantire ambienti di apprendimento salubri e accoglienti. Infine, non può essere trascurata la messa in sicurezza strutturale, che rimane prioritaria per la tutela degli studenti e del personale scolastico. In sintesi si va affermando una visione ampia e condivisa dell'edilizia scolastica secondo la quale rinnovamento delle metodologie

didattiche, sostenibilità ambientale, benessere degli occupanti, inclusione e sicurezza sono considerati fattori interconnessi ed inscindibili di cui gli interventi di recupero non possono non tenere conto.

In considerazione dei molteplici fattori di cambiamento, gli interventi sul patrimonio scolastico esistente, al pari delle nuove realizzazioni, dovrebbero essere il frutto di un'idea condivisa di scuola del futuro da parte del mondo dell'architettura che, attraverso un pensiero multidisciplinare e collaborativo, sappia farsi interprete delle esigenze attuali e anticipare quelle future. Ogni riflessione sull'edilizia scolastica dovrà necessariamente prendere in considerazione gli spazi educativi attualmente esistenti, che spesso si rivelano inadeguati a rispondere alle sfide che il sistema scolastico italiano deve affrontare: questi edifici devono evolversi per supportare le nuove metodologie didattiche, garantire ambienti sicuri e salubri e rispondere alle crescenti esigenze di sostenibilità ambientale, diventando luoghi più inclusivi e funzionali per una didattica innovativa. Oltre alla progettazione di nuovi edifici scolastici, diventa quindi essenziale e ancora più sfidante recuperare, ripensare e reinventare tutti gli spazi delle scuole preesistenti. Gli edifici, le aule e gli ambienti laboratoriali delle scuole non sono solo i luoghi dell'accoglienza, dove trovano spazio le attività formative, ma svolgono essi stessi una funzione educativa fondamentale e contribuiscono a ricostruire una dimensione relazionale e cooperativa.

Come precedentemente accennato, un ingente numero di edifici scolastici ha caratteristiche costruttive e formali che non rispettano le norme di sicurezza strutturale o di sostenibilità ambientale né sono atti ad accogliere modalità di didattica innovativa. Per riqualificare questo patrimonio riuscendo a integrare le odierne necessità di sicurezza, sostenibilità e pedagogia, occorre conoscerlo e studiarlo. Questi edifici, infatti, vengono oggi investiti di nuovi significati e funzioni, diventando una categoria edilizia sempre più complessa nonostante in passato siano stati considerati esclusivamente come un mero contenitore di istruzione. L'obiettivo di utilizzare al meglio le risorse economiche disponibili per il recupero e la riqualificazione degli edifici esistenti pone la necessità di ripensare alle modalità progettuali, adottando soluzioni che soddisfino i nuovi requisiti. In questo contesto, gli interventi integrati, quando applicabili, si

rivelano fondamentali, poiché permettono di affrontare simultaneamente le diverse esigenze strutturali, ambientali e, quando possibile, pedagogiche, garantendo degli spazi sicuri, energeticamente efficienti e adatti ad ospitare le nuove necessità educative. L'approccio multidisciplinare consente di ottenere una visione complessiva dell'edificio scolastico, in cui la progettazione architettonica, strutturale ed energetica interagiscono in modo sinergico, in base ai loro obiettivi a volte contrastanti con lo scopo di giungere a soluzioni soddisfacenti e in grado di rispondere in maniera adeguata alle sfide contemporanee e future.

1.2. Le ragioni della ricerca

La città che funziona è quella in cui si dorme, si lavora, ci si diverte e soprattutto si va a scuola. Occuparsi di edifici scolastici è un rammendo che, ancora prima che edilizio, è sociale.
Ecco la scuola che farei.
Renzo Piano

Il complesso scenario di cambiamento del mondo della scuola e l'impatto di questo sul patrimonio edilizio scolastico è un tema particolarmente delicato e urgente da gestire con strategie innovative e multidisciplinari.
La ricerca si inserisce nel dibattito teorico disciplinare incentrato sulle questioni relative alla riqualificazione dell'edilizia scolastica esistente che, in particolare, nasce da due esigenze: la prima è rappresentata dalla consapevolezza della situazione critica in cui verte il patrimonio scolastico, determinata da una grande diversità tra le prestazioni fornite dagli edifici in esame e i requisiti previsti dalle attuali normative nei campi strutturale, energetico e funzionale. La maggior parte degli edifici scolastici italiani è stata costruita prima dell'introduzione della normativa antisismica del 1974 (Legge 2 febbraio 1974, n. 64) e delle disposizioni sull'efficienza energetica del 1976 (Legge 30 marzo 1976, n. 373), con oltre il 40% situato in zone ad elevato rischio sismico. Questi edifici

presentano consumi energetici elevati e risultano inadeguati a soddisfare i requisiti di comfort e sostenibilità. Inoltre, le scuole costruite prima del 1975 hanno spesso spazi inadeguati ad accogliere i nuovi metodi didattici ed educativi.

La seconda esigenza è dettata dal delicato ruolo sociale che questa tipologia di edificio ricopre. Infatti, la scuola rappresenta un luogo pubblico imprescindibile per l'intera comunità e i suoi spazi contribuiscono alla crescita dei giovani; è quindi prioritario garantirne la sicurezza necessaria e il rispetto degli obiettivi di sostenibilità. La scuola è uno dei settori che prima di altri dovrebbe trasmettere sicurezza ed efficienza perché nei suoi spazi interni si configura la prima struttura relazionale di una società; gli edifici scolastici non sono solo gli spazi dove si studia, ma il luogo dove i giovani crescono e dove il cittadino si forma. "La scuola è il primo luogo dove si impara la democrazia e si diventa cittadini, dove si imparano il valore dell'uguaglianza e della differenza, dell'apprendimento e della conoscenza che ci accompagnerà per tutta la vita, il senso della scienza, le regole della nostra convivenza civile" [5].

Inoltre, è ormai evidente che nel momento in cui accade qualcosa di dirompente come un terremoto o una pandemia è proprio il sistema scolastico a diventare l'anello più debole di una comunità. Un esempio è il drammatico crollo della scuola elementare di San Giuliano, nel terremoto del Molise del 2002, dove sono morti 27 bambini e un insegnante. Ciò ha allertato il Paese sulla vulnerabilità delle strutture critiche portando all'introduzione di una nuova zonazione sismica e delle nuove norme sismiche nel 2003. Analogamente il recente fenomeno pandemico ha messo in evidenza le criticità del patrimonio scolastico in termini di spazi e sicurezza, esasperando l'inadeguatezza di moltissime strutture e accelerando le necessità di un intervento radicale.

La situazione post-pandemica ha attivato una nuova stagione di finanziamenti pubblici per l'edilizia scolastica, offrendo un'opportunità unica per affrontare le criticità di un patrimonio in sofferenza già prima del Covid-19. In particolare, il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), nell'ambito dei fondi Next Generation Europe, destina 30,09 miliardi di euro al settore "Istruzione e ricerca", di cui 3,9 miliardi sono riservati agli interventi sul patrimonio scolastico esistente (Missione 4-C1 - Investimento 3.3) volti alla manutenzione

straordinaria, alla riqualificazione energetica, funzionale e al miglioramento strutturale.

Il lavoro di ricerca nasce dall'intento di contribuire alla comprensione e alla rappresentazione dello stato attuale del patrimonio edilizio scolastico esistente, analizzandone gli aspetti strutturali, energetici e funzionali, e di esaminare in maniera critica le modalità con cui vengono progettati e realizzati gli interventi di recupero. Inoltre, un aspetto chiave della ricerca è lo studio di metodologie innovative per una progettazione multidisciplinare degli interventi che favoriscano una valutazione integrata dei diversi aspetti progettuali per garantire soluzioni complessive ottimali.

1.3. Obiettivi, metodo e strumenti

Dal momento che qualunque contributo innovativo non può prescindere da una conoscenza approfondita della situazione attuale, il lavoro di ricerca ha come primo obiettivo l'elaborazione di un quadro conoscitivo su come il patrimonio scolastico esistente sia evoluto dal punto di vista morfologico-costruttivo e sulle modalità di intervento attualmente adottate per la sua riqualificazione. Questa analisi è condotta in relazione alle normative vigenti, alle strategie educative attuali e alle nuove tendenze architettoniche nel contesto dell'edilizia scolastica. La ricerca si propone quindi, quale obiettivo principale, di studiare, sia dal punto di vista teorico che applicativo, la fattibilità e i possibili benefici di un approccio integrato alla riqualificazione degli edifici scolastici esistenti anche attraverso la valutazione della metodologia di ottimizzazione multidisciplinare, già diffusa in altri settori per l'analisi di problematiche con analoghe complessità.

La ricerca si avvale di metodologie e strumenti che includono, da un lato, quelli propri dell'indagine storico-costruttiva e, dall'altro, quelli specifici per la modellazione e la simulazione numerica, integrando anche tecniche di intelligenza artificiale. La metodologia della ricerca prevede come prima fase la ricostruzione dell'evoluzione dell'edilizia scolastica in Italia, anche attraverso la contestualizzazione nelle vicende storiche. Gli strumenti utilizzati sono stati la ricerca bibliografica di testi e manuali, la ricerca documentale presso le biblioteche e la ricognizione in letteratura delle ricerche già sviluppate sul tema.

Questa indagine prevede anche lo studio delle scuole a livello morfo-tipologico e costruttivo e l'individuazione degli aspetti caratteristici a seconda delle varie epoche. Per la definizione della situazione attuale del patrimonio analizzato in relazione ai nuovi modelli spaziali legati all'apprendimento e alle prestazioni richieste dalle normative vigenti, ci si è avvalsi di report e dell'analisi del database digitale del MIUR. Lo studio propone anche un aggiornamento sintetico del quadro internazionale di ricerche che affinano le conoscenze sul tema degli interventi di miglioramento sismico e delle prestazioni energetiche attraverso l'uso di diversi metodi e strumenti. Un'attenzione particolare è rivolta a quelli che utilizzano un approccio integrato che permette di considerare contemporaneamente più aspetti e di organizzare i processi con la corretta sequenza, ottimizzando le risorse. Tra le diverse tipologie di interventi integrati, è stato scelto di approfondire lo studio dell'esoscheletro, una soluzione che consente di affrontare in modo sinergico gli aspetti strutturali, energetici e funzionali, rispondendo alle principali esigenze degli edifici scolastici esistenti.
In parallelo alle tecniche tradizionali, la ricerca analizza la possibile applicazione della metodologia *Multidisciplinary Design Optimization* (MDO) che è utilizzata per la progettazione di sistemi e sottosistemi complessi, sfruttando in modo sistematico e coerente la sinergia di fenomeni che interagiscono tra loro. Il valore dell'MDO risiede nella capacità di individuare una soluzione ottimale complessiva, che è migliore rispetto a quella ottenuta attraverso l'ottimizzazione sequenzialmente di ciascun fenomeno isolato, sebbene l'analisi contemporanea di tutti i fenomeni comporti un significativo aumento della complessità del problema. Attualmente l'applicazione di questa metodologia si è sviluppata maggiormente nel settore aerospaziale, automobilistico e, in misura minore, nell'ambito edilizio, limitatamente alla progettazione di nuovi edifici o di specifiche componenti tecnologiche. Il vantaggio dell'ottimizzazione multidisciplinare, oltre a trovare un compromesso tra obiettivi contrastanti, è quello di ampliare lo spazio di progettazione ed estendere il numero di soluzioni esaminate rispetto alle tecniche tradizionali, infatti l'algoritmo di ottimizzazione è in grado di elaborare un numero di varianti considerevolmente superiore a quello che un essere umano potrebbe generare in un tempo adeguato,

consentendo così una valutazione più ampia e dettagliata delle possibili soluzioni progettuali.

Dunque, questa ricerca si propone di esplorare il potenziale utilizzo dell'ottimizzazione multidisciplinare anche per la progettazione di interventi di riqualificazione integrata. L'ambito di applicazione scelto è particolarmente sfidante e complesso anche a causa dei vincoli imposti dagli edifici esistenti, ma, in generale, offre un valido campo di applicazione per l'interazione tra discipline differenti quali, per esempio, gli aspetti strutturali, energetici e di comfort interno.

Nel dettaglio, si è inizialmente delineato il contesto teorico dell'MDO attraverso l'indagine bibliografica della letteratura di settore che ha permesso di valutare le basi teoriche della metodologia, comprendere lo stato dell'arte e le tendenze anche in altri settori e individuare casi applicativi nell'ambito edilizio. Dopo aver analizzato questi approcci, la ricerca si è focalizzata sulla formalizzazione della metodologia nell'ambito del settore edilizio e sull'approfondimento di un caso di studio applicativo per verificare i vantaggi e i limiti dell'uso della metodologia MDO per la progettazione degli interventi di recupero di edifici, in particolare quelli scolastici.

Dal momento che si propone l'utilizzo delle simulazioni di ottimizzazione a un nuovo ambito, si è ritenuto opportuno elaborare inizialmente dei modelli meno complessi al fine di poterne studiare più agevolmente l'applicabilità. In particolare è stata scelta un'aula scolastica come primo prototipo in modo tale da avere un modello semplice per comprendere meglio il processo di simulazione, i vantaggi e i limiti. L'uso del modello semplificato ha consentito di consolidare il processo di analisi, di valutare la disponibilità di software commerciali e la loro integrabilità con gli strumenti generalmente utilizzati per la progettazione di edifici. Inoltre è stato possibile evidenziare da subito il valore di questa metodologia, ma anche l'elevata necessità di risorse computazionali che ne renderebbero costosa e complicata l'applicazione a casi d'uso reali. Come ambito di approfondimento applicativo è stato scelto il Comune di Terni in funzione da una parte dell'ampio scenario di tipologie costruttive e dall'altra del campionario non troppo esteso di edifici scolastici che ha permesso di reperire e analizzare tutto il materiale degli stessi. Per il materiale planimetrico

e costruttivo ci si è avvalsi della ricerca presso archivi locali, enti e professionisti che hanno effettuato studi sui singoli edifici e rilievi diretti. Successivamente allo studio dell'evoluzione dell'edilizia scolastica a Terni e all'individuazione delle scuole attualmente operative, è stato scelto di restringere il campo di indagine agli istituti di formazione primaria per uno studio più approfondito. Il campione selezionato per rappresentatività e completezza delle informazioni, presupposto imprescindibile per le valutazioni successive, è composto da quindici edifici di istruzione primaria. Il quadro dei dati forniti dalla città di Terni permette di disporre di una casistica varia, ma non dispersiva, sotto gli aspetti tipologici e costruttivi. La pubblica amministrazione ha fornito rilievi, prove sui materiali e relazioni che sono stati esaminati e studiati in base agli obiettivi della ricerca. Tali informazioni sono state integrate e confrontate con i dati presenti sul portale dell'Anagrafe dell'edilizia scolastica e con quelli non pubblicati forniti dall'anagrafe regionale. Per garantire una raccolta e una catalogazione sistematica dei dati, è stato deciso di creare una scheda che, strutturata in modo generale, possa essere utilizzata anche in altre ricerche. Tale scheda è stata successivamente compilata in modo dettagliato per il campione di studio al fine di raccogliere le informazioni necessarie per l'analisi, ma anche di organizzare il materiale in modo chiaro e ordinato, facilitando l'accesso e la consultazione delle informazioni. Questo approccio ha consentito di avere una visione complessiva e facilmente gestibile dei dati raccolti, migliorando l'efficacia del processo di analisi e interpretazione. Sono stati poi analizzati gli aspetti rilevanti del campione di studio ai fini degli obiettivi della ricerca.

Successivamente, tra le possibili tecniche di progettazione degli interventi di tipo integrato, lo studio si è concentrato sull'esoscheletro in acciaio da applicare ad una scuola elementare in calcestruzzo armato del Comune di Terni realizzata a partire dall'anno 1966. Dopo un'analisi storico-costruttiva dell'edificio, condotta attraverso documenti d'archivio, relazioni tecniche e rilievi, è stato realizzato un modello strutturale per studiarne il comportamento tramite software di simulazione. Contestualmente, è stata effettuata un'analisi della distribuzione funzionale degli spazi, evidenziando le carenze rispetto alle attuali esigenze didattiche e sono state esaminate le prestazioni energetiche dell'edificio utilizzando un software specifico per valutare il suo rendimento. A

partire da questo, è stato sviluppato il progetto dell'esoscheletro dal punto di vista strutturale; successivamente, sfruttando gli spazi tra le campate, è stato elaborato un progetto per la ridistribuzione funzionale degli ambienti e un intervento per il miglioramento dell'efficienza energetica, con particolare attenzione all'implementazione di soluzioni passive, come le serre solari.
Infine, la parte di sperimentazione della ricerca consiste nel cercare di applicare la metodologia di ottimizzazione multidisciplinare alla fase di progettazione degli interventi per la riqualificazione dell'edificio esistente. Le elaborazioni sono state eseguite tramite software di modellazione che basano le loro simulazioni sulla metodologia MDO.
Da qui l'analisi e la valutazione di soluzioni alternative di ordine ridotto (ROM) basati sulla fisica o su tecniche di intelligenza artificiale per ridurre i tempi di simulazione e le risorse hardware necessarie ad un livello adeguato, ma con un errore assolutamente accettabile. Gli strumenti software utilizzati sono sia di tipo commerciale che sviluppati *ad hoc*, come per esempio codici in Python per generare reti neurali o script per automatizzare il workflow di simulazione. L'applicazione è stata successivamente estesa al caso di studio relativo all'intervento dell'esoscheletro applicato all'intero edificio. Per completare le analisi si è ritenuto opportuno effettuare anche un confronto tra i dati provenienti dalle simulazioni sperimentali con i risultati ottenuti dalle analisi tradizionali. Alla fine del processo sono stati esaminati i risultati, evidenziando i vantaggi e i limiti emersi durante lo studio. Inoltre sono stati proposti possibili sviluppi e orientamenti per implementare ulteriormente l'applicazione della metodologia proposta, con l'obiettivo di orientare possibili ricerche future in questo ambito.
L'approccio integrato alla progettazione sviluppato in questo lavoro, basato sull'utilizzo della metodologia di ottimizzazione multidisciplinare (MDO), non è legato in modo esclusivo alla soluzione tecnica dell'esoscheletro in acciaio. Quest'ultima rappresenta una delle possibili opzioni progettuali per rispondere in modo coordinato alle esigenze strutturali, energetiche e funzionali dell'edificio. L'obiettivo generale è quello di dimostrare la validità dell'approccio metodologico adottato, che risulta applicabile anche ad altre tipologie di

intervento, purché queste prevedano l'integrazione di più discipline con obiettivi contrastanti tra loro.

1.4. Domande aperte

Il punto di partenza di questa ricerca è rappresentato dal contributo di studi nazionali e internazionali, come quello della Commissione Nazionale Italiana per l'UNESCO, che sottolineano il ruolo fondamentale di una riforma del sistema educativo nel rilancio sociale ed economico nel nostro Paese; tra le raccomandazioni emerse, particolare rilievo assume quella relativa all'edilizia scolastica che ha l'obiettivo di realizzare scuole accoglienti, moderne, sicure e sostenibili, in cui sia stimolante vivere e lavorare. Questa visione ha fornito la cornice concettuale per approfondire le problematiche legate al patrimonio edilizio scolastico esistente e per valutare proposte innovative per mirate al miglioramento della scarsa qualità media di molte strutture scolastiche. Le domande di ricerca sono state quindi articolate in sei gruppi, che riflettono con una logica consequenziale la struttura complessiva della trattazione. Ciascun interrogativo guida l'indagine e trova spazio di approfondimento in specifici capitoli, delineando così il filo conduttore che struttura e collega le diverse sezioni del presente studio:

Domande aperte	**Capitolo di riferimento**
1. Qual è lo stato attuale del patrimonio edilizio scolastico in Italia? Quante scuole sono attualmente attive e quali sono le loro caratteristiche morfologiche e costruttive? In che stato di conservazione e di efficienza si trovano gli edifici scolastici italiani? Quali sono i principali ambiti di intervento necessari per il loro miglioramento?	2
2. Come si sono evolute nel tempo le caratteristiche costruttive, distributive e architettoniche degli edifici scolastici in Italia? In che modo tali trasformazioni riflettono le diverse missioni attribuite al sistema scolastico	3

	e alla sua organizzazione nel corso dei decenni? Quali sono le attuali tendenze progettuali per rispondere alle sfide contemporanee?	
3.	Come vengono gestiti gli interventi di recupero? Quali sono le principali sfide legate alla riqualificazione dell'edilizia scolastica esistente? Quali approcci progettuali si dimostrano più efficaci in relazione alle sfide contemporanee di sostenibilità, sicurezza e innovazione didattica? In che misura gli interventi definiti integrati rispondono effettivamente ai criteri di interdisciplinarità, coordinamento e sinergia tra i vari aspetti?	4
4.	In che modo problematiche analoghe vengono affrontate in altri settori? Da un punto di vista teorico, la metodologia di ottimizzazione multidisciplinare (MDO) è applicabile a questo settore? Quali benefici e limitazioni emergono? In quale fase del processo progettuale l'applicazione di tale metodologia potrebbe offrire i maggiori vantaggi?	5
5.	La metodologia di ottimizzazione multidisciplinare è applicabile da un punto di vista pratico al settore dell'architettura, ingegneria e costruzioni?	6
6.	Qual è lo stato attuale degli edifici scolastici nella città di Terni in termini di caratteristiche morfologiche, costruttive e di conservazione? Quali sono i principali vantaggi e limiti nella progettazione di un esoscheletro come intervento strutturale, energetico e funzionale su una scuola esistente?	7
7.	Quali sono i principali vantaggi e limiti nella progettazione di un esoscheletro come intervento strutturale, energetico e funzionale su una scuola esistente? La metodologia MDO come può contribuire a migliorare l'efficacia degli interventi integrati?	8

Le prime quattro domande riguardano lo stato dell'arte dei temi studiati, la quinta la formalizzazione della metodologia MDO nel settore edilizio. Infine, le ultime due domande sono relative alla fase applicativa e progettuale della ricerca, che costituisce il momento conclusivo e cruciale rispetto a tutte le questioni precedentemente elaborate, cercando un elemento di sintesi del lavoro.

1.5. Struttura dei contenuti

Questo elaborato si compone di otto capitoli, che illustrano i contenuti e i risultati della ricerca, oltre alla presente introduzione nella quale si descrivono le motivazioni alla base dello studio, gli obiettivi perseguiti, il metodo adottato e gli strumenti utilizzati. La struttura del lavoro riflette lo sviluppo degli obiettivi di ricerca articolandosi in una prima fase dedicata allo studio e all'analisi dello stato dell'arte, seguita dalla definizione della metodologia di progettazione integrata degli interventi di riqualificazione proposta che verrà successivamente applicata a un caso di studio concreto, permettendo di valutarne opportunità e criticità.

Nel secondo capitolo si ripercorre l'evoluzione degli edifici scolastici italiani analizzando le modalità costruttive e le normative che si sono succedute dalla seconda metà dell'Ottocento ad oggi. Questo percorso storico permette di comprendere la situazione attuale del patrimonio scolastico e di individuare gli ambiti di intervento necessari per soddisfare le esigenze del secondo millennio. Successivamente vengono analizzate le condizioni dell'edilizia scolastica in Italia nel suo complesso e con particolare attenzione agli aspetti strutturali, energetici e funzionali, mettendo in evidenza le principali criticità e le priorità di intervento.

Il quarto capitolo approfondisce le modalità di intervento attuate per il recupero degli edifici scolastici esistenti mettendo in evidenza l'opportunità di sviluppare una proposta di riqualificazione integrata che affronti congiuntamente gli aspetti sismici ed energetici. In tale contesto, il campo di indagine viene ulteriormente ristretto attraverso un approfondimento sull'esoscheletro, esaminandone i possibili benefici per la sua applicazione nelle scuole.

Nel quinto capitolo viene descritta una proposta innovativa per la progettazione ottimizzata degli interventi. La metodologia *Multidisciplinary Design Optimization* viene studiata sia dal punto di vista teorico che in relazione alla sua applicabilità nel contesto della progettazione edilizia. Infine vengono approfondite le possibili tecniche di modellazione utilizzabili, inclusi i modelli di ordine ridotto basati sulla fisica e sui dati.

Nel sesto capitolo, la metodologia *Multidisciplinary Design Optimization* viene inizialmente applicata ad un modello semplificato al fine di comprendere meglio il funzionamento del processo, perfezionare il processo operativo e definire gli strumenti da utilizzare per la gestione delle simulazioni. Questo passaggio preliminare ha consentito di formalizzare l'impostazione metodologica all'interno del contesto AEC, definendone con maggiore precisione struttura e potenzialità applicative e rendendola applicabile a casi di studio più complessi, in linea con gli obiettivi definiti nel lavoro di ricerca.

La necessità di individuare uno specifico caso di studio cui applicare la metodologia proposta, diventa l'occasione, nel settimo capitolo, per approfondire la situazione dell'edilizia scolastica descritta nei capitoli precedenti, focalizzandosi su un contesto specifico. Viene infatti studiata nel dettaglio l'edilizia scolastica del Comune di Terni dove è stato selezionato l'edificio di riferimento su cui sviluppare la proposta di riqualificazione integrata.

Nell'ottavo capitolo, dopo aver esaminato approfonditamente lo stato attuale sotto gli aspetti strutturale, energetico e funzionale, è stata elaborata una proposta di intervento tramite la progettazione di un esoscheletro che risponde in modo sinergico a tutte le esigenze di miglioramento. Successivamente viene applicata anche la metodologia di ottimizzazione multidisciplinare, estendendo al caso studio generale dell'edificio di riferimento il workflow operativo formalizzato in precedenza. I risultati ottenuti tramite l'approccio MDO vengono confrontati con quelli derivanti dall'approccio tradizionale, mettendo in evidenza vantaggi e limiti della metodologia proposta.

Infine, nel nono capitolo vengono presentate le conclusioni dell'intero lavoro di ricerca, con una sintesi dei principali risultati ottenuti. Vengono inoltre individuati possibili temi di ricerca che potrebbero essere ulteriormente sviluppati in studi futuri.

Il documento si conclude con l'elenco dei riferimenti bibliografici e delle illustrazioni e da appendici che riportano dettagli tecnici tra cui le schede delle scuole, i modelli di simulazione, i dati utilizzati nelle analisi ed i codici sviluppati.

2. L'EVOLUZIONE STORICO-TIPOLOGICA DELL'EDILIZIA SCOLASTICA ITALIANA

2.1. Le architetture per la formazione in Italia: contesto storico e caratteri salienti

Il panorama politico e culturale, le normative e le tecniche sviluppate nel corso delle diverse epoche hanno influenzato gli aspetti costruttivi, distributivi e architettonici delle scuole. Dal momento che molti di questi edifici risultano ancora oggi attivi, è importante prima di tutto studiarli inquadrando il contesto storico in cui sono stati realizzati.

Per l'indagine sull'evoluzione dell'edilizia scolastica nel tempo si è proceduto alla ricognizione in letteratura di manuali e ricerche già sviluppate sul tema. Per rendere la ricostruzione più chiara ed efficace è stato elaborato un percorso per tappe significative dalla proclamazione del Regno d'Italia all'epoca contemporanea, ponendo l'accento sui caratteri tipologici e costruttivi. Tuttavia è necessario chiarire che le scansioni temporali presentate non possono dirsi nettamente distinte l'una dall'altra poiché risultano tutte strettamente collegate.

Tale excursus diacronico relativo all'edilizia scolastica sarà dunque costituito dallo studio dei caratteri tipologici e costruttivi, da esempi architettonici rilevanti e dalle riflessioni maturate in ambito pedagogico.

Come premesso, sul territorio nazionale sono presenti edifici scolastici di epoche diverse, che ancora oggi risultano attivi; tali costruzioni sono il risultato di fasi normative, politiche, culturali e tecniche della produzione edilizia che si sono succedute nel corso del tempo [6]. Ogni edificio porta con sé la percezione sociale del tempo e la traccia della *ratio* che ne ha ispirato il progetto che ancora oggi si riverbera sul suo utilizzo.

2.1.1. Dall'Unità d'Italia al 1900

Dopo che l'Italia ebbe raggiunto l'unità, l'istruzione diventò una delle principali questioni da affrontare: il livello di scolarizzazione era profondamente disomogeneo poiché fino a quel momento era un servizio erogato dagli Stati

preunitari. Per contrastare tale divario, venne estesa a tutto il territorio nazionale la legge Casati[1] del Regno di Sardegna che prevedeva la divisione del sistema scolastico in istruzione secondaria classica, normale, tecnica ed elementare; quest'ultima era a carico dei Comuni ed era articolata in due gradi di cui quello inferiore gratuito e obbligatorio per la durata di due anni. La frequenza obbligatoria venne successivamente estesa di un ulteriore anno con la legge Coppino del 1877. Lo scopo di entrambi i provvedimenti legislativi era quello di fornire un'istruzione di base a tutti i cittadini dello Stato Italiano, considerata la situazione critica legata all'analfabetismo della popolazione in età scolare che corrispondeva a circa il 78%, secondo il censimento del 1861 [7]. Per valutare lo stato di istruzione del Paese nel 1878 venne svolta un'indagine in cui emerse che "su 8301 comuni del Regno ancora più di 1000 avevano ignorato la legge sull'obbligatorietà di assicurare l'istruzione primaria" [8], e quindi venne dimostrata nei fatti la scarsa efficacia della legge Coppino fino a quel momento. Infatti, nonostante le misure adottate dal governo, i forti divari relativi all'istruzione continuarono a caratterizzare l'Italia per alcuni decenni.

Inoltre, a differenza dell'area lombardo piemontese, inizialmente destinataria della norma, che già nella prima metà dell'Ottocento aveva assistito a una discreta diffusione della formazione primaria, solo pochi comuni furono in grado di assolvere all'obbligo dell'istruzione elementare. Dal momento che, secondo le leggi in vigore, gli edifici idonei ad accogliere le attività formative erano scarsi e le risorse necessarie insufficienti, le lezioni venivano spesso svolte in strutture esistenti adattate a tale uso, come ad esempio conventi[2], ospedali o caserme. Persino Roma, quando nel 1871 venne proclamata Capitale d'Italia, non aveva strutture scolastiche idonee ad accogliere gli studenti [9]. Per far fronte a queste carenze, fu necessario un supporto concreto da parte dello Stato che intervenne

[1] Regio Decreto Legislativo del 13 novembre 1859, n. 3725

[2] "Durante la permanenza di Berti alla Pubblica istruzione, il governo procedette alla emanazione di più esplicite leggi di confisca di quello che era rimasto requisibile dei beni immobili ecclesiastici, in parte riutilizzati, quasi sempre senza opportune modifiche, per ovviare alla carente edilizia scolastica statale." [8]

nel 1878 varando una legge[3] che prevedeva la concessione di mutui agevolati per sostenere lo sviluppo dell'edilizia scolastica.

Nel tempo quindi, sia per il supporto economico fornito dallo Stato sia per la necessità concreta di alcune zone di far fronte all'alta densità demografica, si arrivò a definire una specifica tipologia edilizia pronta ad accogliere le attività didattiche. Il principale riferimento normativo che regolò la progettazione dei nuovi edifici scolastici fu il "Regolamento ed istruzioni tecnico igieniche per la esecuzione della legge 8 luglio 1888 sugli edifici scolastici" [4] che affrontò tale argomento unendo le prescrizioni tecniche (Art. 4) agli aspetti igienici (Art. 6, Art. 9 e Art. 10).

> Art. 4. *L'edificio della scuola deve essere di solida costruzione, d'aspetto semplice ed elegante, tale da elevare l'animo e ingentilire il gusto della scolaresca. I materiali di costruzione devono essere di ottima qualità fra quelli che localmente sono più facili ad aversi; esclusi quelli di puro lusso o che si debbano trasportare con grave spesa, se non siano assolutamente richiesti per ragione di solidità o di salubrità dell'edificio. L'edificio deve essere di regola cantinato, col piano terreno sollevato di almeno m 0.80 sulla superficie del suolo circostante… Si preferiscano negli edifici a più di un piano le divisioni di essi a volta o a doppio soffitto per ammortire la trasmissione dei rumori. Le classi siano situate preferibilmente al piano terreno o al primo piano, e, salvo casi eccezionali, nelle grandi città, non si aggiunga altro piano per le classi medesime.*
>
> Art. 6. […] *La palestra ginnastica è meglio sia separata dall'edificio scolastico.*
>
> *Art. 9. La ventilazione nelle classi, durante la buona stagione, sia assicurata mediante opportuna applicazione di larghi sfiatatoi nella parete opposta a quelle in cui si trovano le finestre, con chiusura facile a regolarsi. […]*
>
> *Art.10: "[…] sarà sempre da preferirsi la disposizione di vani speciali pel deposito delle vesti, separati per classi* […]" [10]

Nonostante le suddette leggi Casati e Coppino, il problema dell'analfabetismo e dell'assenteismo continuarono a sussistere. Le difficoltà economiche delle

[3] Legge n. 4460 del 18 luglio 1878 contenente disposizioni per agevolare ai Comuni la costruzione degli edifici per l'istruzione obbligatoria

[4] Approvato attraverso il Regio Decreto n. 5808 dell'11 novembre 1888

famiglie, la carenza di infrastrutture adeguate e la distribuzione disomogenea delle scuole sul territorio ostacolavano l'accesso all'istruzione, specialmente nelle aree rurali. Inoltre, la scarsa percezione dell'importanza dell'istruzione da parte di alcune fasce della popolazione contribuiva a mantenere alti i tassi di abbandono e di assenza dalle scuole, compromettendo gli obiettivi prefissati dalle normative.

È in questo periodo che maturò tra gli intellettuali dell'epoca quali Camillo Boito, Daniele Donghi e Alfredo D'Andrade la consapevolezza di un'architettura nazionale che in alcuni casi interessò anche l'ambito scolastico[5] che diventò un terreno di sperimentazione di nuove forme spaziali, tecnologie costruttive e sistemi tecnico impiantistici.

Dunque, agli inizi del Novecento, parallelamente alla conversione di edifici dismessi, quali caserme e ospedali, per la funzione scolastica, vennero erette le prime grandi costruzioni destinate a ospitare le scuole. Si definì da questo momento una tipologia architettonica specifica e indipendente.

La struttura degli edifici realizzati in periodo unitario risente fortemente delle modalità didattiche utilizzate: gruppi di studenti distinti per età e livello svolgevano le attività assegnate sotto il controllo dei docenti che impartivano una lezione rigorosamente trasmissiva. Gli alunni erano infatti paragonati a componenti di una catena di montaggio e considerati meri destinatari passivi delle informazioni, come dimostra l'illustrazione di Jean-Marc Coté del 1899 (Figura 1).

Nelle zone densamente popolate l'esiguo numero di docenti a disposizione portò alla formazione di aule che ospitavano in media fino a 70 studenti con picchi di 100 unità i quali necessitavano di spazi per la didattica anche oltre i 60 m^2 [1].

Dal punto di vista spaziale si può riconoscere uno schema distributivo ricorrente sviluppato durante quegli anni. La progettazione delle scuole prevedeva la distribuzione delle aule in successione lungo il corridoio, che svolgeva la sola

[5] Si ricordano la scuola elementare alla Carrarese a Padova, progettata da Camillo Boito, l'asilo notturno di via Ormea e la scuola elementare di via Madama Cristina a Torino, progettati da Daniele Donghi.

funzione di passaggio (Figura 2); queste, generalmente orientate a sud e a est per garantire una adeguata illuminazione naturale, erano considerate come l'unico spazio di apprendimento ed erano disposte lateralmente configurando un blocco a manica singola o a manica doppia.

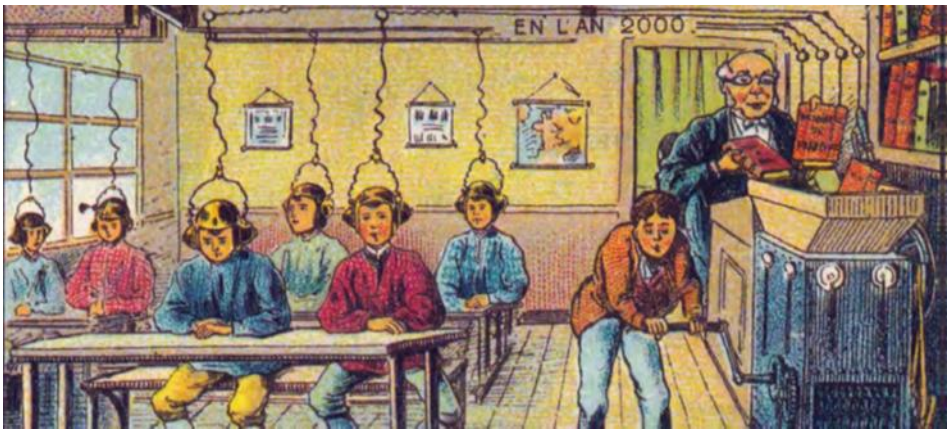


Figura 1 - La scuola della società industriale (illustrazione di Jean-Marc Côté, À l'École, 1899 circa, cromolitografia Bibliothèque Nationale de France, Parigi).



Figura 2 - Immagine del corridoio della scuola primaria del rione G. Taverna a Piacenza. Fonte: FOTOedu, archivio fotografico per la storia della scuola e dell'educazione dell'Istituto Nazionale di Documentazione, Innovazione e Ricerca Educativa (INDIRE).

Gli edifici scolastici furono inoltre costruiti con strutture portanti in muratura che conferiscono una notevole rigidità di organizzazione degli spazi rendendoli difficilmente adatti a successive modificazioni.

Nonostante generalmente ci fosse una netta separazione tra l'edificio scolastico e il territorio circostante, la Legge De Sanctis del 1878 e il Regolamento e Istruzioni tecnico-igieniche sugli edifici scolastici del 1888 rivolsero una particolare attenzione agli spazi esterni degli edifici scolastici; l'obbligatorietà dell'educazione fisica, sostenuta dal Ministro della Pubblica Istruzione di allora Francesco De Sanctis, favorì la realizzazione di cortili e aree esterne alle scuole adibiti alle attività ginniche. In questo contesto, la forma degli edifici scolastici iniziò a trasformarsi, passando dalla tipologia lineare a configurazioni più articolate, come le forme a "C" (Figura 3) o a "L" (Figura 4). Queste soluzioni riuscivano a sintetizzare in modo ottimale l'esigenza della realizzazione di un cortile e di una distribuzione delle aule che favorisse un'illuminazione naturale adeguata, come dimostrano le sperimentazioni dell'architetto Camillo Boito a Padova e a Milano.

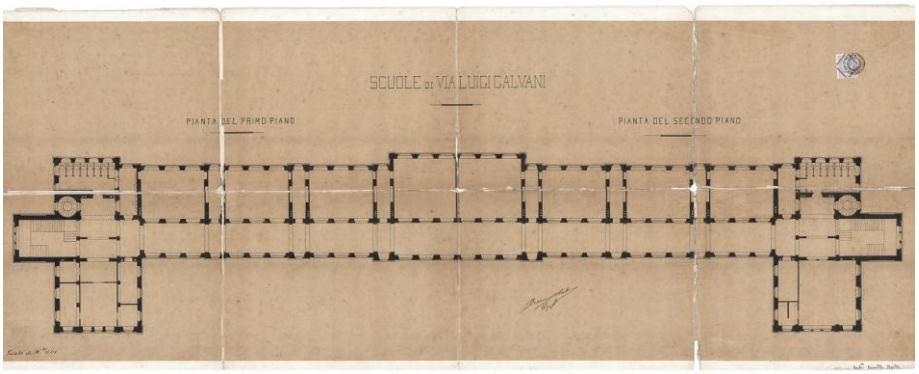


Figura 3 - Pianta del primo e secondo piano della scuola primaria di via Galvani, Milano, 1888 progettata da Camillo Boito. Fonte: Riproduzione del disegno di Camillo Boito da Scarrocchia S. [11].

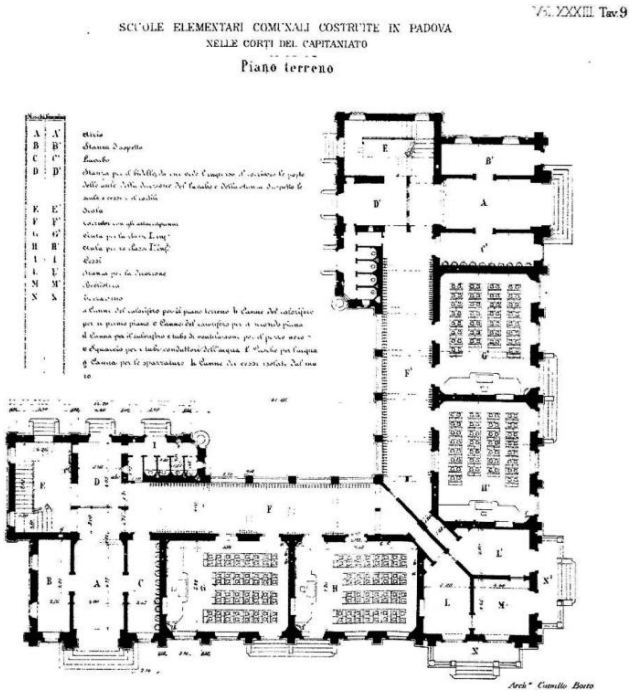


Figura 4 - Esempio di edificio a "L". Pianta del piano terra della scuola primaria costruita da Camillo Boito a Padova nel 1888. Fonte: Vittanovich P. [12], tav. 9.

2.1.2. Il ventennio 1900-1920

Nonostante le leggi ottocentesche volte alla riduzione dell'analfabetismo, all'inizio del XX secolo si riconobbe la necessità di nuovi interventi in materia: nel 1904, la legge Orlando prolungò l'obbligo scolastico, garantì l'assistenza scolastica a carico dei Comuni e definì più compiutamente i programmi del corso di studi[6].

Per valutare le condizioni dell'edilizia scolastica primaria del Regno, nel 1907 venne avviata un'inchiesta ufficiale condotta sotto la direzione dell'ispettore Camillo Corradini. Questa rivelò l'inefficienza delle istituzioni scolastiche affidate alla responsabilità comunale: "su 61668 scuole esistenti si avevano

[6] Poiché esisteva un marcato divario tra il nord e il sud del Paese, particolarmente carente di strutture scolastiche, nel 1906 venne promulgata la Legge speciale per il Mezzogiorno (legge del 15 luglio 1906), che stanziava fondi specifici per la costruzione di scuole nell'Italia meridionale e nelle isole.

solamente 21.028 aule buone; 20.233 aule risultavano, invece, mediocri; 18.806 aule disadatte ed infine 1601 aule mancanti"[7] [13].

Il tipo edilizio scolastico vero e proprio si può far risalire al 1911[8], quando il Ministero dell'Istruzione, considerata l'entità delle masse da educare, pubblicò la *Casa della Scuola* [15], una raccolta di progetti tipo. L'edificio scolastico studiato era un blocco isolato aperto simmetrico, che ospita separatamente, secondo la norma del tempo, da un lato i maschi e dall'altro le femmine; il fronte interno dell'edificio si affaccia sullo spazio verde pertinenziale. I corridoi laterali fungono da elementi distributivi, collegando le diverse funzioni situate lungo il fronte esterno dell'edificio. L'intero impianto architettonico assume il carattere istituzionale e monumentale che in quegli anni connota le architetture dello Stato unitario. Nello stesso anno il Comune di Roma, sotto la guida della giunta Nathan, promuove la diffusione del modello di scuola attiva adottato nelle formulazioni pedagogiche di Maria Montessori, le Case dei Bambini[9]. Nel 1911, inoltre, Angelo Guazzaroni, ingegnere capo dello stesso Comune, ricevette l'incarico di coordinatore ed esecutore dei gruppi regionali [16] grazie al quale, in collaborazione con il collega Augusto Giustini, intraprese una serie di sopralluoghi per tutta l'Italia. Questo lavoro culminò, nel 1913, nella pubblicazione di una raccolta di progetti articolata in 60 tavole grafiche che illustrano 23 tipi di edifici scolastici (Figura 5) spaziando "dal piccolo edifizio rurale che accoglie la limitata scolaresca in una o due aule ed offre l'alloggio per l'insegnante, (...) fino all'edifizio per la grande città col sussidio di tutti i più complessi elementi che a questa convengono" [17].

[7] Da quanto riportato emerge la corrispondenza semantica dei termini scuola e aula, segno evidente che l'aula rappresentava l'unico ambiente dedicato all'apprendimento. Questo riflette una concezione limitata degli spazi educativi, in cui l'intero processo formativo era confinato all'interno di un'unica tipologia di ambiente.

[8] Il 4 giugno dello stesso anno venne emanata la legge Daneo-Credaro "che rappresenta il massimo impulso all'espansione sistematica dell'istruzione elementare nel paese. Essa avoca allo Stato le scuole primarie, eccetto quelle dei comuni di capoluogo e circondario, ristruttura l'amministrazione in senso liberale, istituendo nuovi circoli di direzione didattica, il patronato scolastico obbligatorio in tutti i comuni, le scuole reggimentali e le scuole carcerarie; stanzia fondi per le biblioteche popolari, scolastiche e magistrali, per le scuole degli handicappati e per gli asili." [14]

[9] La prima sede, tuttora esistente, si trova nel quartiere San Lorenzo a Roma.

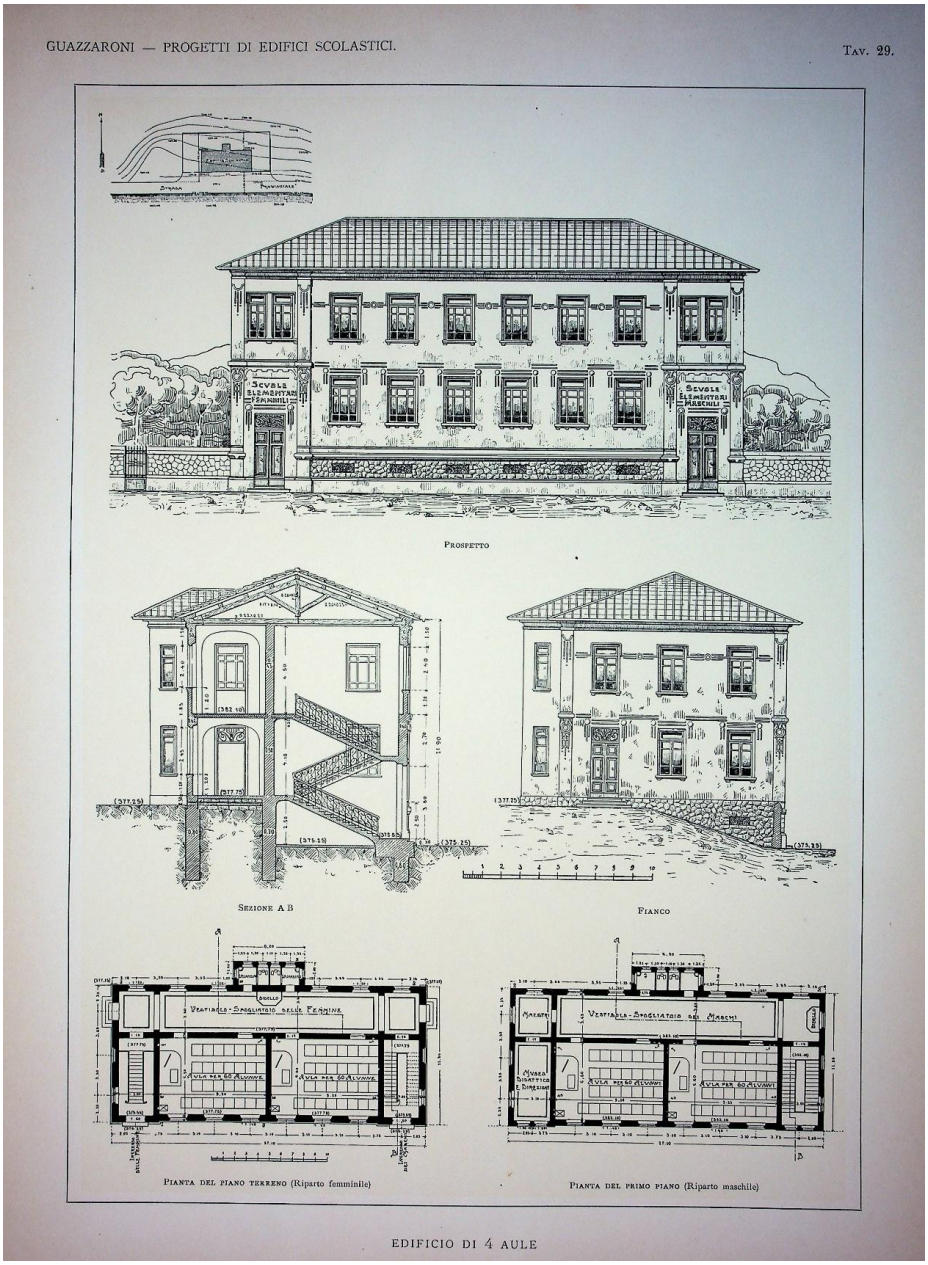


Figura 5 - Progetto di un edificio scolastico con 4 aule. Fonte: Guazzaroni, A. Tav. 29.

Le sperimentazioni dei pedagogisti John Dewey negli Stati Uniti e Maria Montessori in Italia segnarono all'inizio del '900 una svolta nella struttura degli edifici scolastici. Infatti l'acquisizione della centralità dello studente e del suo ruolo attivo iniziarono a mettere in discussione lo schema esistente della successione di aule chiuse: gli ambienti contribuivano a stimolare il ruolo attivo

del discente [18]. A Milano Giuseppina Pizzigoni con la sua Scuola Rinnovata presentò un nuovo modello di edificio scolastico: pochi corridoi e aule comunicanti con l'esterno per permettere agli alunni di relazionarsi strettamente con l'ambiente naturale [19].
Sebbene fossero presenti tali segnali di rinnovamento, le sperimentazioni si limitarono a pochi casi, mentre i modelli tipologici a "L" e a "U", ormai consolidati, continuarono ad essere riproposti; si ebbe qualche esempio della disposizione a pettine "E" che consentì di delimitare gli spazi dei cortili di pertinenza della scuola e di illuminare maggiormente gli spazi interni.
La progressiva diffusione del cemento armato tese a sostituire la muratura portante consentendo una maggiore flessibilità nella configurazione degli spazi che risultarono svincolati dalla rigidità imposta dalla struttura portante in muratura. Tuttavia, in questa fase di transizione, rimase ancora prevalente l'impiego di soluzioni costruttive miste, che combinano elementi in muratura e cemento armato.
Il primo conflitto mondiale frenò lo sviluppo delle politiche scolastiche avviate. I contrasti politici e l'affermarsi delle posizioni nazionalistiche nel periodo post bellico resero forte la consapevolezza della stretta dipendenza tra istruzione e società, economia, e politica stessa.

2.1.3. Dalla vigilia della seconda guerra mondiale al 1945

In concomitanza con l'affermarsi del fascismo, in Italia si diffusero nuovi principi: l'ubbidienza, la devozione allo Stato, l'allenamento ginnico e altri ideali educativi. Questi impressero un segno forte sul piano sociale e culturale. In tale clima propagandistico furono ridisegnati nuovi assetti urbani e realizzati edifici pubblici tra cui scuole in linea con la riforma scolastica del filosofo Giovanni Gentile del 1923[10]. Definita da Mussolini "la più fascista delle riforme", essa impresse un'impronta autoritaria ad ogni ambito educativo segnando fortemente la cultura e la società dell'epoca.

[10] Si articola nelle disposizioni normative elencate di seguito: R. D. Lgs. 31 dicembre 1922, n. 1679; R. D. Lgs. 16 luglio 1923, n. 1753; R. D. Lgs. 6 maggio 1923, n. 1054; R. D. Lgs. 30 settembre 1923, n. 2102 e R. D. Lgs. 1 ottobre 1923, n. 2185.

Nel giugno dello stesso anno fu effettuata una rilevazione sugli edifici scolastici resa necessaria dall'esigenza di valutare gli effetti derivanti dall'applicazione della legge del 1911 e di verificare le condizioni del patrimonio dopo le distruzioni causate dagli eventi bellici. Dall'analisi risultò che, sebbene ci fosse un sensibile miglioramento[11] rispetto al 1908[12], le esigenze nate in relazione alla "maggiore estensione dell'insegnamento ed in rapporto all'incremento della popolazione, e quindi al numero degli obbligati" resero il caso dell'edilizia scolastica "assai complesso e tutt'altro che facile da risolversi" [20]. La constatazione della situazione critica in cui versavano le scuole italiane generò interventi legislativi volti ad agevolare l'edilizia scolastica attraverso sussidi e facilitazioni nel pagamento dei mutui con la finalità di "promuovere e facilitare le costruzioni al fine di dotare anche i più piccoli comuni di locali lindi, adatti e decorosi" [21]. Con tale finalità nel 1925 fu approvato il decreto ministeriale relativo alle "norme per la compilazione dei progetti per la costruzione degli edifici scolastici" che conteneva i criteri da seguire nella progettazione delle scuole. Le direttive erano improntate a principi che garantissero il benessere degli occupanti sia attraverso una buona aerazione e un'adeguata illuminazione, assicurate, ad esempio, da precise dimensioni e un opportuno posizionamento degli infissi, sia da servizi igienici adeguati oltre a una palestra per l'attività fisica. Quest'ultima, in particolare, rifletteva l'enfasi sulla forma fisica che caratterizzò l'educazione fascista, dando luogo alla realizzazione di ampie palestre (Figura 6) e cortili spaziosi. Nel 1930 Raffaello Fulvio osservò sulle pagine degli *Annali dell'istruzione elementare* che "è ormai fuori di ogni discussione l'alta importanza che ha un buon edificio scolastico nei riguardi didattici, igienici ed educativi, non chè in quelli della dignità, del buon funzionamento e dell'alto rendimento della scuola" [21].

[11] "Su 82855 scuole esistenti si avevano 45655 aule adatte, 32314 aule disadatte e 4886 aule mancanti. Se si confrontano questi dati con quelli precedenti si rileva subito che il numero delle scuole era aumentato del 35% circa e per conseguenza, pur essendosi verificato un aumento del 21% nel numero delle aule buone, si aveva sempre una percentuale del 45% di aule disadatte in rapporto alle scuole esistenti." [13]

[12] Anno di pubblicazione dei risultati dell'Inchiesta Corradini.



Figura 6 - Palestra del Regio Istituto Tecnico Commerciale e per Geometri "Antonio Bordoni", Pavia. Fonte: FOTOedu, archivio fotografico per la storia della scuola e dell'educazione dell'Istituto Nazionale di Documentazione, Innovazione e Ricerca Educativa (INDIRE).

Dunque, in questi anni le architetture ebbero una forte impronta stilistica; in particolare gli edifici urbani furono caratterizzati da una identità formale e monumentale. Il Razionalismo, corrente affermatasi in questi anni, finì per identificarsi con le espressioni artistiche del regime anche per il recupero di forme classiche interpretate in chiave nazionalistica. L'architettura scolastica, al centro di riflessioni pedagogiche e regolamentazioni di ambito tecnico (rapporti illuminanti, dimensioni, ecc.), definì una tipologia edilizia caratterizzata dalla separazione in unità funzionali: gli spazi delle aule erano separati da quelli dedicati ai servizi, quali mensa, amministrazione o palestra, configurando così unità ben definite e indipendenti. Si diffusero quindi le tipologie a padiglione e a pettine. Pur mettendo in relazione i volumi dell'edificio con gli spazi esterni attraverso una diversa disposizione (si parlerà infatti di scuola all'aperto [22]), rimase inalterato il carattere chiuso sia dal punto di vista ideologico sia pratico della scuola [14]. Vennero riaffermate la funzione dell'aula (Figura 7), luogo di trasmissione del sapere attraverso una modalità frontale e autoritaria che

caratterizzò l'epoca fascista, e la finalità distributiva del corridoio, che tramonterà successivamente.



Figura 7 - Aula della scuola elementare "U. Ferrandi" di Novara, 1930 circa. Fonte: FOTOedu, archivio fotografico per la storia della scuola e dell'educazione dell'Istituto Nazionale di Documentazione, Innovazione e Ricerca Educativa (INDIRE).

Inoltre furono introdotti l'uso del calcestruzzo armato e nuovi sistemi costruttivi che permisero nuove soluzioni strutturali caratterizzate da una maggiore flessibilità rispetto ai tradizionali edifici in muratura portante. Ricorsero esempi di facciate ricoperte da vetri come nell'asilo Sant'Elia (Figura 8) a Como dell'architetto Giuseppe Terragni che, come affermato su un articolo pubblicato sulla rivista Costruzioni-Casabella [23], avrebbe dovuto essere il modello per tutti gli edifici scolastici fascisti.

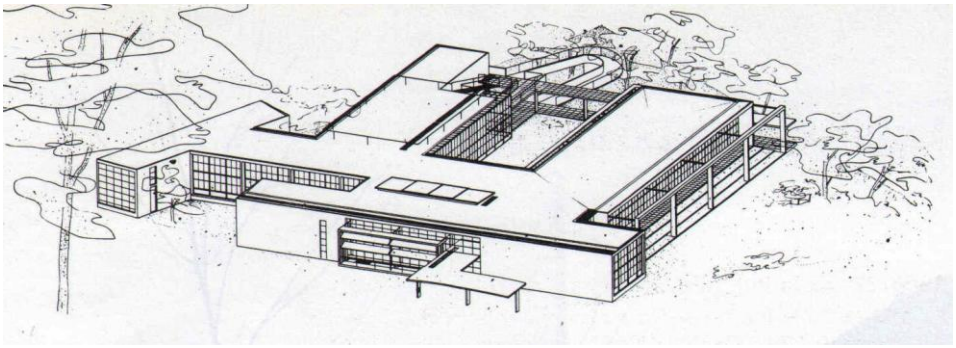


Figura 8 - Asilo infantile Sant'Elia a Como, 1934-1936, Giuseppe Terragni.

Un'altra importante tappa della riforma fascista dell'istruzione fu la "Carta della Scuola" di Bottai[13] che, però, non venne attuata completamente per il sopraggiungere del secondo conflitto mondiale.

2.1.4. Il periodo post bellico: 1946-1960

Il periodo successivo al secondo conflitto mondiale fu caratterizzato dalla necessità di risanare e ricostruire gli edifici scolastici colpiti dai bombardamenti. Fu in questa fase che, nel panorama di un acceso dibattito italiano ed europeo sul tema della scuola, si avviarono studi di carattere legislativo e architettonico-compositivo volti a definire gli aspetti dell'architettura scolastica che fino a quel momento aveva risentito fortemente dei principi del Razionalismo e dell'ideologia fascista. Cominciarono ad acquisire centralità questioni nodali come il rapporto con il luogo, la flessibilità, le modalità di aggregazione tra le parti e la definizione di un sistema costruttivo che rappresentasse l'Italia Repubblicana e antifascista. Tali obiettivi si inserirono all'interno di un animato dibattito pedagogico[14] che concepiva la concezione della scuola come cuore

[13] Presentata al Gran Consiglio del Fascismo del 15 febbraio 1939.

[14] Nella prima metà del Novecento pedagogisti di rilievo come Friedrich Froebel, Maria Montessori e Rudolf Steiner avevano proposto un nuovo approccio educativo basato sulla trasformazione della scuola da luogo di mera trasmissione passiva del sapere a spazio dedicato alla scoperta e alla sperimentazione. Questa visione, volta a promuovere lo sviluppo della personalità individuale, trovò in questi anni concreta applicazione in diverse soluzioni architettoniche adottate per la progettazione di alcune scuole. Inoltre, il crescente interesse verso il rapporto tra pedagogia e spazio dedicato all'apprendimento negli anni Cinquanta è testimoniato da convegni, mostre e

nevralgico della vita sociale di quartiere. Tali principi portarono ad una trasformazione dello schema distributivo non più "a corridoio", rigido e gerarchico, ma caratterizzato da un modello a "unità funzionale".

Emblematico delle trasformazioni in atto in questi anni è il concorso indetto dal Ministero dell'Istruzione nel 1949: i partecipanti vennero invitati a progettare senza tenere conto della normativa dell'edilizia scolastica in vigore [24]. Il vincitore, l'architetto Ciro Cicconcelli, propose un progetto di scuola "a padiglione" con ambienti atti ad accogliere la collettività in un'ottica di apertura alla città. La soluzione elaborata superò in parte la centralità dell'aula, articolando il complesso in ambienti interconnessi da spazi distributivi[15]. Inoltre lui stesso definì la nuova sintassi tipologica: "abbiamo osservato che la forma più adatta a contenere aule è il "Padiglione", esso contiene una doppia illuminazione, si adatta con facilità all'ambiente naturale ed ha indubbiamente molti vantaggi su altri raggruppamenti scolastici […] io lo vedrei trasformato in unità funzionale e non più disimpegnato da corridoi o da porticati. […] L'unità funzionale – e per funzionale bisogna intendere psicologicamente funzionale – elemento fisso e ripetibile direi all'infinito, dovrebbe comprendere non più di cinque ambienti (aule), disimpegnati da un ambiente comune: concetto quindi di scuola-casa (ricordate le montessoriane «case dei bambini?» [25].

Molto significative sono le parole con le quali l'architetto Fausto Ermanno Leschiutta sintetizza gli obiettivi che Cicconcelli si era prefissato: "Nel progetto le intenzioni erano chiare: fare un edificio che aiuti a rompere l'isolamento interno, caratteristico della vita delle scuole tradizionali, orientandosi verso la creazione di una comunità scolastica che avesse un costante rapporto con la società (quindi il tema "scuola all'aperto" è inteso come scuola aperta sia verso l'ambiente naturale sia quello sociale). […] Ecco dunque un'architettura apparentemente neutra, ma al contrario carica di intenzioni, alla quale si affida l'incarico di indurre ad alcuni comportamenti. In questo atteggiamento

pubblicazioni, tra i quali la mostra Switzerland Planning and Buildingche che fu organizzata nel 1946 a Londra e la pubblicazione del catalogo Das Neue Schulhaus, che raccoglie esempi significativi di architetture scolastiche provenienti da Paesi come Olanda, Svizzera e Stati Uniti.

[15] "Più unità funzionali costituirebbero un aggregato scolastico, e le soluzioni urbanistiche potrebbero essere quanto mai varie e interessanti" [25].

progettuale si individua la fiducia, propria della cultura architettonica del periodo di poter incidere nell'evoluzione della società attraverso l'uso dello specifico architettonico" [24].

Nel 1952 fu pubblicato un articolo di Cicconcelli in cui, in linea con alcune esperienze europee, venne valorizzato il rapporto tra uomo e spazio a livello sia psicologico sia educativo; inoltre la scuola era assimilata alla città intesa come assembramento di gruppi collegati internamente ed esternamente, aspetto che influenzò la progettazione degli spazi scolastici in Italia e in Europa, come testimoniato, per esempio, dal progetto per la scuola elementare di Darmstadt (Figura 9) ideato dall'architetto Hans Scharoun del 1951. Sebbene mai realizzato, questo divenne un modello per altre due scuole che gli furono commissionate nel 1956 e nel 1960, rispettivamente a Lünen e a Marl.

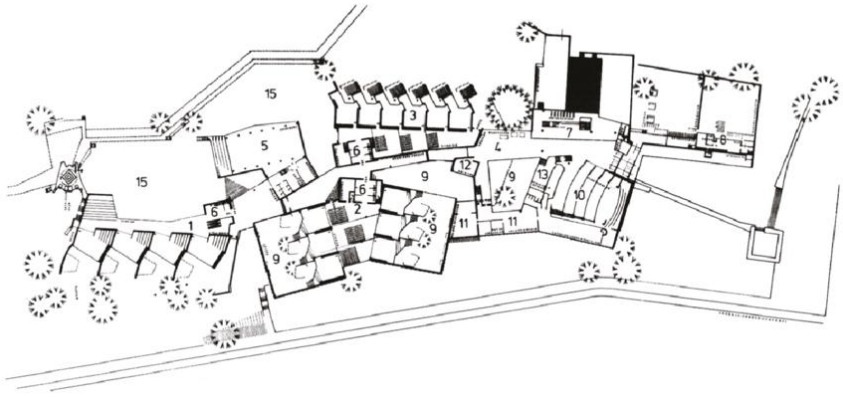


Figura 9 - Pianta del progetto Hans Scharoun per la scuola elementare di Darmstadt (1951).

Risale al 1952 un nuovo concorso indetto dal Ministero della Pubblica Istruzione con richieste e requisiti simili al precedente: registrò una più ampia partecipazione e, ad esso, seguì la costituzione del "Centro Studi per l'edilizia Scolastica", che approfondì questioni pedagogiche nazionali ed internazionali, soluzioni presenti e proposte che furono raccolte nei "Quaderni del Centro Studi". Le tipologie architettoniche presentate furono un punto di riferimento su tutto il territorio italiano.

Nel panorama nazionale, oltre a Cicconcelli, si distinse l'architetto Mario Ridolfi che insieme a Wolfgang Frankl negli asili di Ivrea e di Poggibonsi, tra il 1955 e il 1963, sperimentò in modo molto efficace il concetto di "scuola all'aperto"

coniugata con la valorizzazione dell'artigianalità e dell'attenzione al dettaglio costruttivo, caratteri tipici dello stile ridolfiano che emergono anche nel progetto della scuola media Leonardo da Vinci a Terni.

Un'altra tappa fondamentale è la Legge n.645 risalente al 1954 che riconobbe la necessità di separare l'edilizia scolastica dal resto delle infrastrutture e di concepirne un programma dedicato alla sua pianificazione e costruzione. Grazie allo stanziamento di fondi, i progettisti furono in grado di sperimentare le norme recenti dando vita a nuovi progetti in cui l'aula, pur delimitata in uno spazio definito, fu integrata con gli spazi comuni attraverso pareti mobili e strutture a scomparsa; la funzione del corridoio venne ripensata. Significativa la riflessione frutto della discussione all'interno del già citato Centro studi dell'Edilizia Scolastica: "Sono state studiate soluzioni diverse, tutte dotate di questa caratteristica essenziale e fondamentale: la eliminazione dei corridoi che già per troppo tempo hanno reso la nostra scuola insopportabilmente simile alla clinica, al carcere e alla caserma; e la loro sostituzione con un elemento centrale, la sala intorno a cui si raccolgono gruppi adeguati di aule" [26]. La tendenza a considerare la scuola non solo un insieme dei locali, ma un organismo viene concretizzata dal *Nuovo regolamento per l'edilizia scolastica* (DPR 1 dicembre 1956, n. 1688). Questo non solo affronta aspetti di carattere strutturale, ma introduce anche indicazioni per la progettazione, con il coinvolgimento di studenti, genitori e sindacati, anticipando così i principi della progettazione partecipata.

Un esempio significativo del cambiamento della concezione dell'edificio scolastico si ravvisa nell'esposizione della XII Triennale di Milano del 1960 che affrontò il tema "La casa e la scuola" con l'obiettivo di mettere in luce le sperimentazioni sullo spazio scolastico: l'allestimento di un prototipo di scuola elementare inglese[16] (Figura 10) e quello della scuola al Canton Vesco di Quaroni [27] mostrò due diverse visioni della didattica. La divisione dell'aula in zone e l'articolazione degli spazi aula intorno a più aree comuni del modello anglosassone consentivano l'apprendimento attraverso diverse modalità, anche

[16] La scuola fu disegnata dall'ufficio tecnico del Nottinghamshire County Architect e costruita con il metodo CLASP (Consortium of Local Authorities Special Program), basato sulla prefabbricazione e standardizzazione.

per gruppi e non in maniera unilaterale. Così risultarono superati due aspetti tradizionalmente costitutivi dell'aula italiana: la distribuzione in file di banchi e l'apprendimento orientato alla figura di riferimento del docente.

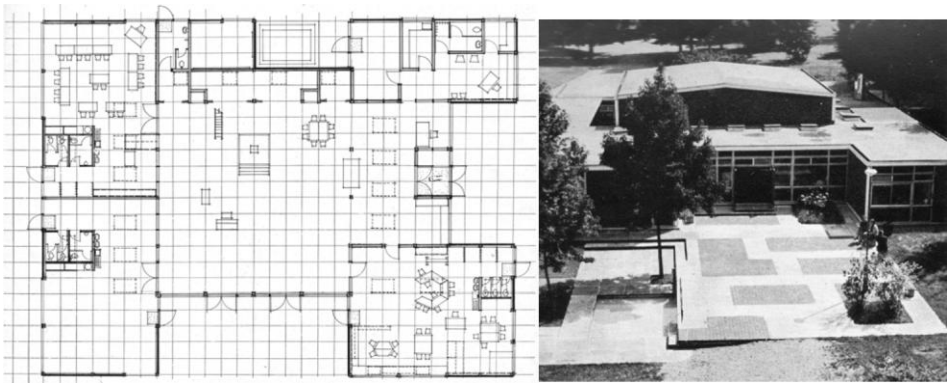


Figura 10 - Scuola elementare allestita alla XII Triennale di Milano nel 1960. Planimetria (a sinistra) e fotografia dell'allestimento nel parco (a destra). Fonte: Casabella-continuità n. 245 del 1960 [28].

L'esperienza della Triennale diede origine a un concorso per la realizzazione di tre scuole a Genova, Milano e Rovigo [29]. Tuttavia i progetti proposti evidenziarono la difficoltà di applicare al caso italiano le sperimentazioni presentate in occasione della mostra. Ciro Cicconcelli, in un articolo pubblicato su «Casabella» [28], manifestò il suo disincanto illustrando la bassa qualità degli edifici scolastici attraverso una serie di immagini esemplificative (Figura 11). Denunciò inoltre il paradosso di dover bandire un nuovo concorso in deroga delle norme esistenti redatte proprio a seguito dei concorsi del 1949 e del 1952.

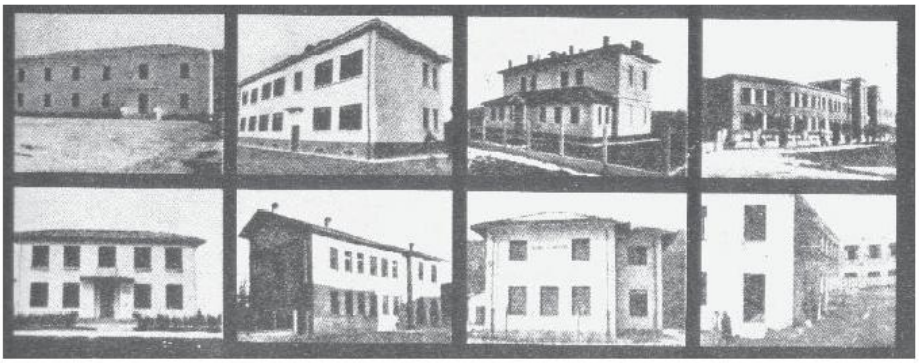


Figura 11 – Esempi di edifici scolastici. Fonte: Immagine tratta dall'articolo di Ciro Cicconcelli su Casabella n.245, 1960 [28].

2.1.5. Il boom economico: 1961-1974

Il quinquennio successivo al secondo conflitto mondiale risultò decisivo sul piano politico e sociale. Nell'ambito della struttura e dell'organizzazione scolastica in questo periodo fino all'inizio degli anni Sessanta non vennero presentate riforme, ma si assistette a una fase di riflessione in cui le sperimentazioni rimasero prevalentemente circoscritte al piano teorico, con pochi effetti concreti, e ad una serie di confronti che sfociarono nel "Piano di Sviluppo della Scuola dal 1959 al 1969", il quale rappresentò un'anticipazione della futura programmazione dell'assetto scolastico [30].

Il radicale cambiamento fu rappresentato dall'istituzione della scuola media unica gratuita e obbligatoria, avvenuta nel 1962 (legge 1859 del 1962) e resa definitiva nel 1979, dal superamento della riforma Gentile dell'istruzione di base per le scuole inferiori, dal raggiungimento della frequenza fino al quattordicesimo anno di età e quindi dalla scolarizzazione di massa [14]. Inoltre l'evoluzione dell'edilizia scolastica fu segnata da tre leggi importanti promulgate nel 1962: la legge di finanziamento n. 17[17] per la costruzione di edilizia scolastica prefabbricata, la legge n. 167 per la costruzione di edilizia economica popolare

[17] Legge 26 gennaio 1962, n. 17 "Utilizzazione di fondi sinora accantonati per il finanziamento del piano per lo sviluppo della scuola".

e infine la legge n.1073 per lo sviluppo della scuola nel triennio 1962-1965[18]. Quest'ultima, oltre a stabilire un aumento dei contributi di finanziamento rispetto a quelli stanziati nel 1954, promosse l'istituzione della Commissione d'indagine sulla scuola italiana, le cui proposte confluirono nella legge n. 641 del 1967, nel relativo piano di finanziamento per il quinquennio 1967-1971 e nelle future Nuove Norme Tecniche. Nonostante tali premesse, la legge suddetta non ottenne i risultati sperati: le proposte della commissione o non vennero accolte del tutto o furono modificate e attuate in ritardo [24]. Lo sviluppo dell'edilizia scolastica ricevette un ulteriore impulso con la legge 444 del 1968, che sancì l'istituzione della scuola materna statale, e con la legge 820 del 1971, che introdusse il tempo pieno nelle scuole elementari, impegnando lo Stato a garantire una presenza più capillare di istituti sul territorio nazionale.

Con la scolarizzazione di massa avviata negli anni Settanta la domanda di istruzione crebbe considerevolmente: l'edificio scolastico divenne oggetto di studio soprattutto negli aspetti costruttivi, tipologici e spaziali. Inoltre la riduzione delle disponibilità economiche impose la ricerca sulla prefabbricazione che, oltre a consentire la razionalizzazione del processo edilizio, permise di rendere gli edifici scolastici più flessibili e adattabili alle diverse esigenze pedagogiche. In fase progettuale si iniziò a ricercare modelli di scuole ripetibili, capaci di adattarsi a diverse località e contesti. Dunque, la diffusione della prefabbricazione fu strettamente legata alla necessità di trovare soluzioni scolastiche standardizzabili e in grado di rispondere alle nuove esigenze educative e alle limitazioni economiche. L'architetto Ciro Cicconelli, in qualità di direttore del Centro Studi, manifestò un forte interesse per la prefabbricazione, trattando l'argomento in un numero monografico dei *Quaderni del Centro Studi per l'edilizia scolastica*, dal titolo *La prefabbricazione dell'edilizia scolastica* [31].

In questo contesto, emerse anche la tendenza, già presente negli anni precedenti, a superare la tradizionale divisione rigida degli spazi scolastici, favorendo una relazione più fluida e diretta tra spazi distributivi e quelli dedicati

[18] In questo quadro si inseriscono le Linee direttive di un piano di sviluppo pluriennale della scuola (1964) in cui il Ministro Luigi Gui pianificò la costruzione in 5 anni di 515.000 nuovi posti-alunno.

alla didattica. Un esempio di scuola a padiglione in opposizione alla scuola-caserma, in cui assume un ruolo essenziale la rottura dell'unità aula-corridoio, è la scuola elementare di Ponte Sesto, progettata dall'architetto Novella Sansoni. L'aula di questo edificio, organizzato in due padiglioni costruiti in fasi successive tra il 1968 e il 1974, è di forma esagonale e diventa il modulo su cui si basa la costruzione dell'intero padiglione (Figura 12) e, allo stesso tempo, anche la misura dello spazio aperto circostante [32]. Inoltre, le aule sono dotate di pareti mobili che consentono l'apertura completa verso lo spazio comune.

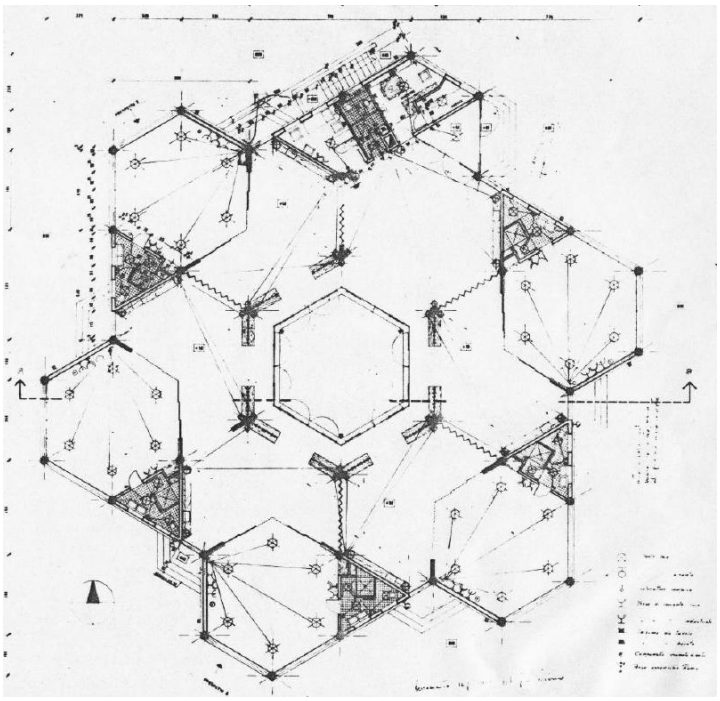


Figura 12 - Planimetria di un padiglione della scuola elementare di Ponte Sesto (Rozzano). Fonte: Archivio di Vincenzo Montaldo.

Il progetto prende ispirazione dalla Heathcote Scholl (Figura 13) progettata da Perskins & Will a New York nel 1951-54: anche in questo caso la composizione si sviluppa intorno al concetto di padiglione, con uno spazio centrale comune e una forma base determinata dal modulo dell'aula.

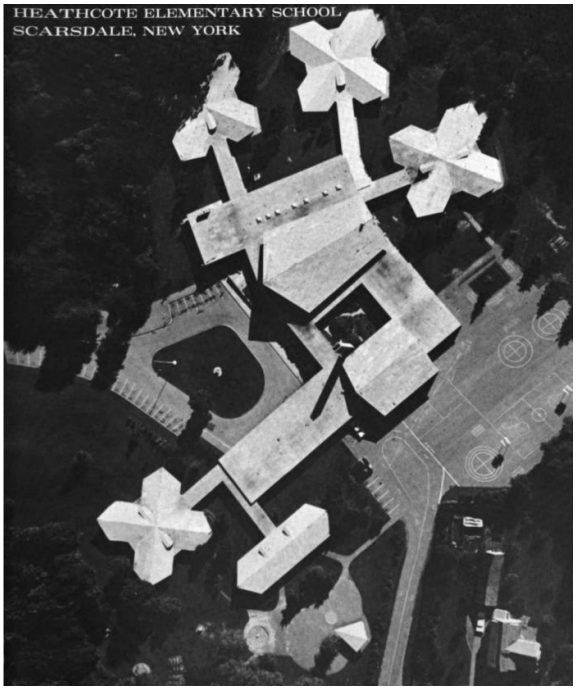


Figura 13 - Vista dall'alto della Heathcote Scholl. Fonte: Educational Facilities Laboratory [33].

Ogni aula dispone di un accesso indipendente al giardino esterno, che include un'area pavimentata per svolgere attività didattiche all'aperto. In questi anni, infatti, si sviluppa una crescente attenzione al rapporto tra l'edificio scolastico e il contesto urbano. Tale interesse, accentuato dalla carenza di strutture sportive e ricreative, portò a concepire la scuola come un centro multifunzionale capace di sopperire a tali carenze attraverso l'integrazione di spazi come palestre, teatri, biblioteche. La scuola media di Buccinasco, costruita nel 1965, è un esempio significativo di architettura scolastica orientata a valorizzare il rapporto tra l'edificio e il contesto urbano in cui è collocato (Figura 14). Progettata dagli architetto Virgilio Vercelloni e Giulio Redaelli a seguito della legge del 1962, la scuola fu concepita come vero e proprio centro civico di riferimento per il quartiere che sappia "promuovere iniziative associative di tipo culturale, sportivo e ricreativo, […] che trasformi se stessa in protagonista attiva per la vita del paese, e che si pone conseguentemente di fronte alla realtà non per servirla, ma per modificarla profondamente, per migliorarla" [34]. Infatti, oltre ai necessari spazi della didattica, vengono inseriti in un unico corpo anche dei servizi che interessano tutta la comunità.



Figura 14 - Pianta del piano terra della scuola media di Buccinasco (1965-68). Fonte: "Controspazio" n.2-3, luglio-agosto 1969 ([35]).

Anche nel progetto della scuola materna ed elementare di Rozzano (Figura 15), realizzata dal 1963 al 1966 dal Collettivo di Architettura Milanese, emerge l'importanza della relazione con lo spazio aperto che, attrezzato con sedute e arredi, è concepito come un luogo per ospitare attività educative in continuità con l'interno. L'edificio è articolato intorno a uno spazio collettivo, progettato per favorire l'incontro e l'interazione dell'intera comunità scolastica, su cui affacciano le aule. Queste, organizzate a gruppi di tre, condividono un'area di ingresso comune e dispongono ciascuna di un piccolo cortile di pertinenza.



Figura 15 - Fotografia dello spazio aperto della scuola materna ed elementare di Rozzano (1963-66). Fonte: Archivio di Vincenzo Montaldo.

Un ultimo esempio è la scuola elementare Salvatore Orrù (Figura 16) a Fagnano Olona, costruita tra il 1972 e il 1976 su progetto dell'architetto Aldo Rossi che la concepì come una piccola città. Le aule, esposte a est per garantire una migliore illuminazione naturale, affacciano su percorsi interni che richiamano l'immagine delle strade, mentre il cortile, concepito come una piazza, funge da spazio di aggregazione per gli studenti. Questo, articolato su due livelli collegati da gradoni, è un luogo polifunzionale in cui è possibile svolgere lezioni e discussioni aperte ai cittadini. Il cortile è uno dei tre elementi principali che enfatizzano l'asse di simmetria dell'impianto planimetrico insieme al volume cilindrico destinato a biblioteca e sala interciclo e alla ciminiera in mattoni che ospita la centrale termica.

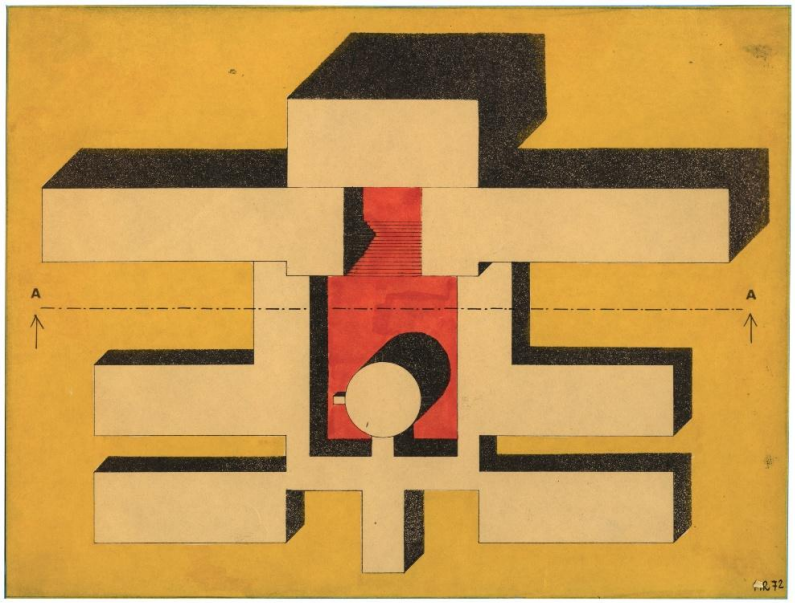


Figura 16 - Progetto per la scuola elementare di Fagnano Olona, 1972. Penna e pennarello su carta. © Eredi Aldo Rossi. Fonte: Fondazione Aldo Rossi.

In generale, nonostante questi impulsi, non si assisterà a una trasformazione radicale dell'utilizzo degli edifici scolastici. Negli anni successivi, i crescenti costi di manutenzione e gestione, insieme ai requisiti di sicurezza legati all'apertura della scuola verso il territorio, resero progressivamente meno praticabile questo approccio[1]. Inoltre, le scuole costruite in questa epoca rivelarono una profonda disomogeneità nelle tecniche realizzative e nella qualità dei materiali impiegati, spesso scadente, compromettendo la funzionalità e la durabilità delle strutture.

2.1.6. Dal 1975 ad oggi

A partire dalla seconda metà degli anni Settanta e nel corso degli anni Ottanta, il calo della popolazione scolastica, conseguenza della fine della spinta demografica, accompagnò la crisi dei modelli costruttivi adottati fino a quel momento per gli edifici scolastici. Le Nuove Norme Tecniche per l'Edilizia

Scolastica elaborate nel 1970 e approvate nel 1975[19], codificarono quanto previsto dalla normativa del 1956 che segnò importanti innovazioni nel campo dell'edilizia scolastica [29]. Nel nuovo quadro tecnico e normativo furono stabilite disposizioni tecniche dettagliate, definiti i livelli di responsabilità e indicati i parametri per la localizzazione e la dimensione degli edifici, attraverso indici e quantità minime da rispettare, e introdotti i principi pedagogici come base della progettazione, in anticipo rispetto agli altri Paesi europei[20]; esse non solo rappresentarono un riferimento per gli aspetti costruttivi, ma applicarono le ricerche pedagogiche[21] alla forma degli spazi. Lo spazio scolastico diventò un organismo caratterizzato da un'organizzazione adattabile e flessibile, in cui tutti gli elementi si integrano direttamente senza disimpegni e corridoi; l'unità pedagogica è definita da un insieme di spazi in continuità rispetto al contesto in cui si inserisce [24]. Queste norme segnano dunque una tappa rilevante non solo nella definizione delle caratteristiche richieste agli edifici scolastici, ma anche nella riconsiderazione del ruolo e della configurazione dell'aula. Nella scuola primaria queste furono concepite in modo tale da aprirsi e unirsi tra loro in base al tipo di attività svolta; furono inoltre previsti spazi per attività interciclo di gruppo e per attività parascolastiche separate dal resto degli ambienti tramite pareti mobili e aperti al quartiere. In questo contesto si integrano perfettamente anche la biblioteca e le aree destinate allo sport. Questo processo di cambiamento interessò anche la scuola media unica, con la progettazione di atelier, collegati al resto da vetrate e destinati all'insegnamento specializzato, e di auditorium collegati agli altri ambienti; vi furono le stesse indicazioni della

[19] D.M. 18 dicembre 1975, "Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici di funzionalità didattica, edilizia e urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica". La normativa ebbe l'obiettivo di rendere omogenea la situazione su tutto il territorio nazionale e adeguare i cantieri ad un processo tecnologico più avanzato.

[20] È interessante osservare che norme di questo tipo siano state introdotte in Scozia e Inghilterra ben più tardi e senza considerare gli aspetti pedagogici, mentre altri Paesi, come Francia e Olanda, le hanno recepite solo in parte. La separazione tra normativa tecnica e concettualizzazione pedagogica evidenzia un limite significativo nella progettazione di spazi scolastici moderni, capaci di sostenere una didattica innovativa e di adattarsi nel tempo.

[21] Tali ricerche si riferiscono all'unità pedagogica, alla relazione tra spazi interni ed esterni e alle forme di apprendimento possibili nello spazio all'apertura sociale.

scuola primaria per le attività parascolastiche. La normativa inoltre impose l'adozione di soluzioni che aumentassero la luminosità delle stanze, pavimenti galleggianti e soffitti attrezzati per soddisfare diverse esigenze [36]. Inoltre, durante questo periodo furono realizzate, soprattutto nelle periferie, scuole di grandi dimensioni che sperimentarono la tipologia a piastra.

Per quanto riguarda le dimensioni degli edifici, il decreto stabilì delle grandezze ottimali, fissando limiti minimi e massimi di alunni e per la composizione di sezioni o classi, a seconda del tipo di scuola. Ad esempio, fu definita la superficie netta per studente prevista per le attività didattiche in aula, con una variazione che va da 1,80 m^2 dalle scuole materne alle medie, fino a 1,96 m^2 per i vari indirizzi di scuola superiore.

Il DM 18 dicembre 1975 si concentrò inoltre anche sui materiali e sui componenti delle strutture scolastiche. In questo contesto emerse la crescente attenzione verso la sicurezza e le prestazioni energetiche del patrimonio edilizio, questioni che sono tuttora attuali. A tale scopo la legge del 30 aprile 1976[22] e il decreto attuativo n. 1052 del 1977 definirono nuovi parametri per l'isolamento termico, gli impianti di riscaldamento e la produzione di acqua calda. Tali norme incisero fortemente sulle caratteristiche dimensionali, spaziali e costruttive dell'edilizia scolastica.

In questo contesto emersero due tendenze principali: la prima, in continuità con la tradizione degli anni precedenti, riguarda la progettazione di edifici scolastici volta a sperimentare nuove tecnologie e modalità di organizzazione spaziale, la seconda invece si occupa della riorganizzazione e del recupero del patrimonio edilizio esistente, costituito in gran parte da edifici costruiti nel secondo dopoguerra, con particolare attenzione agli aspetti strutturali e ambientali. Inoltre, negli anni Novanta ulteriori adeguamenti normativi dotarono gli edifici pubblici di scale antincendio, porte tagliafuoco nei corridoi e rivestimenti isolanti nelle facciate oltre all'eliminazione delle barriere architettoniche, frutto di una particolare attenzione agli alunni con disabilità[23].

[22] Legge 30 aprile 1976, n. 373 "Norme per il contenimento del consumo energetico per gli usi termici negli edifici".

[23] A partire dalla legge Falcucci, che ha posto le basi per l'integrazione degli alunni con disabilità, è stato avviato un nuovo approccio all'organizzazione e alla progettazione degli spazi scolastici.

Tuttavia, è opportuno sottolineare che la normativa relativa all'edilizia scolastica non sarà oggetto di revisioni significative fino alle Linee Guida per l'edilizia scolastica del 2013[24] che vennero introdotte dal Ministero della Pubblica Istruzione, dell'Università e della Ricerca, in seguito al parere favorevole della Conferenza Unificata dell'11 aprile 2013, con l'obiettivo di favorire la realizzazione di edifici scolastici più sicuri, sostenibili, accoglienti e in linea con le più moderne concezioni della didattica. Infatti, la legge 23 del 1996, che rappresenta la normativa di riferimento per l'edilizia scolastica, ha previsto che, in fase di prima applicazione e fino all'approvazione delle normative regionali, rimanessero in vigore gli indici previsti dal decreto del 1975, che di fatto tuttora costituiscono il principale riferimento per i progettisti e le amministrazioni competenti. Tuttavia questa legge, oltre a definire le competenze tra i soggetti istituzionali a livello territoriale, indicando le responsabilità relative alla realizzazione, fornitura e manutenzione ordinaria e straordinaria degli edifici scolastici, con l'articolo 7 ha stabilito la creazione dell'Anagrafe Nazionale dell'Edilizia scolastica, uno strumento conoscitivo fondamentale per la programmazione degli interventi nel settore.

Le attuali tendenze dell'edilizia scolastica, contenute nelle nuove Linee guida[25] del Ministero dell'Istruzione e del Merito, evidenziano il passaggio da un approccio prescrittivo ad uno prestazionale con un'attenzione particolare all'aspetto strutturale ed energetico, alla creazione di ambienti adatti ad una didattica innovativa. Queste Linee Guida hanno cercato di superare i limiti delle normative precedenti promuovendo ambienti di apprendimento innovativi e orientati al futuro verso una scuola di qualità, sostenibile a livello ambientale ed economico, aperta alla comunità, attenta alle nuove esigenze pedagogiche, attrezzata e connessa. Altri criteri base della nuova edilizia scolastica sono la rapidità di costruzione, la riciclabilità dei componenti e dei materiali di base,

[24] Decreto Ministeriale 11 aprile 2013 "Norme tecniche-quadro, contenenti gli indici minimi e massimi di funzionalità urbanistica, edilizia, anche con riferimento alle tecnologie in materia di efficienza e risparmio energetico e produzione da fonti energetiche rinnovabili, e didattica indispensabili a garantire indirizzi progettuali di riferimento adeguati e omogenei sul territorio nazionale".

[25] La prima versione è stata pubblicata nel 2013 e nel 2022 ne sono state sviluppate nuove a supporto del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza.

l'utilizzo di fonti rinnovabili e la facilità di manutenzione; la presenza di spazi verdi, altro elemento importante, è concepita come un ambiente educativo in quanto risorsa continua di apprendimento. Inoltre, gli attuali metodi pedagogici si riverberano nei caratteri di integrazione, complementarità, flessibilità e polivalenza degli spazi scolastici che diventano un punto di riferimento per la comunità che, in taluni casi, dimostra un coinvolgimento attivo anche in fase progettuale.

Tuttavia, la natura non vincolante rende le Linee Guida più simili a raccomandazioni che a standard normativi obbligatori. Infatti, analizzando i recenti bandi per la costruzione di nuove scuole emerge come questi siano prevalentemente basati su documenti non coercitivi e debbano comunque rispettare l'unica normativa italiana fortemente vincolante, quella del 1975. In particolare, i concorsi di progettazione #ScuoleInnovative, Futura e PNRR, che mirano rispettivamente alla realizzazione di 52, 212 e 136 nuovi edifici scolastici distribuiti su tutto il territorio nazionale, evidenziano chiaramente la contraddizione tra l'applicazione di standard normativi ormai datati, la ricerca di modelli scolastici innovativi e la necessità di contenere le dimensioni entro i limiti stabiliti dalle linee guida esistenti.

Inoltre, si sono susseguite riforme, dalla Gelmini alla Buona Scuola, che sono intervenute su temi legati al riordino delle scuole, dall'infanzia all'università, affrontando questioni riguardanti l'organizzazione della docenza, la didattica e l'offerta formativa. In particolare, la riforma Buona Scuola, introdotta con la legge n. 107, non solo ha implementato gli strumenti economici a disposizione delle istituzioni scolastiche, ma ha arricchito il programma di studi e ha introdotto l'Alternanza scuola-lavoro, con l'obiettivo di favorire una maggiore integrazione tra formazione scolastica ed esperienza professionale. Per quanto riguarda gli edifici scolastici, la situazione già precaria si è aggravata a causa di una serie di situazioni emergenziali, dai terremoti alla pandemia, che hanno messo sotto forte pressione il patrimonio edilizio. Questi eventi hanno comportato un'intensificazione della necessità di interventi, dando avvio a numerosi finanziamenti mirati alla manutenzione e al ripristino delle strutture scolastiche.

2.2. Le nuove tendenze

Attualmente il pensiero pedagogico che ispira la scuola, erede dei grandi pedagogisti italiani come Maria Montessori, Loris Malaguzzi, le sorelle Agazzi, Rosa Pizzigoni ed altri, riserva un ruolo importante agli spazi educativi e didattici. La didattica, improntata sulla centralità dell'alunno che acquisisce conoscenze e competenze con modalità sempre più laboratoriali, si pone l'obiettivo di far crescere culturalmente gli alunni non limitandosi all'istruzione e all'insegnamento disciplinare in modalità frontale. In questa dimensione anche i ritmi e i tempi scolastici si dilatano rendendo necessarie nuove articolazioni degli ambienti scolastici.

Prima del primo conflitto mondiale su scala nazionale ed internazionale, i pionieri di una pedagogia innovativa, di carattere esperienziale che pone il bambino al centro dell'esperienza didattica, furono Maria Montessori, il brasiliano Paulo Freire, il francese Fernand Deligny e lo statunitense John Dewey, il quale nella sua opera *Scuola e società* del 1900 esplicitava l'esigenza di una modifica radicale del *setting* scolastico e dell'impostazione pedagogica:

> "come il biologo con un osso o due può ricostruire l'intero animale, così noi, se rievochiamo dinanzi alla nostra mente un'aula scolastica ordinaria, con le sue file di banchi disposti in ordine geometrico, addossati l'uno all'altro in modo da lasciare il minimo spazio possibile al movimento degli alunni, banchi quasi tutte delle medesime dimensioni, con il poco spazio che basta a contenere libri, matite e carta con l'aggiunta di un tavolo, di qualche seggiola e le parti nude o adornate col minor numero possibile di quadri murali, possiamo ricostruire l'unica attività didattica educativa che sia possibile svolgere in siffatto spazio. Tutto è fatto "per ascoltare", - poiché studiare semplicemente da un libro non è che un altro modo di ascoltare; tutto attesta dipendenza di una mente da un'altra mente." [37]

In pieno Novecento un modello di tale concezione ormai in atto è individuabile nella pedagogia "delicata" di Margherita Zoebeli, fondata sul principio di libertà

che gli spazi devono offrire ai bambini per stimolare il senso di responsabilità e di autonomia. La studiosa svizzera delineò la differenza non solo semantica tra i termini “insegnare” (che può essere assimilato al concetto di “educare”, da “e ducere”, tirare fuori il talento che è in ognuno) e “istruire” (derivato dal gergo militare): il primo si basa sull’autonomia del discente del quale viene valorizzata la creatività nell’apprendimento, il secondo si fonda sulla costrizione a svolgere determinati compiti. Sul solco di tale linea pedagogica si collocarono intellettuali come Tonino Guerra, Gianni Rodari, Danilo Dolci, Don Milani fino a Loris Malaguzzi che nel 1993 creò il progetto Reggio Children. Questo approccio pone il bambino al centro del processo di apprendimento, riconoscendo nello spazio un elemento essenziale che aiuta a “supportare relazioni tra situazioni complesse e variegate, il mondo di esperienze, idee e tanti modi di esprimere idee” [38]: lo spazio diventa, dunque, parte integrante del percorso educativo. Secondo Malaguzzi, l’architettura riveste un ruolo cruciale nella qualità dell’apprendimento e nell’esperienza educativa complessiva e, per questo motivo, l’ambiente fisico della scuola viene definito il “terzo insegnante”. Gli edifici, le aule e i laboratori non sono solo gli spazi dove si svolgono le attività formative, ma svolgono essi stessi una funzione educativa fondamentale come luoghi sociali e dinamici, dove i bambini possono incontrarsi, interagire e condividere esperienze, arricchendo il proprio percorso formativo attraverso il dialogo e la relazione. L'intera storia dell'attivismo pedagogico si caratterizza per aver posto lo studente al centro dei processi di apprendimento, ponendo implicitamente le basi per un ripensamento dello spazio fisico scolastico [39]. A questa prospettiva si affiancano recenti studi scientifici di rilevanza internazionale che evidenziano come la qualità dell'ambiente di apprendimento può incidere sulla qualità dei processi educativi, sottolineando il ruolo cruciale dello spazio nel contesto formativo. Nel tempo, il dibattito sulle caratteristiche e sulla funzione degli spazi educativi ha generato una serie di sperimentazioni virtuose anche sul territorio nazionale. Tanto in passato quanto oggi, l'obiettivo rimane quello di promuovere il benessere e lo sviluppo degli studenti, valorizzando in particolare la qualità dello spazio architettonico come strumento educativo essenziale.

Ogni epoca, dunque, ha risposto alle esigenze sociali e pedagogiche del proprio tempo con strutture scolastiche caratterizzate da differenti configurazioni architettoniche. Gli edifici costruiti prima del XX secolo riflettevano un'organizzazione spaziale pensata prevalentemente per sostenere modelli di didattica frontale, dove il sapere veniva trasmesso dal maestro all'allievo, con l'obiettivo principale di scolarizzare il maggior numero possibile di studenti. L'attuale patrimonio edilizio scolastico, che è per lo più costituito da edifici datati, è stato progettato secondo idee di scuola e principi pedagogici ormai in larga parte superati. Il passaggio dalla scuola della società industriale, in cui gli studenti erano assimilati a operai del sapere in una sorta di catena di montaggio, alla scuola per la società della conoscenza, che valorizza percorsi autentici di apprendimento basati sull'autonomia e sull'elaborazione critica delle informazioni, richiede una trasformazione radicale degli spazi, degli strumenti e dei metodi didattici. A livello internazionale, Diana Oblinger, autrice del libro *Learning Spaces* [40], sottolinea come gli spazi scolastici progettati prima degli anni 2000 non siano adeguati a rispondere alle esigenze degli studenti contemporanei. In questo contesto, la configurazione tradizionale con i banchi allineati si rivela inadeguata a sostenere modalità didattiche che prevedono il coinvolgimento attivo degli studenti, poiché limita l'uso degli spazi alla sola lezione frontale, impedendo una maggiore versatilità e interazione. L'architetto Prakash, nel suo articolo *The Classroom Is Obsolete: It's Time for Something New* del 2011, affermava che "la classe è obsoleta" [41] per evidenziare la necessità di superare il modello scolastico delle aule rigide, organizzate in file ordinate di banchi. Inoltre, nel secondo numero di Turris Babel dedicato ad architettura e pedagogia, l'aula è stata definita come un "relitto della rivoluzione industriale" e come un "luogo concepito per un solo processo di apprendimento, per una trasmissione verticale, unidirezionale e passiva del sapere dal docente al discente, la cui funzione è stata quella di uniformare il «prodotto finale» anche a costo di non valorizzare le differenze, cognitive, culturali, di interesse, dei singoli studenti" [42]. Lo spazio didattico si sta evolvendo per rispondere alle trasformazioni delle pratiche educative, superando i confini tradizionali e privilegiando ambienti flessibili e multifunzionali. Questi nuovi spazi, progettati per stimolare la collaborazione, l'innovazione e un apprendimento più attivo ed

esperienziale, riflettono un cambiamento profondo nel modo di concepire l'educazione. In tale contesto, l'architettura svolge un ruolo determinante, influenzando positivamente le condizioni di lavoro collaborativo e ottimizzando l'uso degli spazi scolastici: gli ambienti educativi stanno infatti abbandonando la tradizionale struttura lineare, fatta di corridoi e aule rigidamente separate, per adottare configurazioni più flessibili e ibride, dove le aule si integrano con spazi aperti dedicati al lavoro condiviso tra studenti e insegnanti, favorendo nuove modalità di apprendimento e interazione. Parallelamente, il ruolo sociale della scuola si è ampliato, trasformandola da un luogo destinato unicamente alla trasmissione di informazioni a un centro di aggregazione per la comunità. La scuola si configura sempre più come un centro di aggregazione sociale, offrendo spazi e servizi che vanno oltre l'orario scolastico. Ad esempio, la biblioteca può diventare accessibile ai residenti del quartiere e gli ambienti scolastici possono ospitare eventi culturali o attività collettive. Questa evoluzione fa sì che l'edificio scolastico acquisisca una valenza comunitaria, rispondendo non solo alle esigenze educative ma anche a quelle sociali e culturali del territorio.

2.2.1. Gli indirizzi internazionali

Negli ultimi decenni, l'attenzione verso la progettazione degli spazi educativi si è intensificata a livello internazionale: molti paesi hanno promosso interventi di edilizia scolastica ispirati a principi innovativi, in linea con le nuove esigenze pedagogiche; queste hanno ispirato nuovi modelli organizzativi, metodi procedurali e spazi, creando in Europa un crescente interesse per il rinnovamento degli spazi educativi sostenuto da un dibattito interdisciplinare. Tale impulso ha generato un impegno diffuso per il miglioramento della qualità degli edifici scolastici, spesso attraverso aggiornamenti normativi che regolamentano sia la costruzione di nuove strutture sia la ristrutturazione di quelle esistenti. Le normative internazionali analizzate dalla Fondazione Agnelli nel *Rapporto sull'edilizia scolastica* e dall'INDIRE (Istituto Nazionale di Documentazione, Innovazione e Ricerca Educativa) nella ricerca *Spazi educativi e architetture scolastiche: linee e indirizzi internazionali* consentono di evidenziare due approcci, non alternativi, per l'innovazione dell'ambiente

scolastico che rappresentano preziosi insegnamenti per l'Italia[26]. Il primo, adottato da Australia e Inghilterra, è un modello basato su template (formati architettonici predefiniti, standardizzati e facilmente replicabili) per velocizzare i tempi di realizzazione e ottimizzare i costi, mentre il secondo, utilizzato dal Portogallo, propone un approccio dal basso con soluzioni specifiche in base ad ogni contesto scolastico e geografico. Il governo dello Stato di Victoria in Australia ha avviato nel 2009 il piano *Building the Education Revolution* (BER) che ha permesso la costruzione di nuovi edifici scolastici attraverso delle configurazioni predefinite: sono stati progettati infatti 34 template tra i quali scegliere in base ai bisogni del contesto specifico con lo scopo sia di contenere i costi e semplificare il processo edilizio sia di includere in tutte le nuove scuole gli spazi idonei alle attività educative che sono stati individuati dopo ricerche sulle modalità e i processi di apprendimento. Altri aspetti fondamentali che emergono sono l'uso degli spazi esterni come estensione dell'ambiente di apprendimento tramite la creazione di zone flessibili e adatte a varie attività didattiche e l'apertura verso il territorio attraverso il coinvolgimento degli studenti e della comunità con attività extrascolastiche. Anche l'Inghilterra, dopo l'esito negativo a causa di complessità amministrative e dei costi elevati del programma *Building Schools for the Future* avviato nel 2004, ha proposto di utilizzare modelli di progettazione predefiniti attraverso l'emanazione del *Priority School for Building Programme* nel 2010. La standardizzazione mira a ridurre tempi e costi di progettazione e a migliorare la qualità minimizzando la variabilità dei risultati. Il Portogallo, invece, con l'iniziativa *Parque Escolar* [43] del 2007 per il rinnovamento degli istituti secondari, ha adottato un approccio che non segue una tipologia edilizia standard, ma è concepito per rispondere alle specifiche esigenze di ciascun istituto scolastico, per poter soddisfare gli obiettivi pedagogici e garantire la durabilità, l'integrazione con il territorio e la

[26] Da queste ricerche emerge un contesto normativo diversificato e complesso che non permette un'analisi comparativa dettagliata: in alcuni paesi, infatti, esistono norme nazionali prescrittive specifiche per la progettazione e la costruzione di nuovi edifici scolastici, in altri, sono disponibili documenti orientativi non vincolanti che indirizzano i progettisti riguardo ai requisiti e agli standard richiesti, mentre in altri ancora si riscontra una molteplicità di leggi e regolamenti indipendenti e eterogenei, provenienti da ambiti differenti.

sostenibilità dell'intervento nel lungo periodo. Le iniziative intraprese in Australia, Inghilterra e Portogallo rappresentano alcuni dei casi più ambiziosi di programmi che hanno allocato risorse significative per la riqualificazione o la costruzione di edifici scolastici. Questi interventi non si limitano al semplice aggiornamento normativo, ma promuovono processi di innovazione culturale, una rivalutazione del ruolo dell'istituzione scolastica e una modernizzazione degli spazi destinati all'apprendimento come luoghi dinamici e inclusivi. A livello internazionale, infatti, esiste da tempo una forte sensibilità verso la qualità degli spazi destinati all'apprendimento, riconosciuta come elemento essenziale per promuovere l'innovazione educativa. Solo in alcuni casi, però, i governi hanno intrapreso riflessioni più ampie che hanno portato a una riorganizzazione e a un ripensamento più approfondito della concezione degli spazi destinati alla formazione. Questo approccio mira a creare una scuola inclusiva, flessibile e sostenibile, con ambienti dedicati allo studio, al confronto e al relax, capace di aprirsi al territorio per fungere da centro di aggregazione e promuovere iniziative culturali per tutta la comunità. La scuola si configura dunque come *community school* nel modello statunitense o come *civic center*, in quello nord-europeo. Dall'analisi del contesto internazionale emerge come altra direttrice di sviluppo, oltre all'apertura della scuola alla comunità, il superamento della rigida divisione tra aule e corridoi attraverso una distribuzione differente degli spazi, con ambienti polifunzionali e arredi flessibili che facilitano diverse modalità di apprendimento e rendono le aree di passaggio utilizzabili dalla comunità scolastica.

Il progetto *Innovative Learning Environments* (ILE) dell'OCSE[27], che ha proposto linee guida per la creazione di ambienti scolastici flessibili e multifunzionali, ha giocato un ruolo rilevante per approfondire il tema del rapporto tra spazio e processi di apprendimento. Infatti questo progetto [44], avviato nel 2010 e terminato nel 2013, invita a superare la tradizionale aula statica attraverso spazi

[27] L'OCSE (Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico) è un'organizzazione intergovernativa della comunità europea. La sua convenzione istitutiva è stata firmata a Parigi il 14 dicembre 1960 ed è entrata in vigore il 30 settembre 1961, sostituendo l'OECE (Organizzazione per la Cooperazione Economica Europea) creata nel 1948.

flessibili in grado di accogliere diversi metodi di insegnamento e favorire un coinvolgimento più attivo degli studenti. Il progetto *Creative Classrooms in Europe,* sviluppato dall'università di Salford, compie un ulteriore passo avanti, proseguendo il percorso iniziato dal progetto ILE. La ricerca ha dimostrato che le caratteristiche fisiche dell'ambiente scolastico condizionano il rendimento degli alunni [45].

Inoltre, in ambito europeo, istituzioni come il *Joint Research Centre* della Commissione Europea e il consorzio dei ministeri dell'Istruzione europei *European Schoolnet* hanno lanciato rispettivamente iniziative come *Creative Classroom* [46] e *Future Classroom Lab*. Questi progetti promuovono l'integrazione delle tecnologie nei contesti scolastici e sperimentano nuove configurazioni spaziali. Ad esempio, *Future Classroom Lab* è stato concepito come un laboratorio che esplora l'uso innovativo di attrezzature e tecnologie digitali, incoraggiando i docenti a sfruttare al massimo le possibilità offerte dagli spazi flessibili e a esplorare strategie didattiche più interattive e personalizzate. È formato dalle sei zone di apprendimento mostrate in Figura 17 e descritte brevemente di seguito; ognuna di queste mette in evidenza l'importanza di spazi diversi dall'aula tradizionale con i banchi allineati che supportino gli insegnanti nell'adozione di nuove strategie didattiche e facilitino l'utilizzo di nuove attrezzature e strumenti digitali. *Interact* è un'area in cui l'insegnante è posto di fronte agli studenti per accompagnarli direttamente nel loro percorso di apprendimento coinvolgendoli attivamente; *Investigate* permette agli alunni di apprendere attraverso l'esperienza diretta piuttosto che tramite l'ascolto passivo; *Create* è la zona destinata al lavoro di gruppo e alle attività pratiche per realizzare prodotti in base agli insegnamenti ricevuti; Exchange è un'area interattiva di scambio e collaborazione anche digitale; nella zona *Present* gli studenti possono condividere ciò che hanno creato e ricevere un riscontro da parte degli insegnanti; *Develop* è uno spazio destinato all'apprendimento informale e all'auto-riflessione, dove si possono svolgere i compiti scolastici in modo indipendente. Il progetto, tramite la stesura di un rapporto [47], fornisce indicazioni pratiche per supportare le scuole nell'adattamento degli spazi di apprendimento tramite piccole modifiche agli spazi didattici esistenti. Nel tempo, la guida ha inserito, come caso di studio pratico, l'esperienza di sei

scuole situate in Belgio, Francia, Germania, Portogallo, Spagna e Turchia che hanno incluso queste aree negli spazi a loro disposizione [48].

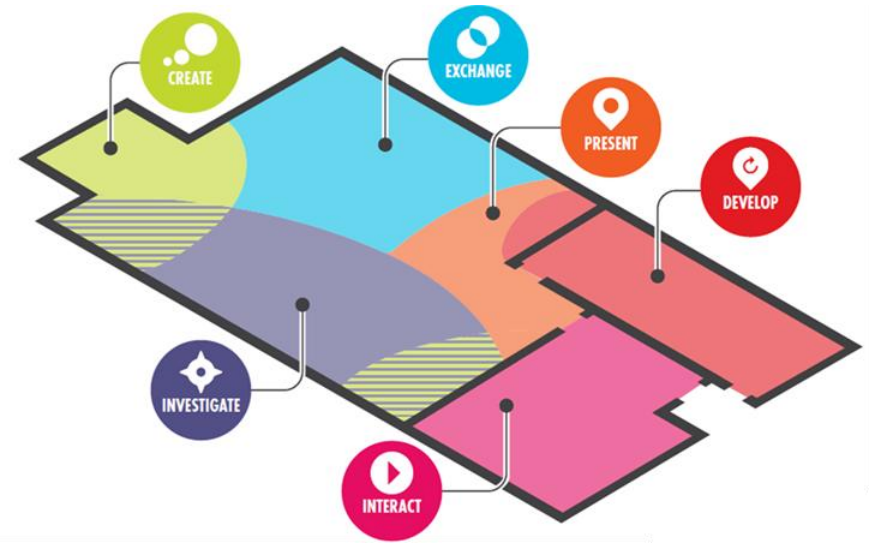


Figura 17 - Schema delle sei zone di apprendimento previste dal progetto Future Classroom Lab. Fonte: Attewell J. [48].

Anche Edutopia, un'iniziativa della George Lucas Educational Foundation, ha individuato sette zone essenziali per le scuole elementari: la *Discovery Zone,* in cui sono presenti strumenti per le attività manuali; la *News Zone*, per mostrare i lavori individuali, di classe, gli eventi o per presentare gli obiettivi di apprendimento; la *Supplies Zone,* destinata all'organizzazione e alla gestione del materiale didattico, di cancelleria e di supporto per studenti e insegnanti; la *Community Zone,* che favorisce la collaborazione e la riflessione collettiva, offrendo uno spazio in cui gli studenti possano discutere, fare collegamenti, porre domande e esplorare diverse prospettive, creando un ambiente di apprendimento interattivo e cooperativo; la *Quiet Zone,* area riservata al lavoro individuale per lo studio e la riflessione; la *Teacher Zone,* concepita come spazio personale e professionale per l'insegnante; la *Subject Zone,* dedicata all'organizzazione e alla gestione delle risorse didattiche specifiche di ogni materia e favorisce la connessione interdisciplinare.

Le iniziative analizzate dimostrano come le politiche educative a livello internazionale siano sempre più orientate a creare ambienti di apprendimento

capaci di adattarsi alle esigenze didattiche in continua evoluzione. Gli ambienti scolastici più efficaci superano l'idea di aula tradizionale, adottando criteri di flessibilità e adattabilità formando spazi in cui l'acquisizione di competenze trasversali, la collaborazione e la creatività diventano centrali nella formazione delle nuove generazioni. Il confronto con gli esempi internazionali risulta di grande valore, poiché offre idee progettuali e un metodo strutturato di approccio. Per quanto riguarda i paesi scandinavi, degli esempi di eccellenza sono l'Ørestad Gymnasium a Copenaghen e la Vittra School Telefonplan a Stoccolma. L'edificio scolastico danese, analizzato dalla ricerca *Quando lo spazio insegna* dell'INDIRE [49], offre una varietà di spazi di apprendimento e ambienti di studio innovativi nati dal confronto tra insegnanti, pedagoghi e architetti: oltre alle aule per le lezioni con il docente e ai laboratori applicativi, la scuola ospita numerosi spazi polivalenti, aree per il lavoro individuale o di gruppo e per lo svago. L'organizzazione spaziale è aperta e flessibile è agevolata dal fatto che ogni livello ha una configurazione a boomerang ruotata rispetto al precedente intorno alla scala che funge da perno centrale, in questo modo si crea un atrio a tutt'altezza verso cui si affacciano tutti i piani e attorno al quale si distribuiscono le attività [50]. Anche la Vittra School Telefonplan, riqualificazione di un ex complesso industriale Ericcson, ha una forte attenzione per i metodi di insegnamento innovativi e digitali con un progetto che si basa sulla flessibilità e sulla creazione di aree differenziate per l'apprendimento. Oltre agli spazi informali, a quelli per i lavori di gruppo e il teatro, i progettisti hanno creato un luogo personale e privato, chiamato "la caverna"[28] (Figura 18), in cui ciascuno può svolgere le proprie attività in silenzio.

[28] Questa tipologia di spazio era già stata proposta da David Thronburg come uno dei quattro modelli archetipici dell'apprendimento (il falò, l'abbeveratoio, la caverna e la vita). Esso è un ambiente raccolto che permette agli studenti di entrare in contatto con se stessi [51].



Figura 18 - Spazio per il lavoro di gruppo e sullo sfondo la caverna della Vittra School Telefonplan. Foto © Kim Wendt.

Inoltre, alcuni esempi di scuole australiane di successo sono la scuola secondaria di secondo grado Ivanhoe Grammar (Figura 19) a Doreen, le cui caratteristiche principali sono l'uso del colore e della trasparenza, la flessibilità e la varietà degli spazi di apprendimento, e la scuola media Braemar College (Figura 20) a Woodend, in cui lo spazio esterno viene sfruttato come ambiente di apprendimento grazie al clima mite.



*Figura 19 – Scuola Ivanhoe Grammar **A.** Entrata principale, **B.** Cortile interno, **C.** Pianta del primo piano. Foto © John Gollings, Disegno Planimetria © McBride Charles Ryan.*

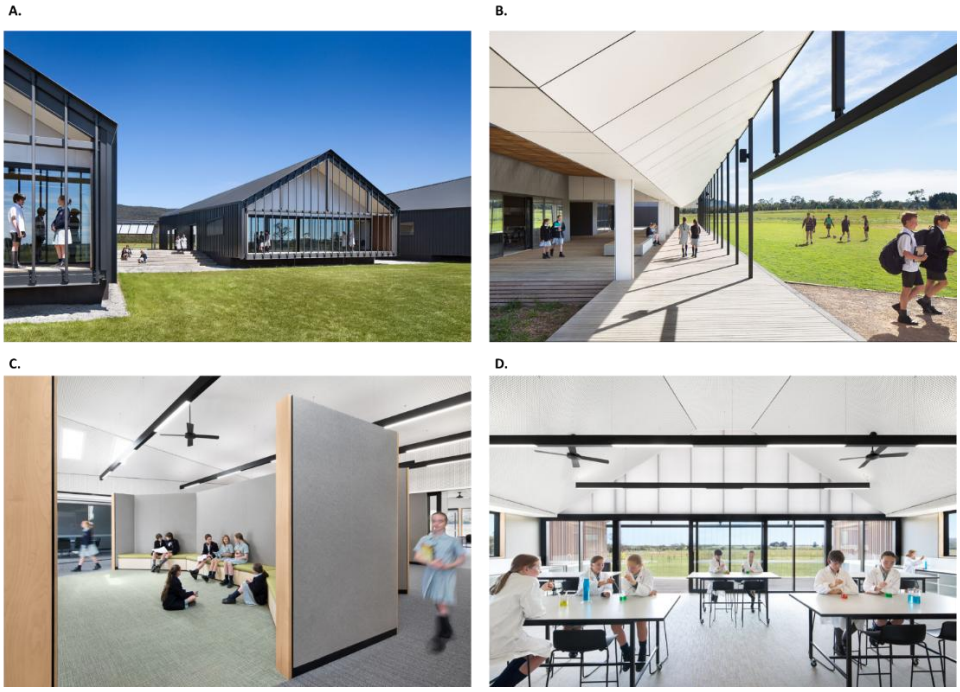


*Figura 20 – Scuola Braemar College **A.** Vista esterna **B.** Spazio di connessione tra l'interno e l'esterno **C.** Spazio interno comune **D.** Laboratorio di scienze. Foto © Emily Bartlett.*

2.2.2. Le proposte italiane

Anche l'architettura scolastica italiana è stata, fin dagli inizi del Novecento, un terreno fertile di sperimentazione, in cui i modelli spaziali si sono adattati e trasformati per rispondere alle esigenze pedagogiche, sociali e culturali. Dall'introduzione del metodo Montessori nel 1907, che ha posto l'accento sull'importanza della flessibilità degli spazi per stimolare creatività e crescita, fino alle proposte di architetti come Giuseppe Terragni e Giovanni Michelucci, la scuola ha progressivamente assunto il ruolo di luogo centrale per la formazione e la socializzazione. Un esempio paradigmatico è l'Asilo Sant'Elia di Terragni a Como, realizzato nel 1937, che, attraverso una distribuzione funzionale attorno a una corte aperta, applica le più aggiornate teorie pedagogiche dell'epoca e tecniche costruttive all'avanguardia. Michelucci, negli anni '60, con una visione anticipatrice rispetto al dibattito attuale sull'innovazione scolastica, ha proposto una scuola aperta alla città [52], dove

l'aula non è il fulcro [53], ma uno spazio fra molti, capace di promuovere un apprendimento inclusivo e non convenzionale. Introduce il concetto di "non-aula" a partire dall'idea di "scuola all'aperto" e sottolinea le potenzialità degli spazi serventi che, se utilizzati correttamente, possono diventare ambienti chiave per promuovere nuove modalità di apprendimento. Tali riflessioni, ancora oggi centrali nel dibattito sull'innovazione scolastica, trovano riscontro, ad esempio, nelle Linee guida del D.M. 11 aprile 2013, nei report della Fondazione Giovanni Agnelli, nelle ricerche condotte da Indire, che verranno analizzate in seguito, e nelle proposte di progettisti come Renzo Piano e Mario Cucinella, che uniscono sostenibilità ambientale, benessere e innovazione didattica. Inoltre, la pandemia ha ulteriormente accelerato la riflessione su spazi scolastici flessibili, sicuri e capaci di integrare esperienze didattiche tradizionali e digitali, all'aperto e al chiuso. L'architetto Renzo Piano risponde alla sfida lanciata dal maestro Franco Lorenzoni nell'articolo *Cari architetti, rifateci le scuole!* su *Il Sole 24 Ore* [54] disegnando con poche parole la sua scuola ideale. Sollevato dal terreno, il piano terra, permeabile e trasparente, invita la città a entrare, trasformando l'edificio in uno spazio di scambio e connessione con il quartiere, il primo piano è quello che ospita gli spazi di studio, mentre il tetto è concepito per essere il luogo della libertà e dell'esplorazione. Inoltre, il progettista afferma che "l'edificio deve trasmettere un messaggio sul piano didattico: si costruisce con leggerezza, si risparmiano risorse e i materiali si scelgono tra quelli che hanno la proprietà di rigenerarsi in natura. Quindi nel nostro edificio abbiamo deciso di usare il legno, che non è solo bello, sicuro, antisismico e profumato: è innanzitutto energia rinnovabile" [55]. Anche per l'architetto Mario Cucinella, che si è occupato degli spazi didattici attraverso numerosi progetti e ricerche, i luoghi dell'istruzione devono essere flessibili, inclusivi e verdi, concepiti per essere di supporto alle attività formative e costruiti nell'ottica della sostenibilità per promuovere il benessere dell'intera comunità scolastica:

> "Solo attraverso uno spazio ben progettato possiamo stimolare la creatività e, per questo, dobbiamo abbandonare lo schema standard della scuola rigida, che ancora ritroviamo in molte strutture, a favore di uno più flessibile capace di

> generare edifici scolastici belli sotto l'aspetto architettonico ed efficienti dal punto di vista energetico. Edifici che siano studiati a partire da un ripensamento delle funzioni che va di pari passo con l'evoluzione dei modelli pedagogici e di insegnamento. Quando una scuola è bella, sostenibile e ben distribuita, riesce a trasmettere ai suoi allievi valori come il rispetto per l'ambiente e il territorio". [56]

L'architetto con il suo studio di progettazione Mario Cucinella Architects ha approfondito modalità e spazi dell'educazione a partire dall'idea generale del benessere che è stata declinata secondo i tre macro-ambienti: Spazi, Ambiente e Città-Comunità, che sono poi diventati tre indicatori qualitativi rappresentativi del possibile valore aggiunto di un edificio scolastico. Questi non solo rappresentano una guida alla pratica progettuale per la realizzazione di nuove scuole o per l'intervento su quelle esistenti, ma riflettono anche l'integrazione tra funzionalità, sostenibilità ambientale e connessione con il contesto urbano e sociale. In particolare, "Spazi" si riferisce alla qualità, flessibilità e fruibilità degli ambienti di apprendimento interni ed esterni in riferimento alle nuove finalità pedagogiche, "Ambiente" evidenzia l'importanza delle variabili che influenzano la qualità dello spazio (luce, aria, rapporto con la natura e temperatura), con particolare attenzione agli aspetti legati all'efficienza energetica e al comfort. Infine, l'indicatore "Città-Comunità" sottolinea il ruolo dell'edificio come punto di aggregazione e interazione con il quartiere, valorizzando la scuola non solo come luogo di formazione, ma anche come elementi di miglioramento del tessuto urbano e sociale. Ogni indicatore viene scomposto in diversi parametri come mostrato nella Figura 21.

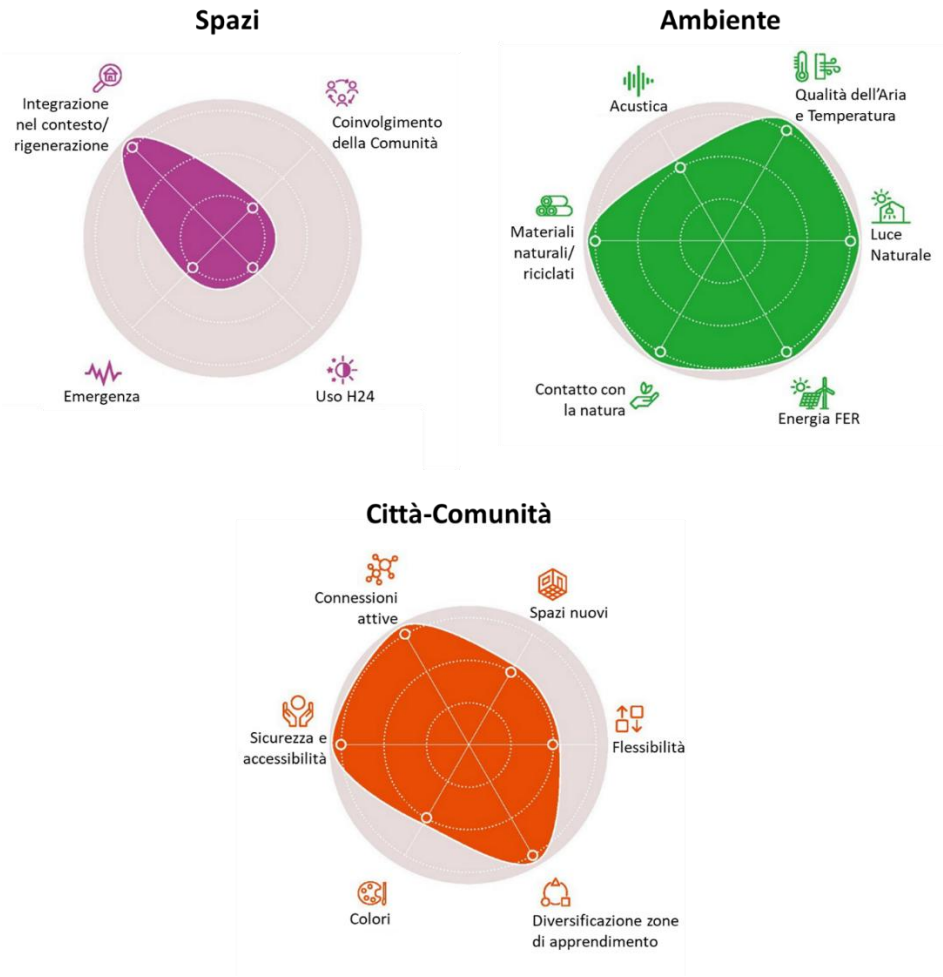


Figura 21 - Indicatori di qualità degli spazi scolastici. Immagine tratta dal libro "Architettura dell'Educazione. Strumenti Progettuali" di Mario Cucinella Architects [56].

Questi parametri vengono analizzati in modo approfondito nel primo volume della collana *I Quaderni*, in cui vengono anche esaminate alcune soluzioni progettuali dello studio Mario Cucinella Architects, valutate in base agli indicatori. Tra i progetti esaminati, si distingue la scuola dell'infanzia di Guastalla, i cui spazi interni sono caratterizzati da forme sinuose e dall'impiego di materiali naturali che conferiscono calore all'ambiente, evocando emotivamente l'immagine del ventre della balena di Pinocchio, come illustrato nella Figura 22. Tale configurazione promuove un'interazione fluida e armoniosa tra gli spazi interni ed esterni, in cui ogni area, inclusi gli spazi di servizio, è progettata per svolgere un ruolo attivo e significativo. Tale approccio garantisce

che nessuna zona venga relegata a una funzione marginale, ma contribuisca invece all'equilibrio complessivo e alla piena funzionalità dell'edificio. Questo si integra armoniosamente con il paesaggio circostante grazie all'utilizzo di ampie vetrate e di spazi di connessione che lo collegano al giardino e ai due elementi esterni di particolare rilievo: il percorso sensoriale e il giardino d'inverno.



Figura 22 - Interno dell'asilo nido Iride di Guastalla. Foto © Moreno Maggi.

Altri due progetti rilevanti caratterizzati dal grande spazio centrale che funge da fulcro tra gli ambienti sono la nuova scuola primaria di Montebelluna (Figura 23), costituita da sei padiglioni disposti intorno al cortile centrale che si integrano con il contesto esterno, e il campus di San Lazzaro di Savena (Figura 24) in cui due edifici si affacciano sull'agorà, ambiente aperto di forma circolare che ha funzione di distribuzione degli spazi e ingresso principale per gli ambienti comuni occupati fuori dall'orario scolastico.



Figura 23 - Il cortile centrale della scuola di Montebellaluna. Render © Mario Cucinella Architects.



Figura 24 - Campus di San Lazzaro di Savena, progetto di Mario Cucinella Architects. Foto © Walter Vecchio.

Le ricerche analizzate precedentemente hanno condotto non solo alla realizzazione di progetti di particolare rilevanza, ma anche allo sviluppo di specifiche linee guida per le scuole della regione Emilia-Romagna, volte a consolidare un approccio metodologico replicabile e a orientare future iniziative

progettuali. Il documento [57], redatto dall'Assessorato Scuola, Università, Ricerca e Agenda digitale della Regione e il dipartimento di ricerca e sviluppo dello studio progettuale dell'architetto Mario Cucinella, costituisce uno strumento operativo che possa guidare non solo le istituzioni e i progettisti, ma anche il corpo docente e gli stessi studenti tramite un processo partecipato, alla realizzazione di nuove scuole. Anche altre regioni italiane hanno promosso la qualità e l'innovazione nella progettazione degli edifici scolastici sviluppando normative e programmi specifici. Tra questi, si distingue la revisione delle direttive di edilizia scolastica in Alto Adige del febbraio 2009 (Regolamento di attuazione ai sensi dell'articolo 10 della Legge Provinciale 21 Luglio 1977 n. 21 [58]), che concede alle singole scuole una maggiore libertà nella definizione dei bisogni spaziali, costringendole alla definizione di specifici progetti operativi a indirizzo pedagogico (art. 104), e pone particolare attenzione al coinvolgimento attivo dei membri della comunità scolastica nelle procedure di progettazione, approvazione ed esecuzione per la ristrutturazione e/o costruzione delle scuole. Con l'obiettivo di fornire indicazioni metodologiche per affrontare le fasi iniziali del processo progettuale, nel biennio 2017-2018 è stata organizzata la mostra-laboratorio *Progettare scuole insieme tra pedagogia, architettura e design*, che ha poi portato alla pubblicazione di un libro guida [59]. Inoltre, a partire dagli anni '80, e con una progressiva intensificazione negli ultimi decenni, l'utilizzo del concorso di progettazione ha favorito la realizzazione di numerosi edifici scolastici di vario ordine e grado, progettati per accogliere e tradurre in architettura i principi didattici innovativi, rendendo l'Alto Adige pionieristico in ambito sia pedagogico sia architettonico [60]. La rivista Turris Babel, che aveva già evidenziato il nuovo orientamento dell'architettura scolastica della provincia di Bolzano, sottolineando l'importanza del dialogo tra pedagogia e architettura come elemento centrale del processo progettuale sia delle scuole dell'infanzia e primarie [61] sia di quelle secondarie [42], ha proposto una selezione di 28 scuole, realizzate prevalentemente tramite concorsi di progettazione banditi tra il 2010 e il 2020, considerate esempi significativi del processo di trasformazione in corso [62]. Il caso dell'Alto Adige si è affermato come riferimento per altre regioni, come per esempio la Sardegna che con il progetto Iscola richiede alle scuole di redigere un documento pedagogico da includere nella

documentazione preliminare alla progettazione prima di stabilire l'entità dei finanziamenti. Questo approccio si riflette anche sui concorsi di progettazione banditi nella regione dal 2017 in cui le giurie spesso includono una figura rappresentante della componente pedagogica e i criteri di valutazione tengono conto della coerenza con il progetto pedagogico proposto. A questi casi di concorsi a livello provinciale o regionale, caratterizzati dalla richiesta di integrazione tra pedagogia e architettura come requisito preliminare del processo progettuale, si affiancano i concorsi promossi su scala nazionale. Il primo bando ministeriale per la costruzione di 52 nuovi istituti scolastici, Scuole Innovative, è stato preceduto da un hackathon in cui gli studenti hanno immaginato i nuovi ambienti scolastici del futuro a partire dai punti definiti dal Decreto Ministeriale n.860 del 3 novembre 2015 [63]. Il concorso #NUOVESCUOLE, previsto dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, mira alla costruzione di nuovi istituti scolastici entro il 2026 sulla base di Linee guida [64] elaborate dal gruppo di lavoro nominato dal Ministro dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca Patrizio Bianchi con decreto del 25 gennaio 2022. Questi edifici dovranno essere sostenibili nei materiali e nelle tecniche costruttive, sicuri, a basso consumo energetico e aperti al territorio.

In Italia, il dibattito sugli spazi scolastici è arricchito da numerose esperienze di successo. Tra queste, l'iniziativa *Rigenerazione Scuola* [65], promossa dal MIUR come piano attuativo degli obiettivo dell'Agenda 2030 dell'ONU, affronta in modo sistematico i temi della sostenibilità, basandosi su quattro pilastri: la rigenerazione del sapere, dei comportamenti, delle infrastrutture e delle opportunità offerte dai nuovi modelli progettuali. Il MIUR collabora inoltre con l'Istituto Nazionale di Documentazione, Innovazione e Ricerca Educativa (INDIRE), punto di riferimento per gli studi sulla didattica innovativa fin dalla sua nascita nel 1925, per sviluppare attività di ricerca e sperimentazione nell'ambito scolastico. Questa sinergia ha dato origine a una ricerca avviata nel 2012, che ha evidenziato i primi segnali di trasformazione nella funzione degli spazi scolastici. I risultati di tale studio hanno fornito un contributo significativo alla definizione delle nuove Linee guida per l'edilizia scolastica, pubblicate dal MIUR nel 2013. Dalle ricerche dell'Indire sono derivati diversi programmi e progetti, come *Abitare la scuola* e *Quando lo spazio insegna*, che hanno portato all'attenzione

nazionale la necessità di affrontare il tema delle scelte architettoniche, non tanto nel loro aspetto tecnico ed estetico ma in una prospettiva didattico-pedagogica. Per sostenere l'innovazione in atto nelle scuole italiane e indirizzare i processi di trasformazione negli edifici l'Istituto ha organizzato anche numerosi convegni come quello internazionale del 2016 a Roma *Dall'aula all'ambiente di apprendimento*, titolo anche di una pubblicazione [66]. Molti libri, infatti, sono il frutto del lavoro del gruppo di ricerca Indire sulle architetture scolastiche, come per esempio *Spazi educativi e architetture scolastiche: linee e indirizzi internazionali* nel 2016 [39], *The Classroom has Broken. Changing School Architecture in Europe and Across the World* [67] nel 2018 e il volume *Fare didattica in spazi flessibili. Progettare, organizzare e utilizzare gli ambienti di apprendimento a scuola* [68] che fornisce spunti di riflessione sul rapporto fra pedagogia e architettura oltre a proporre soluzioni e una raccolta di casi di studio concreti per la riorganizzazione degli ambienti scolastici senza interventi strutturali e con risorse economiche modeste. Lo scopo è quello di supportare processi di riorganizzazione degli ambienti di apprendimento e sostenere un'idea di benessere scolastico che richiama i moderni standard di comfort e abitabilità. Le pubblicazioni più recenti che raccolgono l'impegno di ricerca e sensibilizzazione dell'Indire sul tema sono *Architetture educative* [69], che propone la lettura dell'ambiente di apprendimento di 15 scuole italiane di recente costruzione con uno sguardo particolare all'uso e all'adattamento degli spazi educativi rispetto alle attività formative che vengono svolte all'interno, e *Lo spazio della scuola. Architetture scolastiche e cicli pedagogici* [70] in cui viene analizzato il ruolo della comunità scolastica nel cambiamento offerto dalla costruzione di un nuovo edificio scolastico o dalla ristrutturazione degli spazi esistenti, basandosi sulle esperienze condotte dall'istituto nel periodo 2016-2022. Anche la Fondazione Agnelli fornisce un contributo fondamentale in questo campo attraverso numerosi studi, iniziative e pubblicazioni [71]. Una di queste è il progetto *Torino fa scuola* promosso dalla Fondazione Giovanni Agnelli e dalla Compagnia di San Paolo con il Comune di Torino e la Fondazione per la Scuola che fornisce degli esempi operativi e replicabili attraverso la riqualificazione di due scuole medie di Torino. In particolare nella scuola Enrico Fermi, costruita nel 1965 (Figura 25), sono stati ripensati gli ambienti interni,

con il raggruppamento in aule tematiche, ed esterni, organizzato in diversi ambiti, il sistema di accesso e l'involucro che viene ridisegnato attraverso l'aggiunta di telai d'acciaio che costituiscono nuovi volumi per le attività all'aperto (Figura 26).

A.



B.



Figura 25 – Scuola Enrico Fermi prima dell'intervento A. atrio centrale B. cortile. Foto © Francesca Cirilli.

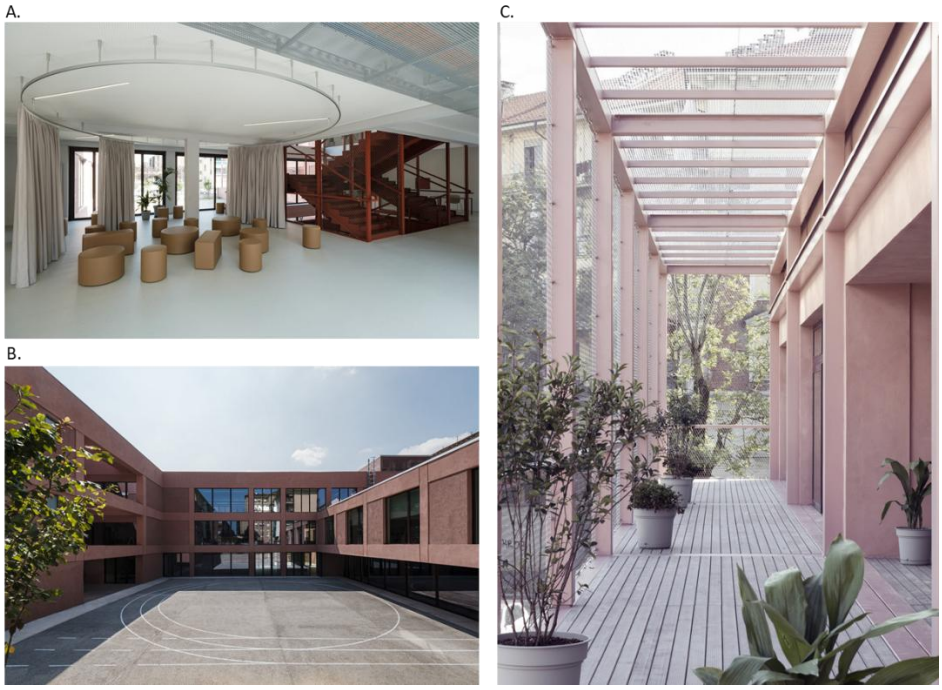


Figura 26 - Scuola Enrico Fermi dopo l'intervento A. atrio centrale B. cortile C. spazio esterno nei volumi esterni aggiunti. Foto © Francesca Cirilli; Render © BDR bureau.

Il tema della riqualificazione delle scuole esistenti è stato affrontato anche da una ricerca del Dipartimento di Architettura DIDA dell'Università degli Studi di Firenze [72], mentre altri esempi di ristrutturazioni virtuose di edifici scolastici sono state progettate dallo studio dell'architetto Mario Cucinella. L'intervento di riqualificazione architettonica secondo le nuove esigenze in un edificio storico come quello della scuola Gabelli a Belluno ha rappresentato una sfida: pur con un margine di intervento limitato, vengono considerati sia il comfort, attraverso l'utilizzo di strategie energetiche attive e passive, sia gli spazi interni, mediante la riconfigurazione degli ambienti esistenti e l'integrazione di nuove funzioni. Un altro esempio è rappresentato dal progetto di ActionAid *OpenSpace – Spazi di Partecipazione Attiva per la Comunità Educante* che ha l'obiettivo di progettare interventi a basso costo ma a grande impatto sociale che possano rafforzare il senso di comunità e contrastare la dispersione scolastica. Dopo un processo di progettazione partecipata che ha coinvolto non solo professionisti ma anche docenti, studenti e genitori, sono stati scelti degli ambienti su cui realizzare la proposta di intervento: il corridoio sovradimensionato e sottoutilizzato per la

scuola ICS MT Calcutta di Milano e il giardino per la scuola ICS Grimaldi Lombardi di Bari. Anche se già Maria Montessori, Celestine Feinet, Bruno Ciari e Mario Lodi avevano esteso l'ambiente scolastico al giardino e a tutte le aree esterne utilizzabili, il tema della progettazione degli spazi educativi all'aperto è ancora oggi centrale e per questo è stato indagato in molte pubblicazioni che hanno proposto delle strategie per valorizzare i cortili delle scuole [73] o analizzato come questi ambienti possano diventare anche occasioni per la rigenerazione funzionale e sociale della città [74]; inoltre a questo tema è stato dedicato anche un numero della rivista Contesti [75].

Anche la recente emergenza pandemica ha incentivato l'introduzione di innovazioni progettuali volte a ripensare le caratteristiche spaziali e funzionali degli edifici scolastici, così come le modalità di gestione degli ambienti interni e degli spazi esterni [76]. Ciò risulta pienamente in linea con le indicazioni che promuovono l'interazione degli alunni con l'ambiente circostante e lo svolgimento di attività didattiche all'aperto, non solo come risposta alle esigenze poste dalla crisi sanitaria, ma soprattutto a fini pedagogici. In questo contesto si collocano le ricerche nate dalla collaborazione tra il Future Urban Legacy Lab del Politecnico di Torino e la Fondazione Agnelli che mirano a fornire degli strumenti per la rigenerazione del patrimonio edilizio della scuola italiana affrontando i temi della sicurezza, dell'ambiente e dell'innovazione didattica. Il report *Fare Spazio* [77] ha lo scopo di aiutare le scuole in vista della riapertura post-pandemica proponendo 14 idee progettuali reversibili. Queste soluzioni si concentrano sull'individuazione di spazi scolastici precedentemente non impiegati per le lezioni, suggerendo interventi poco invasivi per consentirne l'utilizzo alla ripresa delle attività didattiche nel rispetto delle misure di distanziamento. La collaborazione tra i due enti di ricerca è proseguita anche dopo l'emergenza sanitaria con il progetto *Re-school* che "si propone di supportare gli enti territoriali nell'individuazione di priorità di intervento sul patrimonio di edilizia scolastica; nella pianificazione strategica a scala regionale e nella definizione di linee guida regionali di intervento sugli edifici scolastici" [78].

Infine, in questo contesto, alcune ricerche hanno delineato concretamente dei modelli spaziali capaci di rispondere alle trasformazioni in atto, sottolineando

l'importanza dell'integrazione tra pedagogia e architettura. L'istituto di ricerca Indire nel 2012 ha individuato all'interno del Manifesto *1+4 Spazi educativi per la scuola del terzo millennio* dei modelli di ambienti di apprendimento in base alle differenti modalità di apprendimento per superare l'idea di aula come il solo riferimento spaziale per la didattica. Questo, che ha costituito il modello di riferimento per Linee guida del MIUR, individua i cinque spazi mostrati in Figura 27, di cui:

- "1" lo spazio di gruppo, l'ambiente di apprendimento quotidiano della classe in cui si costruisce l'identità del gruppo attraverso lavori e progetti collaborativi, presentazioni o discussioni condivise;
- "4" sono gli spazi della scuola complementari agli ambienti della didattica quotidiana: l'Agorà, per accogliere l'intera comunità scolastica, lo spazio informale, per lo svago durante le pause, l'area individuale, per lo studio individuale, e l'area per l'esplorazione, per l'apprendimento pratico.

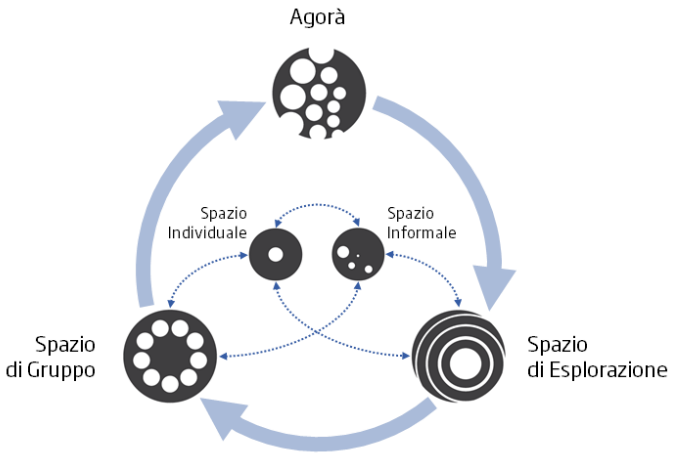


Figura 27 - Gli spazi educativi e le loro relazioni secondo la ricerca dell'Indire.

Sulla base di questa ricerca, le Linee Guida pubblicate dal MIUR del 2013 integrano nell'edificio scolastico i seguenti cinque luoghi di apprendimento basati su una logica di tipo prestazionale:

- Spazio classe: prevede la centralità dello studente che in quest'area assiste a lezioni, riceve indicazioni da parte del docente e svolge verifiche;
- Spazio laboratorio: luogo in cui lo studente sperimenta attraverso l'osservazione, l'analisi della realtà e la produzione di artefatti anche con l'ausilio di tecnologie specifiche in ambienti immersivi che riproducono situazioni reali;
- Spazio di gruppo: consente una distribuzione flessibile del gruppo classe che, anche grazie ad arredi mobili, vive diversi momenti di apprendimento individuale e collettivo;
- Spazio individuale: è pensato per momenti di apprendimento autonomo in cui si può accedere ad informazioni tramite strumenti tecnologici;
- Spazio informale: ha lo scopo di ospitare gli studenti per riposare o svolgere attività non legate a specifiche discipline scolastiche;
- Agorà: attrezzato con arredi adeguati, è il luogo della scuola finalizzato ad accogliere eventi pubblici destinati agli studenti e alla comunità;
- Palestra: accoglie sia all'interno che nelle aree verdi adiacenti anche un'utenza esterna e oltre l'orario scolastico per svolgere attività sportive;
- Mensa: non si limita ad esser uno spazio per la consumazione dei pasti, ma diventa laboratorio di educazione alimentare e addirittura area per coltivare frutta e ortaggi.

Gli studi condotti e l'esperienza progettuale hanno portato anche l'architetto Mario Cucinella e il suo gruppo di ricerca ad approfondire le tipologie di spazi dell'educazione, individuandone otto come mostrato in Figura 28:

- Zona dinamica: spazio multifunzionale per lo svolgimento di attività formali ed informali;
- Zona di Comunità: luogo situato in posizione strategica all'interno dell'edificio è utilizzato per incontri ed eventi di diversa natura;
- Zona di Scoperta: spazio dove si svolgono attività volte allo sviluppo di nuove competenze per mezzo di diversi metodi di apprendimento;
- Zona di Proiezione: luogo concepito per la presentazione frontale, alla condivisione di contenuti e alla proiezione di prodotti multimediali;

- Zona di Progettazione: spazio destinato alle attività di gruppo di tipo laboratoriale;
- Zona del Silenzio: area protetta dal punto di vista acustico ideale per la concentrazione, la lettura e lo studio;
- Zona Individuale: spazio raccolto, di piccole dimensioni destinato alla concentrazione e ad attività individuali;
- Spazi aperti: aree esterne collegate con lo spazio educante adibite ad attività ludiche e didattiche.

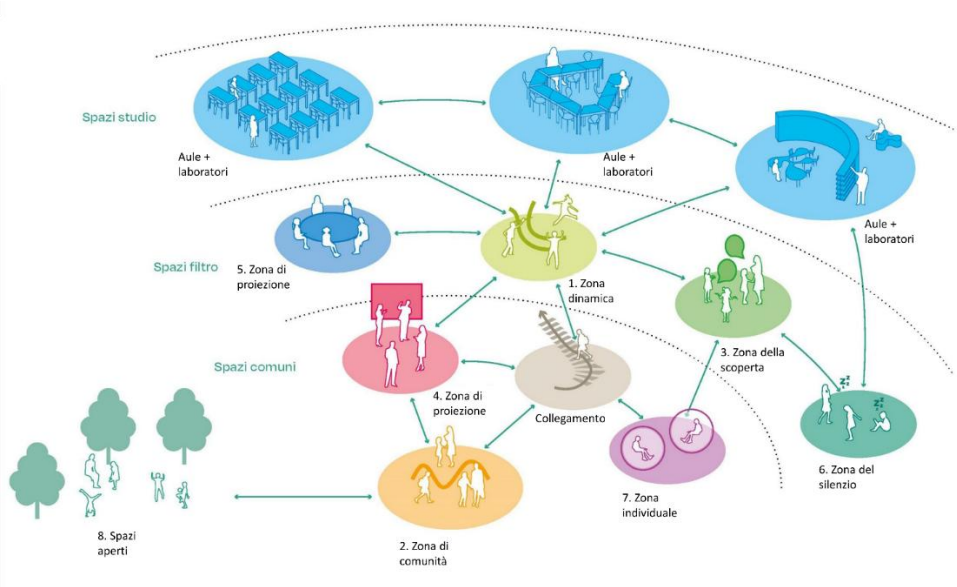


Figura 28 - I nuovi tipi di spazi. Immagine tratta dal libro "Architettura dell'Educazione. Strumenti Progettuali" di Mario Cucinella Architects [56].

3. LA SITUAZIONE ATTUALE DELL'EDILIZIA SCOLASTICA IN ITALIA

Intorno a me giacevano sul pavimento
matite e pastelli, colori divini, azzurri
che spiravano freschezza, verdi smarriti
al limite dello sbigottimento.
Bruno Schulz

L'edilizia scolastica italiana risulta difforme per periodo di costruzione, tecniche costruttive utilizzate e distribuzione funzionale; essa è stata infatti influenzata dalle diverse trasformazioni sociali, politiche e culturali che si sono succedute nel corso degli anni, come descritto nel capitolo precedente. Dunque, la riflessione sugli spazi educativi del futuro si scontra inevitabilmente con lo stato attuale di un patrimonio tanto vario e diffuso, spesso non idoneo ad accogliere i cambiamenti del sistema scolastico e le sfide che dovrà affrontare.

Per questo la conoscenza approfondita dello stato del patrimonio esistente, anche rispetto alle esigenze prestazionali (energetiche e antisismiche) e funzionali attuali, costituisce uno strumento fondamentale ai fini di una pianificazione attenta e mirata degli interventi da attuare per disporre di scuole sicure, energeticamente efficienti e idonee ad ospitare gli spazi di una didattica rinnovata, aspetti che non possono essere demandati esclusivamente alle nuove scuole:

> "Una nuova generazione di scuole che faranno la differenza qualitativa, se saranno capaci di rispondere anche ai bisogni educativi e sociali, oltre che di sostenibilità strutturale e gestionale, di quelle realtà più a rischio povertà educativa, ma che non saranno risolutive delle esigenze diffuse di sicurezza e sostenibilità a cui devono rispondere i circa 40mila edifici scolastici italiani." [79]

Di seguito viene presentato un quadro di sintesi della situazione attuale, elaborato a partire dalle informazioni contenute nelle principali pubblicazioni sul tema, tra cui il *Rapporto sull'edilizia scolastica*, promosso dalla Fondazione Agnelli, *Ecosistema scuola. XXIII Rapporto nazionale sulla qualità degli edifici e dei servizi scolastici* di Legambiente e il XXII Rapporto *Osservatorio civico sulla*

sicurezza a scuola di Cittadinanzattiva. Il *Rapporto sull'edilizia scolastica*, pubblicato nel 2020 nell'ambito del programma Education della *Fondazione Agnelli*, offre un'analisi approfondita delle condizioni degli edifici scolastici in Italia. Le elaborazioni presentate si basano sui dati rilasciati dall'Anagrafe dell'edilizia scolastica aggiornati al 20 ottobre 2019 e delineano un quadro preoccupante evidenziando le principali criticità. Analogamente, il *XXII Rapporto Osservatorio civico sulla sicurezza a scuola* di Cittadinanzattiva utilizza come riferimento i dati dell'Anagrafe aggiornati all'anno scolastico 2020-2021 per analizzare la situazione attuale degli edifici scolastici esistenti. Tuttavia, si distingue per l'aggiunta di un resoconto dettagliato sui crolli avvenuti nelle scuole tra settembre 2023 e settembre 2024, fornendo un quadro aggiornato e critico delle problematiche di sicurezza. Infine, l'indagine annuale condotta da Legambiente sulla qualità dell'edilizia scolastica fornisce un'analisi dettagliata dello stato di conservazione di 6.343 edifici scolastici situati in 93 comuni capoluogo di provincia. I dati utilizzati nell'elaborazione del rapporto sono stati raccolti tramite un questionario somministrato nell'anno 2022.

Per garantire un'analisi più completa e accurata, sono stati inclusi ed elaborati anche i dati più recenti dell'Anagrafe Nazionale dell'Edilizia Scolastica, pubblicati sul sito ufficiale del MIUR nel settembre 2023 e relativi all'anno scolastico 2020/2021. Questi dati, rappresentando l'aggiornamento più recente disponibile al momento della stesura, costituiscono una fonte preziosa per valutare lo stato attuale del patrimonio edilizio scolastico in Italia, fornendo informazioni dettagliate e rilevanti per l'approfondimento della ricerca. Per questo sono stati elaborati per produrre nuove analisi e interpretazioni, con l'obiettivo di integrare e ampliare le informazioni già presenti nei report precedenti.

L'Anagrafe Nazionale dell'Edilizia Scolastica rappresenta uno strumento conoscitivo essenziale per valutare la consistenza, lo stato e la funzionalità del patrimonio edilizio scolastico. È concepita come una base informativa indispensabile per supportare la programmazione e la pianificazione degli interventi nel settore. Il Sistema Nazionale dell'Anagrafe dell'Edilizia Scolastica è stato istituito attraverso una serie di accordi tra Stato, Regioni ed Enti locali, a partire dall'Accordo raggiunto in Conferenza Unificata il 6 febbraio 2014

secondo il quale: “il Sistema Nazionale dell’Anagrafe dell’Edilizia Scolastica prevede due componenti: una centrale SNAES che garantisce al Ministero dell’Istruzione, dell’Università e della Ricerca le conoscenze necessarie all’adempimento della sua missione istituzionale di indirizzo, pianificazione e controllo e un’altra, distribuita in “nodi regionali” denominati ARES, che assicura la programmazione, a livello regionale, del patrimonio edilizio e la gestione del medesimo su base provinciale, comunale e di singola unità scolastica, in un quadro di integrazione e condivisione delle informazioni con i sistemi informativi degli Enti locali stessi” [80]. Nonostante l’emanazione della legge del 1996 che ne sanciva l’istituzione, l’Anagrafe è rimasta incompleta per molti anni, con rilevazioni limitate a specifici contesti regionali. Solo a partire dall’agosto 2015, grazie a un nuovo accordo in Conferenza Unificata, si è riusciti a integrarla in un sistema nazionale operativo, rendendola accessibile tramite il portale “Scuola in Chiaro” del MIUR. In questo contesto, è stato sviluppato un software avanzato denominato "ARES 2.0", che ha migliorato le modalità di gestione e raccolta dei dati. Nonostante ciò, il quadro conoscitivo sull’edilizia scolastica risulta ancora sconnesso (Figura 29) e difficilmente interrogabile nelle banche dati ad oggi disponibili. In gran parte, le lacune sono attribuibili alle fonti dirette e indirette che non hanno o non trasmettono le informazioni sui fabbricati. Tra le criticità che ostacolano una consultazione immediata e accurata dei dati si segnala la duplicazione delle informazioni relative a 14.711 edifici scolastici, probabilmente imputabile alla non univocità dei codici nel caso di alcuni Istituti Comprensivi. Queste problematiche tecniche ne hanno limitato l’efficacia come strumento di pianificazione e monitoraggio degli interventi. Inoltre, per definizione, l’Anagrafe esclude alcuni edifici, come quelli situati nelle Province autonome di Bolzano e Trento, nella Regione Valle d’Aosta e quelli che ospitano scuole paritarie, limitando la completezza del quadro fornito a livello nazionale.

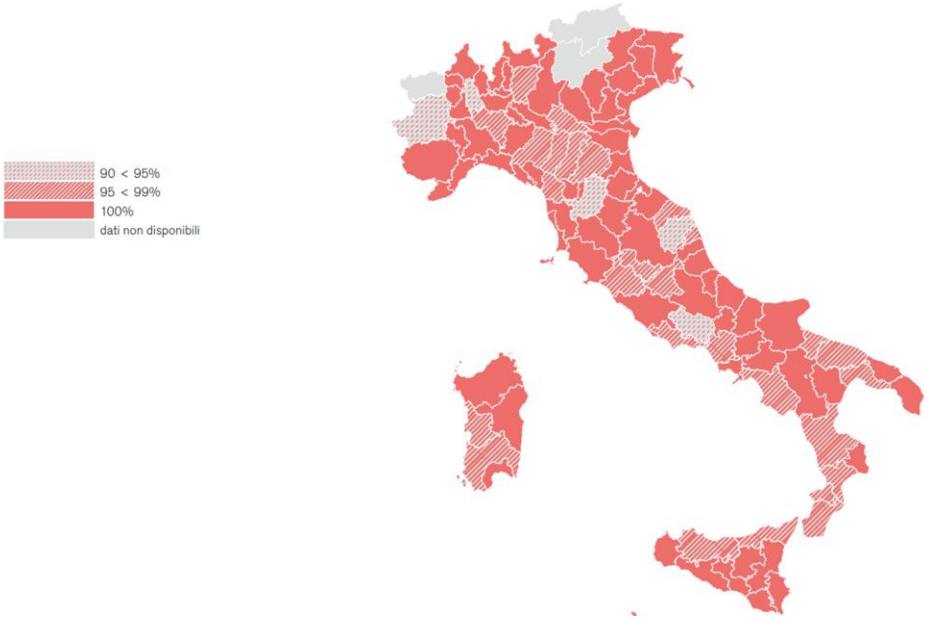


Figura 29 – Tasso di copertura dell'Anagrafe dell'Edilizia Scolastica (settembre 2018). Fonte: Future Urban Legacy Lab [78].

Secondo gli ultimi dati disponibili dall'Anagrafe, l'edilizia scolastica in Italia comprende complessivamente 40.133 edifici attivi distribuiti tra i diversi ordini e gradi di istruzione. È importante sottolineare che questo valore è soggetto a variazioni non solo in funzione della costruzione di nuove scuole, ma anche in relazione agli aggiornamenti progressivi dell'Anagrafe, che consentono di affinare e integrare le informazioni disponibili.

Un aspetto fondamentale da analizzare è l'epoca di costruzione degli edifici. Secondo i dati forniti dall'Anagrafe dell'edilizia scolastica mostrati in Tabella 1, è possibile risalire all'anno di costruzione per il 73% degli edifici (29.446), mentre per il 9%, pari a 3.618, è possibile risalire al periodo ci costruzione. Infine per 7069 edifici, pari a circa il 18% del totale, non è disponibile alcuna informazione.

Periodo	Edifici dei quali non si sa nulla	Edifici dei quali si conosce solo l'epoca di costruzione	Edifici dei quali si conosce anche l'anno di costruzione	
prima del 1800		286	292	
1800-1899		380	604	
1900- 1933		360	2.165	
1934-1949		277	1.084	
1950-1970		1.052	8.844	
1971-1975		370	3.175	
1976-1992		700	8.353	
1993-1996		71	818	
1997- 2008		86	2.646	
2009- 2017		27	1.150	
dal 2018 in poi		9	315	
Totale	7.069	3.618	29.446	**40.133**

Tabella 1 – Epoca di costruzione degli edifici scolastici.
Fonte: Ministero dell'Istruzione – Anagrafe dell'Edilizia Scolastica, 2021-2022.

Il grafico riportato in Figura 30 illustra la distribuzione degli edifici scolastici in base al loro anno di costruzione, offrendo una visione d'insieme sull'evoluzione del patrimonio edilizio scolastico nel tempo. Questa analisi evidenzia un periodo particolarmente significativo per l'edilizia scolastica italiana, collocato tra l'inizio degli anni Sessanta e la metà degli anni Ottanta del Novecento. In questa fase storica, si concentra circa la metà del patrimonio edilizio scolastico attualmente in uso. Al contrario, durante il decennio finale del XIX secolo e nei periodi delle due guerre mondiali, la costruzione di nuovi edifici scolastici fu estremamente limitata o caratterizzata da standard costruttivi insufficienti a garantirne l'uso prolungato nel tempo. Osservando invece gli anni più recenti, emerge una riflessione sull'attuale andamento dell'edilizia scolastica: da un lato potrebbe trattarsi di un momento di reale crisi o, dall'altro, di una mancata tempestività nell'aggiornamento delle informazioni disponibili. Anche i più significativi interventi legislativi degli ultimi anni hanno portato alla realizzazione di un

numero sensibilmente ridotto di nuovi edifici, limitandosi a qualche decina di interventi annuali [1].

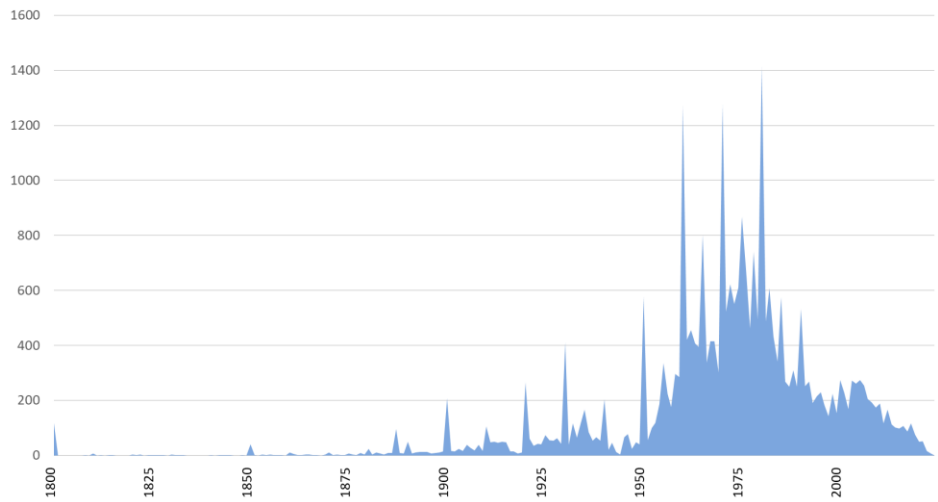


Figura 30 - Distribuzione degli edifici scolastici in base al loro anno di costruzione.

Un ulteriore aspetto rilevante riguarda la distribuzione degli edifici scolastici per regione e periodo di costruzione, come rappresentato nella Figura 31. Si precisa che la suddivisione temporale adottata segue quella prevista dal database del MIUR, assicurando coerenza e uniformità nell'analisi dei dati. La distribuzione degli edifici scolastici più datati riflette le profonde disuguaglianze territoriali nei livelli di istruzione presenti nell'Italia preunitaria, disuguaglianze che si sono mantenute anche nei decenni successivi all'introduzione delle leggi Casati (1859) e Coppino (1877). Ancora oggi, oltre il 50% degli edifici scolastici costruiti prima del 1900 si concentra in quattro regioni: Piemonte, Lombardia, Toscana e Veneto. Nei primi vent'anni del Novecento e durante il periodo fascista, la costruzione di nuovi edifici scolastici si estese progressivamente a tutto il territorio nazionale, sebbene il Centro-Nord continuasse a beneficiare di un maggiore sviluppo. Fu solo con l'avvento della Repubblica che si registrò una significativa crescita nella costruzione di scuole nelle aree storicamente più svantaggiate dal punto di vista dell'istruzione, in particolare nel Sud e nelle Isole. Questo processo subì un'ulteriore accelerazione a partire dalla metà degli anni Sessanta, in seguito all'introduzione della scuola media unica, che rese necessario un ampliamento del patrimonio edilizio scolastico per soddisfare la

crescente domanda. Tuttavia, con il progressivo calo della pressione demografica, dalla fine degli anni Settanta la costruzione di nuovi edifici scolastici è diventata sempre meno frequente.

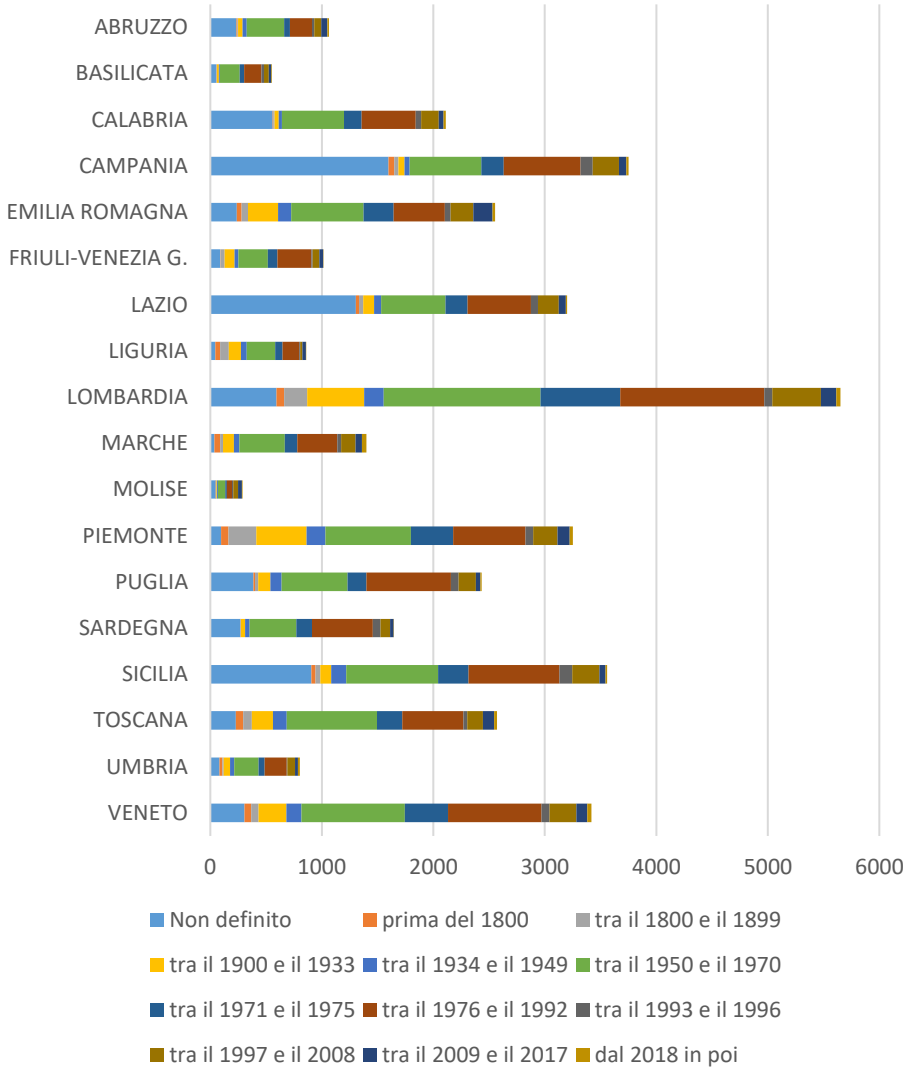


Figura 31 - Edifici scolastici per regione e periodo di costruzione.

L'età media degli edifici scolastici italiani, calcolata in base all'anno di costruzione, si attesta attualmente attorno ai 52 anni [1]. La maggior parte delle regioni presenta un'età media che varia tra i 47 e i 56 anni (Figura 32), un intervallo che riflette chiaramente la fase storica, definita come la grande

stagione dell'edilizia scolastica italiana, in cui si è registrata la maggiore concentrazione di costruzioni. Nei prossimi paragrafi verrà analizzato in che misura l'età di tali edifici influenzi il loro stato di conservazione e l'efficienza operativa.

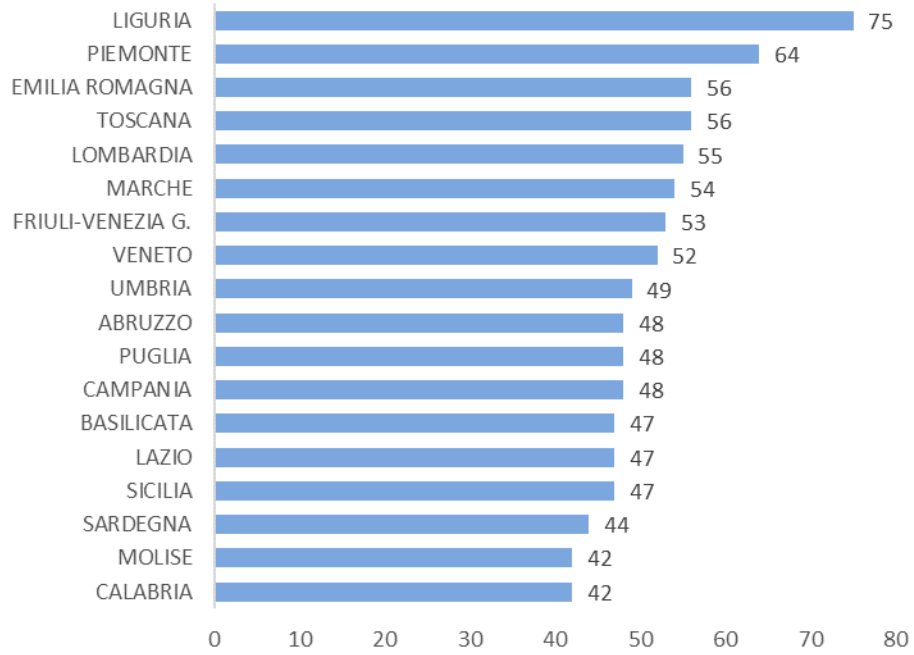


Figura 32 - Età media degli edifici per Regione. Fonte: Fondazione Agnelli [1]. Rielaborazione dell'autore.

La maggior parte degli edifici attualmente in uso risulta effettivamente progettata e destinata a tale scopo sin dall'origine, come evidenziato dalla Figura 33. Tuttavia, vi è una quota non trascurabile di edifici che, pur essendo oggi adibiti a scuole, non erano originariamente destinati a tale funzione. Questo fenomeno risulta particolarmente evidente in regioni come Piemonte, Lombardia e Sicilia, dove si registra un numero significativo di edifici che sono stati successivamente adattati per uso scolastico. È interessante notare che, tra i 2.515 edifici non progettati per l'uso scolastico, una parte rilevante (35%) non ha beneficiato di interventi di adattamento significativi, come indicato dalla categoria "no e non adattati", visibile in quasi tutte le regioni con una certa uniformità. Questo dato evidenzia la persistenza di edifici che, pur non essendo stati modificati per rispondere adeguatamente alle esigenze di un ambiente

scolastico, continuano a essere utilizzati per tale scopo. Parallelamente, la categoria "non definito", particolarmente marcata in regioni come la Campania, riflette una difficoltà nella raccolta e nell'organizzazione dei dati, suggerendo la necessità di un censimento più accurato e completo del patrimonio edilizio scolastico. In generale, il grafico conferma come, ancora oggi, una parte delle scuole italiane viene ospitata in edifici che non erano stati originariamente progettati per svolgere tale funzione. Questo fenomeno riguarda non solo edifici di epoca remota, ma anche una quota non marginale di costruzioni più recenti. Tali risultati sottolineano l'importanza di interventi di riqualificazione e adeguamento che non solo garantiscano la sicurezza strutturale e l'efficienza energetica, ma che rispondano anche alle esigenze funzionali e pedagogiche di un ambiente scolastico moderno.

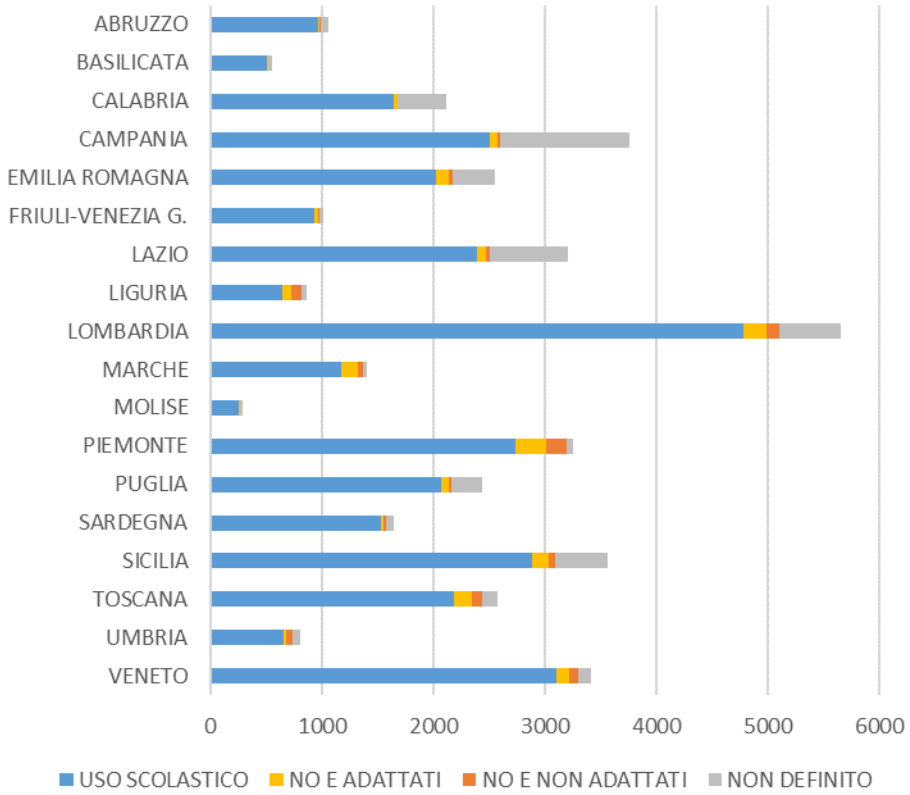


Figura 33 - Edifici per Regione e destinazione d'uso.

Infine, la situazione relativa alle certificazioni degli edifici scolastici evidenzia criticità rilevanti. Un'ampia quota di edifici risulta infatti priva del certificato di agibilità, con un totale di 23.794 strutture, pari al 59,16% del totale. Analogamente, il 57,68% degli edifici, corrispondente a 23.199 unità, non è in possesso della certificazione di prevenzione incendi. Secondo il DM 26 agosto 1992, la certificazione di collaudo statico avrebbe dovuta essere obbligatoria per tutte le scuole entro cinque anni dall'entrata in vigore del decreto. Tuttavia, tale scadenza è stata ripetutamente prorogata nel corso degli anni, con l'ultimo rinvio stabilito dal Decreto Legge 198/2022, che ha fissato il termine al 31 dicembre 2023, mentre per gli asili nido la scadenza è stata ulteriormente estesa al 31 dicembre 2024. Per quanto riguarda il collaudo statico, il numero complessivo degli edifici considerati risulta più elevato, in quanto include i vari corpi di fabbrica che compongono ciascun edificio. Nonostante ciò, il numero di edifici scolastici privi di collaudo statico rimane significativo, coinvolgendo 19.983 strutture, pari al 41,50%. È importante sottolineare che circa il 50% degli edifici scolastici è stato realizzato prima del 1971, anno in cui è entrata in vigore la normativa che ha reso obbligatorio il certificato di collaudo statico.

	AGIBILITA'		PREVENZIONE INCENDI		COLLAUDO STATICO	
Sì	15.026	37,36%	13.436	33,41%	26.427	54,88%
No	23.794	59,16%	23.199	57,68%	19.983	41,50%
Non noto	1.119	2,78%	3.321	8,26%	1.741	3,62%
In parte	282	0,70%	265	0,66%	-	-
TOTALE	40.221		40.221		48.151	

Tabella 2 - Certificazioni in possesso degli edifici scolastici statali.
Fonte: Ministero dell'Istruzione – Anagrafe dell'Edilizia Scolastica, 2021-2022.

Dunque, dall'analisi dei dati emerge una situazione complessivamente critica, caratterizzata da una diffusa obsolescenza del patrimonio edilizio scolastico su scala nazionale. Questo capitolo si propone di offrire una descrizione approfondita dello stato attuale dell'edilizia scolastica in Italia, evidenziandone le principali problematiche. Nei paragrafi successivi verranno analizzati nel dettaglio gli aspetti strutturali, energetici e funzionali, con l'obiettivo di fornire

una visione completa delle sfide e delle opportunità connesse alla riqualificazione del patrimonio scolastico esistente.

3.1. Aspetti strutturali

Le macerie, nella loro accezione più immediata, evocano immagini di distruzione e devastazione, testimonianze tangibili di catastrofi naturali come i terremoti. In Italia, paese sismicamente attivo, questo termine richiama alla mente le drammatiche conseguenze di eventi tellurici che hanno scosso diverse regioni, lasciando dietro di sé edifici ridotti in rovina, tra cui numerose strutture scolastiche. Tuttavia, il concetto di maceria può essere esteso oltre il danno fisico, assumendo una connotazione metaforica che riflette una condizione di decadenza culturale e infrastrutturale. In questo contesto, l'edilizia scolastica italiana rappresenta oggi un esempio emblematico di tale duplice interpretazione. Da un lato, le scuole danneggiate o distrutte dai terremoti testimoniano la fragilità delle infrastrutture di fronte ai disastri naturali. Dall'altro, lo stato di degrado e abbandono in cui versano molti edifici scolastici, frutto di politiche di investimento insufficienti e della cronica carenza di manutenzione, simboleggiano una crisi più profonda, di natura culturale e sociale. Pertanto, oltre ai danni fisici causati dai terremoti, l'edilizia scolastica italiana è segnata da una persistente mancanza di manutenzione e da investimenti inadeguati.

Il caso dell'istituto "Francesco Jovine" a San Giuliano di Puglia, crollato il 31 ottobre 2002, rappresenta una delle tragedie legate alla vulnerabilità sismica delle scuole italiane. Sotto le macerie rimasero intrappolati 56 bambini, 4 insegnanti e 2 collaboratrici scolastiche. Il bilancio definitivo delle vittime fu tragico: 27 bambini e un'insegnante persero la vita. Il collasso dell'edificio è stato il risultato di una combinazione di fattori: primo tra tutti il fatto che la zona in cui sorgeva non era classificata come area sismica, il che ha comportato l'assenza di criteri progettuali in grado di garantire la resistenza ai terremoti. Anche interventi successivi, come l'aggiunta di un piano, si sono limitati a verifiche per i carichi verticali. Solo in seguito, con l'entrata in vigore della nuova

zonazione sismica del 2003, la zona di San Giuliano è stata classificata come Zona 2, ai sensi dell'Ordinanza 3274/2003.

Oltre a ciò, la scarsa qualità costruttiva ha rappresentato un altro fattore determinante: l'edificio era stato realizzato con muratura di bassa qualità (Figura 34) e un tetto in cemento armato particolarmente pesante [81]. Inoltre, l'aggiunta del secondo piano ha incrementato ulteriormente il carico strutturale, con conseguenti effetti negativi sulla stabilità dell'edificio. Si può quindi concludere che il crollo della scuola di San Giuliano è stato il risultato di una serie di fattori di vulnerabilità, tra cui l'inadeguatezza sismica, la scarsa qualità costruttiva e l'effetto amplificato del suolo durante l'evento sismico [82].



Figura 34 - Crollo della scuola primaria "F. Iovene" di San Giuliano di Puglia: cordolo in cemento armato visibile tra le macerie. Vista dall'asilo. Fonte: Augenti N. et al. [81].

Un altro esempio significativo è rappresentato dal terremoto che ha colpito L'Aquila nel 2009. In quell'occasione, la Scuola parificata "Istituto Santa Maria degli Angeli" subì danni così gravi da essere dichiarata inagibile, evidenziando ancora una volta la fragilità delle strutture scolastiche italiane di fronte agli eventi sismici.

Anche in assenza di eventi sismici, i crolli nelle scuole italiane sono spesso causati dall'obsolescenza degli edifici e dai materiali con cui sono stati costruiti,

nonché dalla carenza di manutenzione. Cittadinanzattiva monitora costantemente i casi di distacchi di intonaco, crolli di soffitti, controsoffitti, solai, tetti, ma anche di finestre, muri di recinzione e alberi caduti all'interno o nelle immediate vicinanze degli edifici scolastici. Secondo l'ultimo report annuale, tra settembre 2023 e settembre 2024 si sono registrati 69 episodi di questo tipo, un dato che non si verificava da sette anni. Di questi, 28 sono avvenuti nelle regioni del Sud e nelle Isole (40,5%), lo stesso numero è stato registrato nel Nord (40,5%), mentre 13 si sono verificati nel Centro (19%). Questi incidenti hanno provocato il ferimento di nove studenti, tre docenti, due collaboratori scolastici, un'educatrice e quattro operai, causando danni agli ambienti e agli arredi scolastici, con conseguenti interruzioni delle attività didattiche e disagi psicologici per gli studenti e le loro famiglie [83].
Correlando la distribuzione degli edifici scolastici con il periodo di costruzione e l'introduzione delle norme antisismiche (Figura 35), emerge che il 44% degli edifici è stato realizzato prima dell'entrata in vigore della legge 64/1974 che ha previsto specifiche norme tecniche per costruzioni in zona sismica.

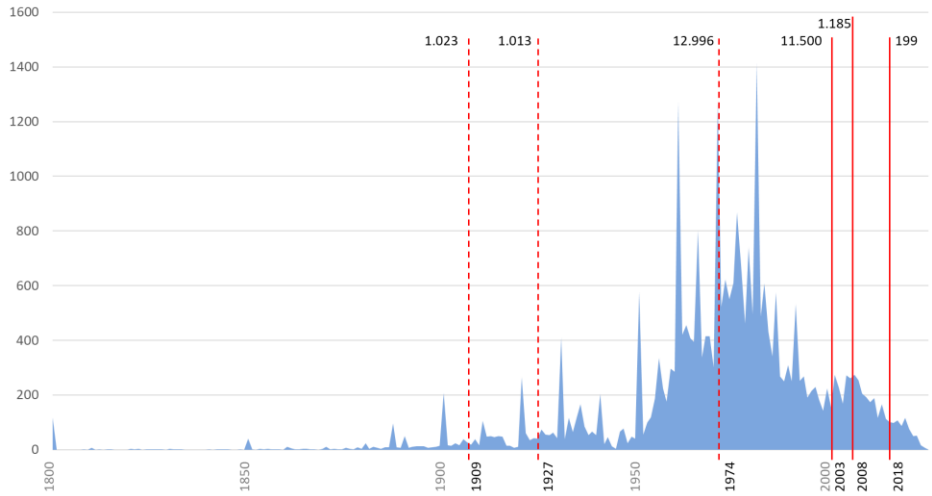


Figura 35 - Distribuzione degli edifici scolastici per periodo di costruzione rispetto all'introduzione delle norme antisismiche.

Nel 1981, in risposta al terremoto dell'Irpinia del 1980, venne adottata una zonazione sismica più ampia e razionale, basata sull'analisi della storia sismica del territorio italiano. Con questa revisione, circa il 45% del territorio nazionale

venne classificato nelle zone sismiche 1, 2 e 3, mentre il restante 55% rimase privo di disposizioni specifiche. Fino ad allora, infatti, la zonazione era aggiornata solo dopo terremoti significativi, limitandosi a classificare circa il 25% del territorio, ovvero le aree colpite da danni rilevanti. Nel 1984, con il Decreto Ministeriale del 19 giugno, furono emanate norme tecniche relative alle costruzioni sismiche, introducendo il coefficiente di protezione sismica, variabile tra 1 e 1,4 (Figura 36). Tale coefficiente veniva applicato come moltiplicatore delle forze orizzontali nelle analisi statiche e dell'accelerazione spettrale nelle analisi dinamiche. Per la prima volta, inoltre, venne prevista una verifica sismica specifica per gli edifici in muratura.



Figura 36 - Classificazione sismica del territorio italiano (1984). Decreto MLP del 14/07/1984 e decreti successivi.

Un ulteriore passo avanti si registrò con il Decreto Ministeriale del 16 gennaio 1996, che introdusse la possibilità di adottare il metodo degli stati limite in alternativa a quello basato sulle tensioni ammissibili. Contestualmente, oltre all'analisi statica e dinamica, ne furono previste altre più approfondite, fondate sulla definizione di un terremoto di progetto.

Grazie ai progressi nella comprensione del rischio sismico, nel 1998 fu avanzata una nuova proposta di classificazione (Figura 37), che portò circa il 70% del territorio italiano a rientrare nelle principali categorie sismiche.



Figura 37 - Proposta di riclassificazione sismica del territorio italiano (1998) a cura del Gruppo di Lavoro ING-GNDT-SSN costituito dalla Commissione Nazionale di Previsione e Prevenzione dei Grandi Rischi.

Nel 2003, fu recepito ufficialmente l'Eurocodice ENV 8, riconoscendo che l'intero territorio nazionale è soggetto a rischio sismico (Figura 38) e introducendo una nuova zona a bassa sismicità per il restante 30%.

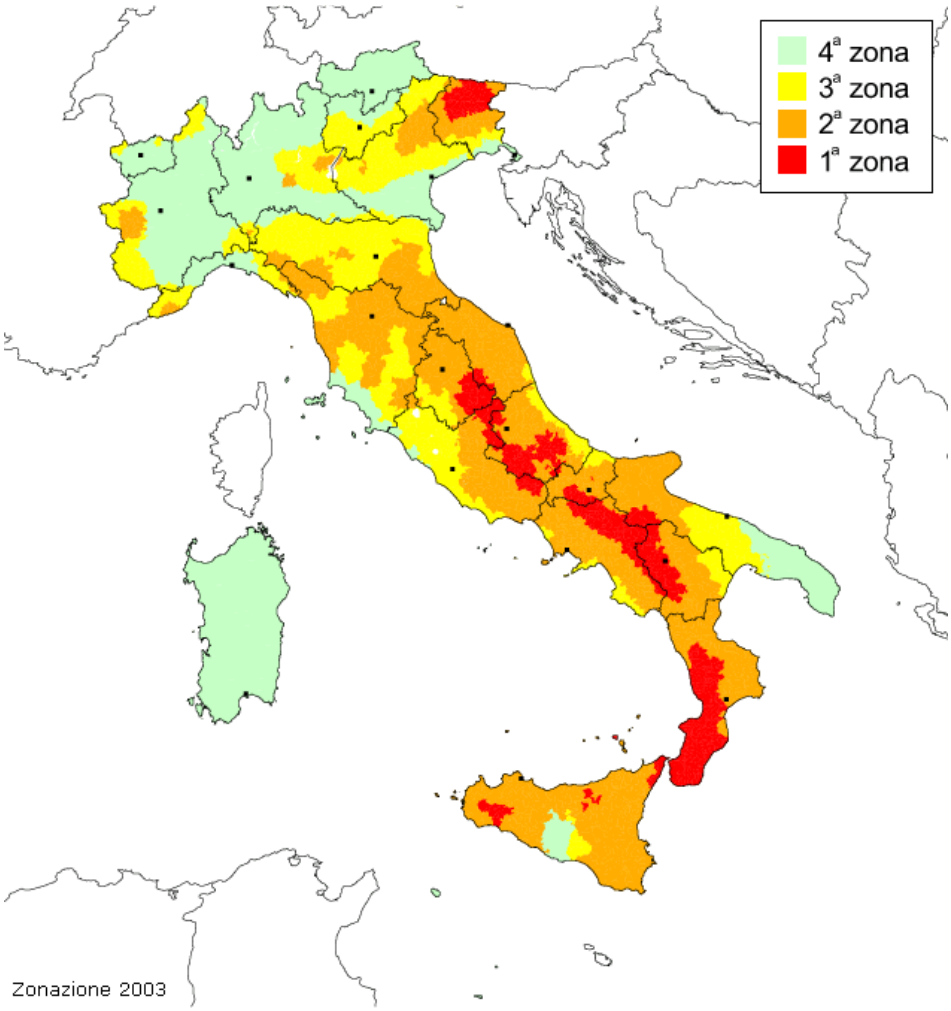


Figura 38 - Zone sismiche del territorio italiano (2003). Ordinanza PCM 3274 del 20/03/2003.

Con l'Ordinanza PCM 3519 del 28 aprile 2006 venne elaborata la mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale mostrata in Figura 39.

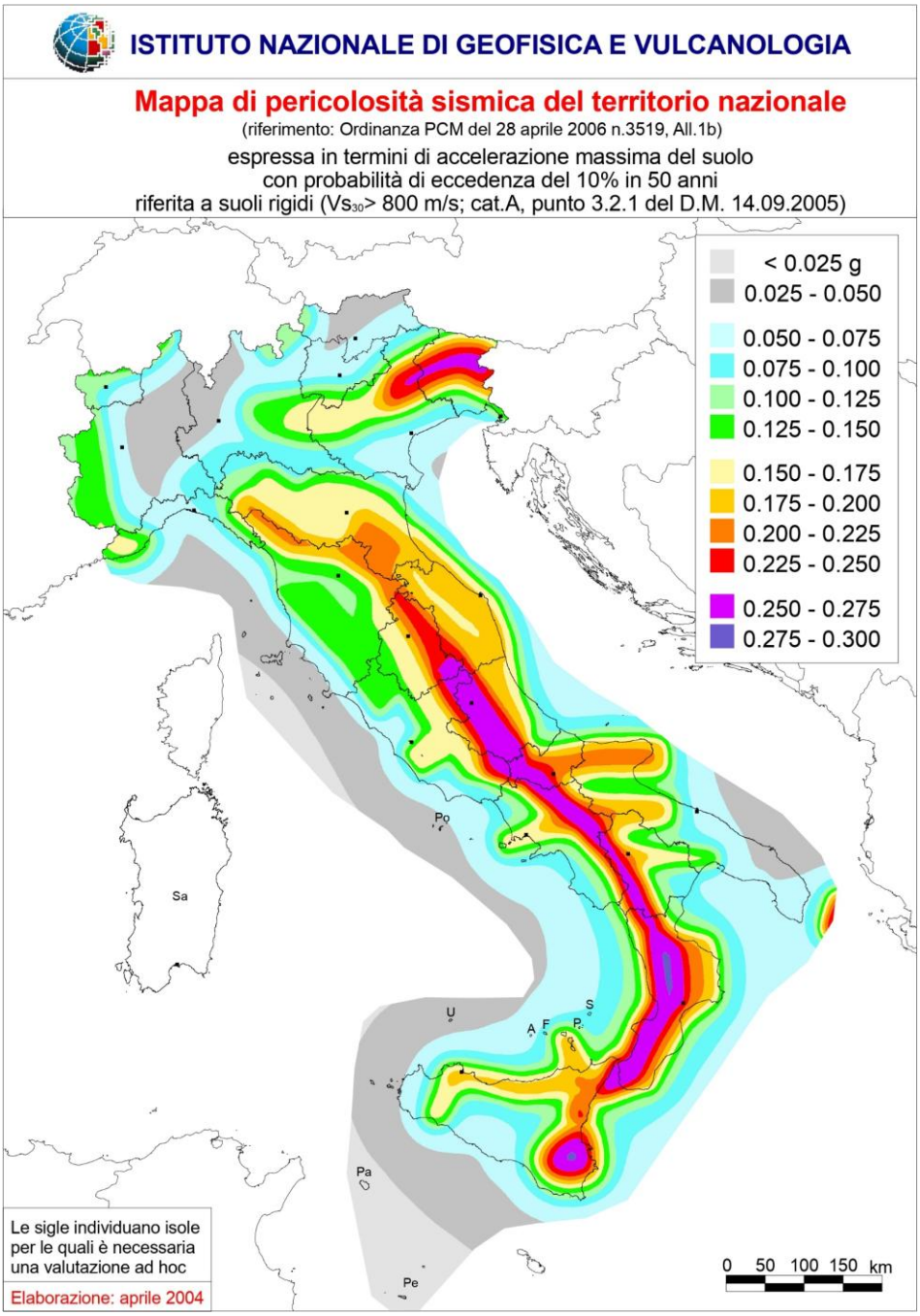


Figura 39 - Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale. Ordinanza PCM del 28 aprile 2006 n. 3519.

Con il Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008, seguito dalla Circolare esplicativa n. 617 del 2 febbraio 2009, si adottò un approccio innovativo per la

valutazione dell'intensità sismica, sostituendo la tradizionale mappa sismica con un reticolo di riferimento elaborato dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). Questo reticolo, composto da riquadri di 10 km di lato, attribuisce a ciascun vertice un valore di accelerazione sismica prevista al suolo a(g). Le successive Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018 (NTC 2018) hanno ulteriormente perfezionato i criteri di progettazione sismica, confermando l'impegno costante verso una maggiore sicurezza del patrimonio edilizio nazionale.

I dati dell'Anagrafe dell'Edilizia Scolastica evidenziano che 17.166 edifici scolastici non risultano né progettati secondo normative sismiche né sottoposti a interventi di adeguamento o miglioramento sismico.

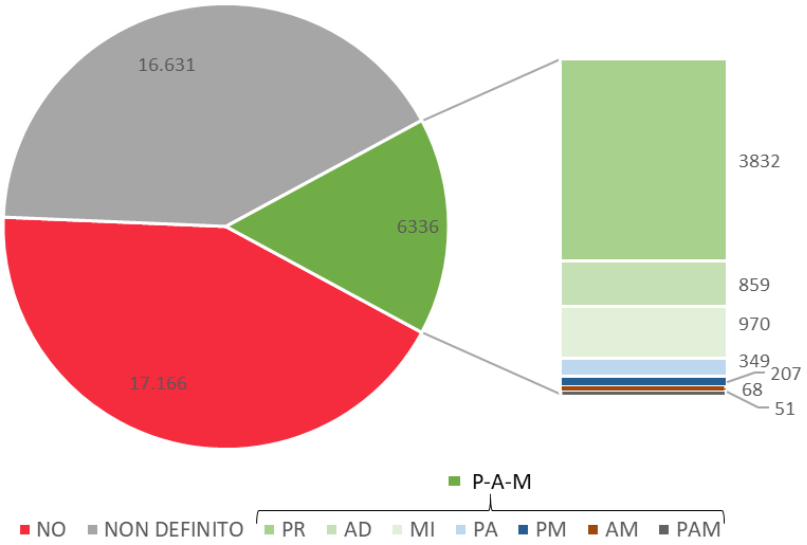
Il grafico in Figura 40 illustra nel dettaglio il numero di edifici progettati in conformità alle normative sismiche o che hanno beneficiato di interventi specifici. Tuttavia, si osserva che una parte di questi edifici, pari allo 0,8%, risulta progettata secondo normative sismiche e oggetto sia di interventi di miglioramento sia di adeguamento, suggerendo la presenza di possibili errori nella compilazione dei dati.

Inoltre, dal grafico mostrato in Figura 41 si evince anche che il 7% degli edifici scolastici si trova in Zona sismica 1, classificata come la più pericolosa, mentre il 38% ricade in Zona sismica 2. Il restante 55% è situato nelle Zone sismiche 3 e 4, caratterizzate da un rischio inferiore.

È stata successivamente approfondita la distribuzione degli edifici scolastici nelle diverse zone sismiche, considerando la presenza di interventi di progettazione, adeguamento o miglioramento antisismico (Figura 42). Le Zone 1 e 2, caratterizzate da un rischio sismico elevato, evidenziano una condizione critica: numerose strutture risultano ancora prive di interventi o con dati non disponibili. Questa situazione sottolinea l'urgenza di intensificare le indagini e promuovere interventi mirati per migliorare la sicurezza degli edifici scolastici.

I dati analizzati evidenziano con chiarezza la necessità di interventi mirati volti a garantire la sicurezza e la conformità normativa del patrimonio edilizio scolastico. Tali azioni risultano imprescindibili non solo per tutelare l'incolumità degli studenti, del personale scolastico e della comunità, ma anche per preservare la continuità delle attività didattiche, spesso interrotte o

compromesse in seguito ad eventi calamitosi. Inoltre, è necessario un costante monitoraggio dello stato degli edifici e un aggiornamento continuo delle informazioni relative alla loro sicurezza, per poter indirizzare risorse e interventi



LEGENDA		
NON DEFINITO	Edifici per cui risulta NON DEFINITO progettazione, adeguamento o miglioramento antisismico	
NO	Edifici per cui NON risultano progettazione, adeguamento o miglioramento antisismico	
P-A-M	Edifici per cui risulta esserci stata una progettazione e/o adeguamento e/o miglioramento antisismico. Comprende i casi seguenti:	
	PR	Edifici per cui risulta la sola progettazione antisismica
	AD	Edifici per cui risulta il solo adeguamento antisismico
	MI	Edifici per cui risulta il solo miglioramento antisismico
	PA	Edifici per cui risulta sia progettazione che adeguamento antisismico
	PM	Edifici per cui risulta sia progettazione che miglioramento antisismico
	AM	Edifici per cui risulta sia adeguamento che miglioramento antisismico
	PAM	Edifici per cui risulta progettazione, adeguamento e miglioramento antisismico

Figura 40 - Distribuzione edifici scolastici rispetto alla normativa antisismica.

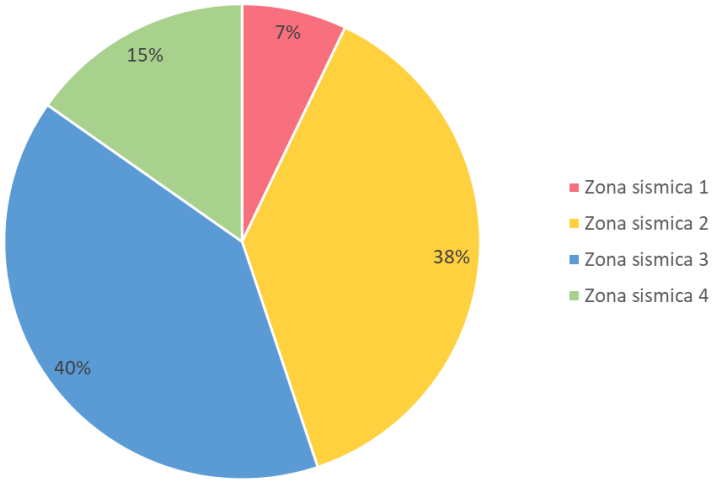


Figura 41 - Distribuzione edifici per zona sismica. Rielaborazione dell'autrice dai dati dell'Anagrafe dell'Edilizia Scolastica.

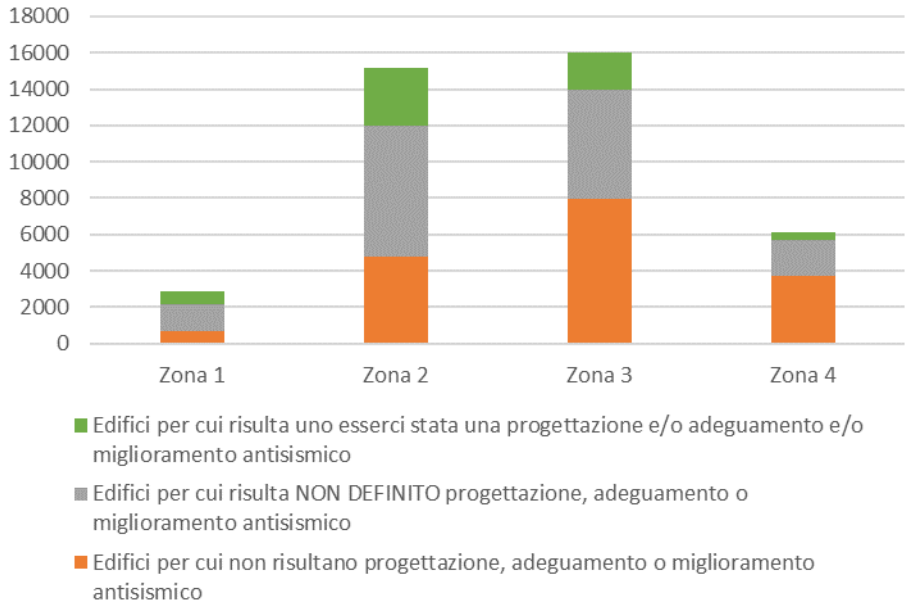


Figura 42 - Distribuzione degli edifici scolastici per zona sismica in base alla progettazione, adeguamento o miglioramento antisismico. Rielaborazione dell'autrice dai dati dell'Anagrafe dell'Edilizia Scolastica.

3.2. Aspetti energetici

La Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC) stima che le emissioni di CO_2 generate dalle attività edilizie e dai materiali utilizzati nella costruzione di edifici rappresentino circa il 37% delle emissioni globali legate all'energia e ai processi. Secondo l'ultimo rapporto annuale sullo stato globale degli edifici e delle costruzioni (Buildings-GSR), queste emissioni dovrebbero ridursi di oltre il 98% rispetto ai livelli del 2020 per raggiungere emissioni nette di carbonio pari a zero entro il 2050 [84]. Inoltre, alcuni studi stimano che la popolazione mondiale raggiungerà i 9,7 miliardi di persone entro il 2050, determinando una significativa espansione delle aree urbane e un aumento sostanziale del fabbisogno energetico degli edifici.

Considerando questi aspetti, insieme agli obiettivi di sostenibilità dell'Unione Europea fissati per il 2050, la sfida è quella di ridurre l'impatto ambientale degli edifici. In Europa questo ha portato ad una crescente attenzione verso la riqualificazione del patrimonio edilizio esistente: il Green Deal europeo e altri programmi basati su incentivi promuovono strategie a lungo termine finalizzate a rendere il patrimonio edilizio più sostenibile, a partire dalla ristrutturazione degli edifici pubblici [85]. Gli interventi sugli edifici esistenti, se progettati e realizzati con criteri di efficienza energetica, offrono un enorme potenziale per ridurre i consumi, limitare i costi energetici e migliorare il comfort degli occupanti [86]. In Italia, la situazione è altrettanto critica e rispecchia le dinamiche europee; il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) include obiettivi specifici per promuovere la sostenibilità e l'efficienza energetica del patrimonio edilizio, in particolare attraverso un articolato sistema di incentivi fiscali. Tra questi, le detrazioni fiscali destinate alla bioedilizia, all'uso di materiali sostenibili e al risparmio energetico svolgono un ruolo chiave nella strategia di transizione ecologica del paese [87].

In risposta a questa situazione risulta fondamentale prendere in considerazione il patrimonio di edilizia scolastica che, oltre ad essere esteso e distribuito su tutto il territorio nazionale, presenta caratteristiche particolarmente variegate e complesse. Inoltre, un numero considerevole di tali edifici non è adeguato agli attuali standard energetici, con conseguenti inefficienze nei consumi e impatti ambientali significativi. In considerazione di ciò, è necessario adottare un

approccio mirato e strutturato per il miglioramento dell'efficienza energetica delle scuole, riducendo le emissioni di CO_2 e garantendo, al contempo, ambienti scolastici più confortevoli, sicuri e sostenibili. In questo contesto, l'analisi che segue si concentrerà sugli aspetti energetici degli edifici scolastici italiani, esaminando nello specifico le condizioni attuali delle strutture, le criticità esistenti e le opportunità di miglioramento.

Una larga parte degli edifici scolastici esistenti è stata costruita prima dell'introduzione delle normative energetiche, come evidenziato dal grafico in Figura 43. In particolare, il 57%, al netto degli edifici senza anno di costruzione specificato, è stata realizzata prima dell'entrata in vigore della Legge 373/76 "Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici", che rappresentò il primo intervento normativo nazionale riguardante l'isolamento termico degli edifici e la progettazione degli impianti termici. Questo fu un passo fondamentale verso la regolamentazione del risparmio energetico nell'edilizia. A seguire, la Legge 9 gennaio 1991 n. 10, attuativa del Piano Energetico Nazionale in materia di uso razionale dell'energia, risparmio energetico e sviluppo delle fonti rinnovabili di energia, ha introdotto disposizioni fondamentali per regolare sia le modalità progettuali che la gestione integrata del sistema edificio/impianto. Un ulteriore passo in avanti fu il Decreto Legislativo 192/2005, che recepiva la direttiva europea 2002/91/CE, definendo criteri, metodi di calcolo e requisiti minimi per l'efficienza energetica degli edifici nuovi ed esistenti. Il Decreto Legislativo 311/2006 ha introdotto l'obbligo di certificazione energetica degli edifici, definendo una metodologia standardizzata per il calcolo delle prestazioni energetiche. Successivamente, con il Decreto Ministeriale del 26 giugno 2009, sono state emanate le *Linee Guida Nazionali per la certificazione energetica*, fornendo un quadro normativo di riferimento unificato per l'intero territorio italiano. Un ulteriore sviluppo normativo in ambito energetico si è avuto con la Legge 90/2013, che ha introdotto modifiche significative al Decreto Legislativo 192/2005. Questa legge ha fornito, tra le altre cose, la definizione di edificio a energia quasi zero (NZEB) e ha stabilito nuovi criteri per l'aggiornamento e la programmazione degli standard prestazionali relativi agli edifici, inclusi involucro, impianti e fonti rinnovabili. L'obiettivo era quello di allinearsi agli obiettivi europei in materia di

edifici a energia quasi zero. Inoltre, è stato introdotto l'Attestato di Prestazione Energetica (APE), uno strumento fondamentale per valutare e comunicare l'efficienza energetica degli edifici. Nel 2014, il Decreto Legislativo 102/2014 ha stabilito un quadro comune di misure per promuovere l'efficienza energetica nell'Unione Europea, contribuendo al raggiungimento dell'obiettivo del 20% di miglioramento dell'efficienza energetica entro il 2020 e ponendo le basi per ulteriori progressi in questo ambito. Successivamente, il Decreto Legislativo 48/2020, in attuazione della Direttiva UE 2018/844, ha apportato ulteriori modifiche al Decreto Legislativo 192/2005, introducendo i criteri per la predisposizione di una strategia a lungo termine per la ristrutturazione del parco immobiliare nazionale. Nello stesso anno, il Decreto Legislativo 73/2020, attuativo della Direttiva UE 2018/2002, ha aggiornato il Decreto Legislativo 102/2014, introducendo una serie di misure volte a migliorare l'efficienza energetica e a conseguire obiettivi di risparmio energetico a livello nazionale. Infine, il Decreto Legislativo 199/2021 ha recepito la Direttiva UE 2018/2001, promuovendo l'uso dell'energia da fonti rinnovabili e consolidando ulteriormente il quadro normativo per il raggiungimento degli obiettivi climatici ed energetici europei.

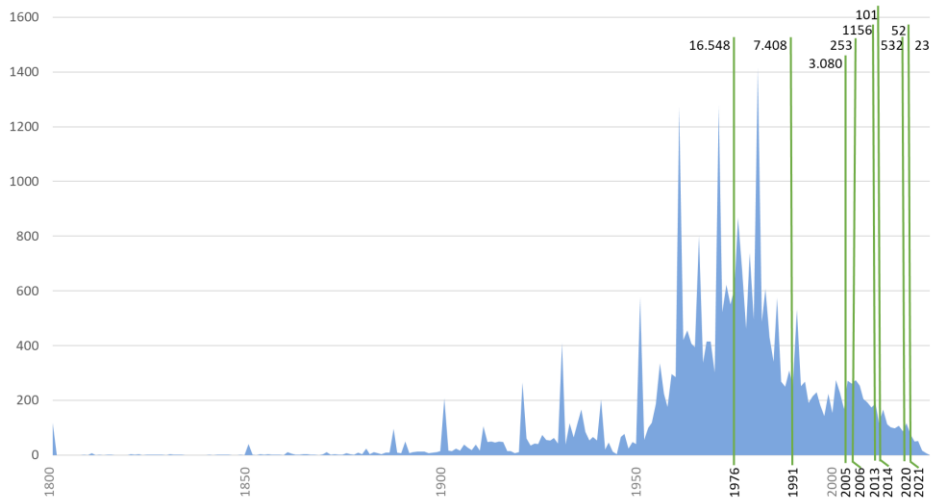


Figura 43 - Distribuzione degli edifici scolastici per periodo di costruzione rispetto all'introduzione delle normative energetiche.

Dai dati forniti da Legambiente (Figura 44), emerge che su un totale di 6.343 edifici oggetto dell'indagine, solo il 30,7% risulta dotato di certificazione energetica. Di questi, una porzione esigua, pari al 5,4%, appartiene alla classe A, mentre il 33,2% si colloca nella classe G, la più bassa. Considerando complessivamente le ultime tre classi energetiche (E, F e G), la percentuale di edifici che rientrano in queste categorie sale al 73%.

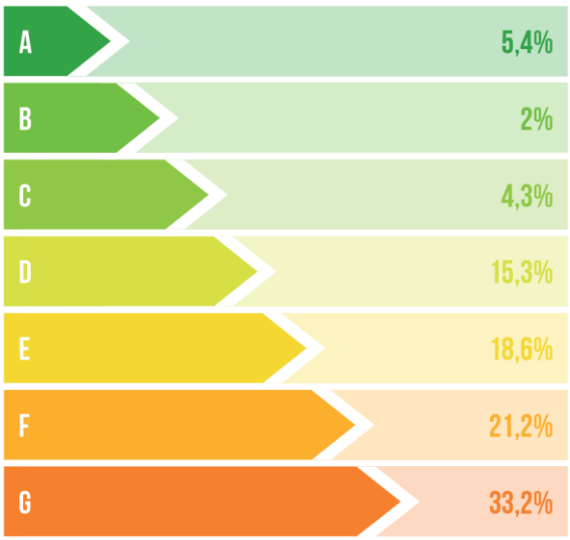


Figura 44 - Classificazione degli edifici scolastici con certificazione energetica. Fonte: Legambiente [88].

Il report *Ecosistema scuola. XXIII Rapporto nazionale sulla qualità degli edifici e dei servizi scolastici* evidenzia inoltre che i dati relativi all'efficientamento energetico offrono uno scenario preoccupante. Sebbene il 79,2% dei Comuni capoluogo abbia effettuato interventi per il miglioramento energetico delle scuole negli ultimi cinque anni, con percentuali che variano dal 92,9% delle amministrazioni del Centro al 45,5% del Sud, solo il 12,7% degli edifici italiani ha effettivamente beneficiato di tali interventi. La distribuzione territoriale evidenzia che il 17,5% degli edifici del Nord, il 13,8% del Centro, il 5,1% delle Isole e solo lo 0,9% del Sud ha ricevuto gli interventi di efficientamento.
Analizzando i dati più recenti dell'Anagrafe dell'Edilizia Scolastica (Figura 45) emerge che il 57% delle scuole ha adottato accorgimenti per la riduzione dei

consumi energetici, mentre il 23% non ha intrapreso alcun intervento e il restante 20% non fornisce informazioni a riguardo.

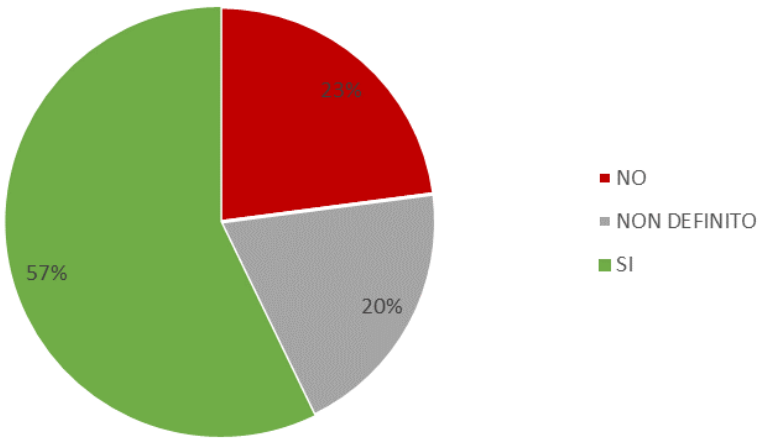


Figura 45 - Adozione di accorgimenti per la riduzione dei consumi energetici.

Analizzando più nel dettaglio, gli interventi più comuni per il miglioramento dell'efficienza energetica sono quelli illustrati nella Figura 46.

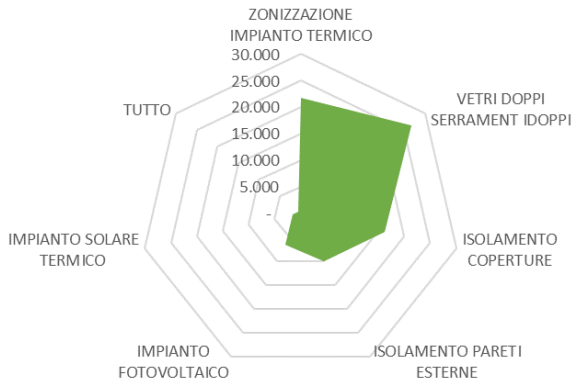


Figura 46 - Interventi di riduzione dei consumi eneergetici adottati.

Tra gli accorgimenti indicati nello schema, sono stati analizzati negli edifici presi in considerazione (Figura 47) i tre più frequentemente adottati (doppi vetri, isolamento delle coperture e isolamento delle pareti esterne). Risulta che nella

maggior parte (circa l'85%) si ha almeno un accorgimento, una porzione rilevante (pari al 30% del campione esaminato) si limita però ad adottare esclusivamente i doppi vetri, una soluzione che, pur utile, risulta insufficiente per un miglioramento sostanziale delle prestazioni energetiche complessive dell'edificio, mentre solo il 15% ha implementato tutti e tre gli interventi.

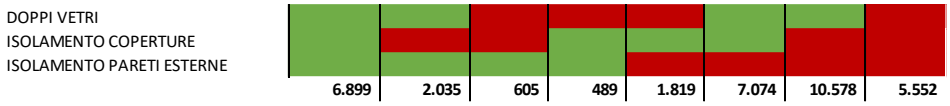


Figura 47 - Interventi di riduzione energetica più adottati.

Molte scuole, dunque, risultano ancora oggi prive di adeguati sistemi di coibentazione, una mancanza che incide in modo significativo sulle condizioni di comfort ambientale all'interno degli edifici scolastici. Questa criticità non solo comporta implicazioni dirette sulla qualità dell'ambiente di apprendimento influendo negativamente sul benessere termico degli occupanti, ma in alcuni casi penalizza anche il rendimento scolastico. In particolare, l'assenza di un corretto isolamento provoca un diffuso disagio termico, con temperature interne che non rispondono ai bisogni degli utenti, sia nei mesi invernali che estivi. L'adozione di interventi di miglioramento dell'efficienza energetica e di isolamento termico risulta dunque una necessità inderogabile per garantire ambienti scolastici più salubri.

3.3. Aspetti funzionali

Accanto alle criticità di natura strutturale ed energetica, emerge anche un'inadeguatezza funzionale: il dialogo tra pedagogia e architettura ha infatti favorito l'affermazione di un nuovo modello spaziale basato sull'integrazione degli ambienti superando l'aula come unico fulcro del processo educativo. L'aula tradizionale ereditata dal passato rifletteva un approccio educativo incentrato su un discente passivo, infatti l'iconografia storica che caratterizza ancora oggi gran parte degli edifici scolastici raffigura un docente che trasmette frontalmente i contenuti, in posizione isolata rispetto ai banchi allineati e ai discenti. Tuttavia, le attuali esigenze educative richiedono spazi progettati per

supportare lo sviluppo dell'intelligenza emotiva e creativa, così come delle capacità relazionali e manuali. Questo ripensamento degli ambienti scolastici non riguarda solo la progettazione di nuove scuole, ma deve necessariamente estendersi anche agli interventi di riqualificazione degli edifici esistenti. Inoltre, sebbene la riqualificazione energetica e la messa in sicurezza strutturale siano temi di primaria importanza, la pandemia del 2020 ha evidenziato con forza quanto sia rilevante la relazione tra spazio e apprendimento. Perciò, in questo contesto, mentre il PNRR pone al centro l'adeguamento energetico e strutturale degli edifici scolastici, gli amministratori locali sono chiamati a considerare, accanto a questi obiettivi, l'opportunità di utilizzare i fondi anche per promuovere un'innovazione pedagogica e formale: diventa così fondamentale sviluppare progetti che ripensino gli spazi scolastici non solo per garantire strutture sicure ed efficienti, ma anche per offrire ambienti all'avanguardia, progettati per rispondere alle esigenze educative contemporanee e per sostenere una scuola innovativa e inclusiva. Come analizzato precedentemente, la progettazione di ambienti didattici innovativi trae origine dalle esigenze pedagogiche e didattiche della scuola, strettamente connesse alla relazione con gli spazi. Tali ambienti devono essere funzionali allo svolgimento di attività diversificate, che includano il lavoro di gruppo e individuale, la presentazione di elaborati, la realizzazione di prodotti multimediali, lo svolgimento di prove individuali o collettive, nonché la discussione e il confronto su tematiche condivise.

Come evidenziato dal *Rapporto sull'edilizia scolastica* della Fondazione Agnelli, il patrimonio edilizio scolastico risulta obsoleto per quanto riguarda la distribuzione degli spazi. Una parte significativa degli edifici è stata infatti realizzata prima dell'emanazione del D.M. 19 dicembre 1975, la prima normativa tecnica dedicata all'edilizia scolastica. Sebbene i parametri indicati da questo decreto siano prescrittivi e ormai distanti dal moderno approccio prestazionale, essi rappresentano tuttora l'unico riferimento legislativo per il dimensionamento degli spazi scolastici.

Un'analisi dettagliata delle funzioni ospitate all'interno degli edifici scolastici e della distribuzione delle loro superfici, presentata nel documento *Fare spazio.*

Idee progettuali per riaprire le scuole in sicurezza[29], offre un interessante spaccato sulla realtà delle scuole del Piemonte[30], rappresentativa a livello nazionale. Lo studio evidenzia come una parte significativa delle superfici complessive degli edifici scolastici, pari al 28%, sia destinata alle aule, sottolineando il ruolo centrale di questi ambienti nell'organizzazione tradizionale degli spazi educativi (Figura 48). In particolare, è interessante notare che, nella storia della scuola italiana, il rapporto tra la superficie dedicata alle aule e quella destinata ad altri spazi interni ha subito variazioni minime, con una lieve riduzione a partire dal 1975 (Figura 49). Questo riflette una visione progettuale ancora fortemente incentrata sull'aula come elemento principale, a discapito di una maggiore diversificazione funzionale degli spazi scolastici. Inoltre, dopo le aule, gli ambienti che occupano la maggiore percentuale di superficie sono quelli distributivi, che rappresentano circa il 20% delle superfici totali. Sebbene tali spazi possano essere percepiti come un potenziale spreco quando utilizzati esclusivamente come zone di passaggio, rappresentano al contempo una risorsa: se opportunamente ripensati, questi ambienti possono essere riconvertiti per ospitare funzioni aggiuntive, come aree destinate alla didattica innovativa, spazi per lo studio individuale, zone per attività collaborative o persino laboratori temporanei. In questo senso, la reinterpretazione degli spazi distributivi potrebbe contribuire significativamente a un uso più efficiente e flessibile delle risorse edilizie. Infine, i laboratori e le aule dedicate alla musica o ad altre attività creative rappresentano percentuali decisamente inferiori, pari rispettivamente al 6% e al 3% delle superfici complessive. Questi dati evidenziano una sottodimensione di ambienti specifici per attività che potrebbero invece incentivare un approccio educativo più variegato e orientato allo sviluppo delle competenze trasversali.

[29] Questo documento è stato elaborato a luglio del 2020 dal Future Urban Legacy Lab e dalla Fondazione Agnelli.

[30] I risultati presentati derivano dall'elaborazione delle informazioni contenute nella banca dati EDISCO – Anagrafe dell'edilizia scolastica della Regione Piemonte, aggiornate a giugno 2020.

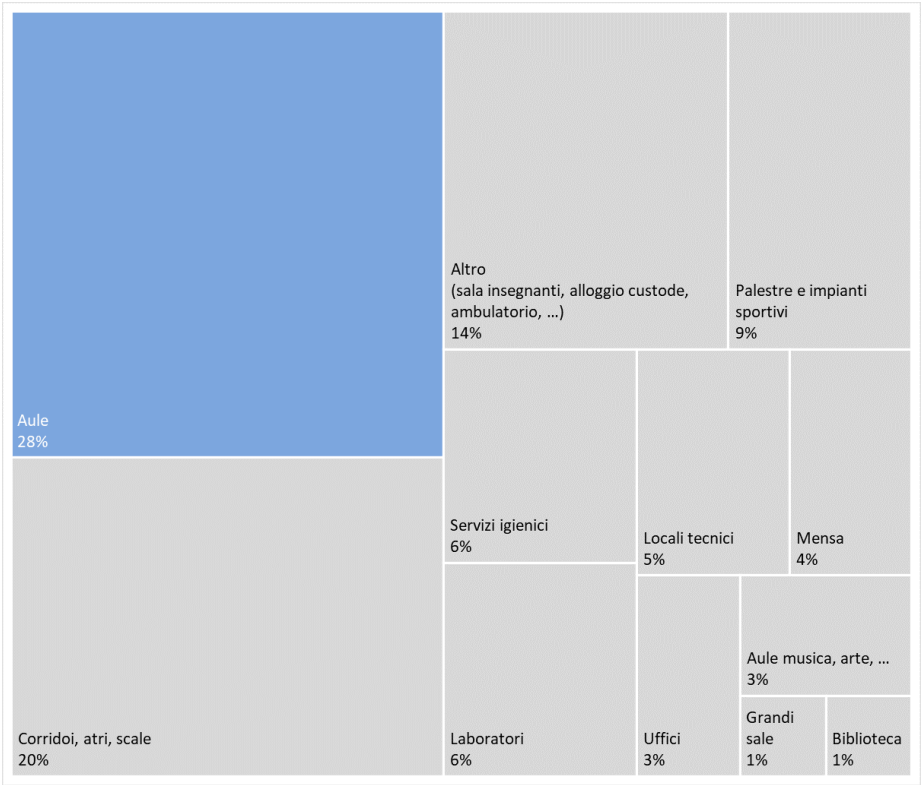


Figura 48 - Destinazione delle superfici complessive degli edifici scolastici in Piemonte. Fonte: Fare spazio [77].

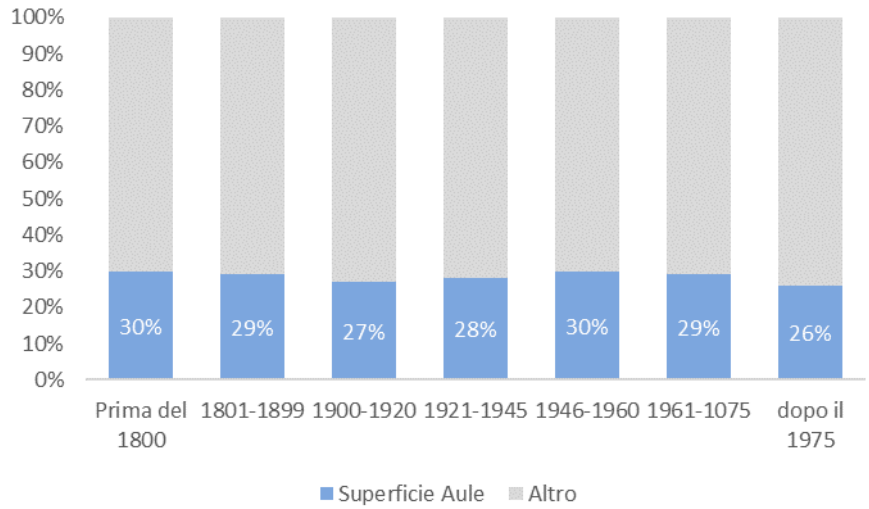


Figura 49 - Rapporto tra la superficie delle aule e quella degli spazi interni accessori, suddiviso per periodo di costruzione. Fonte: Fare Spazio [77].

Analizzando invece gli spazi destinati alle strutture sportive, sebbene la Legge 23/1996 affermasse che “la programmazione degli interventi, per assicurare alle strutture edilizie scolastiche uno sviluppo qualitativo e una collocazione sul territorio adeguati alla costante evoluzione delle dinamiche formative, culturali, economiche e sociali, deve garantire la disponibilità da parte di ogni scuola di palestre e impianti sportivi di base, oltre alla piena utilizzazione delle strutture scolastiche da parte della collettività”, emerge un quadro di significative carenze. La situazione risulta ulteriormente critica se si considera che, nonostante gli investimenti promossi dai vari governi negli ultimi anni per potenziare le infrastrutture per lo sport a scuola, Le palestre e gli impianti sportivi sono presenti solo nel 50,4% degli edifici scolastici gestiti dai Comuni capoluogo di provincia.

Dal report del 2024 di Legambiente emerge che tra le scuole dotate di impianti sportivi, il 66,9% dispone esclusivamente di impianti al chiuso, il 7% di impianti all’aperto, mentre il 26,1% offre entrambi. Di queste scuole, solo il 57,3% consente l'accesso agli impianti anche al di fuori dell'orario scolastico, favorendo l'utilizzo di tali spazi. Il 29,3% degli impianti sportivi scolastici necessita di interventi urgenti di riqualificazione. Nonostante la rilevante necessità di interventi di manutenzione, gli interventi di riqualificazione realizzati nel 2022 hanno interessato solo il 7,3% degli impianti, evidenziando una risposta insufficiente a queste necessità.

Insieme agli spazi per praticare sport, rivestono un ruolo molto importante nelle scuole gli spazi all’aperto, non solo come luoghi di socializzazione, ma anche come aree destinate a supportare attività didattiche all'esterno. Secondo i dati disponibili, il 68,7% degli edifici scolastici dispone di giardini o aree verdi accessibili, di cui il 42,1% viene utilizzato per la didattica all'aperto. Tuttavia, queste cifre mostrano significative disparità tra le diverse aree del Paese, come evidenziato in Tabella 3.

STRUTTURE PER LO SPORT E AREE VERDI	DATO NAZIONALE	NORD	CENTRO	SUD	ISOLE
Edifici con impianti per lo sport (palestre, campi esterni, piscine, …)	50,4%	50,8%	43,8%	52,8%	57,1%
Edifici con impianti indoor	66,9%	66,0%	66,0%	70,2%	66,3%
Edifici con impianti outdoor	7,0%	3,3%	9,3%	11,4%	9,6%
Edifici con impianti sia indoor che outdoor	26,1%	30,7%	24,8%	18,4%	24,1%
Edifici con impianti per lo sport aperti in orario extra scolastico	57,3%	69,5%	62,8%	40,8%	33,0%
Impianti per lo sport agibili	95,4%	98,3%	96,4%	86,4%	97,1%
Impianti per lo sport che necessitano di riqualificazione urgenti	29,3%	22,4%	27,9%	46,2%	30,2%
Impianti per lo sport in cui sono stati realizzati interventi di riqualificazione nel 2022	7,3%	9,1%	6,4%	4,8%	4,8%
Edifici con giardini o aree verdi fruibili	68,7%	81,8%	82,2%	45,0%	38,1%
Edifici con giardini o aree verdi fruibili utilizzati per didattica all'aperto	42,1%	62,6%	55,8%	11,6%	20,4%
Edifici posti all'interno di parchi urbani	4,8%	6,1%	5,2%	1,1%	0,0%

Tabella 3 – Superficie destinata a strutture per lo sport e aree verdi.

4. RIQUALIFICAZIONE DELL'EDILIZIA SCOLASTICA

Il patrimonio scolastico italiano è il risultato di una lunga e articolata storia edilizia, caratterizzata da edifici realizzati in diverse epoche e con approcci progettuali e costruttivi differenti. Questa variegata evoluzione ha dato vita a un panorama estremamente vasto e diversificato, con strutture che, pur rispondendo alle necessità del tempo in cui sono state costruite, presentano oggi una molteplicità di problematiche che ne compromettono l'efficienza e la sicurezza. Infatti, tra le principali criticità degli edifici scolastici italiani emergono problematiche di natura strutturale, energetica e funzionale. Dal punto di vista strutturale, molte scuole sono state realizzate con materiali e soluzioni progettuali che non sono più conformi agli standard di sicurezza attuali, soprattutto in riferimento alla normativa antisismica. Per quanto riguarda l'efficienza energetica, numerosi edifici scolastici mostrano impianti e strutture obsolete, con una gestione energetica inefficiente che influisce negativamente sui costi di gestione e sul comfort degli ambienti. Infine, dal punto di vista funzionale, molte scuole non sono più in grado di rispondere adeguatamente alle esigenze didattiche moderne, sia per quanto riguarda l'organizzazione degli spazi che per le dotazioni tecnologiche e gli impianti. Queste problematiche richiedono interventi mirati e strutturati, che possano rispondere alla necessità di un adeguamento globale del patrimonio scolastico, con lo scopo di migliorare le condizioni di sicurezza, efficienza e funzionalità.

Inoltre, il sistema scolastico italiano si sviluppa in edifici dalle caratteristiche estremamente diverse, spaziando dal prestigioso palazzo rinascimentale riadattato a uso scolastico fino alle costruzioni prefabbricate degli anni Sessanta, nate come risposte rapide a un bisogno crescente di spazi educativi. All'interno di questo scenario si trovano edifici progettati da rinomati architetti, affiancati a costruzioni meno ambiziose realizzate da uffici tecnici comunali, nonché strutture originariamente pensate per scopi completamente diversi, come caserme o abitazioni private, successivamente convertite in scuole.

Dunque, analizzare un panorama edilizio così complesso e comprenderne l'eterogeneità è fondamentale per definire interventi di riqualificazione e valorizzazione che siano mirati ed efficaci, tenendo conto delle specificità di ciascun edificio e del contesto in cui esso si inserisce. L'obiettivo ultimo è quello

di creare ambienti scolastici sicuri, funzionali e sostenibili, capaci di supportare pienamente le esigenze di una società in continua evoluzione.

Il rinnovamento del patrimonio edilizio scolastico si presenta come una necessità inderogabile, alla luce dei risultati emersi dall'analisi dell'Anagrafe dell'Edilizia Scolastica e dei numerosi report di settore, che delineano un quadro complesso e critico. Inoltre, sebbene i concorsi di progettazione e i finanziamenti destinati alla realizzazione di nuove scuole rappresentino un passo importante verso l'innovazione e la modernizzazione del sistema, non possono essere considerati sufficienti di fronte agli oltre 40.000 edifici scolastici esistenti. È quindi imprescindibile adottare un approccio mirato e strutturato, volto a intervenire in modo efficace e tempestivo. Questo implica la necessità di un piano nazionale organico che definisca priorità chiare, indirizzi tecnici specifici e una distribuzione dei fondi che tenga conto delle peculiarità territoriali e delle esigenze locali. Infatti, nonostante i finanziamenti messi in campo negli ultimi anni abbiano portato a un miglioramento della situazione, i progressi sono ancora insufficienti rispetto alla portata delle problematiche emerse. È quindi necessario un impegno continuativo, che combini investimenti strutturali, monitoraggi costanti e strategie innovative per preservare e valorizzare un patrimonio che, nonostante le sue criticità, rappresenta una risorsa fondamentale per il Paese.

4.1. Modalità di intervento

Negli ultimi dieci anni sono state attivate numerose linee di finanziamento destinate alla riqualificazione dell'edilizia scolastica (Figura 50), con l'obiettivo di affrontare le criticità che caratterizzano gran parte del patrimonio edilizio esistente.

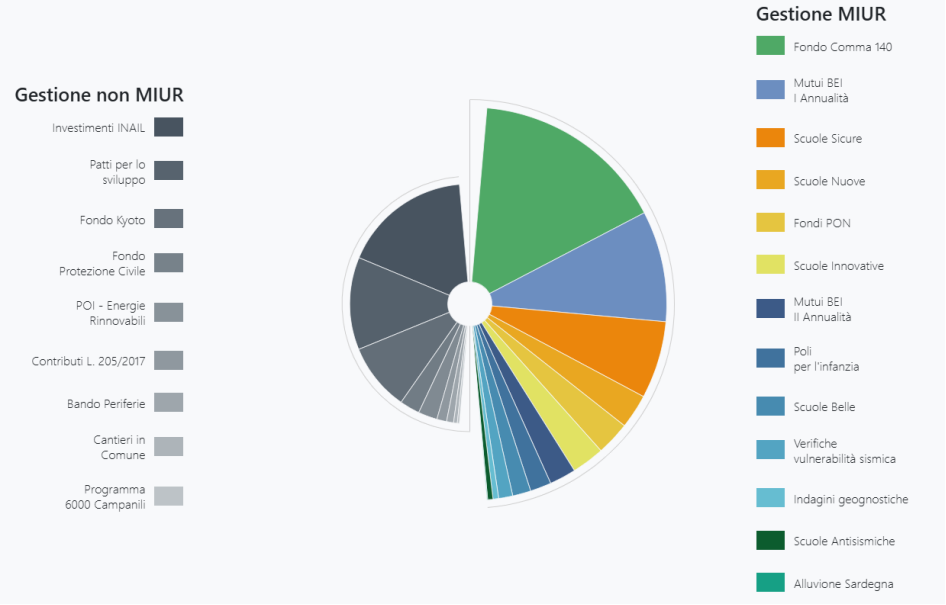


Figura 50 - Finanziamenti previsti per l'edilizia scolastica. Fonte: Portale GiES (Gestione interventi Edilizia Scolastica).

Tra i principali programmi monitorati attraverso il portale GiES (Gestione interventi Edilizia Scolastica) emergono alcune linee di intervento di particolare rilievo (Figura 52) che hanno contribuito a migliorare la sicurezza e l'efficienza del patrimonio edilizio scolastico. Il finanziamento Mutui BEI ha consentito agli enti locali di affrontare una gamma diversificata di problematiche legate alla sicurezza e all'efficienza del patrimonio edilizio: questi fondi sono stati infatti utilizzati per interventi straordinari di ristrutturazione, messa in sicurezza, adeguamento sismico ed efficientamento energetico, oltre che per la costruzione di nuovi edifici scolastici, la realizzazione di palestre e il miglioramento di quelle esistenti. Un'altra iniziativa significativa è il programma #ScuoleSicure, finalizzato alla messa in sicurezza e all'adeguamento antisismico degli edifici scolastici. Gli interventi effettuati con queste due linee di finanziamento si sono concentrati sul miglioramento sismico ed energetico, anche se quelli più frequenti sono le opere di ristrutturazione e di adeguamento normativo (Figura 51) che comprendono, per esempio, lavori di manutenzione straordinaria, interventi per il rispetto delle normative antincendio e ampliamenti.

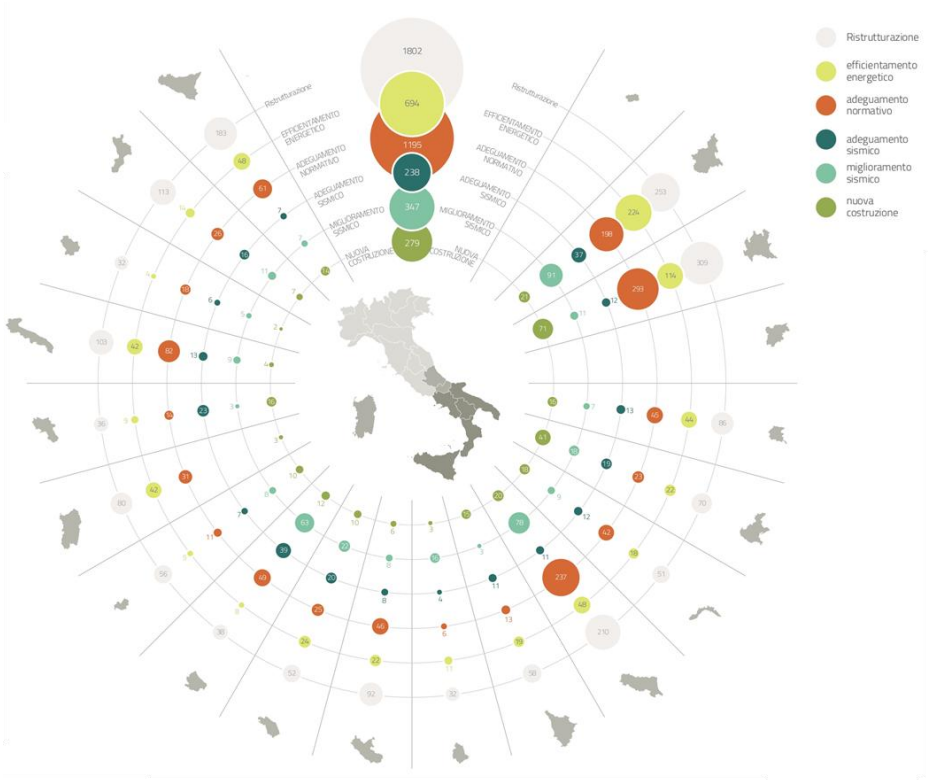


Figura 51 - Quadro sinottico delle tipologie di intervento finanziate attraverso i fondi Mutui Bei e Scuole Sicure. Fonte: Portale GiES (Gestione interventi Edilizia Scolastica), 2017.

Inoltre, il Decreto del "Fare" ha previsto uno stanziamento di 150 milioni di euro che ha consentito il finanziamento di 692 interventi. In linea con questa direzione, il programma Scuole Antisismiche, introdotto con il Decreto del Ministro dell'Università e della Ricerca del 23 dicembre 2015 n.943, ha stanziato 40 milioni di euro per interventi finalizzati all'adeguamento strutturale e antisismico degli edifici scolastici. Questo fondo ha previsto anche la possibilità di costruire nuovi immobili in sostituzione di quelli esistenti, qualora non sia possibile intervenire sulla struttura preesistente per effettuare gli interventi necessari a garantirne la sicurezza sismica. Infine, anche il Fondo Comma 140 ha messo a disposizione risorse per interventi di adeguamento sismico, prevedendo anche la possibilità di realizzare nuove costruzioni per sostituire gli edifici esistenti qualora questo non risultasse economicamente conveniente.

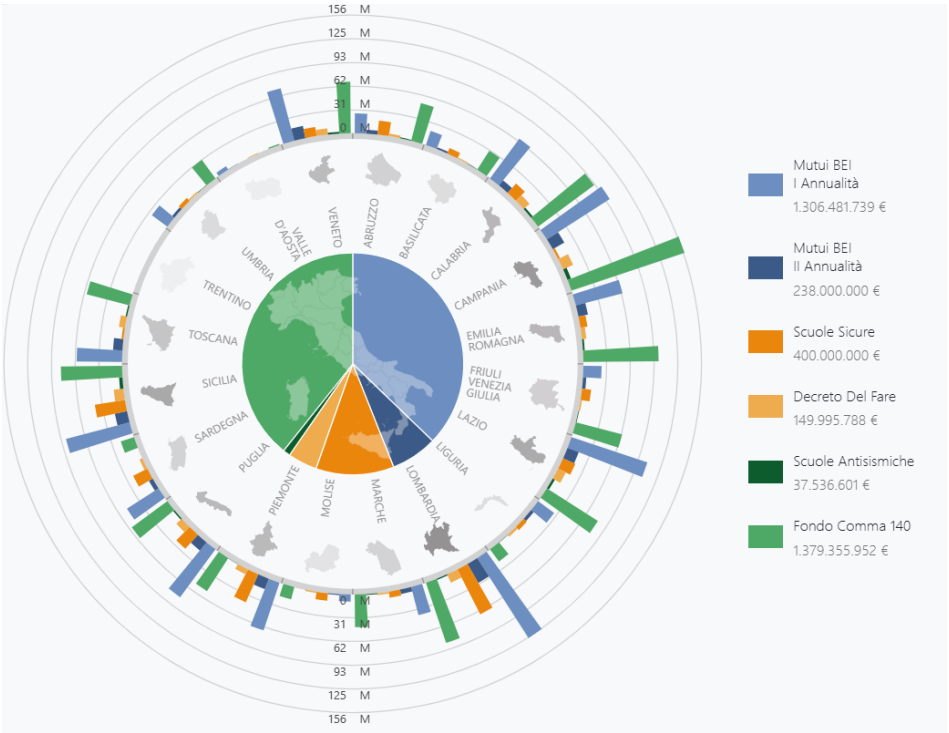


Figura 52 - Distribuzione dei finanziamenti suddivisa per regione. Fonte: Portale GiES (Gestione interventi Edilizia Scolastica).

Anche il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) ha stanziato ingenti risorse destinate al miglioramento del patrimonio edilizio scolastico, articolandole in diverse aree per rispondere alle principali esigenze del sistema educativo. Tra gli interventi più significativi si annovera la costruzione di nuove scuole nell'ambito della Missione 2, Componente 3 (Investimento 1.1), con l'obiettivo di realizzare 195 istituti innovativi, sostenibili, sicuri e inclusivi, che rappresentino modelli di eccellenza. Un altro ambito prioritario riguarda l'ampliamento dell'offerta educativa per la fascia 0-6 anni, previsto dalla Missione 4, Componente 1 (Investimento 1.1). Questo intervento punta ad aumentare il numero di asili nido e scuole dell'infanzia in tutte le regioni, colmando le lacune presenti. Particolare attenzione è stata rivolta anche al potenziamento delle infrastrutture sportive nelle scuole, con risorse assegnate attraverso la Missione 4, Componente 1 (Investimento 1.3). L'obiettivo è incrementare l'offerta di attività sportive mediante la costruzione di circa 400 nuovi edifici o l'adattamento di strutture esistenti da destinare a palestre e

impianti sportivi. Un ulteriore ambito di intervento è rappresentato dal potenziamento delle mense scolastiche, previsto dalla Missione 4, Componente 1 (Investimento 1.2), finalizzato non solo a migliorare i servizi offerti, ma anche a facilitare la diffusione del tempo pieno nelle scuole, aspetto ancora critico in molte aree del Paese. Infine, il PNRR prevede importanti investimenti per la messa in sicurezza e la riqualificazione degli edifici scolastici (Missione 4, Componente 1 – Investimento 3.3), con l'obiettivo di rendere le scuole più sicure, innovative, sostenibili e inclusive, oltre a promuovere la transizione digitale attraverso la creazione di nuove aule didattiche e laboratori all'avanguardia, nell'ambito delle Scuole 4.0 (Missione 4, Componente 1 – Investimento 3.2).

In generale, questi programmi rappresentano esempi concreti degli sforzi intrapresi per migliorare il patrimonio edilizio scolastico, ma il loro impatto, seppur significativo, è ancora limitato rispetto alle numerose criticità presenti sul territorio nazionale. Infatti, nonostante la varietà di fondi messi a disposizione, i miglioramenti ottenuti non appaiono ancora sufficienti a risolvere le problematiche, alla luce della situazione attuale delineata nel capitolo precedente. La frammentazione delle iniziative e la mancanza di un coordinamento efficace hanno portato a interventi poco incisivi, non in grado di garantire un impatto significativo sull'intero sistema. Inoltre, un monitoraggio costante e aggiornato, come quello che avrebbe dovuto offrire il portale GiES, sarebbe stato fondamentare per migliorare la pianificazione e l'efficacia di tali interventi. Lo strumento predisposto per tracciare lo stato degli edifici e l'efficacia degli interventi rappresenta invece un punto critico poiché non è aggiornato dal 2017; questa lacuna nella raccolta e nella gestione dei dati compromette la capacità di analizzare in modo completo l'efficacia delle politiche messe in atto e di pianificare azioni future. Inoltre, sarebbe interessante poter approfondire il grado di integrazione tra gli interventi strutturali ed energetici, analizzando quanti progetti abbiano affrontato simultaneamente entrambi gli aspetti e quanti invece li abbiano trattati in maniera separata. Un'ulteriore area di indagine, qualora si avessero a disposizione i dati adeguati, riguarderebbe il livello di sicurezza strutturale delle scuole oggetto di interventi di riqualificazione energetica poiché, se effettuati

su edifici che non rispettano i requisiti normativi in termini di sicurezza strutturale, potrebbero comportare gravi conseguenze qualora un evento sismico compromettesse tali strutture. Si rischierebbe, infatti, non solo di mettere in pericolo la vita degli occupanti, ma anche di vanificare i finanziamenti ricevuti, con conseguenti perdite economiche significative e l'inefficacia complessiva dell'intervento.

Dunque, nonostante gli sforzi compiuti e le risorse stanziate, persiste una mancanza di visione strategica e di un piano strutturato a lungo termine per la riqualificazione del patrimonio scolastico. La frammentarietà degli interventi e l'assenza di un coordinamento complessivo limitano l'efficacia delle azioni intraprese. Per affrontare in maniera organica le problematiche esistenti, è infatti necessario definire un piano integrato e mirato, in grado di coniugare le esigenze di sicurezza con l'efficienza energetica e la modernizzazione funzionale, garantendo al tempo stesso un monitoraggio costante e aggiornato dei progressi compiuti.

4.2. Proposta di riqualificazione integrata in ambito sismico ed energetico

Le criticità emerse dall'analisi dello stato attuale evidenziano la necessità di affrontare problematiche complesse e interconnesse che richiedono un approccio sistemico e multidisciplinare. In tale contesto, l'adozione di un approccio integrato rappresenta una risposta particolarmente promettente, poiché consente di intervenire simultaneamente su più aspetti, ottimizzando risorse, riducendo tempi di intervento e garantendo soluzioni più sostenibili ed efficaci. Tale metodo, quindi, può rappresentare una risposta concreta ed efficace a un problema così complesso e urgente.

Tradizionalmente, gli interventi di retrofit sugli edifici esistenti si sono focalizzati su strategie distinte per migliorare il comportamento energetico e sismico, approccio prevalente nella maggior parte dei contesti operativi. Tuttavia, soluzioni frammentarie e non coordinate si rivelano spesso inadeguate per affrontare in maniera strutturata le complesse sfide poste dal patrimonio edilizio esistente; per questo negli ultimi anni si è sviluppata una crescente

attenzione verso l'integrazione delle esigenze sismiche ed energetiche attraverso la promozione di soluzioni capaci di affrontare simultaneamente entrambe le problematiche. Ciò è dovuto al fatto che gran parte dei paesi europei ricade in aree a rischio sismico e recenti terremoti hanno mostrato la vulnerabilità degli edifici esistenti, che sono anche responsabili di una quota significativa delle emissioni di energia e carbonio a livello europeo.

I vantaggi degli interventi integrati risiedono principalmente nei minori costi complessivi e nel ridotto tempo di ritorno dell'investimento, che può essere considerato una stima della sua efficienza economica. Tale riduzione è dovuta principalmente al miglioramento delle prestazioni energetiche, che comporta minori consumi e costi di gestione dell'edificio. Inoltre, anche la diminuzione del rischio sismico derivante dall'adeguamento strutturale può essere interpretata, sotto un profilo economico, come una riduzione delle perdite attese in caso di terremoto, conferendo così un doppio beneficio al sistema di retrofit integrato. L'adozione di una visione olistica nella ristrutturazione degli edifici è fondamentale, poiché ignorare l'integrità strutturale potrebbe portare a stime imprecise dei risparmi attesi da un intervento di riqualificazione energetica. Gli investimenti in misura di efficienza energetica possono risultare vani qualora la struttura venga danneggiata o crolli, come ad esempio in seguito a un terremoto. Allo stesso modo, interventi di adeguamento sismico privi di considerazioni sull'efficienza energetica potrebbero compromettere non solo il comfort termico degli occupanti, ma anche aumentare i consumi energetici, riducendo l'efficacia complessiva dell'edificio nel rispondere alle esigenze di sostenibilità e riduzione dei costi operativi. Infine, nonostante richiedano una progettazione più accurata e una pianificazione approfondita, i sistemi integrati presentano il vantaggio di ottimizzare le risorse, consentendo una significativa riduzione dei tempi di inattività e dei costi di manodopera.

Belleri et al. [89] hanno analizzato il confronto tra la demolizione e la sostituzione di un edificio esistente con due approcci di retrofit (Figura 53). Nel primo scenario, viene effettuato esclusivamente un adeguamento energetico, lasciando l'edificio vulnerabile agli eventi sismici. In caso di terremoto, si potrebbero verificare danni strutturali, con effetti che spaziano dalle necessarie riparazioni a una completa sostituzione dell'edificio in base all'intensità

dell'evento. In questa eventualità, oltre ai danni strutturali, i benefici derivanti dalla riqualificazione energetica verrebbero annullati. Al contrario, adottando un approccio integrato di riqualificazione strutturale ed energetica, l'integrità dell'edificio sarebbe garantita anche in caso di eventi sismici, senza compromettere i miglioramenti energetici. In contesti a rischio sismico moderato o elevato, è dunque cruciale che qualsiasi intervento di retrofit energetico venga attuato solo su un edificio strutturalmente sicuro per evitare il rischio di perdere l'investimento energetico.

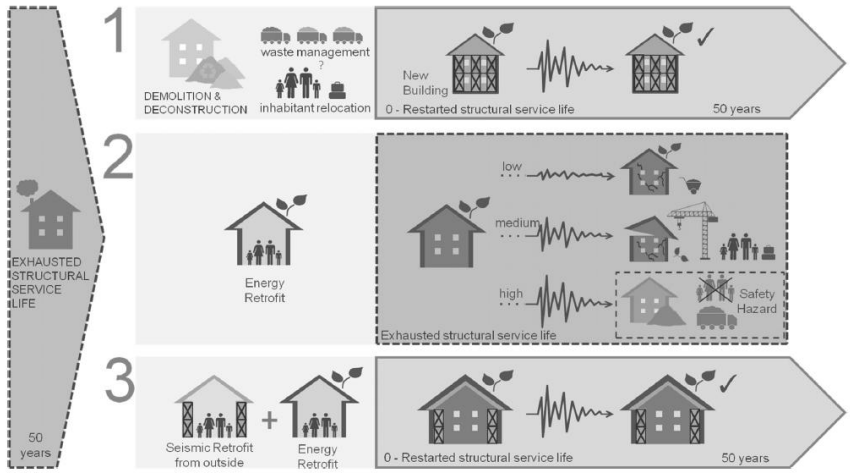


Figura 53 - Mappa concettuale dei possibili scenari di retrofit: (1) demolizione e ricostruzione; (2) solo riqualificazione energetica; (3) riqualificazione combinata energetica e strutturale. Fonte: Belleri et al. [89].

Attualmente, nonostante la crescente attenzione al tema, sono ancora necessari ulteriori sviluppi relativi alle tecnologie realmente integrate e alla loro validazione attraverso applicazioni su larga scala su edifici esistenti. Parallelamente, è fondamentale disporre di metodi di progettazione, normative e incentivi adeguati che favoriscano l'adozione di interventi di riqualificazione integrata. C'è comunque da rilevare che negli ultimi cinque anni i ricercatori hanno dedicato un interesse crescente all'integrazione tra adeguamento sismico ed efficienza energetica, evidenziando il potenziale di tale approccio nel contesto della riqualificazione edilizia e proponendo approcci innovativi per affrontare questa sfida cruciale.

Ademovic et al. [90] hanno condotto una revisione critica delle strategie integrate proposte in letteratura, analizzandone le caratteristiche, i limiti e le potenzialità. Lo studio ha evidenziato come non sia ancora stata proposta una soluzione pienamente efficiente in questo settore, mettendo in luce la presenza di numerosi problemi aperti che richiedono ulteriori approfondimenti. Tra le strategie analizzate figurano soluzioni come l'utilizzo di esoscheletri abbinati a sistemi termici e di facciata finalizzati al recupero energetico ed estetico [91], e l'impiego di pannelli CLT (*Cross Laminated Timber*) per la realizzazione di una nuova struttura interna che garantisca maggiore sicurezza strutturale ed efficienza termica, preservando l'involucro esterno esistente [92] [93]. Anche per quanto riguarda i materiali compositi, si evidenziano diverse soluzioni innovative. Tra queste, la malta rinforzata con tessuto (TRM) accoppiata a pannelli isolanti, come proposto da Gkournelos et al. [94], e le malte migliorate a base di calce a bassa resistenza, che offrono simultaneamente benefici meccanici e termici. Inoltre, Illampas et al. [95] hanno approfondito l'incorporazione di materiali a cambiamento di fase (PCM) nelle malte, con l'obiettivo di migliorarne le prestazioni termiche e sviluppare una matrice idonea per il retrofit integrato, strutturale ed energetico, degli involucri edilizi.
Per affrontare il problema del surriscaldamento negli edifici in legno a struttura leggera, causato dalla scarsa massa termica, una soluzione consiste nell'aggiunta di quest'ultima. Tuttavia, questa scelta comporta un aumento delle forze sismiche che l'edificio deve sostenere, rappresentando un significativo svantaggio. Inoltre, fattori come la lunghezza delle pareti di taglio esterne, la presenza di aperture per le finestre e la spaziatura dei montanti influenzano sia le prestazioni energetiche che quelle strutturali. Wenzel et al. [96] hanno analizzato le variabili energetiche e di progettazione sismico-strutturale per un edificio residenziale, considerando diverse configurazioni di connettori sismici laterali e altezze dell'edificio. Dallo studio è emerso che le quattro variabili principali che evidenziano la connessione tra prestazioni energetiche e sismico-strutturali sono: la spaziatura dei montanti, lo spessore dell'isolamento delle pareti, il tipo di isolamento (con capacità termica specifica elevata o bassa) e lo spessore dello strato di calcestruzzo del solaio.

Anche Pohoryles et al. hanno esaminato diversi approcci integrati, classificandoli nelle categorie riportate in Figura 54. Le soluzioni proposte includono esoscheletri, tecniche di rinforzo e isolamento per l'involucro dell'edificio esistente o la sua sostituzione con materiali più performanti, oltre a interventi su elementi orizzontali.

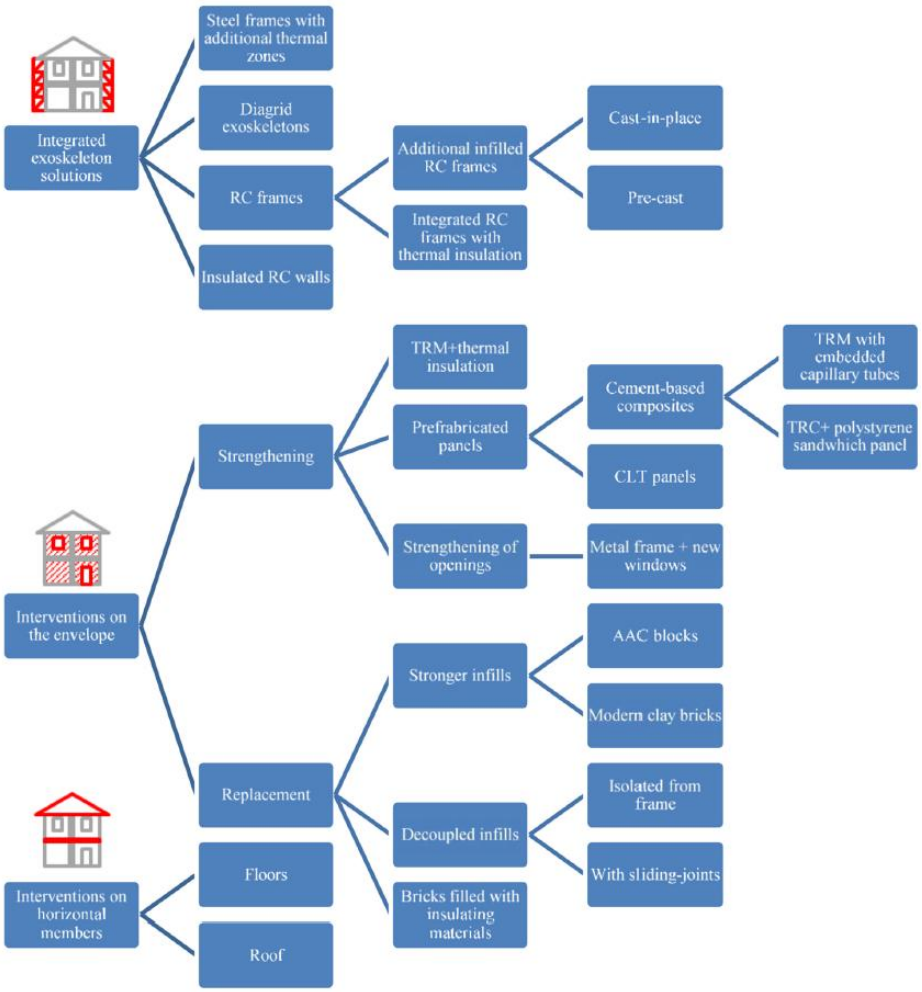


Figura 54 – Classificazione delle tipologie di interventi integrati. Fonte: Pohoryles D.A. et al. [97].

Nel combinare tecniche di adeguamento sismico ed energetico, è fondamentale valutare la loro compatibilità fin dalla fase di progettazione, considerando aspetti quali le sovrapposizioni spaziali, la scala di applicazione, il livello di disturbo e le prestazioni desiderate. Le sovrapposizioni spaziali possono

rappresentare un ostacolo, poiché vincoli pratici potrebbero limitare l'applicazione simultanea degli interventi sismici ed energetici. La scala di applicazione, invece, riguarda l'estensione dell'intervento in termini di numero di componenti edilizi coinvolti, mentre il livello di disturbo si riferisce al tempo di inattività dell'edificio necessario per completare i lavori. Recentemente, Menna et al. [98] hanno proposto un quadro di riferimento utile per integrare efficacemente gli interventi di adeguamento sismico ed energetico, illustrato nella Figura 55. Il grafico si sviluppa lungo due assi principali: l'asse orizzontale rappresenta gli aspetti energetici, mentre l'asse verticale quelli sismici. Gli obiettivi prestazionali sono definiti in un intervallo che va dai valori iniziali P0, cioè la condizione dell'edificio prima dell'intervento, ai valori massimi Pmax ottenibili attraverso l'applicazione del retrofit. Tali obiettivi sono visualizzati tramite barre di intensità di colore rosso per miglioramenti energetici e blu per i miglioramenti sismici. Gli obiettivi prestazionali possono essere classificati in base alle normative nazionali e sono associati a livelli di intervento crescenti sull'edificio: per il rafforzamento sismico, si passa da interventi locali a soluzioni globali mentre, per la riqualificazione energetica, dalla semplice riqualificazione fino alla ristrutturazione completa (classificata come livello II o I in termini di efficienza energetica). L'intersezione tra le due direzioni, energetica e sismica, identifica la combinazione ottimale delle tecniche di retrofit, rispettando i criteri di coerenza definiti. La scala di grigi nel grafico rappresenta il grado crescente di complessità e di impegno richiesto dagli interventi in termini di costi, tempi e estensione delle parti dell'edificio coinvolte.

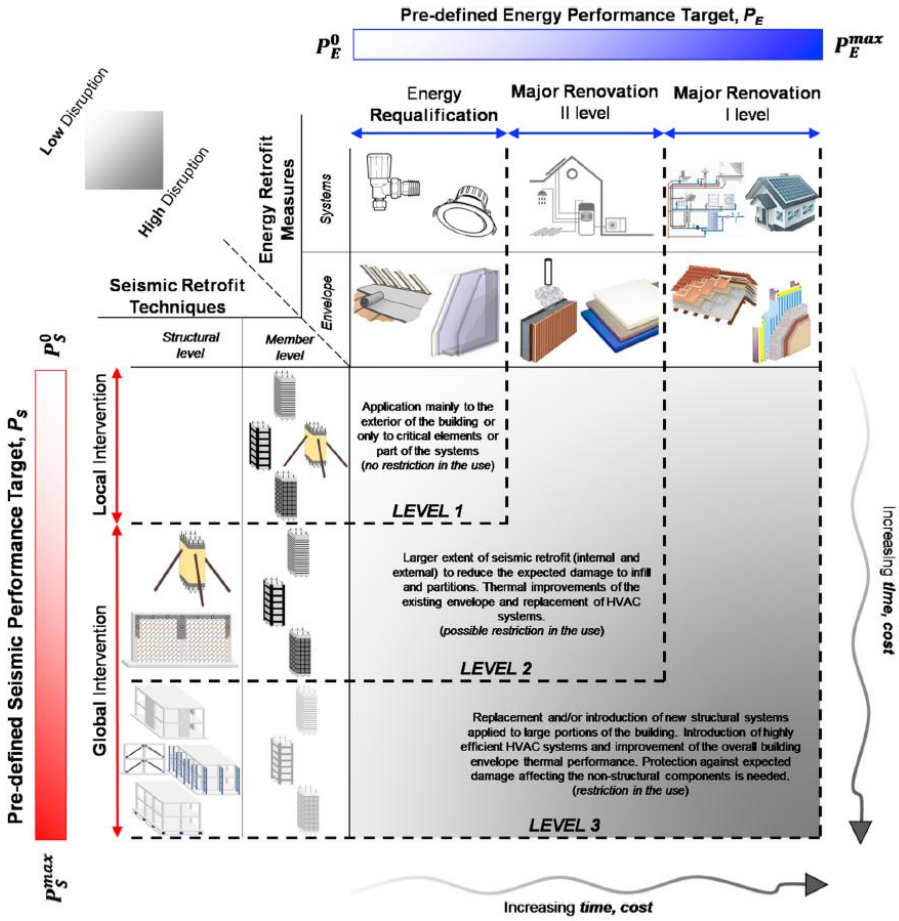


Figura 55 - Schema concettuale dei criteri di selezione delle soluzioni di retrofit integrato. Fonte: Menna et al. [98].

4.3. Esoscheletro

Tra le diverse tecniche di intervento esaminate in precedenza, si è deciso di approfondire l'analisi dell'esoscheletro, una soluzione che offre significativi vantaggi non solo sul piano strutturale, ma anche sotto il profilo architettonico, energetico e funzionale [99]. Questa scelta risponde alle esigenze tipiche di molte scuole realizzate in cemento armato, spesso caratterizzate da carenze normative in ambito sismico e da prestazioni energetiche inadeguate rispetto agli standard odierni. L'esoscheletro, infatti, non si limita a migliorare la sicurezza strutturale, ma consente di integrare interventi per l'efficienza

energetica e per la riqualificazione degli spazi, contribuendo a una rigenerazione complessiva dell'edificio. Nei contesti in cui risulta applicabile, tale intervento si configura come una soluzione multidisciplinare in grado di rispondere in maniera integrata alle esigenze di adeguamento e valorizzazione del patrimonio edilizio scolastico esistente.

L'esoscheletro costituisce una soluzione di rinforzo strutturale esterno, concepita per essere indipendente dalla struttura esistente, in quanto non esercita carichi aggiuntivi né sulla stessa né sulle sue fondazioni, preservandone le condizioni statiche. Pur mantenendo questa autonomia, l'esoscheletro è rigidamente connesso all'edificio esistente instaurando una relazione sinergica tra i due sistemi: tale configurazione consente all'esoscheletro di svolgere un ruolo strutturale complementare, contribuendo al contrasto delle forze orizzontali indotte dall'azione sismica, proteggendo l'edificio esistente in cemento armato che è particolarmente vulnerabile ai terremoti. Infatti, in condizioni dinamiche come quelle generate da un evento sismico, le due strutture hanno un funzionamento in parallelo che migliora significativamente la risposta globale del sistema in termini di sicurezza e capacità di resistenza. In particolare, per gli edifici esistenti in calcestruzzo armato a bassa duttilità, come le costruzioni realizzate in Italia prima degli anni '80 che sono prive di prescrizioni sismiche, è fondamentale prevenire l'attivazione prematura di meccanismi fragili, come la rottura dei nodi o il cedimento per taglio di elementi tozzi, nonché la formazione di meccanismi locali di piano soffice, che possono compromettere la risposta strutturale in caso di evento sismico. L'impiego di strutture additive esterne contribuisce a incrementare la rigidezza globale laterale, migliorando la capacità dell'edificio di resistere alle sollecitazioni orizzontali.

L'esoscheletro è stato introdotto principalmente come intervento strutturale con l'obiettivo di migliorare la risposta sismica delle costruzioni in cemento armato esistenti, in particolare nelle aree caratterizzate da elevata pericolosità sismica. Per questo motivo soprattutto i primi esempi realizzati a livello internazionale non hanno seguito un approccio olistico, limitandosi prevalentemente a risolvere le criticità legate alla vulnerabilità sismica senza considerare altri aspetti progettuali. Tra questi, alcuni esempi applicativi sono il

Telegraph – Channing Garage in California (Figura 56) e la palazzina per uffici dello stabilimento Magneti Marelli di Crevalcore.



Figura 56 - Esoscheletro ortogonale alla facciata del Telegraph – Channing Garage in California.

Quest'ultimo, costruito nel biennio 1973-1974 e successivamente danneggiato a seguito degli eventi sismici che hanno colpito l'Emilia Romagna nel 2012, è stato oggetto di un intervento di adeguamento sismico mediante l'istallazione di un esoscheletro disposto ortogonalmente alla facciata, come mostrato nella Figura 57. Gli elementi sismoresistenti che lo compongono sono costituiti da tralicci in acciaio, realizzati con profili cavi di sezione circolare [100].



Figura 57 - Palazzina per uffici dello stabilimento Magneti Marelli di Crevalcore prima (a sinistra) e dopo (a destra) dell'intervento di adeguamento sismico. Foto © Paolo Lambertini [100].

Questo tipo di intervento è stato applicato come soluzione per il miglioramento e l'adeguamento sismico anche nel contesto degli edifici scolastici: un esempio

significativo è rappresentato dalla scuola primaria "La Tina" di Città di Castello mostrata in Figura 58.

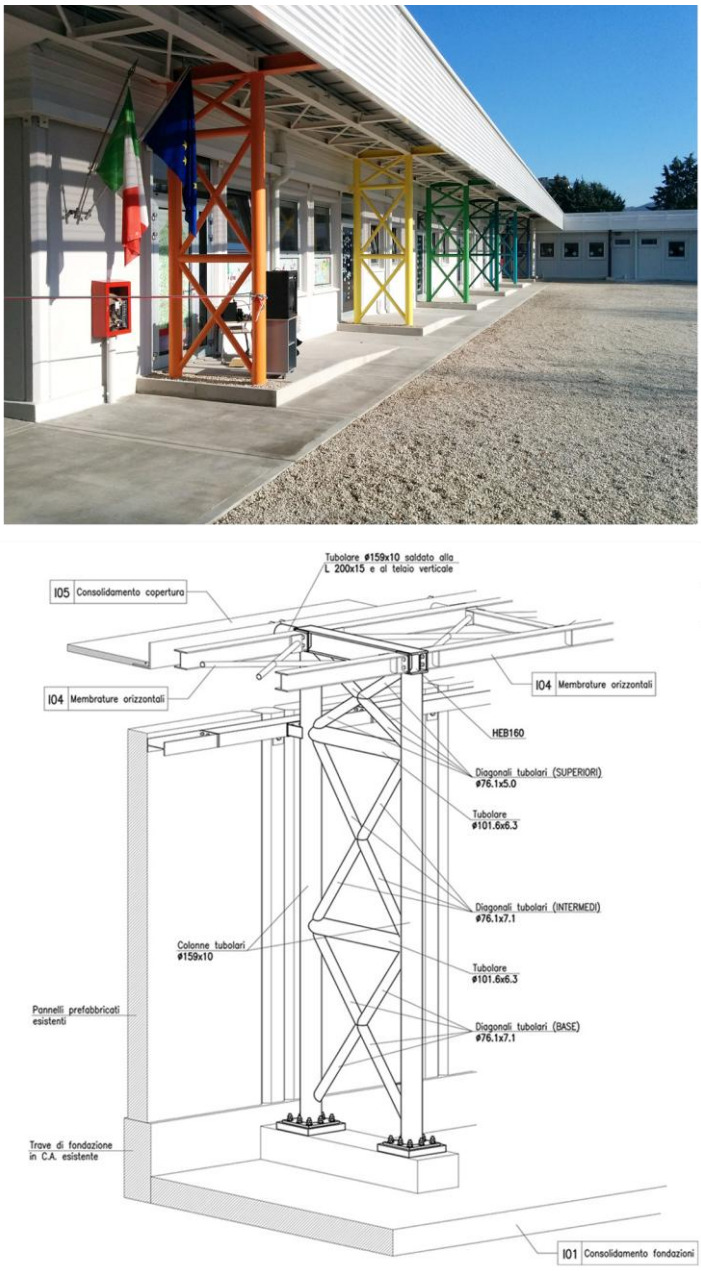


Figura 58 - Adeguamento sismico della scuola primaria "La Tina" di Città di Castello mediante esoscheletro: fotografia dell'edificio dopo l'intervento (in alto) e vista assonometrica di un singolo telaio (in basso). © EXUP s.r.l.

L’esoscheletro, il cui nome si ispira al linguaggio della biomimesi [101]: offre il vantaggio di non interrompere l’uso dell’edificio esistente perché gli elementi di rinforzo sono realizzati all'esterno (Figura 59). Al contrario, l’endoscheletro viene utilizzato in presenza di vincoli di natura fisica o geometrica (ad esempio edifici in aggregato), urbanistica (come limitazioni di relative distanze e volumi) o architettonica (ad esempio edifici vincolati). Inoltre, l’esoscheletro può essere definito integrale nel caso in cui avvolga completamente la costruzione esistente, svolgendo un ruolo sia di addizione laterale che verticale, garantendo anche la protezione dell’impalcato di copertura.

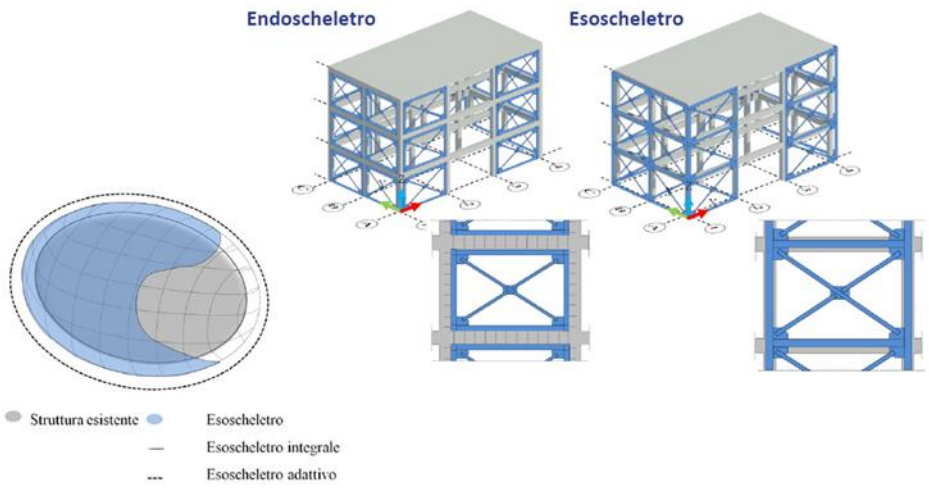


Figura 59 - Concetto di esoscheletro. Fonte: Di Lorenzo et al. [102].

Secondo Di Lorenzo et al. [102], la progettazione degli esoscheletri si sviluppa attraverso vari livelli, dal generale al particolare. Nel Livello I, che riguarda la scelta del sistema, è necessario determinare la tipologia di esoscheletro in base alla trasmissione delle azioni sismiche che può avvenire attraverso elementi piani bidimensionali (2D) o spaziali tridimensionali (3D), come mostrato in Figura 60. Nel primo caso, le pareti possono essere orientate ortogonalmente (2D⊥) o parallelamente (2D//) alla facciata dell’edificio esistente: nei sistemi 2D⊥, ispirati al concetto di contrafforte, il collegamento con la struttura esistente avviene tramite link rigidi o dispositivi di dissipazione aggiuntiva. Al contrario, i sistemi 2D// sono fortemente influenzati dalla griglia strutturale dell'edificio e richiedono specifici dispositivi per il trasferimento delle azioni

orizzontali a livello di piano. Infine i sistemi 3D, pur essendo più efficienti perché capaci di assorbire azioni orizzontali indipendentemente dal loro orientamento, comportano costi più elevati. Questi sistemi spaziali possono essere piani o curvi, continui (membrane o gusci) o grigliati (a strato singolo o doppio). La scelta dello schema resistente non è determinata esclusivamente da considerazioni di natura strutturale, ma è influenzata anche da ulteriori fattori. Tra questi, rivestono particolare importanza la disponibilità e l'utilizzabilità dello spazio lungo il perimetro della costruzione, oltre alle esigenze formali e distributive legate all'architettura dell'edificio. Un ulteriore aspetto è rappresentato dalla presenza, all'interno della struttura esistente, di piani sufficientemente rigidi o di aree adeguate per l'inserimento di sistemi o collegamenti necessari per il trasferimento delle azioni all'esoscheletro, che deve essere omogeneo e continuo lungo tutto il contorno dell'edificio.

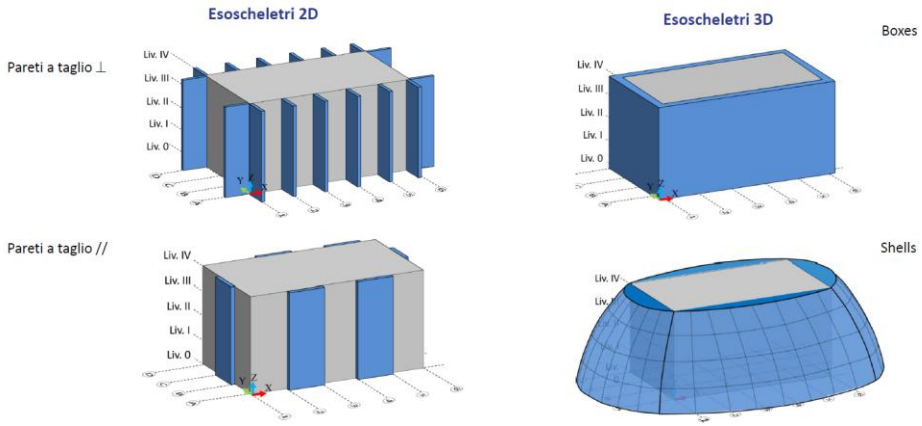


Figura 60 - Scelta tipologica di livello I: pareti di taglio perpendicolari (2D⊥), parallele (2D//) alla facciata e strutture 3D. Fonte: Di Lorenzo et al. [102].

Successivamente è necessario decidere la configurazione (Livello II) e la tipologia di controvento (Livello III) e scegliere i profili degli elementi (Livello IV). Infine, la fase conclusiva della scelta tipologica prevede la descrizione dei collegamenti e dei sistemi di trasferimento delle azioni tra l'esoscheletro e la struttura esistente e tra l'esoscheletro e le fondazioni (Livello V) [103].

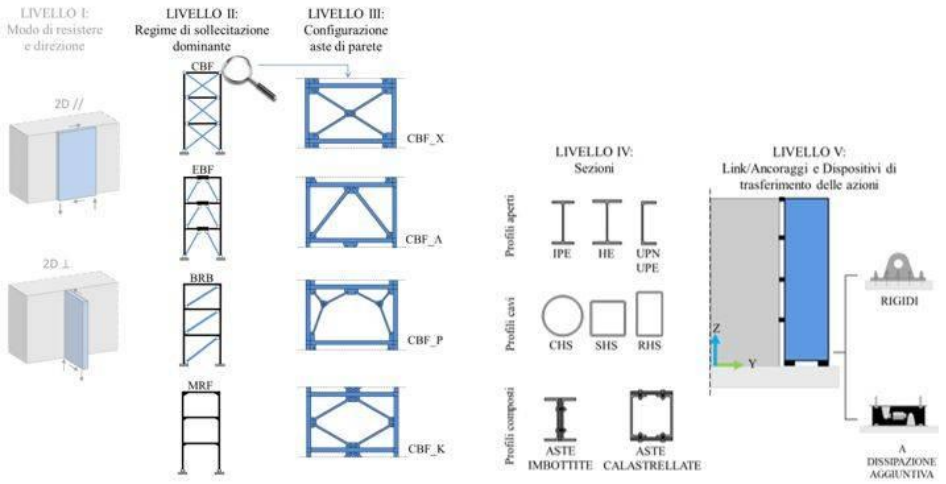


Figura 61 - Scelta tipologica dal Livello II al Livello V. Fonte: Landolfo et al. [103].

Molteplici workshop [104] e progetti di ricerca come il Progetto di Rilevante Interesse Nazionale *Nuove pratiche progettuali per la riqualificazione sostenibile di complessi di habitat sociale in Italia*[31] del 2009 [105] e il Progetto *DPC-ReLUIS 2019-2021*[32] hanno dimostrato che tale strategia di intervento si dimostra particolarmente efficace per il retrofit integrato che combina il miglioramento sismico, energetico e funzionale dell'intera costruzione. L'esoscheletro, pertanto, non solo incrementa i livelli di sicurezza strutturale dell'edificio esistente rispetto ai principali stati limite ma, se concepito nell'ambito di una progettazione integrata [91], può contribuire anche al miglioramento delle prestazioni energetiche della costruzione e fornire allo stesso tempo l'opportunità di ripensare l'immagine architettonica dell'edificio [106] e la distribuzione interna degli ambienti, considerando l'aggiunta di nuovi spazi.

[31] Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (MIUR), Progetti di Rilevante Interesse Nazionale (PRIN), 2009, Nuove pratiche progettuali per la riqualificazione sostenibile di complessi di habitat sociale in Italia, Coordinatore Scientifico: M. Montuori, Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica, Università degli Studi di Brescia

[32] Dipartimento della Protezione Civile (DPC), Consorzio della Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica (ReLUIS) 2019-2021, WP5 Interventi di rapida esecuzione a basso impatto ed integrati, Coordinatore scientifico: Prota, A., Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura-Università degli Studi di Napoli Federico II Napoli, da Porto, F., Dipartimento di Ingegneria civile, edile e ambientale-Università degli Studi di Brescia.

Bellini et al. [107] hanno esplorato un'applicazione dell'esoscheletro che integra il rafforzamento sismico con soluzioni mirate all'ottimizzazione delle prestazioni energetiche dell'edificio. Tra questi, l'implementazione di serre solari lungo la facciata meridionale, l'aggiunta di isolamento termico, la sostituzione delle finestre esistenti con infissi ad alte prestazioni e l'installazione di sistemi di ombreggiamento mediante lamelle orientabili per il controllo della radiazione solare. Tale approccio è stato applicato attraverso analisi numeriche a un edificio in cemento armato degli anni '70, evidenziando un miglioramento significativo della risposta sismica e una riduzione del 70% del fabbisogno energetico per il riscaldamento.

Un altro esempio di esoscheletro utilizzato come intervento integrato è il progetto di ricerca europeo Pro-GET-onE (*Proactive Sinergy of integrate Efficient Technologies on Buildings' Envelopes*) [108] che adotta una visione olistica basata sull'integrazione di tecnologie volte ad aumentare l'efficienza energetica, la sicurezza sismica e la sostenibilità socio-economica degli edifici. Nel sistema proposto la struttura esterna fornisce anche zone cuscinetto termiche che contribuiscono a ridurre l'irraggiamento solare in estate, a fornire riscaldamento in inverno e a supportare l'installazione plug-and-play di nuovi sistemi HVAC. Inoltre, l'esoscheletro consente di generare spazi abitativi aggiuntivi, come balconi o stanze supplementari, in base alle esigenze degli utenti [109]. Nonostante il costo iniziale dell'intervento sia superiore a quello di una ristrutturazione energetica tradizionale, l'approccio integrato offre vantaggi significativi tra cui una ridotta necessità di trasferire i residenti durante i lavori, un incremento del valore immobiliare dovuto all'aumento dello spazio abitativo e un miglioramento complessivo del comfort degli utenti e del valore architettonico dell'edificio.

Dal punto di vista strutturale, l'esoscheletro non solo migliora il comportamento globale della struttura in risposta alle azioni sismiche, ma offre anche vantaggi in termini di durabilità: il doppio involucro creato dall'esoscheletro, infatti, protegge le zone più vulnerabili alle intemperie [110]. Questo intervento non solo aumenta la durabilità della costruzione, ma ne estende anche la vita utile, aspetto fondamentale per gli edifici in calcestruzzo armato costruiti nel secondo dopoguerra e negli anni '70, che costituiscono una parte significativa del

patrimonio edilizio esistente. Questa soluzione garantisce anche la sostituibilità e la riparabilità nel tempo, grazie all'impiego di elementi prefabbricati installati a secco, che semplificano e velocizzano le operazioni di cantiere. L'applicazione dell'esoscheletro per la ristrutturazione degli edifici consente di ridurre i disagi per gli occupanti poiché, essendo una struttura totalmente esterna, permette di mantenere l'edificio esistente in funzione durante l'intervento. Inoltre, questo offre la possibilità di modificare l'aspetto esterno dell'edificio, includere nuovi spazi fruibili e integrare soluzioni per il miglioramento energetico, sia attive che passive. Tale approccio risulta vantaggioso anche sotto il profilo economico e ambientale poiché permette l'abbattimento degli oneri di demolizione e dello smaltimento dei rifiuti, oltre ai costi di una nuova costruzione.

Tuttavia, le soluzioni di esoscheletro presentano alcune limitazioni. La necessità di spazio intorno alla struttura e di un sistema di fondazioni aggiuntivo rende difficile la loro applicazione, soprattutto in contesti urbani densamente popolati; inoltre, l'intervento comporta modifiche significative all'aspetto esterno dell'edificio, che in alcuni casi potrebbe non essere auspicabile o consentito, come per gli edifici storici vincolati. L'introduzione di una nuova struttura implica anche l'utilizzo di un notevole quantitativo di materiale, aumentando i costi e il carbonio incorporato associato dall'intervento. Infine, poiché solitamente le forze vengono trasmesse dall'edificio esistente all'esoscheletro per mezzo di connessioni a livello del solaio, se il diaframma orizzontale non è sufficientemente rigido e resistente, l'efficacia dell'intervento potrebbe essere compromessa.

5. NUOVA PROPOSTA PER L'OTTIMIZZAZIONE DEGLI INTERVENTI

5.1. Multidisciplinary Design Optimization

Il *Multidisciplinary Design Optimization* (MDO) è "una metodologia per la progettazione di sistemi e sottosistemi complessi che sfrutta in modo coerente la sinergia dei fenomeni che interagiscono reciprocamente" [111]. Lo scopo della progettazione multidisciplinare (MDO) è quello di trovare la soluzione ottimale per un problema complesso utilizzando una metodologia di ottimizzazione formalizzata. Questa metodologia viene utilizzata per ottenere un'ottimizzazione del progetto considerando le interazioni tra più discipline con obiettivi contrastanti tra loro. Il valore dell'approccio multidisciplinare, infatti, è dato dal fatto che alla fine del processo viene raggiunto l'ottimo complessivo, che risulta migliore rispetto a quello trovato ottimizzando sequenzialmente ciascun fenomeno, anche se l'analisi contemporanea di tutti gli aspetti ne aumenta significativamente la complessità. Dunque questa metodologia, come indagato da Chen et al [112], "mira ad esplorare il meccanismo dell'azione sinergica" tra i diversi aspetti senza considerarli come entità isolate e per questo è utilizzata per ottimizzare un sistema, un sottosistema o un componente di un prodotto considerando due o più discipline contemporaneamente.

L'ottimizzazione è una procedura matematica utilizzata per determinare il progetto migliore per un insieme di vincoli dati, modificando le variabili di input in modo automatico. Un problema di ottimizzazione può essere formulato come:

$$\begin{aligned} &\min_{x}/\max && f(x) \\ &soggetto\ a && g(x) \leq 0 \\ & && h(x) = 0 \\ & && x^{inferiore} \leq x \leq x^{superiore} \end{aligned} \qquad (1)$$

Dove $f(x)$ è la funzione obittivo, $g(x)$ e $h(x)$ sono rispettivamente i vincoli di disuguaglianza e di uguaglianza e x sono le variabili di progetto. Lo scopo è quello di trovare i valori delle variabili che minimizzano o massimizzano la funzione obiettivo rispettando tutti i vincoli. Come mostrato dalla Figura 63 le

ottimizzazioni possono essere di diverse tipologie. Secondo un primo criterio di classificazione che riguarda il numero di obiettivi, i problemi di ottimizzazione vengono divisi in due macrocategorie: singolo obiettivo (SOO) e multi-obiettivo (MOO). Il problema di ottimizzazione definito nell'equazione (1) è a obiettivo singolo, ma la maggior parte delle applicazioni reali ne includono molteplici, spesso in contrasto tra loro. Quando si risolvono problemi di ottimizzazione multi-obiettivo (MOO), due o più funzioni (2) sono contemporaneamente minimizzate o massimizzate. Un tipico problema MOO con m funzioni obiettivo è così definito:

$$\begin{aligned} &\min_{x}/\max && f_1(x), \dots, f_m(x) \\ &soggetto\ a && g(x) \leq 0 \\ & && h(x) = 0 \\ & && x^{inferiore} \leq x \leq x^{superiore} \end{aligned} \qquad (2)$$

In genere, mentre per un'ottimizzazione a obiettivo singolo è facile identificare la soluzione migliore, un problema MOO non ha un'unica soluzione ottimale ma un insieme di soluzioni che riflettono il compromesso tra gli obiettivi. In questo caso una soluzione si dice non dominata, o ottimale di Pareto, se non esistono altre soluzioni che possano migliorare uno qualsiasi degli obiettivi senza peggiorarne almeno un altro. L'insieme di tutte le soluzioni ottimali è chiamato insieme ottimale di Pareto e la sua rappresentazione nello spazio degli obiettivi è detta fronte ottimale di Pareto. Questo è rappresentato da una curva (Figura 62), una superficie o una iper-superficie per i rispettivi casi di due, tre o più obiettivi in conflitto tra loro. Al termine delle simulazioni di ottimizzazione multi-obiettivo verranno quindi prodotte una serie di soluzioni di compromesso che devono essere esaminate e selezionate dal tecnico in base alle esigenze progettuali.

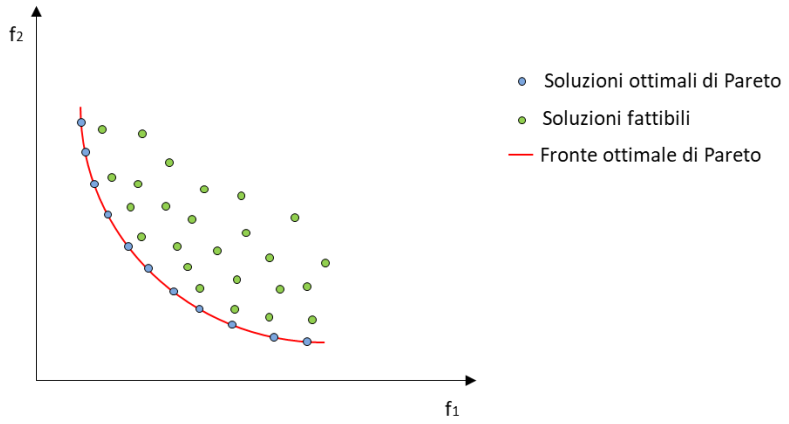


Figura 62 - Rappresentazione di punti di Pareto e punti fattibili in un problema con due funzioni obiettivo.

Inoltre, dal momento che più obiettivi possono riferirsi a una sola disciplina o a discipline differenti, le ottimizzazioni multi-obiettivo possono essere ulteriormente suddivise in due sottocategorie: ottimizzazione multi-obiettivo monodisciplinare (SDO) e multidisciplinare (MDO) [113]. La capacità di quest'ultima tipologia di indagare le interazioni tra più discipline alla ricerca di un compromesso tra gli obiettivi contrastanti aumenta notevolmente la complessità delle simulazioni; questo richiede una capacità computazionale elevata ma, allo stesso tempo, rappresenta un grande potenziale per migliorare il processo di progettazione. Questa ricerca si concentrerà sullo studio dei possibili benefici che l'applicazione delle simulazioni di ottimizzazione multidisciplinare può avere se applicata alla progettazione edilizia che, sin dalle prime fasi, è caratterizzata da un'intensa connessione tra le discipline.

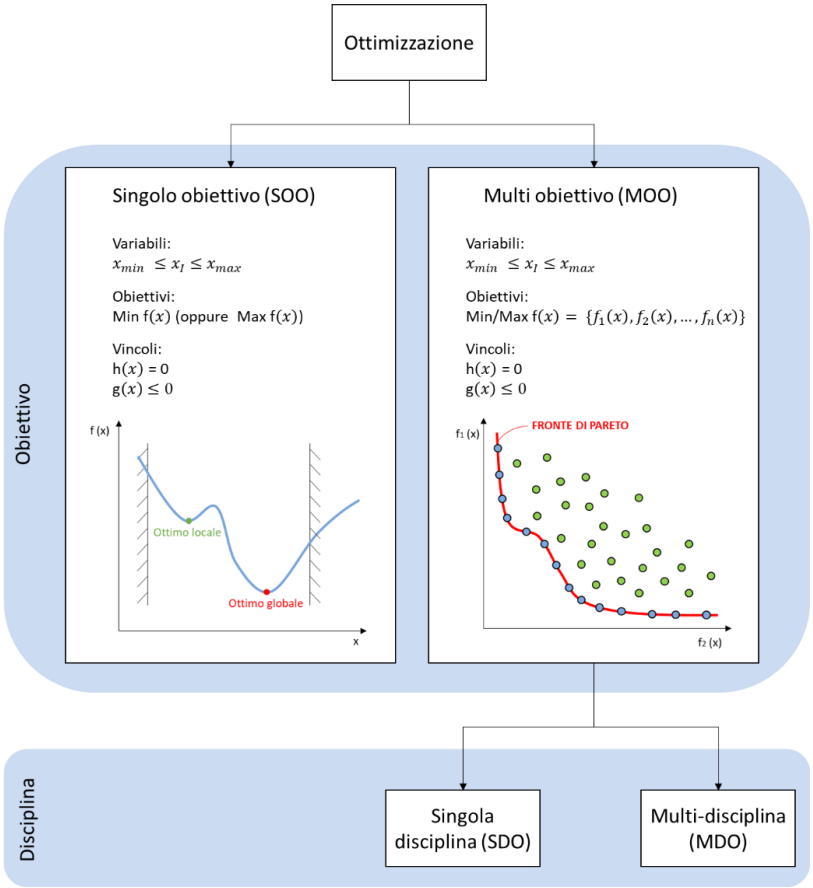


Figura 63 - Classificazione delle tipologie di ottimizzazione.

Le simulazioni MDO hanno avuto origine negli anni ’80 nell’ambito della progettazione di aeromobili nel campo della ricerca aerospaziale [114]. In particolare nel 1982, in un documento di ricerca sull'ottimizzazione strutturale, Sobieszczanski-sobieski [115] ha proposto l'ottimizzazione multidisciplinare come nuova metodologia di progettazione per superare alcuni limiti derivanti dalla progettazione tradizionale. A partire dalle ottimizzazioni strutturali [116] l’MDO si è evoluta integrando nel problema anche le discipline che avevano una forte interazione con gli aspetti strutturali, rendendo così l'ottimizzazione multidisciplinare. Da quando è stata proposta questa metodologia come un nuovo campo di ricerca e come un aiuto nella progettazione di sistemi ingegneristici [117] ricevette grande attenzione da parte del mondo accademico e industriale. Infatti, per esempio, l'AIAA (American Institute of Aeronautics and

Astronautics), la NASA (National Aeronautics and Space Administration), l'OAI (Ohio Aerospace Institute) e l'USAF (United States Air Force) nel 1986 hanno organizzato negli Stati Uniti il primo simposio sulla “Multidisciplinary Analysis and Optimization” che è diventata una delle principali conferenze accademiche internazionali sull’argomento.

Il processo di ottimizzazione multidisciplinare, come mostrato in Figura 64, può essere suddiviso in tre fasi principali: Pre-processing, Cicli di simulazione; Post-processing.

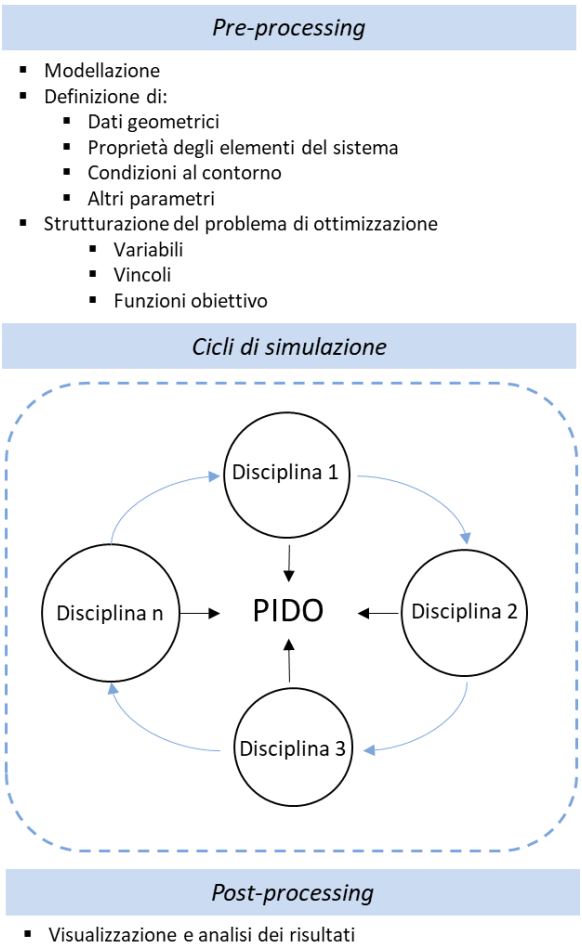


Figura 64 - Processo di ottimizzazione multidisciplinare.

Possono essere indipendenti, se sono specifiche di una singola disciplina, o condivise, se riguardano più discipline. Inoltre, ogni variabile può essere

continua o discreta, può quindi assumere qualsiasi valore o solo alcuni valori discreti, compresi tra i limiti superiore e inferiore. I vincoli, che possono essere di uguaglianza o disuguaglianza, costituiscono le restrizioni dello spazio di progetto, cioè i requisiti del sistema che devono essere soddisfatti affinché il progetto sia accettabile. I punti che soddisfano tutti i vincoli sono detti fattibili, tutti gli altri non sono fattibili. Le funzioni obiettivo, invece, rappresentano ciò che si vuole minimizzare o massimizzare. Unendo le variabili di progetto, gli obiettivi e i vincoli, si ottiene la formulazione dell'ottimizzazione per un problema di progettazione come mostrato nella Tabella 4.

Funzione obiettivo		$\min f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)\}$
Vincoli	disuguaglianza	$g_j(x) \leq 0 \;\; j = 1, \dots, m$
	uguaglianza	$h_k(x) = 0 \;\; k = 1, \dots, m_h$
Variabili		$x_i^I \leq x_i \leq x_i^S$

Tabella 4 - Formulazione di un problema di ottimizzazione.

Dove $f(x)$ è la funzione obiettivo da minimizzare o massimizzare, $g_j(x)$ sono i vincoli di disuguaglianza, $h_k(x)$ i vincoli di uguaglianza e x le variabili con i limiti inferiori x_i^I e superiori x_i^S. Lo scopo dell'ottimizzazione multidisciplinare, quindi, è trovare all'interno dello spazio di progettazione il design ottimale o quasi ottimale che soddisfi contemporaneamente gli obiettivi di più discipline e i vincoli dati. Il problema può essere lineare, se le funzioni obiettivo e vincolo sono funzioni lineari delle variabili di progetto, non lineare, se la funzione obiettivo o una qualsiasi delle funzioni di vincolo sono non lineari.

Durante la seconda fase del flusso di lavoro vengono eseguite le simulazioni che, prendendo in considerazione più discipline e le loro interazioni, risultano più complesse di quelle che riguardano problemi di ottimizzazione tradizionali. Infatti, dopo aver collegato i modelli creati per ogni disciplina a specifici strumenti di analisi, c'è bisogno di uno strumento che orchestri l'intero processo in modo da gestire lo scambio di informazioni tra questi. Quindi, l'ottimizzazione

multidisciplinare viene sviluppata in un singolo ambiente di processo in cui un software simula analisi in modo iterativo sul modello; in ogni ciclo avviene la generazione di opzioni di progettazione con diverse combinazioni di variabili. Questo ambiente di processo è generalmente chiamato *Process Integration and Design Optimization* (PIDO) [1] e utilizza diversi algoritmi di ottimizzazione che consentono di esplorare rapidamente le alternative di progettazione e di eseguire dei compromessi per selezionarle. Le piattaforme PIDO, comunemente utilizzate, costituiscono un *framework* di interoperabilità dei software di elaborazione (*solver*) in grado di:

- automatizzare e integrare in un processo unico strumenti computazionali, di modellazione e di analisi;
- integrare e coordinare i risultati dell'analisi considerando più domini fisici;
- ottimizzare uno o più aspetti della progettazione di un prodotto iterando le analisi della progettazione attraverso i parametri di input verso delle funzioni obiettivo specifiche.

Dunque, il processo di simulazione avviene attraverso cicli iterativi che, per facilitarne l'utilizzo, vengono generalmente automatizzati. Questo permette di generare e analizzare rapidamente alternative di progetto e selezionare gli output che rispondono ai parametri assegnati nella fase iniziale. Affinchè il processo sia automatizzato, è necessario definire e modificare i parametri geometrici e non geometrici di un'alternativa progettuale in un ambiente flessibile e di facile utilizzo, in modo tale da evitare sforzi significativi per rigenerare la geometria e riassegnare i parametri.
Generalmente, prima dell'ottimizzazione vera e propria che considera variabili, vincoli e funzioni obiettivo, lo stesso processo di simulazione viene eseguito considerando solo le variabili di progetto. Questo è un primo test, chiamato *Design of Experiments* (DoE), condotto per esplorare lo spazio di progettazione e comprendere il comportamento globale del sistema prima della simulazione vera e propria (Appendice A – Design of Experiment). Successivamente, vengono eseguite le ottimizzazioni in cui il processo di simulazione viene ripetuto

nuovamente considerando l'intero problema di ottimizzazione: le diverse opzioni di progettazione generate tramite combinazioni differenti di variabili, vengono valutate dall'algoritmo a seconda degli obiettivi e dei vincoli assegnati. Nell'ultima fase, le opzioni di progettazione identificate come fattibili al termine dell'ottimizzazione, vengono visualizzate e analizzate.

A causa della relazione di accoppiamento tra le discipline, nell'ottimizzazione della progettazione multidisciplinare si presentano alcuni limiti, tra cui l'elevato costo computazionale delle simulazioni e l'aumento della complessità dell'attività di progettazione: con questo approccio, infatti, i progettisti devono ipotizzare una struttura concettuale che guidi la scelta delle alternative (tramite vincoli e variabili di progetto) e, a volte, anche un modello geometrico parametrico [2]. Tuttavia, una volta che l'intento progettuale è stato definito, l'automazione può ridurre significativamente il tempo necessario per generare un vasto numero di alternative di progetto che rispettino i criteri assegnati, oltre a mettere in luce le relazioni tra le diverse discipline evidenziando come la variazione di un parametro possa influenzare positivamente o negativamente un altro. Infatti, dal momento che il processo di solito utilizza dei loop iterativi automatizzati per eseguire le simulazioni, viene ridotto significativamente il processo laborioso di generare alternative progettuali e ciò permette ai progettisti di sperimentare ed esaminare molte opzioni fin dalla prima fase di progettazione. Dunque, il vantaggio di questa tecnica è di espandere lo spazio di progetto e di estendere il numero di soluzioni esaminate rispetto ai metodi tradizionali: questo consente ai professionisti di dedicare più tempo alla valutazione dei risultati e di prendere decisioni sul progetto in modo più consapevole, come provato da Flager et al. [118].

L'interazione della capacità di calcolo e delle competenze umane, essenziali nella preparazione dei modelli e nell'interpretazione dei risultati, è fondamentale per il successo di questa metodologia. Infatti, l'ottimizzazione del progetto non può sostituire né il professionista che controlla il processo e supervisiona il risultato né il calcolo della verifica finale; questo metodo ha il solo scopo generale di fornire dati sufficienti per supportare le decisioni di progettazione. Il progettista ha un ruolo importante anche nella fase iniziale del processo in quanto stabilisce i vincoli, le funzioni obiettivo e, tramite le variabili,

i limiti entro i quali l'algoritmo può cercare una soluzione ottimale. Dunque, come mostrato in Figura 65, il flusso di lavoro può essere suddiviso in un ciclo interno, in cui l'elaborazione del software si basa sui parametri impostati dal progettista, e in un ciclo esterno in cui il progettista, valutando i risultati, seleziona una soluzione oppure modifica parte del processo [119]. Gli obiettivi e i vincoli progettuali, infatti, possono cambiare spesso durante la realizzazione di un progetto in base all'osservazione e all'interpretazione dei risultati o alle diverse esigenze di ogni signola fase progettuale: per questo è essenziale l'interazione delle competenze umane con la capacità di elaborazione automatica.

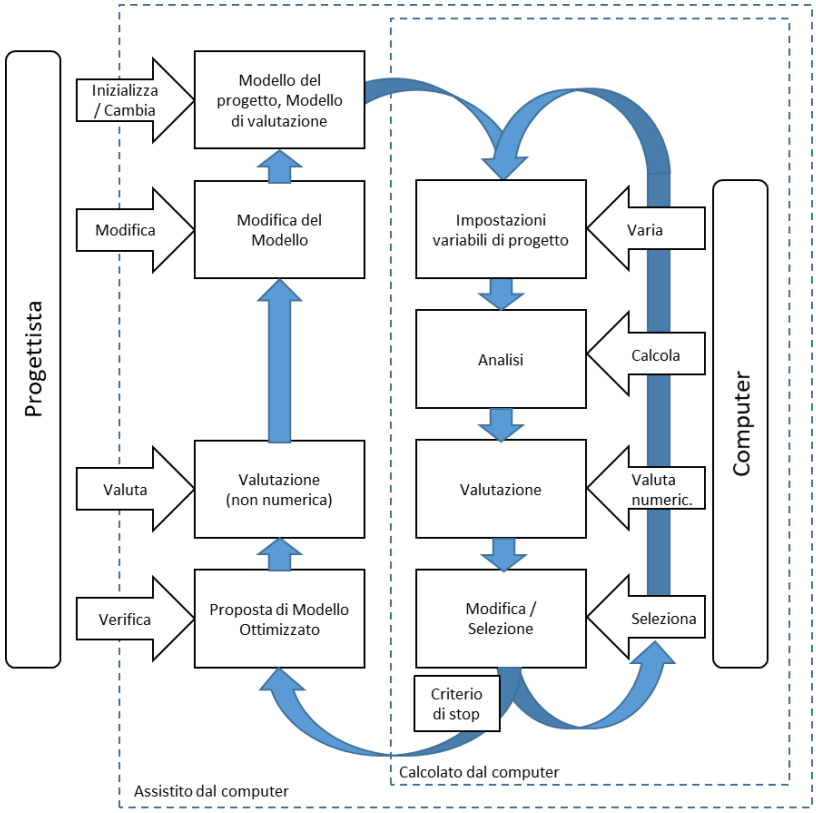


Figura 65 – Schematizzazione dei cicli del flusso di lavoro. Rielaborazione dell'autrice da Geyer et al. [119].

Inoltre le simulazioni di ottimizzazione producono principalmente soluzioni basate su dati numerici, spesso privilegiando gli aspetti quantitativi rispetto agli

obiettivi specifici di progettazione stabiliti dal tecnico. Le complesse interazioni tra molteplici variabili ed esigenze, che fanno parte del processo di progettazione architettonica, non possono essere tutte rappresentate quantitativamente. Infatti, l'MDO è solo una metodologia che supporta i progettisti nel trovare la migliore soluzione da adottare ma non può sostituirli nel considerare i criteri sociali e le esigenze delle persone che vanno oltre gli aspetti puramente tecnici.

5.2. Applicazioni nella progettazione edilizia

La metodologia MDO è utilizzata in numerosi campi e le applicazioni di maggior successo sono state sviluppate nei settori automobilistico e aerospaziale [120] che l'hanno integrata nel processo di progettazione di macchine [121], aerei [122] e veicoli spaziali. Anche se in questi settori le ottimizzazioni multidisciplinari sono ampiamente diffuse, nella progettazione edilizia tali simulazioni sono ancora nella fase di ricerca e sperimentazione e perciò le loro applicazioni risultano comparativamente modeste. La forte interazione tra diverse discipline, tipica della progettazione architettonica fin dalle fasi iniziali, potrebbe trarre vantaggio da tale metodologia che analizza problemi multidisciplinari. Infatti, con la necessità di edifici efficienti su più fronti come la stabilità strutturale, l'efficienza energetica e la qualità ambientale interna, in cui a volte gli obiettivi di progettazione sono in contrasto tra loro, è essenziale valutare più alternative e analizzare i risultati per giungere ad un compromesso. Anche se può essere applicata nelle diverse fasi del processo di progettazione, la sua applicazione è particolarmente utile nella fase concettuale poiché le prestazioni complessive degli edifici sono fortemente influenzate dalle decisioni prese durante la progettazione preliminare [123].
Come un prodotto complesso, ad esempio un aereo, può essere considerato un sistema composto da numerosi sottosistemi che si influenzano reciprocamente [124], allo stesso modo un edificio può essere scomposto in vari sottosistemi (strutturale, impiantistico, funzionale) ed elementi (chiusure orizzontali, chiusure verticali, etc.). La Figura 66, che mette in evidenza questa relazione, è stata elaborata da Muthumanickam et al. [125] in una revisione dettagliata

sull'integrazione della metodologia MDO nel settore edile in cui vengono analizzate dettagliatamente le sfide tecniche implicate nell'ottimizzazione multidisciplinare ed evidenziate le somiglianze e le differenze tra i processi di progettazione nei diversi campi dell'ingegneria.

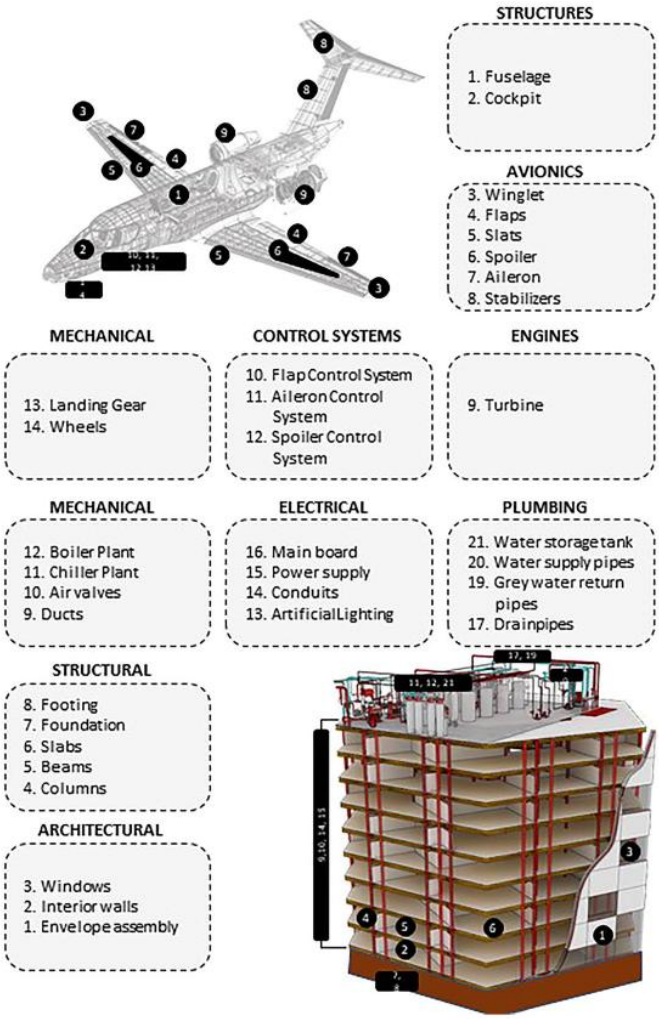


Figura 66 - Confronto tra la scomposizione in sottosistemi di un aereo e di un edificio. Fonte: Muthumanickam et al. [125].

Tuttavia i progettisti ricorrono in generale all'uso di metodi basati su modelli solo per convalidare un'opzione scelta piuttosto che per esplorare più alternative, senza considerare i possibili benefici che la valutazione delle interazioni tra le discipline avrebbe sulla qualità del progetto. La difficoltà di

generare rapidamente più opzioni e di analizzarle rigorosamente dal punto di vista interdisciplinare lascia inevitabilmente inesplorata un'ampia area dello spazio progettuale. Una serie di interviste rivolte ad architetti e ingegneri fa emergere che i professionisti in media impiegano meno della metà del loro tempo lavorativo svolgendo attività di progettazione e analisi in cui possono utilizzare al meglio la loro esperienza specializzata, mentre dedicano la maggior parte della loro attività alla gestione delle informazioni, inclusa l'integrazione manuale, la rappresentazione delle informazioni e il coordinamento delle soluzioni [118]. Queste limitazioni impediscono un'esplorazione più completa e sistematica della progettazione, campo in cui si applicano le competenze tecniche del progettista conferendo valore aggiunto al progetto. Gli stessi sondaggi Figura 67 condotti in ambito aerospaziale hanno portato a risultati simili per quanto riguarda le tecniche tradizionali. Dopo aver ripetuto le interviste in seguito all'introduzione dei processi MDO, è emerso che gli ingegneri hanno speso solo l'8% del tempo lavorativo per la gestione delle informazioni (rispetto al 26% del metodo tradizionale). Infatti, una volta automatizzato il processo, il resto dell'attività è stata dedicata alla progettazione, all'analisi delle alternative e alla riconfigurazione dello spazio di progettazione verso aree più promettenti, ottenendo un prodotto finale con prestazioni migliori. La distribuzione del modo in cui gli ingegneri hanno impiegato il loro tempo varia significativamente tra il metodo tradizionale e quello MDO. Quest'ultimo migliora notevolmente l'efficienza del processo, la conoscenza e le prestazioni del progetto e richiede una filosofia di progettazione e un insieme di competenze di squadra diverse rispetto ai metodi tradizionali.

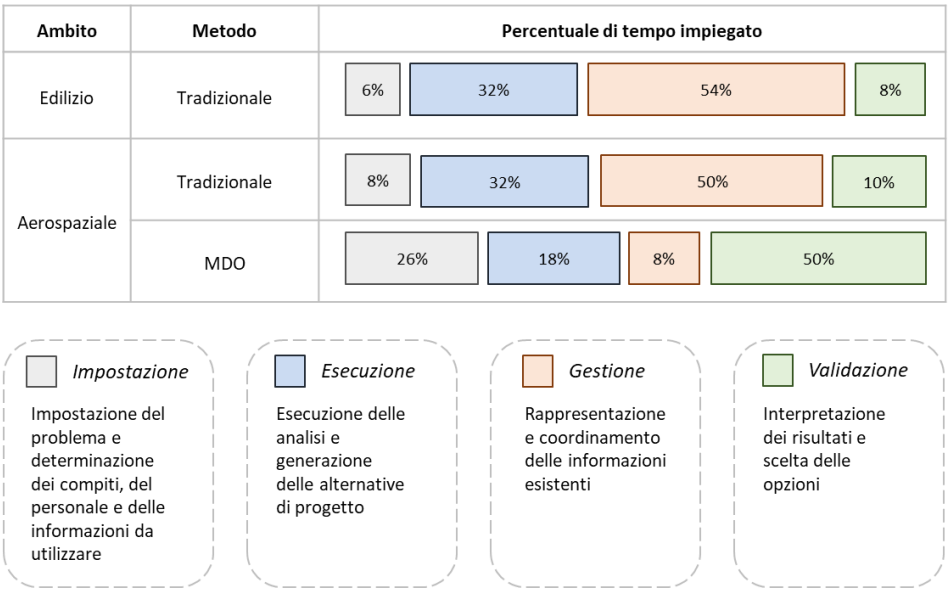


Figura 67 - Risultati delle interviste condotte da Flager et al. [118]. Rielaborazione dell'autrice.

Il potenziale di questa metodologia non è stato ancora pienamente sfruttato nel settore edilizio per diverse ragioni che sono riportate nella letteratura disponibile sull'ottimizzazione progettuale. Sebbene negli anni la situazione sia migliorata, i limiti relativi alla necessità di competenze informatiche e di risorse computazionali sono ancora validi [126]: anche se gli strumenti hanno ormai un'interfaccia utente grafica che ne facilita l'applicazione, l'utilizzo operativo della metodologia MDO richiede un uso avanzato delle tecnologie informatiche e, in alcuni casi, anche competenze di programmazione, abilità non usuali tra architetti ed ingegneri nel campo edile. È necessario infatti che i professionisti siano in grado di comprendere le fasi del processo MDO e il modo in cui le informazioni vengono trasferite per poterne controllare la qualità e la validità e per permetterne la riutilizzabilità in progetti futuri. Un altro limite è la necessità di capacità computazionali elevate per l'esecuzione delle simulazioni multidisciplinari. Flager et al. [127] hanno messo in luce come, pur considerando il caso di studio semplificato come un'aula e limitando il numero di variabili di progettazione, le simulazioni hanno richiesto circa 34 ore di elaborazione con un computer con un processore da 3,00 GHz e 8 GB di memoria. Dal momento che i professionisti lavorano su progetti più grandi e complessi con spazi di progettazione molto più ampi, i lunghi tempi di calcolo necessari per le analisi

MDO possono essere un ostacolo importante, anche se attualmente si ha la possibilità di usufruire di risorse computazionali adeguate in modalità *cloud* o di utilizzare tecniche di modellazione alternative, che verranno analizzate in seguito (paragrafo 6.2).

Un ulteriore aspetto che dovrebbe essere migliorato per facilitare la diffusione della metodologia di ottimizzazione multidisciplinare nella progettazione edilizia riguarda gli strumenti utilizzati. Il processo MDO è realizzato attraverso diversi tipi di software per la modellazione e l'analisi delle discipline (solver) che vengono orchestrati da piattaforme di ottimizzazione PIDO (Process Integration and Design Optimization). In genere, ogni disciplina gestisce un modello di dominio; nel caso della progettazione di un edificio, si tratta generalmente di modelli 3D, come quelli architettonici, strutturali, meccanici, elettrici e idraulici (MEP), che includono variabili di progettazione, come le dimensioni dell'edificio, la disposizione e le dimensioni delle stanze, la dimensione degli elementi e le caratteristiche dei materiali. I singoli modelli di dominio vengono quindi collegati a specifici strumenti di analisi per calcolare le funzioni obiettivo, come le prestazioni strutturali ed energetiche e il fattore di illuminazione naturale, e l'intero processo è gestito in modo automatizzato dalla piattaforma PIDO. Per poter utilizzare i software utilizzati comunemente nella progettazione edilizia esistono alcune barriere tecniche da superare. Per esempio, nei campi dell'ingegneria in cui il processo MDO è stato codificato, la modellazione avviene generalmente con software CAD (Computer Aided Design), mentre per la progettazione degli edifici sono ormai sempre più diffusi gli strumenti che si basano sulla metodologia BIM (Building Information Modeling); per questo sono nate delle ricerche, come per esempio quella di Welle et al. [128], per riuscire ad integrare questo tipo di programmi all'interno del processo di ottimizzazione multidisciplinare. Per quanto riguarda gli strumenti attualmente più utilizzati dai professionisti del settore AEC per le analisi, come per esempio quella strutturale o energetica, questi non supportano la rapida generazione e valutazione di alternative di progettazione. Inoltre, tali software sono stati progettati principalmente per essere gestiti dall'interfaccia utente grafica e non tutti permettono l'analisi in batch, cioè l'esecuzione di uno strumento senza intervento umano, utile quando bisogna eseguire un grande numero di

simulazioni in modo consecutivo: c'è quindi bisogno di un'integrazione di questi strumenti con le piattaforme PIDO per poter eseguire l'intero processo in modo completamente automatizzato. Diaz e al. [129] hanno testato l'integrazione di cinque strumenti tipicamente usati nella progettazione edilizia nel workflow MDO spiegando le sfide e le strategie adottate. Sebbene siano necessarie ulteriori ricerche per poter sfruttare i benefici del flusso di lavoro multidisciplinare nelle applicazioni AEC, l'analisi dei software ha evidenziato che anche quelli sviluppati per la progettazione edilizia hanno beneficiato degli sviluppi tecnologici trainati dalle esigenze dei settori automobilistico e aerospaziale.

Per quanto riguarda i casi applicativi, il percorso seguito dall'ingegneria aerospaziale e automobilistica per l'adozione della metodologia MDO parte dall'uso consolidato di simulazioni dei vari fenomeni in maniera separata [fase 0 - preliminare] e passa attraverso le ottimizzazioni multidisciplinari su componenti o sottosistemi (es. ottimizzazione del profilo alare rispetto all'aerodinamica e al peso [130]) [fase 1 - parziale] fino ad arrivare all'ottimizzazione multidisciplinare a livello dell'intero sistema (es. un intero velivolo [131]) [fase 2 - completa]. Si può notare come nel campo dell'ingegneria edile, sebbene l'applicazione di questa metodologia sia ancora in evoluzione, sono state seguite le stesse fasi degli altri settori. Inizialmente si sono affermate e consolidate le ottimizzazioni monodisciplinari [fase 0 - preliminare] per quanto riguarda gli aspetti strutturali [132], energetici [133] o di illuminazione [134].

Successivamente, i professionisti hanno iniziato a studiare la metodologia per l'ottimizzazione multidisciplinare e ad applicarla a parti circoscritte dell'edificio o a particolari componenti [fase 1 – parziale]. Per esempio Díaz et al. [129] hanno osservato le interazioni multidisciplinari tra architettura, struttura e costi al variare delle dimensioni di un telaio in calcestruzzo. Ampliando di poco il caso applicativo, Geyer [135] ha mostrato come l'ottimizzazione potrebbe dare supporto durante la fase di dimensionamento di una sala ampia e priva di colonne centrali. Le simulazioni si concentrano sugli aspetti strutturali, ma il problema di ottimizzazione considera anche gli effetti delle altre discipline coinvolte nella progettazione come gli aspetti termici ed economici. Per esempio è possibile trovare il compromesso migliore tra la distanza tra i telai e

il tipo di sezione da adottare (singola o a traliccio) in modo tale da minimizzare i costi di costruzione considerando fattori come la quantità di materiale e il numero di giunti. Un caso di studio simile a quello descritto, ma con condizioni progettuali e destinazione d'uso differenti, è stato utilizzato dall'autore anche in altre ricerche successive [136]. Invece la progettazione di una struttura di copertura per uno stadio di atletica con telaio in acciaio è stata analizzata da Flager et al. [137]: in particolare, è stato studiato il dimensionamento degli elementi del telaio strutturale per ridurre al minimo i costi, stimati in base al peso della struttura, dovendo soddisfare contemporaneamente i requisiti di sicurezza e la manutenibilità. Inoltre, sono stati considerati anche alcuni parametri come la minimizzazione del numero di connessioni tra le sezioni per semplificare il processo di fabbricazione e montaggio e dei requisiti estetici come la simmetria, la continuità e la proporzione tra gli elementi dal momento che la struttura è visibile esternamente. Gli autori hanno applicato la metodologia MDO anche per ottimizzare le prestazioni strutturali ed energetiche in un'aula scolastica con finestre su due facciate opposte e la struttura a telaio in acciaio [127]. Le simulazioni multidisciplinari si sono rivelate vantaggiose per l'individuazione delle soluzioni di compromesso tra obiettivi contrastanti: infatti, per esempio, mentre l'aumentare delle lunghezza dell'edificio risulta vantaggioso per la struttura, l'edificio diventa meno efficiente a livello energetico dato l'aumento della superficie finestrata per soddisfare i requisiti di illuminazione diurna, dei guadagni solari e dei requisiti di raffreddamento oltre alle maggiori perdite nell'involucro. Un'altra applicazione rilevante è quella di Yang et al. [138] che hanno analizzato il caso della fase concettuale della progettazione di un palazzetto dello sport a un piano con pianta rettangolare e tetto sferico situato in Cina. Nella costruzione del problema di ottimizzazione sono state considerate le prestazioni della luce diurna, dell'energia e della struttura, rendendolo così multidisciplinare.

Per quanto riguarda la progettazione di dettaglio di alcuni elementi, i pavimenti in calcestruzzo sono stati oggetto di recenti studi di Broyles et al. [139]. La ricerca si concentra sulla progettazione di sistemi in calcestruzzo strutturale a vista e in particolare sullo studio olistico di sistemi di pavimenti in calcestruzzo in un edificio residenziale vicino a Città del Messico. L'ottimizzazione strutturale

di questi elementi, infatti, può avere conseguenze sulle prestazioni acustiche e termiche, causando potenzialmente impatti negativi sulla salute degli inquilini. Le diverse configurazioni studiate hanno mostrato diversi compromessi tra l'efficienza dei materiali e la trasmissione del suono e hanno rivelato che, con alcuni tipi di nervature, le prestazioni acustiche e termiche sono migliori. Tien e Van Tung [140] hanno individuato un metodo per simulare la forma della facciata di un edificio utilizzando dati metereologici, al fine di ottenere condizioni ottimali per la visibilità e la quantità di esposizione solare annuale. Queste simulazioni utilizzano i dati meteorologici.

Infine, analizzando le recenti applicazioni dell'ottimizzazione multidisciplinare nel campo dell'edilizia, è possibile trovare anche esempi che considerano l'intero sistema [fase 2 - completa]. L'implementazione delle tecniche di ottimizzazione durante la fase iniziale della progettazione consente non solo di creare strutture leggere minimizzando i profili di travi e pilastri e gli spessori delle pareti, ma anche di individuare le forme più efficienti degli edifici e di esplorare modelli di carico complessi in modo da ottenere prestazioni ottimali ed eliminare le ridondanze dei materiali, riducendo notevolmente i costi di costruzione. Questo approccio collaborativo e innovativo è stato adottato da alcuni studi di architettura, tra cui il gruppo di ricerca Computation and Design (co|de) dello studio Zaha Hadid Architects per la proposta di progetto per la Neue National Gallery di Berlino (Figura 68). Al fine di creare un dialogo con il Neue National Gallery dell'architetto Mies van der Rohe, i progettisti hanno cercato di ottenere la soluzione di progetto più leggera possibile. Infatti, il peso della struttura in calcestruzzo è stato ridotto attraverso la generazione di nervature che seguono la stessa logica strutturale degli organismi naturali: in questo modo vengono rispettati sia gli obiettivi prestazionali sia la volontà di ottimizzare l'utilizzo dei materiali eliminando eventuali ridondanze (Figura 69). Nel complesso il progetto sintetizza una struttura flessibile ed efficiente integrandola con gli aspetti funzionali. L'organizzazione spaziale, delimitata da un perimetro vetrato, prevede uno spazio unico e trasparente, favorevole all'interazione sociale, all'esposizione e alla produzione di arte contemporanea.



Figura 68 - Render della proposta di progetto dello studio Zaha Hadid Architects per la Neue National Gallery di Berlino. Fonte: Zaha Hadid Architects [141].

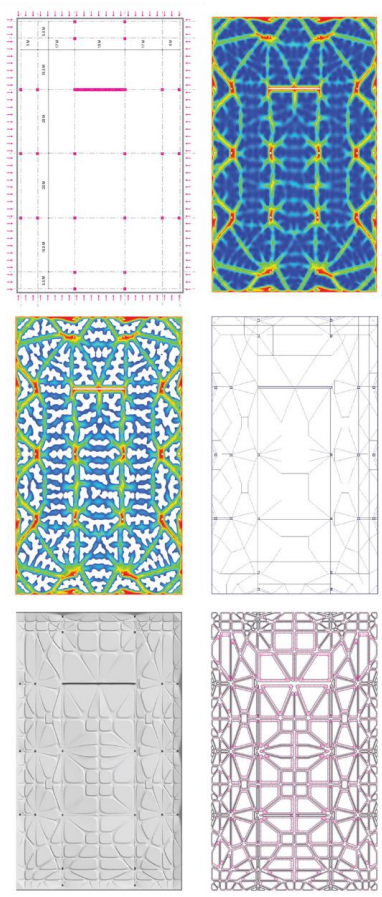


Figura 69 - Processo di progettazione delle nervature. Fonte: Zaha Hadid Architects [141].

Il New United States Courthouse, situato al centro di Los Angeles, è un altro esempio di edificio che, pur senza seguire il processo MDO, è stato progettato considerando aspetti multidisciplinari. Lo studio di ingegneria e architettura Skidmore, Owings & Merrill (SOM) ha migliorato il design strutturale sfruttando le avanzate tecniche di ottimizzazione in un approccio a due fasi: nella prima sono state create opzioni di progettazione applicando carichi e vincoli con l'obiettivo di generare un percorso di carico ottimale, nella seconda fase è stata individuata la migliore tipologia di profilati in acciaio da utilizzare. Essendo un luogo aperto e uno spazio pubblico delimitato da pareti vetrate, lo studio di progettazione ha posto particolare attenzione all'uso dei materiali e al peso dell'edificio; questo ha portato a una riduzione del 10% dell'acciaio, al miglioramento delle prestazioni globali del sistema strutturale e a una conseguente riduzione dei costi e dell'impatto ambientale. L'edificio ha ricevuto la certificazione LEED Platino, ha raggiunto l'obiettivo energetico 2020 della GSA e ha anche vinto numerosi premi per il suo design architettonico e strutturale innovativo. Negli ultimi anni, la metodologia di ottimizzazione multidisciplinare ha trovato applicazioni più avanzate nella progettazione della forma più efficiente degli edifici alti, per esempio in legno, in cui gli aspetti strutturali sono studiati insieme alla geometria e alla resistenza al fuoco [142], ai costi [143] o agli aspetti fluidodinamici correlati alle azioni del vento. Infatti, all'indagine dei comportamenti strutturali è possibile unire anche le azioni del vento, per trovare la forma più efficiente e ottimizzare le prestazioni complessive del sistema come nel caso della torre Caleido, la quinta torre di Madrid. Sull'edificio alto 160 m, sono state svolte simulazioni CFD (*Computational Fluid Dynamics*) che hanno utilizzato i dati del vento raccolti dall'aeroporto Barajas di Madrid in diversi anni. Studi come questo di solito vengono gestiti da test in galleria del vento, che potrebbero richiedere mesi per l'elaborazione dei risultati; è però fondamentale avere queste informazioni il prima possibile dal momento che gli esiti delle simulazioni potrebbero individuare degli aspetti critici nel progetto originale permettendo di proporre modifiche in uno stato ancora non avanzato del progetto. Infatti, cambiare il progetto in una fase successiva a quella di progettazione preliminare, comporterebbe un grande dispendio di lavoro e di costi, soprattutto nel caso in cui le simulazioni fluidodinamiche sono state

integrate con quelle strutturali per ottenere la forma della torre con le migliori prestazioni possibili. Alla fine, i risultati della simulazione sono stati convalidati rispetto ai risultati dei test in galleria del vento e hanno mostrato un'ottima correlazione. In una zona particolarmente esposta come quella in esame, il vento naturale è un fattore importante da considerare poiché ha un impatto non solo sull'edificio stesso, ma anche sulle persone che camminano vicino all'edificio; sono quindi stati eseguiti studi dettagliati sul flusso a diverse scale (dall'edificio al quartiere) per identificare le aree di possibile disagio o pericolo per le persone e trovare soluzioni progettuali ottimali per garantire anche il comfort dei pedoni in queste zone (Figura 70).

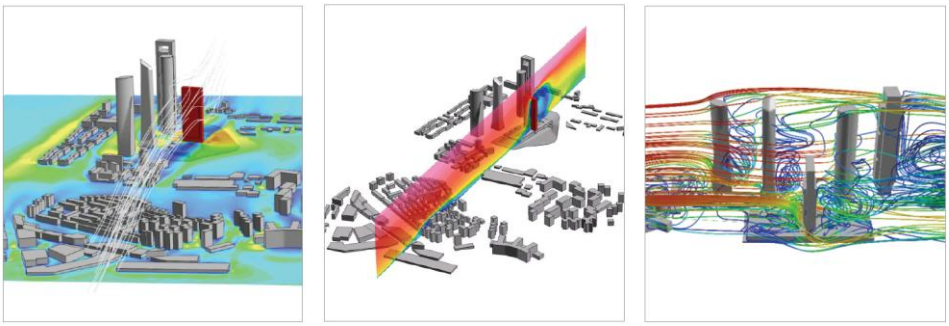


Figura 70 - Simulazioni fluidodinamiche a scala di edificio e di quartiere. Fonte: Altair Engineering [144].

La ricerca di Muthumanickam et al. [145] propone un framework MDO per assistere più fasi della progettazione di un edificio per uffici a due piani che rispetti i requisiti minimi delle normative energetiche e di illuminazione. Sono stati utilizzati strumenti di analisi per stimare il carico di raffreddamento, il consumo energetico e i livelli di illuminazione naturale nelle opzioni di progettazione dell'edificio generate; dall'analisi delle aternative progettuali con rapporti superficie finestrata-parete differenti, per esempio, è emerso che la riduzione al minimo un obiettivo (potenza di illuminazione artificiale) porta all'aumento del valore in un altro (energia di raffreddamento), evidenziando la necessità dell'individuazione di un compromesso. Il caso applicativo studiato, pur avendo dimostrato la possibilità di utilizzare le simulazioni multidisciplinari e i loro benefici in questo settore, rimane una rappresentazione molto generalizzata rispetto a un problema reale. La Pennsylvania State University ha

utilizzato il processo di ottimizzazione multidisciplinare per la progettazione di un habitat sostenibile in cui gli esseri umani possono vivere su Marte stampabile in 3D tramite robot industriali, sviluppato come parte della partecipazione alla 3D-Printed Mars Habitat Centennial Challenge della NASA [146]. Oltre a specifici requisiti funzionali, le simulazioni dovevano tener conto delle condizioni ambientali come le estreme oscillazioni di temperatura, e forti radiazioni cosmiche, la forza di gravità e la pressione atmosferica ridotte, che creano carichi laterali maggiori sulle pareti dell'edificio a causa della maggiore differenza di pressione tra l'interno e l'esterno dell'edificio. Inoltre, insieme alla realizzabilità per garantire una costruzione robotica con un intervento umano minimo o nullo, la progettazione dell'edificio deve soddisfare requisiti architettonici, come la progettazione della disposizione spaziale interna, strutturali, e dei sistemi meccanici, elettrici e idraulici. L'insieme di questi requisiti comporta la necessità di individuare compromessi tra obiettivi multidisciplinari.

Sebbene negli ultimi anni le applicazioni della metodologia MDO nel settore dell'edilizia siano state differenti e sempre più avanzate, sono state elaborate principalmente in un contesto accademico e non sono ancora mature per poter gestire i progetti molto più complessi degli edifici che devono essere realizzati. Inoltre, è emerso anche che la maggior parte dei casi di studio si è concentrato nella fase di progettazione di nuovi edifici, tralasciando l'importanza dello studio multidisciplinare per la realizzazione di interventi sulle strutture esistenti. Sono dunque ancora necessarie ulteriori ricerche e applicazioni per poter colmare le lacune riscontrate e affrontare problemi di progettazione più grandi e complessi tipici del settore edile con questo tipo di simulazioni.

5.3. Tecniche di modellazione

Le simulazioni 3D, note anche come simulazioni ad alta fedeltà, forniscono informazioni dettagliate e hanno un valore significativo in termini di precisione e accuratezza dell'output, tuttavia richiedono generalmente tempo (ore o giorni) e potenza di calcolo considerevoli, soprattutto quando vengono combinate diverse discipline, come nel processo MDO. Per superare questi

problemi molti settori, come quello aerospaziale [147] e automobilistico [148], utilizzano modelli di ordine ridotto (ROM). Con risorse computazionali minori, i ROM consentono a ingegneri e ricercatori di costruire in modo efficiente rappresentazioni in scala ridotta che catturano il comportamento cruciale dei modelli sorgente ad alta fedeltà e mostrano gli effetti più significativi del sistema. Questi modelli, chiamati anche surrogati, mantengono l'accuratezza desiderata entro un errore definito, accelerano le simulazioni, consentono l'analisi della dinamica del sistema e semplificano la progettazione di sistemi di controllo riducendo la complessità computazionale.

Quando è necessario svolgere un elevato numero di valutazioni, come nel caso dell'ottimizzazione, e quando è troppo dispendioso in termini di tempo eseguire il modello ad alta fedeltà per ogni valutazione, è molto vantaggioso utilizzare un modello semplificato che possa fornire una rappresentazione efficiente del modello dettagliato. Per esempio, quando si progettano sistemi complessi come i veicoli, sono necessarie molte simulazioni per valutare e migliorare il progetto durante lo sviluppo ma, dal momento che le simulazioni richiedono molto tempo per essere eseguite con i modelli dettagliati, vengono utilizzate delle approssimazioni dei modelli ad alta fedeltà per esplorare un numero elevato di alternative di progettazione a un costo computazionale inferiore [149]. Una volta che il modello surrogato è stato definito, è possibile studiare facilmente più scenari di progetto cambiando i parametri iniziali e ottenendo i risultati con un tempo di calcolo ridotto. Se utilizzati per l'ottimizzazione di progetti multidisciplinari, un ulteriore vantaggio dell'uso dei modelli di ordine ridotto è che i professionisti delle diverse discipline possono lavorare in parallelo allo sviluppo dei modelli surrogati e verificarne l'accuratezza prima del processo di simulazione. Inoltre, per quanto riguarda le ottimizzazioni multidisciplinari, è possibile utilizzare all’interno del processo di simulazione un approccio di modellazione multi-fedeltà in cui una combinazione di modelli a più bassa e più alta fedeltà viene utilizzata per ottenere stime accurate a costi computazionali inferiori [150] [151] [152]. Inoltre, l'ottimizzazione può essere eseguita utilizzando il modello dettagliato per alcune discipline e quello di ordine ridotto per altre oppure è possibile passare da un modello surrogato nella fase inziale

per valutare più alternative progettuali a uno di fedeltà elevata per le simulazioni di dettaglio nelle fasi avanzate della progettazione.
Dal momento che i modelli surrogati sono approssimazioni dei modelli ad alta fedeltà, il loro principale svantaggio è l'introduzione di un'ulteriore fonte di errore. Inoltre il professionista, oltre a individuare la tipologia di modelli surrogati più adatta da utilizzare, deve effettuare numerose scelte per costruire un ROM che sia sufficientemente accurato. Un altro limite, soprattutto nel campo della progettazione edilizia, è che i progettisti sono abituati a gestire modelli tridimensionali per prendere decisioni di progettazione [153], questo significa che è necessaria una conoscenza aggiuntiva della metodologia e degli strumenti da utilizzare. Nonostante ciò, in questo settore sono presenti delle applicazioni dei modelli di ordine ridotto utilizzati per le analisi strutturali [154], energetiche [155] [156] e illuminazione diurna [157] [158] [159].
In generale, esistono due metodi principali per la costruzione di modelli di ordine ridotto: quelli basati sui modelli e quelli guidati dai dati [160]. La prima tecnica consiste nel modellare la fisica alla base di un sistema specifico; si tratta quindi di un approccio *white-box*. Il metodo data-driven, invece, utilizza l'approccio *black-box* perché le relazioni tra le variabili vengono stimate dall'intelligenza artificiale senza esplicitarne le equazioni. Questi due approcci verranno approfonditi successivamente.

5.3.1. Modelli di ordine ridotto basati sulla fisica

Il primo approccio prevede tre modi diversi per rappresentare un sistema basati su:

- script (0D)
- fisica (1D)
- segnali (1D)

Per quanto riguarda i modelli 1D, il sistema viene modellato collegando diversi blocchi. In un approccio grafico basato sulla fisica essi rappresentano i componenti reali e le proprietà, pertanto in questo modo è possibile descrivere i fenomeni fisici che caratterizzano il sistema senza analizzarne ed esplicitarne

le equazioni matematiche alla base. In un approccio grafico basato sui segnali, invece, i blocchi rappresentano operazioni matematiche elementari che consentono di descrivere la matematica alla base dei fenomeni che costituiscono il sistema. I due approcci possono essere utilizzati separatamente o contemporaneamente all'interno dello stesso modello.
"Un sistema è un insieme o una combinazione di elementi o parti che formano un insieme complesso o unitario" [161] ed è costituito da:

- componenti, che sono le parti operative di un sistema e sono costituite da input, processi e output. Ogni componente può assumere una serie di valori per descrivere lo stato del sistema;
- attributi, che sono le proprietà dei componenti del sistema e lo caratterizzano;
- relazioni, che sono le interazioni tra i componenti.

Un sistema è quindi un insieme di componenti interconnessi che lavorano insieme per raggiungere un obiettivo comune e per studiarne il comportamento è necessario estrarne le caratteristiche interne e le relazioni di interazione tra le sue parti [162].
La Figura 71 mostra il flusso di lavoro per la costruzione di un modello 1D nelle sue cinque fasi operative. Nella prima fase viene identificato il sistema da studiare con i relativi requisiti funzionali e prestazionali e i valori dei parametri. Successivamente vengono individuati i componenti principali e i tipi di interazione tra di essi; ognuno di questi viene poi suddiviso in sottocomponenti fino a quando ogni parte del sistema può essere rappresentata da equazioni matematiche (approccio basato sui segnali) o da elementi, come per esempio quelli già presenti in una libreria, che ne descrivono il comportamento fisico (approccio basato sulla fisica) [163]. Le fasi successive prevedono la costruzione del modello, l'esecuzione della simulazione, la raccolta e l'analisi dei dati. In questo modo, è possibile analizzare il sistema modellato per valutare sia il soddisfacimento dei requisiti nello stato di fatto o di progetto sia la variazione del comportamento a seguito della progettazione di interventi di miglioramento o di variazioni dei valori di input. Qualora i risultati non siano soddisfacenti, è necessario aggiornare la progettazione ed eseguire nuovamente le simulazioni.

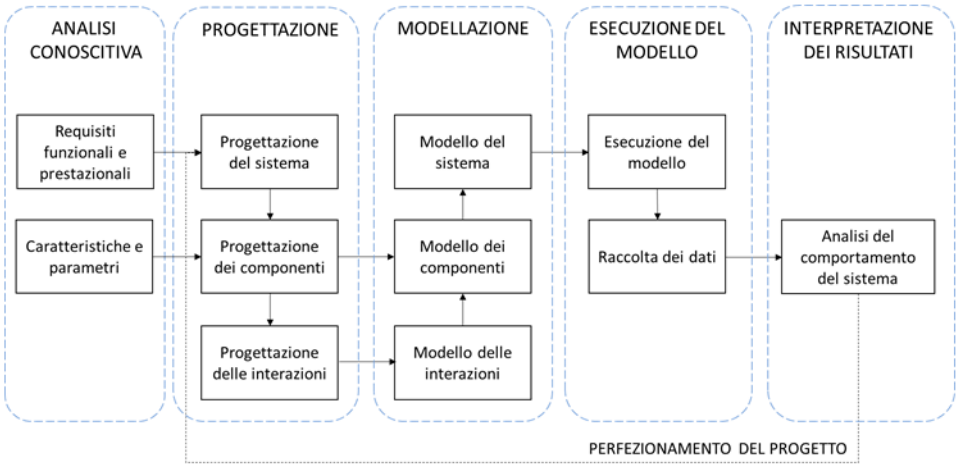


Figura 71 - Flusso di lavoro operativo della costruzione di un modello 1D.

Infatti, dal momento che i modelli di ordine ridotto richiedono una bassa capacità di calcolo, hanno tempi di simulazione molto più brevi rispetto ai modelli ad alta fedeltà e permettono quindi di ripetere velocemente il processo con dati di input differenti. Nonostante questo vantaggio, la costruzione di modelli 1D, la determinazione dei loro parametri, l'analisi e la scomposizione in sottosistemi richiedono una conoscenza dettagliata del sistema e dei meccanismi alla base; questa è un'attività che di solito non è richiesta così approfonditamente dai metodi di modellazione tradizionali nel campo delle costruzioni. Identificare i componenti significativi del sistema e le interazioni tra di essi fino al punto in cui ogni parte può essere rappresentata da leggi fisiche costituisce quindi un lavoro oneroso per un professionista del settore. Un modo per facilitare questo processo è quello di utilizzare modelli 1D basati sulla fisica in cui è possibile utilizzare blocchi esistenti raccolti in librerie, come per esempio quelle sviluppate in Modelica [164], un linguaggio di modellazione orientato agli oggetti basato su equazioni algebriche differenziali con capacità di modellazione multidominio. Ciò significa che i componenti di un sistema corrispondenti agli oggetti fisici di diversi domini, come quello elettrico, meccanico, termodinamico, idraulico, biologico e le applicazioni di controllo, possono essere descritti e collegati tra di loro [165]. Questo linguaggio è stato sviluppato a partire dal 1997 [166] dalla Modelica Association, un'associazione no-profit che include membri sia dell'industria che del mondo accademico; il lavoro

collaborativo dei numerosi gruppi di ricerca internazionali ha permesso lo sviluppo del linguaggio (fino all'attuale versione 3.6 [167]) e l'aggiornamento costante delle librerie, raccolte di elementi che permettono all'utente di modellare facilmente i componenti dei sistemi in diversi settori. Affinché il linguaggio Modelica possa essere utilizzato, gli utenti devono avvalersi di uno strumento di modellazione e simulazione in modo tale da poter definire il modello tramite un'interfaccia grafica, tradurlo in una forma che possa essere simulata in maniera efficiente in un ambiente di simulazione appropriato e visualizzare il risultato. Esistono molti software compatibili con le librerie Modelica sia commerciali, come per esempio Altair Twin Activate, Simplorer e Dymola, sia open-source, come la piattaforma OpenModelica.

La maggior parte della ricerca nel settore dell'edilizia in questo ambito riguarda le analisi termiche ed energetiche. Alcune delle librerie Modelica più rilevanti per gli edifici, in cui sono disponibili molti componenti per la modellazione di fenomeni fisici di base e degli impianti, sono: IBPSA, AixLib [168], ATplus, BuildingControlLib, Building, BuildingSystems, BuildSysPro [169], FastBuildings, IDEAS [170]. Dal 2002, Felgner et al. [171] hanno iniziato a sviluppare componenti utili per caratterizzare il comportamento termico di un edificio utilizzando il linguaggio di modellazione Modelica. Wetter M. [172] ha presentato l'implementazione di una libreria open-source di modelli per i sistemi energetici degli edifici, mentre Wang et al. [173] hanno sviluppato Buildings.Occupants, un pacchetto open-source per la simulazione del comportamento degli occupanti. Inoltre, Altes-Buch et al. [174] hanno creato la libreria Greenhouses, uno dei pochi framework di modellazione open-source che considera in modo integrato gli aspetti termici, climatici ed energetici in una serra bioclimatica. L'insieme dei componenti presenti in queste librerie sono stati utilizzati in molte ricerche e sono fondamentali perchè contribuiscono a facilitare gli studi applicativi in questo campo.

Nel settore dell'Architettura, Ingegneria e Costruzioni (AEC), i modelli di ordine ridotto basati sulla fisica trovano la loro maggiore applicazione nel campo dei sistemi di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC) [175]. Infatti, i modelli surrogati, richiendo una bassa capacità di calcolo e tempi di simulazione brevi, danno la possibilità di utilizzare input variabili nel tempo già

nella fase di progettazione concettuale. In questo modo, ad esempio, la progettazione di un impianto può passare da essere prescrittiva e incentrata sugli scenari peggiori in uno stato stazionario a essere dinamica e basata sulle prestazioni in condizioni di carico parziale. Per esempio, Lu et al. [176] hanno modellato un sistema di raffreddamento a volume d'aria variabile (VAV) multizona per migliorare il comfort interno e ridurre il consumo energetico di un edificio per uffici di medie dimensioni. Un confronto incrociato tra il modello di sistema Modelica e il modello prototipo EnergyPlus ha confermato la validità del primo. Inoltre, la possibilità di eseguire simulazioni dinamiche permette non solo di capire come varia il comportamento del sistema nel tempo, ma anche di considerare gli impatti degli scenari climatici futuri, elemento essenziale per trovare strategie di progettazione o di riqualificazione energetica efficaci e durature, in grado di adattarsi ai cambiamenti climatici. Infine, questo tipo di modellazione è vantaggiosa rispetto ad altri strumenti perché, richiendo una bassa capacità di calcolo e tempi di simulazione brevi, può simulare le prestazioni dell'edificio aggiungendo funzioni di controllo degli impianti durante la fase operativa. Lo studio delle simulazioni di sistemi impiantistici tramite modelli di ordine ridotto basati sulla fisica nei settori in cui questa tecnica è ormai consolidata permette di avere una compensione più profonda del suo potenziale. Molti sfruttano l'efficienza computazionale per condurre rapidamente simulazioni di ottimizzazione: ad esempio, Cvok et al. [177] hanno studiato i pannelli di riscaldamento a infrarossi, tecnologie di riscaldamento innovative che vengono integrate nei moderni sistemi HVAC dei veicoli elettrici. Il risultato è un sistema complesso con più attuatori, che devono essere coordinati in modo ottimale attraverso le simulazioni per minimizzare il consumo totale di elettricità e massimizzare l'efficienza dell’impianto e il comfort dei passeggeri. Ahn et al. [178] hanno invece eseguito delle simulazioni multiobiettivo su un motore di trazione. Poiché sia i cicli di guida che la temperatura del motore cambiano durante l'ottimizzazione, il costo computazionale, utilizzando modelli ad alta fedeltà, sarebbe elevato; tramite il modello 1D invece del metodo agli elementi finiti si ottiene un'elevata efficienza computazionale che permette di tenere in considerazione i parametri che variano nel tempo e di eseguire una simulazione accoppiata elettromagnetica e

termica. Inoltre, per ottenere il massimo beneficio dalle simulazioni, molte ricerche hanno studiato come questi modelli surrogati possono essere accoppiati con quelli ad alta fedeltà [179]: Singh et al. [180] hanno creato un modello termico completo di un sistema di condizionamento dell'aria di una mietitrebbia per studiare il fenomeno del raffreddamento transitorio nella cabina. Il quadro di simulazione proposto include un modello 3D di fluidodinamica computazionale (CFD) basato su una rete neurale artificiale mentre, per prevedere la capacità di assorbimento del calore dell'evaporatore in diverse condizioni operative, il ciclo di refrigerazione viene modellato con una metodologia 1D. La rete neurale viene addestrata utilizzando i dati di uscita del modello 1D considerando come parametri di ingresso il flusso d'aria, l'umidità relativa e la temperatura dell'aria e come parametri di uscita l'assorbimento di calore dell'evaporatore. Per quanto riguarda l'industria automobilistica, Lu et al. [181] hanno applicato il metodo di simulazione accoppiata 1D/3D ai circuiti di raffreddamento del motore e di condizionamento dell'aria. In questo modo è stato possibile esaminare in modo dettagliato i processi operativi del motore e del climatizzatore e studiare l'interazione tra di essi. Recentemente Stellato et al. [182] hanno implementato un modello del sistema di raffreddamento 1D di un veicolo integrandolo con un modello multicorpo con lo scopo di utilizzarlo in tempo reale nel simulatore di guida dinamica con conducente umano. Alla fine il modello è stato convalidato attraverso il confronto con i dati reali di un veicolo esistente. Questo tipo di simulazione è stato applicato anche agli edifici, pur in modo meno avanzato: Ljubijankic et al. [183] presentano un'analisi dei modelli di simulazione numerica accoppiata 1D/3D nei sistemi di approvvigionamento energetico degli edifici. L'obiettivo è quello di suddividere il complesso modello del sistema in più sottomodelli 1D o 3D, in modo che i sottomodelli accoppiati rappresentino il più fedelmente possibile il sistema reale durante la simulazione: i modelli di ordine ridotto sono costruiti tramite il linguaggio Modelica, mentre i tradizionali modelli ad alta fedeltà vengono utilizzati per descrivere la fluidodinamica. Zuo et al. [184] hanno studiato una simulazione dinamica accoppiata del flusso di aria interno, dei sistemi HVAC, del controllo e del trasferimento di calore dell'involucro dell'edificio. L'ambiente interno è stato simulato con un programma di fluidodinamica CFD, mentre il trasferimento di

calore nell'involucro dell'edificio, il sistema HVAC e il sistema di controllo sono stati modellato tramite la libreria *Buildings* di Modelica. Per stimare il comportamento di un sistema di condizionamento dell'aria residenziale, Huang e Wu [185] hanno costruito un modello per simularne il comportamento termico tramite cosimulazione tra Modelica ed EnergyPlus. Inoltre, il metodo di ottimizzazione della progettazione multidisciplinare (MDO) può trarre vantaggio dalla combinazione dei modelli 1D e 3D; infatti, si possono costruire modelli ad alta fedeltà per alcune discipline e modelli di ordine ridotto per altre in modo da accelerare i tempi di simulazione e ridurre i costi computazionali.

Nonostante le applicazioni ai sistemi impiantistici siano le più diffuse e studiate, Qiu et al. [186] hanno analizzato altre applicazioni del linguaggio e delle librerie Modelica nel campo dell'edilizia. La revisione proposta sottolinea il crescente interesse nel settore per questa tipologia di modellazione, evidenziandone però i limiti, tra cui gli elevati tempi di apprendimento, e sottolineando la necessità di maggiori ricerche per sviluppare librerie open source e modelli complessi che possono permettere applicazioni più ampie nei sistemi edilizi. Da questo studio emerge che le applicazioni alla scala di edificio riguardano principalmente l'involucro edilizio, il consumo energetico [187], la ventilazione naturale e meccanica, la trasmissione degli inquinanti, il comfort termico e le applicazioni di controllo dell'edificio. Per esempio, Novelli et al. [188] hanno utilizzato il linguaggio Modelica per costruire il modello di un nuovo sistema dinamico di involucro edilizio con collettori fotovoltaici e termici concentrati che unisce più strategie energetiche attive e passive. Dopo essere stato calibrato in base ai risultati sperimentali, il modello di ordine ridotto ha mostrato buone capacità predittive. Per simulare il processo di trasferimento del calore delle pareti, Danza et al. [189] hanno costruito un modello a resistenza-capacità (RC) in grado di rappresentare l'inerzia termica dell'involucro su base oraria.

Tallet et al. [190], invece, hanno sviluppato un modello surrogato nel linguaggio Modelica per valutare l'effetto della permeabilità nel bilancio energetico di un edificio a basso consumo energetico. Le infiltrazioni d'aria hanno un impatto considerevole sulle prestazioni energetiche degli edifici e possono essere valutate introducendo il fattore IHR (*Infiltration Heat Recovery*) all'interno dell'equazione del bilancio energetico; questo viene generalmente calcolato

utilizzando un software di fluidodinamica computazionale che richiede tempi elevati di simulazione e per questo spesso non viene considerato. Dai risultati emerge che il fattore IHR è essenziale nella stima della perdita di calore nell'edificio per ridurre i costi energetici e che il modello di ordine ridotto consente di ottenere risultati in tempo reale con grande accuratezza. Per quanto riguarda la simulazione del flusso d'aria, i modelli sviluppati con Modelica mirano a calcolare il flusso d'aria tra diverse stanze e tra l'ambiente interno ed esterno [191] e vengono utilizzati principalmente per la simulazione del trasporto di inquinanti o dei sistemi di ventilazione. Un esempio è la ricerca di Guo et al. [192] hanno simulato il flusso d'aria e le differenze di pressione di una singola stanza di isolamento e di un piano in un vero ospedale per malattie infettive. Tramite un modello multizona viene studiata una strategia di controllo della differenza di pressione attiva per i sistemi a portata d'aria variabile nel reparto di isolamento a pressione negativa. Per quanto riguarda gli inquinanti, Faulkner et al. [193] hanno studiato alcune strategie per migliorare la qualità dell'aria interna durante la pandemia di COVID-19 in un edificio per uffici di medie dimensioni in un clima freddo e secco utilizzando modelli basati su Modelica, dimostrando come tale approccio consenta di trovare i vari compromessi tra il rischio di esposizione, capacità degli impianti HVAC e il consumo di energia. Invece, Wullens et al. [194] hanno proposto un metodo di accoppiamento della simulazione della fluidodinamica computazionale con un modello multizona per studiare la ventilazione naturale in una stanza dotata di due aperture, una bassa e una alta. Le caratteristiche principali vengono commentate in termini di flusso e di trasferimento di calore. Ulteriori ricerche alla scala di edificio si sono concentrate sull'ottimizzazione della ventilazione per il comfort interno [195], sull'integrazione di impianti fotovoltaici [196] e sui modelli di controllo per la riduzione del consumo energetico [197].

Altri studi, seppur nella fase preliminare, hanno riguardato la simulazione energetica a livello urbano in cui il compromesso tra tempo di calcolo e precisione dei risultati è particolarmente importante [198]. Infatti, poiché lo sforzo computazionale richiesto per calcolare i carichi termici nel tempo a scala urbana può essere proibitivo quando si utilizzano modelli tridimensionali di edifici, sono stati sviluppati dei modelli di ordine ridotto di edifici utilizzando

Dymola e Modelica ([199] [200]) che, dimostrando una buona accuratezza di previsione, sono considerati promettenti per le simulazioni degli aspetti energetici e anche per la loro ottimizzazione [201].

Dunque, sebbene i modelli di ordine ridotto basati sulla fisica abbiano ottime potenzialità e siano numerosi i loro campi di applicazione nel settore edile come risulta dalla letteratura analizzata, tuttavia la creazione di modelli 1D richiede ancora un elevato costo di apprendimento iniziale che ne limita la diffusione e l'ampio utilizzo pratico; per questo, pur essendo molto vantaggioso a livello di costi e tempi computazionali e garantendo una buona accuratezza nei risultati, tali modelli hanno una diffusione più circoscritta rispetto ad altri strumenti del settore. È quindi indispensabile potenziare il lavoro di ricerca volto a renderli più fruibili e ampiamente applicabili.

Una strategia che permetterebbe una più facile integrazione con il processo abitualmente in uso di modellazione e simulazione degli edifici è trasferire automaticamente i dati geometrici, le condizioni al contorno e i parametri del modello BIM; ciò permetterebbe di eliminare gran parte dell'attività manuale di inserimento dei dati per la costruzione del modello di ordine ridotto. Alcuni studi stanno quindi cercando di automatizzare il trasferimento dal BIM al modello energetico dell'edificio basato su Modelica tramite lo sviluppo di librerie come ModelicaBIM [202] e di strumenti che riescano ad esportare un modello Revit per eseguire simulazioni termiche in Modelica [203]. Un altro modo per migliorare l'interoperabilità tra i due tipi di modelli consiste nel trasferimento automatico dei dati utilizzando standard aperti, come IFC (Industry Foundation Classes), o l'utilizzo di tecnologie web. Andriamamonjy et al. hanno introdotto un flusso di lavoro automatizzato tramite lo strumento IFC2Modelica [204]. Questo approccio ha riscontrato dei limiti nella capacità degli strumenti BIM commerciali, come Revit, di trasferire adeguatamente tutti i dati necessari nel flusso di lavoro con IFC2Modelica. Infatti, dopo aver trasferito il file IFC da uno strumento BIM, prima di poter eseguire le simulazioni nell'ambiente Modelica l'utente deve comunque inserire manualmente alcuni dati. Alcuni critici sostengono che una strategia appropriata da adottare è il passaggio a un ambiente digitale di raccolta e gestione dei dati, come il Common Data Environment (CDE), in cui questi vengono archiviati in database centralizzati e

condivisi tramite formati aperti [205]. Fjerbæk et al. [206] hanno sviluppato una ricerca avanzata in questo campo, dimostrando tramite la simulazione di un piccolo impianto di riscaldamento come è possibile eliminare gran parte del lavoro manuale trasferendo automaticamente i dati del modello BIM a un modello di ordine ridotto attraverso una piattaforma cloud. Le fasi future di questo studio hanno l'obiettivo di utilizzare i modelli per il rilevamento dei guasti e l'analisi dettagliata degli effetti dinamici dell'accoppiamento dei sistemi. Infatti, se collegati ai dati in tempo reale (come esempio quelli metereologici) o a dati provenienti da sensori, i modelli di ordine ridotto basati sulla fisica possono essere alla base di un Digital Twin (DT), definito come una rappresentazione virtuale di un bene fisico collegato e che comprende l'intero ciclo di vita del prodotto [207]. La sincronizzazione permanente con l'edificio o il sistema durante la fase operativa è dunque possibile attraverso un gemello guidato dalla fisica che opera in tempo reale durante la fase operativa [208] permettendo il rilevamento dei guasti e l'ottimizzazione del suo funzionamento. Questo è essenziale perché il Digital Twin è attualmente un campo attivo nella ricerca del settore AEC (Architettura, Edilizia, Costruzioni), soprattutto per quanto riguarda la manutenzione dei sistemi HVAC e l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche nella fase operativa. Infatti, con l'avanzamento della gestione degli edifici e la crescente domanda di edifici intelligenti, la ricerca sulle applicazioni di controllo predittivo e l'analisi dei guasti del sistema è notevolmente cresciuta negli ultimi anni.

Dunque, il metodo di modellazione analizzato è innovativo perché consente ai professionisti di ottimizzare le prestazioni del sistema sia in fase di progettazione che nelle successive fasi di funzionamento e gestione attraverso un unico modello che progredisce nel tempo e aumenta la sua complessità in base alle diverse esigenze. Il modello di ordine ridotto basato sulla fisica, infatti, può essere utilizzato durante l'intero ciclo di vita del caso di studio, come illustrato nella Figura 72: nella fase di ideazione, il modello 1D consente un maggiore controllo sulla progettazione e tempi di simulazione ridotti, mentre nella fase operativa può essere alimentato con dati in tempo reale e trasformato in un gemello digitale che collega i sensori a una piattaforma Internet of Things

(IoT), supportando così, senza soluzione di continuità, sia la progettazione fisica che quella di controllo.

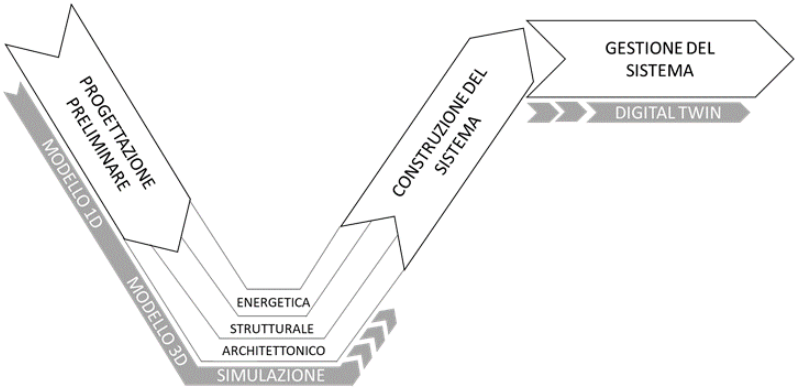


Figura 72 - Modellazione 1D dalla progettazione alla fase operativa.

5.3.2. Modelli di ordine ridotto basati sui dati

I modelli di ordine ridotto guidati dai dati, combinando l'intelligenza artificiale e le tecniche di modellazione dei sistemi per generare modelli statici o dinamici altamente efficienti in termini di tempo, sono in grado di accelerare la progettazione e l'ottimizzazione dei sistemi. Ci sono tre categorie principali di dati a partire dai quali può essere costruita questa tipologia di modello: dati in tempo reale provenienti da sensori che, per quanto riguarda gli edifici, possono per esempio essere raccolti dai sistemi di gestione o dall'Internet of Things (IoT); dati storici, come quelli derivati dalla domanda energetica annuale degli edifici; dati generati da strumenti di simulazione. Quest'ultima tipologia di modelli surrogati, detti anche metamodelli, utilizzano i dati di input-output raccolti da un modello ad alta fedeltà. Per esempio, Lindqvist [209] propone una metodologia per creare modelli di ordine ridotto basati sui dati derivanti dalle simulazioni di fluidodinamica computazionale (CFD). Quando si esegue un modello di simulazione dettagliata un vettore di input x (valori delle variabili di progetto) si traduce in un vettore di output y:

$$y = f(x) \tag{3}$$

Per ogni risposta *y* è possibile costruire un metamodello per approssimare la risposta vera come:

$$\hat{y} = s(x) \tag{4}$$

dove $s(x)$ è la funzione matematica che definisce il metamodello e che mappa le variabili di progetto x alla risposta y predetta. In generale però questa approssimazione non è esatta e per questo la risposta prevista $\hat{y}$ differirà dalla risposta y del modello dettagliato di un errore di approssimazione ε:

$$y = \hat{y} + \varepsilon = s(x) + \varepsilon \tag{5}$$

Dunque, poiché i metamodelli sono approssimazioni matematiche di modelli di simulazione dettagliati, viene introdotta un'ulteriore fonte di errore: la sfida consiste nel mantenere questo errore a un livello accettabile per il problema considerato.

Come mostrato nella Figura 73, la costruzione del modello di ordine ridotto basato sui dati derivanti da simulazioni avviene in quattro fasi principali: raccolta e preparazione dei dati, generazione dei dati, generazione del modello di ordine ridotto attraverso l'intelligenza artificiale e ottimizzazione. La prima consiste nel costruire un modello ad alta fedeltà e nel delineare matematicamente il problema di ottimizzazione impostando i vincoli, le funzioni obiettivo, le variabili di progetto e l'intervallo entro il quale queste possono variare. Successivamente viene condotto un *Design of Experiment* (DoE) per generare le opzioni iniziali di progettazione. L'output di questa simulazione è una matrice di test che contiene le combinazioni di valori delle variabili generate automaticamente durante le iterazioni. Nella terza fase, questa matrice diventa il dataset utilizzato per il training di una rete neurale. Le reti neurali, descritte in maniera più approfondita in seguito, hanno la capacità di imparare associazioni tra i dati e proprio per questo possono essere utilizzate per approssimare le relazioni complesse tra un insieme di input e di output che normalmente vengono ottenute con simulazioni di modelli ad alta fedeltà, con un grande impiego di tempi, costi e risorse computazionali. La produzione di dati di addestramento input-output da un modello ad alta fedeltà è quindi essenziale per la costruzione di modelli di ordine ridotto basati sull'intelligenza artificiale. Dopo che la rete neurale è stata addestrata e raggiunge livelli di accuratezza accettabili, viene

collegata all'interno del modello di ordine ridotto, definito in un ambiente di simulazione-modellazione del sistema. Una volta creato il ROM, viene eseguita la simulazione di ottimizzazione. Per verificare la validità del modello, i risultati devono essere confrontati con quelli della simulazione ad alta fedeltà. L'applicazione del workflow descritto verrà illustrata nel paragrafo 6.2.2.

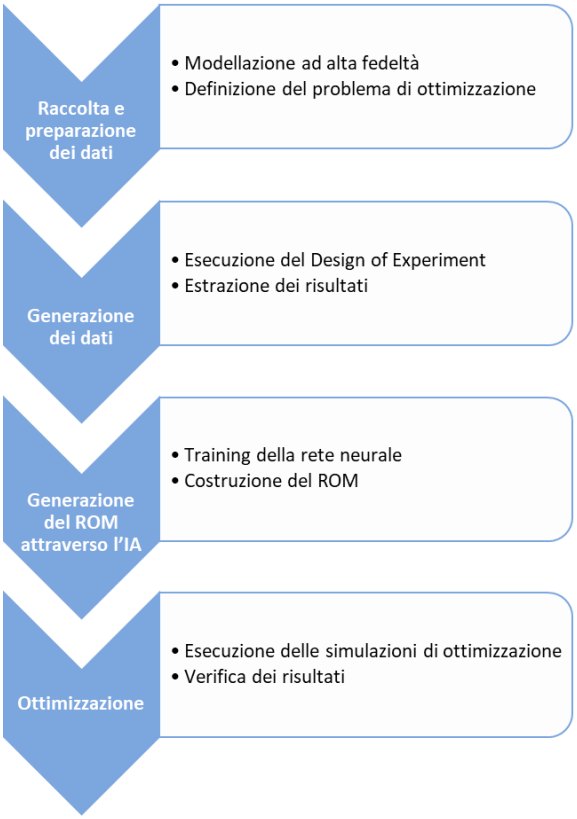


Figura 73 - Workflow della costruzione di un modello di ordine ridotto basato sui dati provenienti da simulazioni.

Le reti neurali, chiamate così perché rispondono agli stimoli in modo simile ai sistemi nervosi biologici, sono costituite da unità di elaborazioni, detti neuroni, organizzati in diversi strati. Maggiori sono i neuroni, maggiore sarà lo spessore della rete; maggiori saranno gli strati, più profonda sarà la rete. Uno schema di esempio di una rete neurale è riportato in Figura 74.

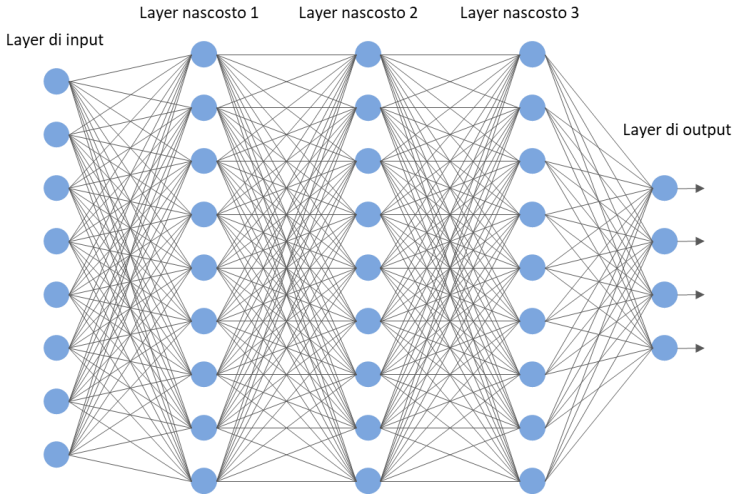


Figura 74 – Schematizzazione di una rete neurale.

Ogni neurone riceve una serie di input che, tramite dei pesi a_i, è in grado di ponderare; inoltre, viene sommato un termine di bias b per ottenere l'output che costituirà l'input dei neuroni dello strato successivo. Dunque l'output di un neurone sarà una combinazione dei seguenti input:

$$y = \sum a_i x_i + b \qquad (6)$$

Pesi a_i e termine di bias b sono modificati durante un processo di training al fine di poter minimizzare l'errore che la rete compie nella predizione dell'output finale. Poiché la maggior parte della fisica studiata è non lineare, cioè la relazione ingresso-uscita non può essere descritta tramite una combinazione lineare, si utilizza una funzione di attivazione per considerare gli effetti non lineari:

$$y = \sigma(\sum a_i x_i + b) \qquad (7)$$

Dove σ è la funzione di attivazione. Esempi di funzioni di attivazione sono:

ReLu: $y = \frac{x+|x|}{2}$

Tanh: $y = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$

Sigmoide: $y = \frac{1}{1+e^{-x}}$

L'input della funzione d'attivazione è l'output della ponderazione del neurone, come rappresentato in Figura 75.

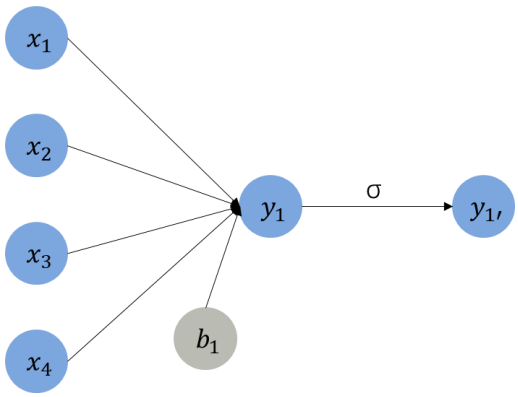


Figura 75 – Schematizzazione del comportamento di un neurone.

Dal punto di vista matematico, si ottiene:

$$y_1 = a1 * x_1 + a2 * x_2 + a3 * x_3 + a4 * x_4 + b_1 = \sum_{i=1}^{4} a_i * x_i + b_1 \quad (8)$$

$$y_{1'} = \sigma(y_1) \quad (9)$$

Dove $\sigma(x)$ rappresenta la funzione di attivazione. Immaginando uno strato costituito da 4 neuroni ($y_{1,2,3,4}$), la relazione matematica si può riscrivere:

$$y_j = \sum_{i=1}^{4} a_{ji} * x_i + b_j = \bar{\bar{A}}\bar{x} + \bar{b} \quad (10)$$

Lo schema seguente (Figura 76) sintetizza quanto illustrato precedentemente. Come anticipato precedentemente, i coefficienti a_{ji} e b_j di ogni strato vengono modificati durante un processo di training con lo scopo di minimizzare l'errore tra i valori predetti dalla rete neurale e i valori di riferimento (*Ground Truth* o

Target). La funzione errore utilizzata è lo scarto quadratico medio (*Mean Squared Error*), definito come:

$$MSE = \frac{1}{N_{campioni}} \sum_{k=1}^{N_{campioni}} (y_k - \tilde{y}_k)^2 \quad (11)$$

Dove $N_{campioni}$ rappresenta la lunghezza del dataset analizzato per il processo di training, y_k è il k-mo valore target del dataset e $\tilde{y}_k$ è il k-mo valore predetto dalla rete. Dal momento che:

$$\tilde{y}_k = F(a_{ji}, b_j) \quad (12)$$

è possibile procedere con un algoritmo di ottimizzazione che permetta di ottenere i parametri a_{ji} *e* b_j tale da minimizzare la funzione MSE. Questo processo passa dalla definizione dei gradienti $\frac{\partial F}{\partial a_{ji}}$ e $\frac{\partial F}{\partial b_j}$ che vengono utilizzati per aggiornare i parametri della rete all'epoca successiva, sfruttando metodi che dipendono dall'algoritmo stesso. L'ottimizzazione dei parametri della rete neurale viene eseguita considerando un set di dati di addestramento, che di solito è l'80% dell'intero set di dati. Il resto viene utilizzato come dataset di test per verificare l'accuratezza del modello di ordine ridotto su dati che la rete neurale non ha mai considerato.

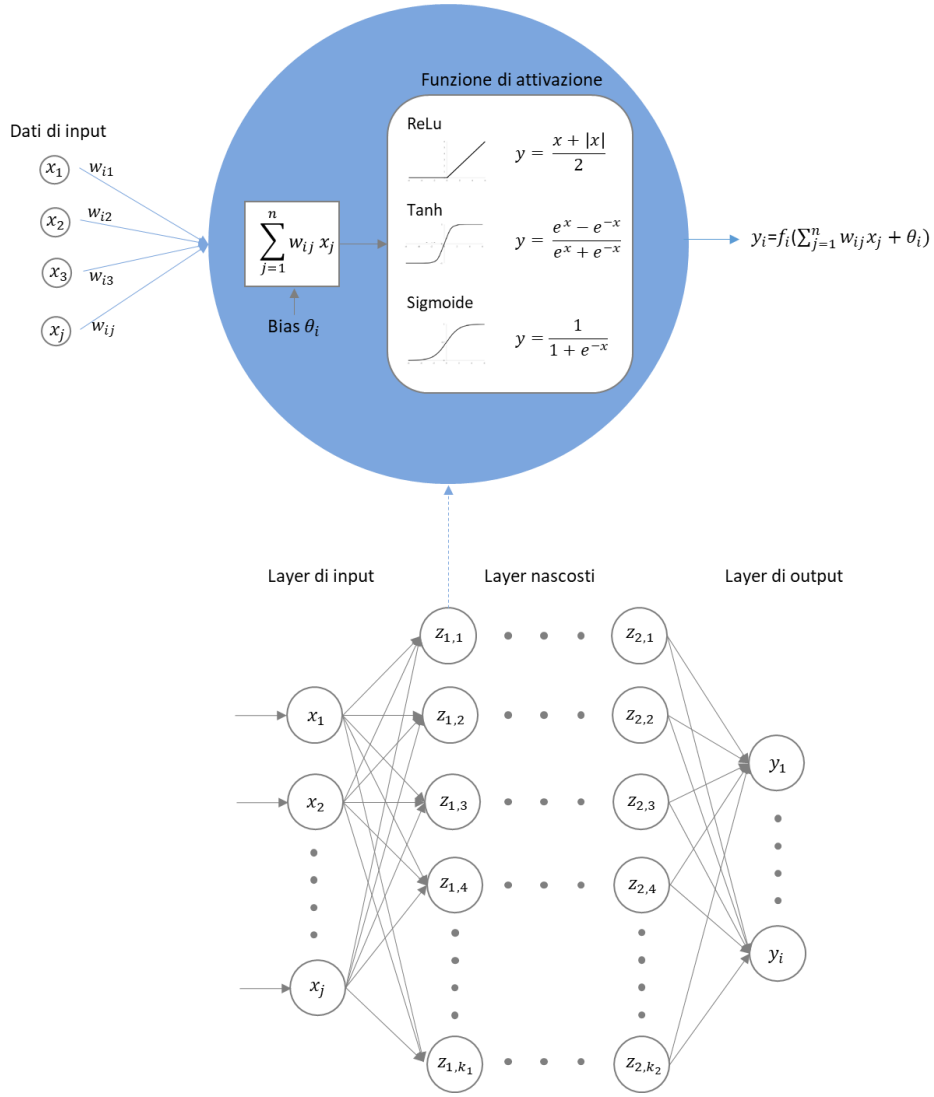


Figura 76 – Esempio di architettura di una rete neurale. Rielaborazione da una pubblicazione di Ayoub M. [159].

Dal momento che questa tipologia di modelli di ordine ridotto presenta molti vantaggi, viene utilizzata in numerosi campi con diversi obiettivi. Per esempio Jiang et al. [210] hanno modellato un ROM per la previsione dell'evoluzione della temperatura del fluido nelle reti di tubature per il teleriscaldamento. Invece, Vijayarangan et al. [211] hanno sviluppato un modello di ordine ridotto basato sui dati per accelerare l'integrazione temporale di sistemi rigidi a reazione chimica. Inoltre, la capacità di questi modelli basati su reti neurali di

prevedere rapidamente e con precisione il campo di flusso di sistemi complessi, come le interazioni fluido-struttura, accelera le simulazioni e consente di analizzare e progettare tali sistemi nel modo migliore possibile [212]. Solo recentemente anche alcune ricerche nel settore dell'architettura, dell'ingegneria e delle costruzioni hanno iniziato ad introdurre questa tipologia di modelli surrogati all'interno delle loro applicazioni. Uno dei casi di studio ha riguardato le simulazioni di illuminazione naturale poiché le tecniche tradizionali richiedono significative risorse di calcolo, infatti la simulazione di un singolo punto nel tempo di una sola opzione di progettazione di un edificio richiede tempi di elaborazione molto lunghi rendendo impegnativo lo studio di più alternative di progettazione. Alcune ricerche hanno dimostrato i vantaggi dell'utilizzo di tecniche di apprendimento automatico [159], in cui i dati di input e output ottenuti da simulazioni di illuminazione naturale precedenti possono essere utilizzati per addestrare una rete neurale che sarà in grado di prevedere le metriche di illuminazione per nuovi progetti di edifici senza dover eseguire una simulazione effettiva. Questa rete neurale può essere utilizzata all'interno del modello surrogato per valutare grandi set di opzioni di progettazione negli edifici a costi computazionali inferiori rispetto alle simulazioni basate su modelli tridimensionali. Questo può essere vantaggioso soprattutto per permettere ai progettisti di esplorare facilmente molte alternative progettuali e prendere delle decisioni più consapevoli durante le fasi iniziali della progettazione. Lo studio di Muthumanickam et al. [158] fornisce una spiegazione approfondita della costruzione di un modello di luce diurna basato su tecniche di apprendimento automatico. I risultati preliminari dell'addestramento risultano promettenti per quanto riguarda la capacità del metamodello basato sulla rete neurale di prevedere i valori di illuminazione diurna con tempi di calcolo ridotti e con un valore di accuratezza di 0,82 (considerando 1 come il massimo dell'accuratezza). Un altro ambito di applicazione riguarda la valutazione degli impatti sul microclima locale della costruzione di nuovi edifici al fine di migliorare il comfort termico esterno e ridurre al minimo il consumo energetico dell'edificio. Anche per questo tipo di analisi vengono generalmente utilizzate simulazioni basate su modelli tridimensionali, in particolare modelli di fluidodinamica computazionale (CFD). Sebbene la simulazione CFD sia efficace

nel fornire una previsione accurata del microclima locale, l'elevato carico computazionale ne limita l'applicazione pratica durante il processo di progettazione. Per questo, alcune ricerche hanno iniziato a sviluppare modelli di apprendimento automatico per la previsione degli impatti microclimatici locali dovuti all'inserimento di un nuovo edificio in un'area urbana in base a diverse alternative progettuali, sostituendo le simulazioni con elevato onere computazionale e dispendiose in termini di tempo. Uno degli studi più recenti in questo settore è stato condotto da Zhao et al. [213] in cui sono stati sviluppati due modelli surrogati basati sull'apprendimento automatico; uno studia la temperatura dell'aria locale, mentre l'altro la velocità del vento. Per l'addestramento e la validazione del modello è stato utilizzato un dataset proveniente da simulazioni CFD già effettuate su diversi progetti di edifici. I risultati evidenziano come i modelli surrogati possono ridurre significativamente i tempi di calcolo (da oltre 5 ore a meno di un secondo per una singola previsione), mantenendo lo stesso ordine di accuratezza delle simulazioni fluidodinamiche tridimensionali.

Per quanto riguarda invece le simulazioni MDO, Moni et al. [214] hanno proposto un modello di ordine ridotto che utilizza tecniche di apprendimento automatico per risolvere il problema dell'elevato costo dell'ottimizzazione basata su modelli ad alta fedeltà. Infatti, il modello proposto riesce a trovare la configurazione aerodinamica ideale per un intero progetto di un aeromobile con un tempo di calcolo notevolmente inferiore rispetto alle tecniche standard di risoluzione dei problemi di ottimizzazione multidisciplinare. Per il settore delle costruzioni, l'utilizzo di questa tipologia di modellazione potrebbe essere vantaggiosa per poter facilitare l'utilizzo delle simulazioni MDO all'interno del processo di progettazione e per estendere il campo di applicazione di questo tipo di simulazioni a un problema multidisciplinare che possa riguardare l'intero edificio. Infine, questo modello può anche essere utilizzato come Digital Twin "As Designed" [207] per accelerare le analisi di progettazione e ottimizzazione dei sistemi. Ad esempio, può essere impiegato in un simulatore in tempo reale o come base per un osservatore in un'applicazione di controllo. Ad esempio, [215] et al. hanno sviluppato il gemello digitale per un motore a corrente continua. Il risultato più importante di questo studio è la ROM basata

sull'intelligenza artificiale che utilizza i dati dei sensori di temperatura e corrente per anticipare con precisione i livelli di temperatura e corrente di un motore di base. Questa tipologia di applicazione dei modelli di ordine ridotto è molto promettente perché il gemello digitale è un campo attivo della ricerca nel settore delle costruzioni, soprattutto per quanto riguarda la manutenzione dei sistemi impiantistici e l'ottimizzazione delle prestazioni energetiche nella fase operativa.

Nell'ultimo "Congresso mondiale di ottimizzazione strutturale e multidisciplinare" tenutosi in Irlanda nel 2023, il Prof. Xueguan Song della Dalian University of Technology ha tenuto la lezione dal titolo: "Tendenze del modello surrogato, intelligenza artificiale, gemello digitale" in cui emerge che negli ultimi anni questo tipo di modellazione viene sempre più utilizzata dai numerosi gruppi che operano in questo campo di ricerca nel mondo. Dati i vantaggi e gli esiti molto promettenti delle prime applicazioni, questo tipo di modellazione sta diventando un campo di ricerca molto attivo in diversi settori tra da cui anche quello edilizio che può trarne vantaggio all'interno del processo di progettazione.

6. FORMALIZZAZIONE DELLA METODOLOGIA MDO IN AMBITO EDILIZIO

Come fase preliminare all'applicazione della metodologia nell'ambito degli interventi integrati, è stato sviluppato un caso studio semplificato, con l'obiettivo di testarne il funzionamento e consolidarne le modalità operative. Questa scelta deriva dalla complessità intrinseca del metodo, che combina discipline diverse, e dalla necessità di affrontare in modo progressivo le sfide legate alla sua implementazione in edilizia. L'obiettivo principale di questa fase preliminare è stato quello di avere un approccio graduale per poter gestire agevolmente i risultati, esplorare e valutare i potenziali benefici dell'approccio MDO, identificare eventuali criticità e definire un workflow efficace e replicabile. Successivamente, l'applicazione verrà estesa al caso studio selezionato, con l'obiettivo di indagare le potenzialità di questo approccio nel contesto specifico dell'intervento proposto.

Infine, qualora le simulazioni più avanzate portassero a dei risultati soddisfacenti, si avrebbe la possibilità di costruire un quadro metodologico e operativo riferito alle architetture esistenti per guidare i progettisti verso scelte più consapevoli e complessivamente coerenti. In questo modo, sulla base del percorso seguito nell'ingegneria aerospaziale ed automobilistica, anche il settore edile potrà beneficiare dei metodi di simulazione ed ottimizzazione multidisciplinare. Infatti, oltre alle caratteristiche energetiche, fluidodinamiche e gli effetti legati al benessere, considerati nel primo prototipo applicativo, nelle simulazioni possono essere inclusi anche gli aspetti strutturali e acustici. In questo modo si aprono nuove e più complete possibilità per la simulazione del comportamento di un edificio in tutte le fasi, dalla progettazione iniziale, al recupero, miglioramento e mantenimento dello stesso.

6.1. Ottimizzazione con modello di simulazione 3D

Per una prima applicazione della metodologia MDO, rispetto all'intero edificio, è stato scelto come caso di studio semplificato un'aula di una scuola esistente e, in base a questo, è stato sviluppato un problema di ottimizzazione multidisciplinare con l'obiettivo di esplorare l'approccio e valutarne le

potenzialità. In particolare, l'edificio preso in esame è in muratura:tale scelta è motivata dall'omogeneità delle caratteristiche dei muri portanti di tali strutture, che elimina le discontinuità tra struttura e tamponature tipiche delle costruzioni in cemento armato. Questa maggiore uniformità ha semplificato le fasi di modellazione, riducendo il numero di parametri da considerare e consentendo un inserimento più agevole delle proprietà dei materiali nei modelli. Inoltre, l'adozione di un edificio in muratura ha permesso di isolare più facilmente i fattori di studio, limitando le complessità non necessarie per questo tipo di applicazione e garantendo una maggiore focalizzazione sull'efficacia della metodologia.

L'aula analizzata è situata al primo piano del plesso scolastico Anita Garibaldi di Terni e ha un'area di 50,24 mq. L'ubicazione è servita per definire la zona climatica, i parametri di irraggiamento e l'orientamento. L'edificio, costruito in muratura dopo la fine del secondo conflitto mondiale, ha un impianto distributivo a C tipico dell'edilizia scolastica degli anni Cinquanta con tutte le aule affiancate lungo la facciata principale e un corridoio laterale di collegamento. Come mostrato in Figura 77, l'aula ha tre finestre collocate sull'unica parete che confina verso l'esterno; l'altro muro portante, parallelo a quello esterno, divide la stanza dal corridoio, mentre i due tramezzi ortogonali la separano delle altre aule.

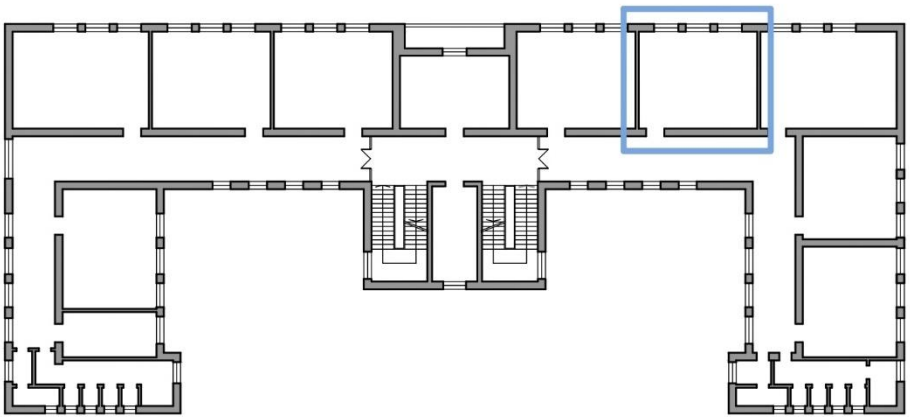


Figura 77 - Primo piano della scuola primaria Anita Garibaldi con individuazione dell'aula di riferimento. Scala 1:500.

L'indagine storico-costruttiva è stata indispensabile per individuare e selezionare i caratteri significativi degli elementi che costituiscono il modello, come per esempio le stratigrafie e i materiali. Dallo studio delle informazioni raccolte è emerso che le pareti portanti sono costituite da muratura in pietrame a spacco con buona tessitura con uno spessore di circa 50 cm, mentre i tramezzi di mattoni pieni hanno uno spessore complessivo di 20 cm. Dalle relazioni delle indagini videoendoscopiche è emerso un solaio latero-cementizio alto 31 cm. Le finestre, a vetro singolo con l'infisso in legno, sono state definite nel modello come una superficie con proprietà assegnate quali il materiale, lo spessore e la conducibilità termica.

Per il miglioramento energetico dell'aula sono stati scelti due interventi: il cappotto termico esterno con pannelli isolanti EPS e l'istallazione di un impianto di condizionamento. Le discipline coinvolte sono diverse; le simulazioni riguardano infatti non solo l'analisi termica, tramite la quale viene definito lo spessore del cappotto e alcuni parametri del climatizzatore, ma anche la fluidodinamica e il comfort interno. Infatti, la ventilazione può influenzare i parametri microclimatici e svolge un ruolo importante nel processo di termoregolazione del corpo umano e nel garantire situazioni di comfort ambientale. Con l'analisi fluidodinamica CFD è possibile modellare il flusso dell'aria immessa nell'aula tramite la ventilazione forzata e analizzare la meccanica e le proprietà del fluido in termini di pressione, temperatura e velocità. Definendo dei parametri di input e output, come per esempio valori della temperatura interna o la velocità del flusso, è dunque possibile unire alle simulazioni anche aspetti legati al benessere interno. Considerare il comfort interno negli ambienti scolastici è di fondamentale importanza poiché una temperatura interna adeguata porta a risultati di apprendimento migliori [216], mentre una temperatura interna elevata può causare mal di testa e costrizione toracica, compromettendo la concentrazione degli studenti [217]. Proprio perchè ha un effetto diretto sulla produttività, sono stati definiti standard per il comfort termico degli ambienti scolastici, come ad esempio lo standard ASHRAE 55 [218], lo standard ISO 7730 [219] e EN15251/2007 [220].

Il processo di ottimizzazione multidisciplinare con modello tridimenzionale è stato organizzato nelle cinque macrofasi illustrate nella Figura 78:

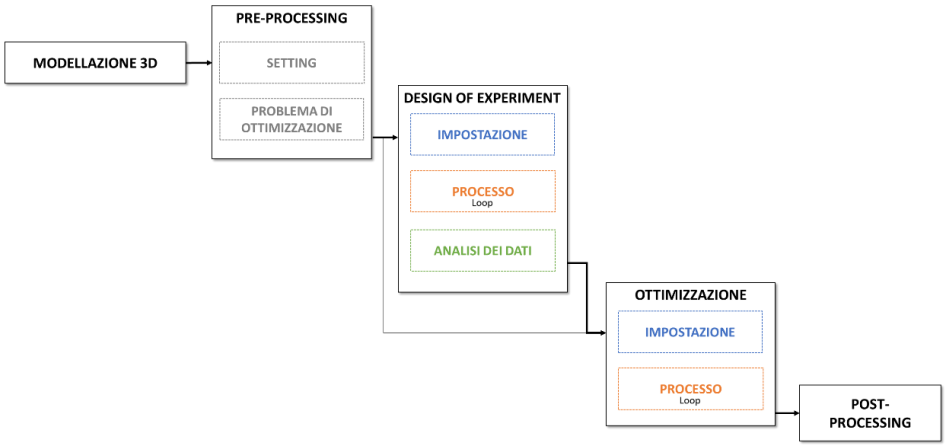


Figura 78 - Processo di ottimizzazione multidisciplinare con modello ad alta fedeltà.

Inizialmente è stata quindi modellata l'aula (Figura 79) tramite un software CAD[33] (in questo caso è stato utilizzato AutoCAD®). Nello stato attuale l'aula è dotata dell'impianto di riscaldamento di cui sono stati modellati solo i radiatori come semplici parallelepipedi con il volume equivalente e la posizione di quelli reali. Infatti ai fini della simulazione nel caso invernale è importante definire le fonti di calore interne. Inoltre, avendo deciso di rendere le simulazioni più complesse inserendo aspetti riguardanti il benessere delle persone e dal momento che la rappresentazione degli alunni sarebbe stata complessa per questo primo prototipo, è stato deciso di inserire i banchi nel modello e studiare le condizioni dell'ambiente intorno ad essi.

[33] La scelta di utilizzare un software CAD invece di un software BIM è dettata dalla necessità di garantire la compatibilità con i programmi impiegati nelle fasi successive. Nei settori dove la metodologia di ottimizzazione multidisciplinare è maggiormente diffusa, la modellazione dei prodotti avviene prevalentemente attraverso strumento CAD. Di conseguenza, i programmi specifici che si utilizzano per l'MDO attualmente sono stati progettati per integrarsi con questa tipologia di modellazione.

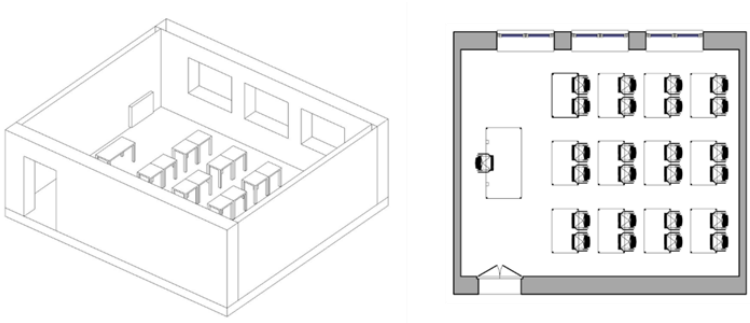


Figura 79 - Modello 3D e pianta dell'aula analizzata.

Dopo aver delineato il problema da studiare e costruito il modello, nella fase di preprocessing è stato necessario definire le proprietà assegnando materiali (Tabella 5), condizioni al contorno e paramentri come la radiazione solare, l'orientamento e le proprietà del flusso d'aria (in questo caso considerato laminare e stazionario).

Tramezzo		
Strato		
intonaco di calce e gesso	1,5	cm
mattoni in laterizio pieni	17	cm
intonaco di calce e gesso	1,5	cm
Trasmittanza (U)	2,1351	W/m^2K
Massa superficiale (Ms)	340	Kg/m^2
Muro portante		
Strato		
intonaco di calce e gesso	1,5	cm
blocchi di pietra	47	cm
intonaco di calce e gesso	1,5	cm
Trasmittanza (U)	2,4476	W/m^2K
Massa superficiale (Ms)	1175	Kg/m^2
Solaio		
Strato		
intonaco interno	1	cm
Strato resistente laterocementizio	28	cm
massetto	5	cm
pavimento	2	cm
Trasmittanza (U)	1,1999	W/m^2K
Massa superficiale (Ms)	515	Kg/m^2

Tabella 5 - Stratigrafie e proprietà dei materiali.

Da un punto di vista matematico, si traduce nelle seguenti semplificazioni:

- Equazione di conservazione della massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \;\; \rightarrow \;\; \nabla \cdot (V) = 0 \tag{13}$$

Dove si è considerato $\rho = cost$ nel tempo e nello spazio

- Equazione della conservazione della quantità di moto di un fluido newtoniano incomprimibile (equazione di Navier-Stokes):

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V = -\nabla p + \mu \nabla^2 V + F \rightarrow \frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu \nabla^2 V + \frac{1}{\rho}F \tag{14}$$

Dove μ è la viscosità cinematica, ν è la viscosità dinamica, p la pressione e F è la somma delle forze di volume, tra cui quella di gravità. Esprimendo la densità come $\rho = \rho_0 - \alpha\rho_0(T - T_0)$, dove α è il coefficiente di dilatazione termica, e scrivendo F= ρ *g. l'equazione (14) diventa:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V = -\frac{1}{\rho_0}\nabla p + \nu \nabla^2 V + g - g\alpha(T - T_0) \tag{15}$$

- Equazione di conservazione dell'energia:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + V \cdot \nabla T = k \nabla^2 T + Q \tag{16}$$

Dove $\rho C_p = cost$ rappresenta la capacità termica del fluido, k la conducibilità termica e Q il flusso di calore sorgente all'interno del flusso. Nell'equazione (15) è trascurato l'energia termica generata dalle forze di frizione ($\mu \nabla^2 V$).

Infine, per poter risolvere le equazioni che governano il fenomeno fisico da studiare, il dominio computazionale viene discretizzato attraverso la creazione di celle elementari che generano una griglia (*mesh*), come mostrato in Figura 80. Per quanto riguarda il numero di nodi della mesh, parametro strettamente correlato alla dimensione delle celle, è stata condotta un'analisi di sensitività finalizzata a valutare l'influenza della discretizzazione spaziale sulla precisione e sulla stabilità dei risultati, individuando un equilibrio ottimale tra accuratezza

del modello e costi computazionali. In particolare, in tutte le zone dove sono state imposte delle condizioni al contorno, i valori di alcuni parametri hanno un gradiente elevato e quindi è stata necessaria una discretizzazione piuttosto fitta rispetto al resto del modello per non compromettere la soluzione generata dagli algoritmi di approssimazione.

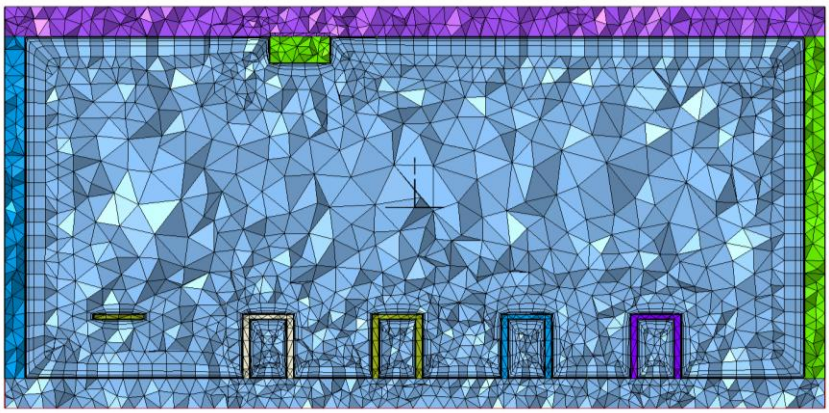


Figura 80 - Mesh del modello (sezione longitudinale)

Per le simulazioni del caso di studio sono stati principalmente utilizzati prodotti software della società Altair®, in particolare HyperWorks® CFD è servito nella fase di Preprocessing per la definizione dei materiali, delle condizioni al contorno e della mesh.

L'implementazione dell'ottimizzazione multidisciplinare è stata sviluppata in un ambiente di integrazione dei processi (PIDO), che consente di definire e gestire il flusso di lavoro attraverso una sequenza strutturata di operazioni: Preprocessing, Design of Experiment (DoE) e Ottimizzazione. Dunque, dopo aver definito il workflow specifico per questo caso di studio, come mostrato in Figura 81, questo viene configurato all'interno dello strumento PIDO per automatizzare l'intero processo. Altair Hypertudy® è la piattaforma di gestione delle simulazioni che ha consentito di inserire variabili, vincoli e parametri, collegare in automatico i programmi di simulazione (come per esempio AcuSolve® per la simulazione fluidodinamica), orchestrare le iterazioni del processo di ottimizzazione ed esplorare in modo sistematico ed efficiente lo spazio di progettazione.

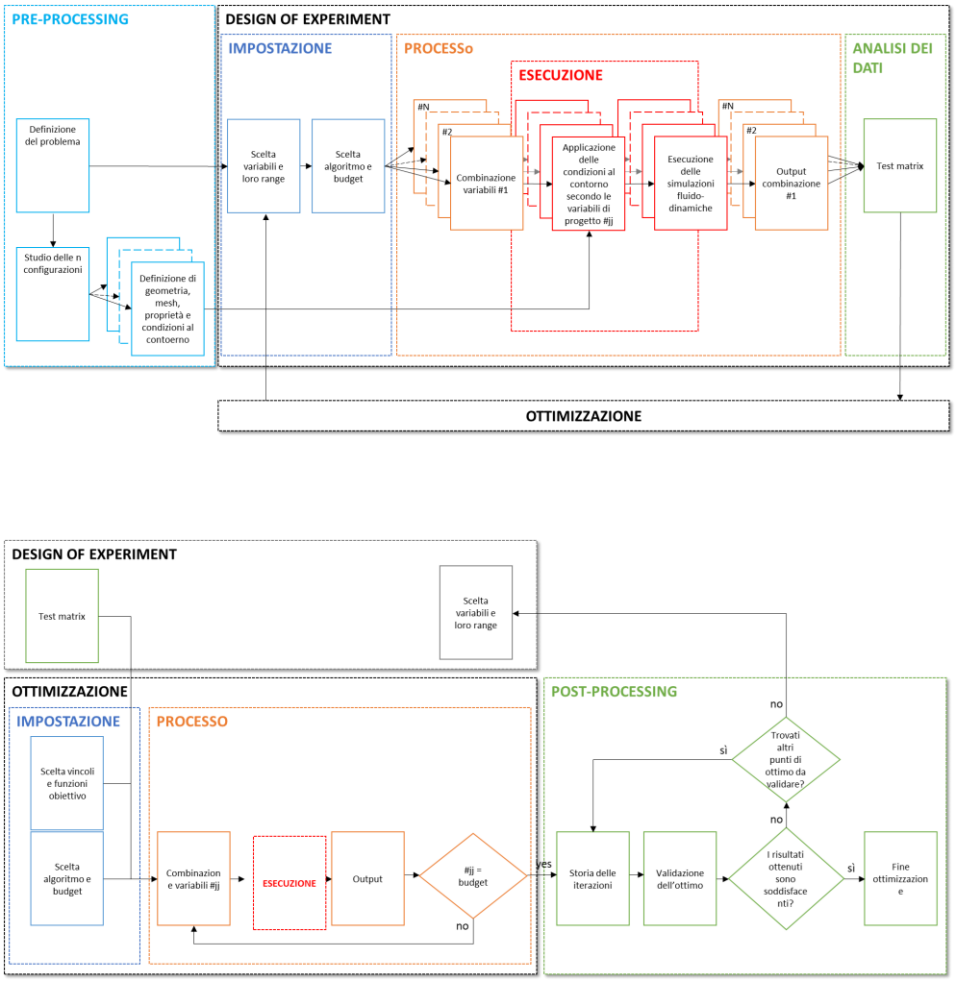


Figura 81 - Workflow specifico per il caso di studio. Dettaglio della prima parte del processo (in alto) e della seconda parte (in basso).

Per applicare la metodologia MDO, durante la fase di Preprocessing, è necessario definire, oltre alle proprietà del modello, anche il problema di ottimizzazione attraverso variabili (parametri che possono essere modificati per migliorare le prestazioni del sistema), vincoli (requisiti che devono essere soddisfatti affinché il progetto sia accettabile) e funzioni obiettivo (ciò che deve essere minimizzato o massimizzato). Trattandosi di progettazione di interventi sull'esistente la geometria della stanza è definita quindi, per le finalità di questa ricerca, si è proceduto alla definizione delle variabili riportate nella Tabella 6.

Variabile	Limite inferiore	Limite superiore	Unità di misura	Tipo
Configurazione	0	21		Discreta
V_x	-1,00	1,00	m/s	Discreta
V_y	-1,00	1,00	m/s	Discreta
V_z	-2,00	-0,01	m/s	Discreta
Temperatura	296,00	304,00	K	Discreta
Spessore	0,10	0,20	m	Discreta
Potenza	1500,00	3000,00	W	Discreta

Tabella 6 - Variabili di progetto.

Sono state definite ventuno configurazioni che differiscono tra loro per la posizione del climatizzatore all'interno dell'aula (Figura 82) al fine di poter trovare quella ottimale. Altre variabili considerate sono le tre direzioni della velocità e la temperatura del flusso di aria, lo spessore del pannello EPS e la potenza dei caloriferi, valida per il caso invernale. Si ritiene utile specificare che lo spessore dell'isolante ha come limite inferiore il valore che permette di raggiungere una trasmittanza del muro di 0,32 W/m^2K, valore minimo da ottenere per le strutture opache verticali sottoposte a intervento di riqualificazione energetica nella zona climatica D, dove si trova il caso di studio analizzato.

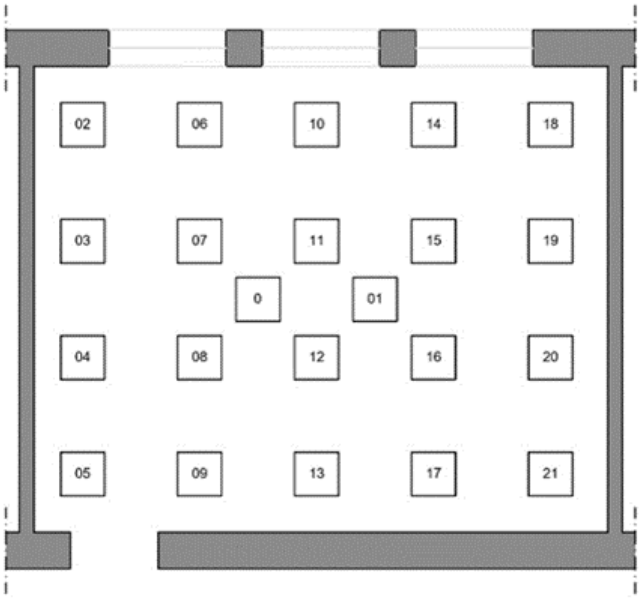


Figura 82 – Possibili configurazioni del condizionatore. Scala 1:100.

Inoltre, lo spazio progettuale è stato vincolato imponendo alla temperatura della superficie superiore dei tredici banchi una variazione compresa tra i 23°C e i 26°C per il caso estivo e tra i 20°C e i 24°C per il caso invernale. Dal momento che l'attività fisica svolta nell'aula è considerata moderata, applicando il vincolo ai banchi presenti nel modello è possibile studiare la variazione di temperatura nel loro intorno considerandola come quella degli occupanti per valutare il livello di comfort. La temperatura, infatti, è una delle proprietà fisiche dell'aria interna che contribuiscono al benessere microclimatico.
Gli obiettivi definiti per il caso di studio sono:

- aumento della temperatura dell'aria del climatizzatore nel caso estivo al fine di impegnare una potenza minore e quindi avere minori costi di esercizio;
- riduzione al minimo della velocità dell'aria del climatizzatore nel caso estivo per avere minore potenza e rumore, ovvero maggior comfort;
- riduzione al minimo dello spessore del pannello isolante con lo scopo di ridurne il costo.

Per quanto riguarda la funzione obiettivo, uno degli approcci per semplificare un problema con più obiettivi consiste nel convertirlo in uno a obiettivo singolo attraverso la somma ponderata dei singoli obiettivi:

$$\begin{aligned} \min_{x} \quad & \sum_{i=1}^{m} w_i \, f_i(x) \\ soggetto\ a \quad & g(x) \leq 0 \\ & h(x) = 0 \\ & x^{inferiore} \leq x \leq x^{superiore} \end{aligned} \tag{17}$$

dove i pesi wi sono numeri positivi la cui somma è spesso impostata all'unità, ovvero $\sum w_i = 1$. È stata quindi definita la seguente funzione obiettivo da minimizzare:

$$f = \left(\frac{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}{2^2 + 1 + 1}\right) \times 0{,}2 + \left(\frac{-T}{14} + \frac{304}{14}\right) \times 0{,}3 + (c \times s - 1) \times 0{,}5 \tag{18}$$

dove le variabili velocità (V), temperatura (T) e spessore (s) hanno valori compresi tra quelli indicati nella Tabella 6. Si assume il costo dell'isolante pari al costo unitario del pannello c moltiplicato per il suo spessore s: minimizzare il costo del pannello significa quindi minimizzarne lo spessore. La costante c ha un valore pari a 10, per uno spessore che può variare da 0,1 a 0,2 m. La funzione è composta da tre addendi, ognuno dei quali può assumere un valore compreso tra 0 e 1 e deve essere minimizzato durante la simulazione. Questi sono pesati in modo tale che l'ottimizzazione sia maggiormente guidata dallo spessore (peso 0,5), successivamente dalla temperatura (peso 0,3) e infine dalla velocità (peso 0,2).

Successivamente, dopo aver inserito le variabili, i vincoli e la funzione obiettivo, il processo di simulazione viene strutturato in fasi, che in Hyperstudy assumono il nome di *modelli*[34]. In questo caso, come mostrato in Figura 83, sono stati definiti quattro *modelli* (due per il caso estivo e due per quello invernale). Il primo (m_1) è un *parametrized file* per poter aggiornare a ogni iterazione il file di input con delle combinazioni di valori delle variabili comprese tra gli intervalli stabiliti precedentemente (Tabella 6). Gli altri tre, invece, sono definiti come *operator*: non dovendo modificare alcun file, si è optato per un *modello* che abiliti l'esecuzione delle simulazioni, partendo dal file di input di m_1 in modo da avere le stesse combinazioni di variabili.

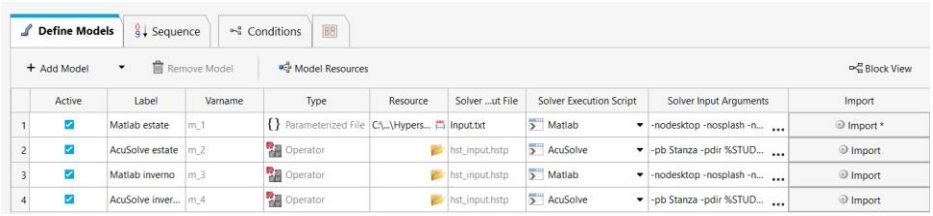


Figura 83 - Schermata del software HyperStudy con la definizione dei modelli.

Per ogni *modello*, il processo si sviluppa in tre fasi: *write*, *execute* e *extract*. Nella prima il software genera per ogni iterazione un file di testo con una combinazione diversa di valori delle variabili di progetto. Questo costituisce il

[34] Nella presente trattazione viene utilizzato il termine *modello* in corsivo quando si fa riferimento alle fasi del processo in Hyperstudy per distinguerlo dal modello geometrico tridimensionale o monodimensionale.

file di input per la seconda fase (*execute*) nella quale viene sottomesso un codice scritto in Matlab (Appendice B – Codice Matlab) che, tra le diverse operazioni di automatizzazione del processo svolte, calcola in base al valore dello spessore la conducibilità termica λ equivalente per il calcolo della trasmittanza del muro esterno e aggiorna le proprietà del climatizzatore dialogando con il modello associato a ciascuna configurazione. Infine, genera un nuovo file aggiornato (*extract*). Si passa, quindi, al secondo *modello* (m_2) che, essendo un *operator*, non deve modificare le variabili ma processa il file di *output* del primo *modello* (m_1) avviando le simulazioni fluidodinamiche tramite il software AcuSolve®, che è stato utilizzato al fine di comprendere gli effetti fluidodinamici e termici (come flussi, trasferimento di calore, turbolenza e analisi dei materiali) del progetto. Il programma, per ottenere la convergenza del problema, ha bisogno di svolgere 600 iterazioni: questo valore è stato stabilito dopo aver svolto un'analisi di sensitività condotta in relazione al tempo computazionale e ai risultati di temperatura ottenuti (Tabella 7) e rappresenta un compromesso tra accuratezza della soluzione e tempi di calcolo. Nell'ultima fase vengono estratti gli output.

Iterazioni	Temperatura (K)	Tempo (min)	ΔT
100	300,58	2,20	
600	304,26	11,23	1,22356
1000	304,30	17,83	0,01291
5000	304,38	92,75	0,02594

Tabella 7 - Valori dell'analisi di sensitività.

Gli altri due *modelli* si occupano di ripetere questo processo per il caso invernale. Il terzo (m_3) è un *operator* perchè eredita i valori derivanti dalla parte iniziale (*write*) del primo *modello* (m_1), dovendo fare riferimento alle stesse combinazioni delle variabili del caso estivo. Un'altra differenza sta nel modello associato a ciascuna configurazione a cui fa riferimento Matlab®: anche se la geometria è uguale a quella del caso estivo, sono stati modificati alcuni parametri come la temperatura dell'aria interna ed esterna, le condizioni al contorno del climatizzatore, che in questo caso risulta spento, e la quantità di calore generata dai radiatori, che nel caso precedente era nulla. Questo processo è servito inizialmente per condurre un Design of Experiments (DoE),

un primo test svolto per valutare le tendenze delle prestazioni sull'intero spazio di progettazione e comprendere il comportamento globale del sistema prima della simulazione di ottimizzazione vera e propria. Tale operazione richiede la definizione di un algoritmo e di un numero di iterazioni: è stato scelto l'algoritmo *Modified Extensible Lattice Sequence* (MELS) che si basa su una sequenza reticolare progettata per distribuire equamente i punti nello spazio riducendo al minimo le concentrazioni e gli spazi vuoti. Per questa fase è stato individuato un numero di iterazioni pari a 350, ognuna delle quali rappresenta una diversa combinazione delle variabili di progetto e quindi il numero di volte in cui il processo sopra descritto viene ripetuto. Il DoE ha come risultato una matrice (*test matrix*) composta da tutti i valori assunti dalle variabili al susseguirsi delle iterazioni e mette in luce quali rispettano i vincoli e quali invece sono inammissibili. Questa fase rappresenta un modo conveniente per iniziare a esplorare lo spazio di progettazione e definire quelle relazioni input/output utili ai fini dell'ottimizzazione. Nella Figura 84 sono riportati i valori della velocità dell'aria del climatizzatore e dello spessore analizzati nelle 350 iterazioni. I punti sono classificati con una scala di colori secondo il valore della funzione obiettivo; i triangoli vuoti verso il basso indicano le configurazioni inammissibili mentre i cerchi quelle fattibili. Sebbene tutti i punti analizzati risultino non ammissibili, tale risultato contribuisce comunque a delineare lo spazio di progetto e a orientare le simulazioni di ottimizzazione che verranno svolte in seguito. In questa fase, infatti, l'obiettivo principale non è quello di minimizzare la funzione obiettivo, come avverrà nella fase successiva, ma di esplorare e comprendere lo spazio di design.

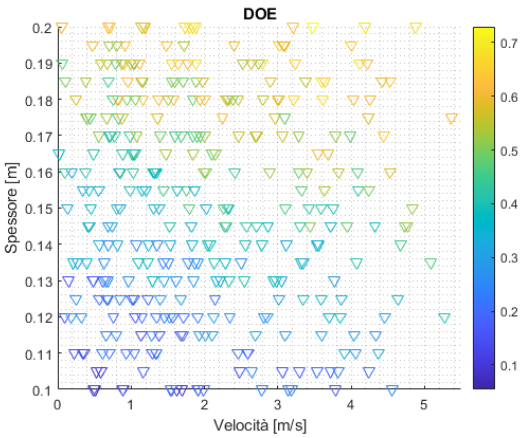


Figura 84 - Risultati delle iterazioni in termini di velocità e spessore nel DoE.

Dai risultati emerge anche che la variabile che influenza maggiormente la risposta nel caso invernale è la potenza termica dei termosifoni, come mostrato nella Figura 85 in cui le linee tratteggiate con una pendenza positiva indicano un effetto positivo (se la variabile di input aumenta, aumenta anche la risposta di output) mente le linee tratteggiate con pendenza negativa indicano un effetto negativo (se la variabile di input aumenta, la risposta di output diminuisce).

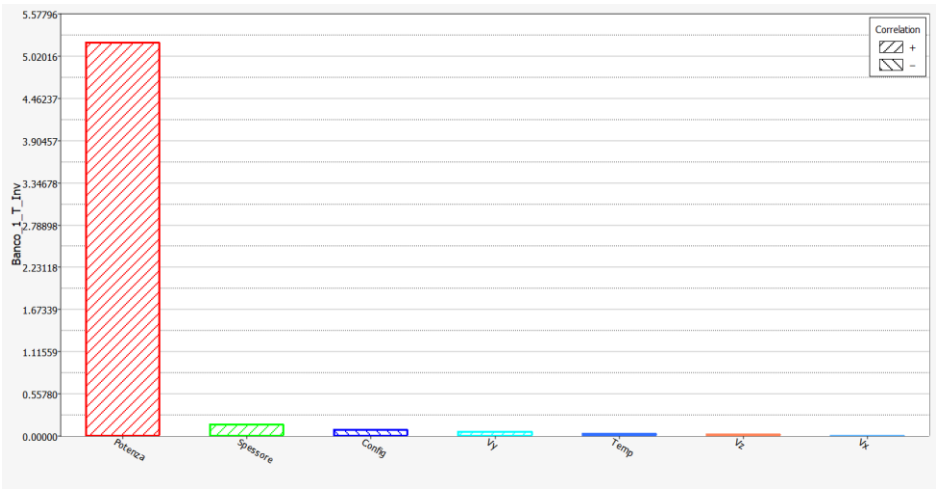


Figura 85 - Effetto delle variabili di input sulle risposte di output nel caso invernale.

Successivamente, lo stesso processo descritto per il DoE viene utilizzato anche per l'ottimizzazione, che ha lo scopo di trovare i valori delle variabili di *output* che minimizzino gli obiettivi stabiliti, oltre a essere rispettosi dei vincoli imposti.

Considerando il problema nella sua interezza, questa fase richiede una grande potenza di calcolo e quindi, per poter ridurre il numero di iterazioni e renderle più efficienti, è fondamentale aver prima definito lo spazio di progetto con il DoE. Poiché le equazioni che governano il fenomeno fisico studiato e che devono essere risolte per arrivare alla soluzione sono di tipo non lineare, è stato selezionato l'algoritmo *Global Response Search Method* (GRSM) [3] che, data la sua natura, permette di risolvere problemi di ottimizzazione complessi con un numero iterazioni (in questo caso 150), e quindi di tempo, minore rispetto agli algoritmi genetici. Quello scelto è un algoritmo di ottimizzazione globale che, come descritto nella Figura 86, dopo il campionamento iniziale (in questo caso fatto da 20 configurazioni), genera una superficie di risposta, ottenuta interpolando le variabili di design e gli output tracciati; in questo modo, è possibile cercare il minimo all'interno dello spazio di progettazione e valutarlo con una simulazione ad alta fedeltà. Durante le successive iterazioni, una nuova ottimizzazione basata sulla superficie di risposta genera nuove configurazioni in cui trovare il minimo (in questo caso 2). Di conseguenza, la superficie di risposta viene aggiornata in modo adattivo in base ai nuovi risultati per avere una migliore capacità predittiva del problema rispetto agli output d'interesse. Per sua natura, non esistono criteri di terminazione basati su una soglia, come invece accade nell'algoritmo di ottimizzazione locale: il GRSM si ferma una volta raggiunto il numero massimo di configurazioni valutabili (iterazioni) definite dall'utente.

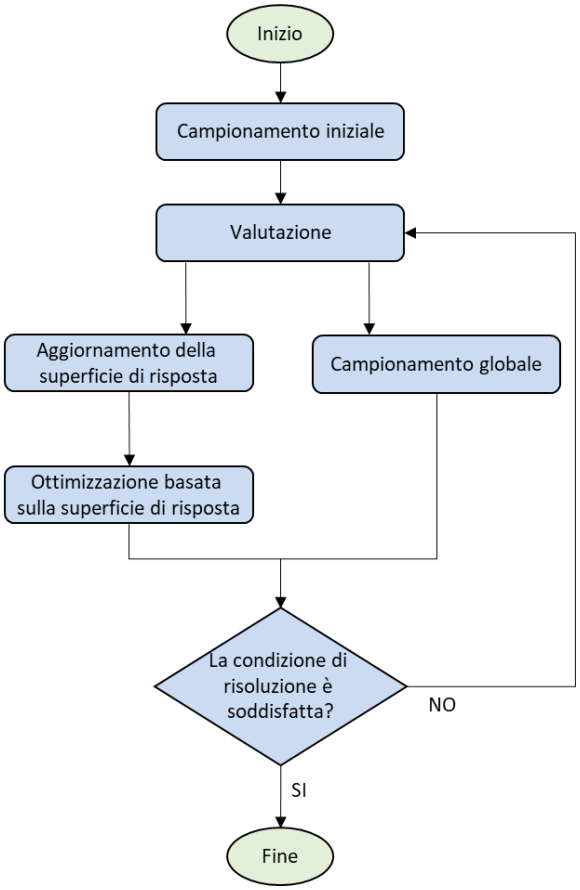


Figura 86 - Diagramma di flusso dell'algoritmo GRSM.

Infine, al termine del processo di ottimizzazione, i risultati sono stati elaborati e visualizzati tramite i software Hyperstudy® e HyperView®. Nella Figura 87 sono presenti tutte le combinazioni delle variabili di progetto analizzate: in blu sono indicati i valori che portano alla minimizzazione della funzione obiettivo, in rosso le combinazioni di variabili peggiori, mentre in grigio le altre.

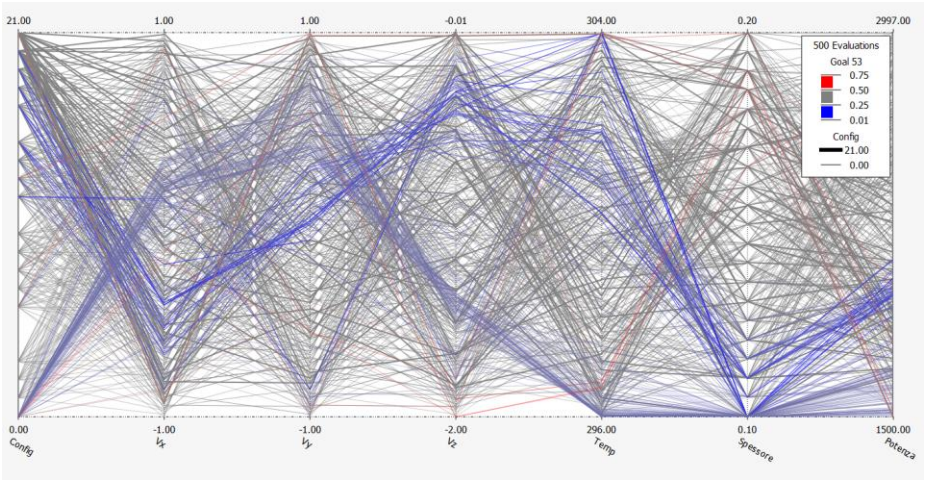


Figura 87 - Grafico a coordinate parallele delle simulazioni di ottimizzazione.

Lo scopo delle simulazioni effettuate è trovare la combinazione delle variabili che possa ridurre al minimo la funzione obiettivo definita inizialmente. I risultati della fase di ottimizzazione vera e propria sono stati riportati nella Figura 88: la linea nera tratteggiata congiunge le configurazioni che sono ottimali fino a quell'iteerazione, mentre il cerchio rosso indica il risultato migliore alla fine di tutte le iterazioni (punto che minimizza la funzione e soddisfa tutti i vincoli). Viene riportato l'andamento dei valori dello spessore e della velocità assunti singolarmente (grafico a sinistra) e dell'intera funzione obiettivo (grafico a destra) durante le 150 iterazioni. Quindi, nonostante il DoE non abbia identificato alcun valore ammissibile, quella fase è servita per definire lo spazio di progetto e dare delle informazioni di partenza all'algoritmo di ottimizzazione in modo tale da rendere le iterazioni più efficienti e indirizzare la ricerca del punto di ottimo in zone diverse da quelle non fattibili.

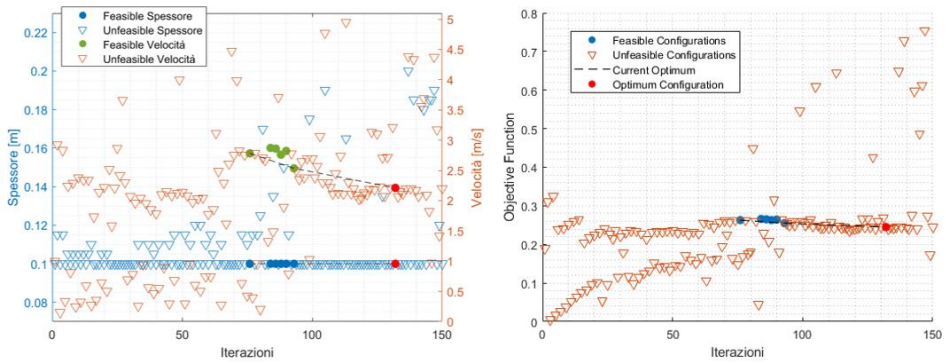


Figura 88 - Risultati delle iterazioni in termini di velocità e spessore nell'ottimizzazione (a sinistra) e andamento della funzione obiettivo al progredire delle iterazioni (a destra).

Dai grafici è inoltre evidente come, al crescere delle iterazioni, la distribuzione dei risultati si concentri in un'area sempre più ristretta dello spazio di progetto. In questo modo le simulazioni di ottimizzazione hanno identificato una soluzione che minimizza lo spessore dell'isolante termico esterno, individua la posizione migliore del climatizzatore in base al flusso di aria che si genera nell'aula e ottimizza le prestazioni in termini di velocità e temperatura del sistema di ventilazione forzata per il risparmio energetico e il comfort ambientale. Nella Tabella 8 sono riportati i valori assunti dalle variabili nel punto di ottimo individuato.

Punto di ottimo		
Configurazione	0	
V_x	0,13	m/s
V_y	0,39	m/s
V_z	-1,38	m/s
Temperatura	296,01	K
Spessore	0,1	m
Potenza	1666,00	W

Tabella 8 - Valori del punto di ottimo.

Si può notare come lo spessore dell'isolante esterno, che aveva un peso maggiore nella funzione obiettivo, assuma il valore inferiore dell'intervallo assegnato. Nella Figura 89 è possibile osservare la posizione del climatizzatore (configurazione 0) e le variazioni della temperatura dell'aria interna nella soluzione di ottimo.

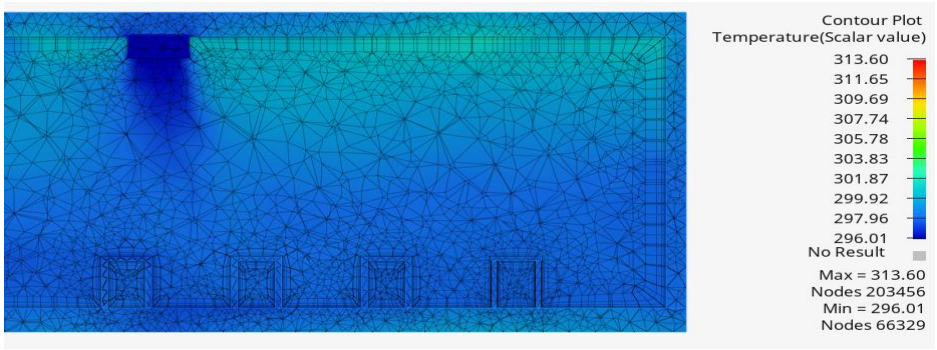


Figura 89 - Distribuzione della temperatura interna nella configurazione di ottimo.

Inoltre, è interessante osservare come quest'ultimo valore risulti non solo omogeneo nell'intorno dei banchi, ma anche compreso nell'intervallo necessario per garantire la condizione di comfort interno per quanto riguarda la temperatura. Il rispetto dei vincoli assegnato inizialmente sulla superficie superiore dei banchi viene mostrato dagli istogrammi riportati di seguito (Figura 90) sia per il caso estivo che per quello invernale.

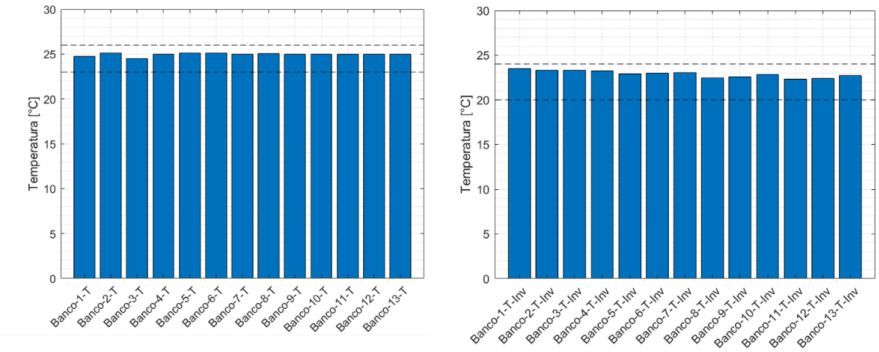


Figura 90 - Verifica grafica del rispetto dei vincoli imposti nel caso estivo (sinistra) e nel caso invernale (destra).

Dalle simulazioni è emerso come nel caso di studio preso in considerazione il valore della temperatura dell'aria in uscita dalla ventilazione forzata influenzi maggiormente la temperatura dell'aria interna rispetto all'irraggiamento esterno, soprattutto al crescere della velocità del flusso in quanto aumenta lo scambio convettivo e quindi la propagazione del calore verso le regioni vicine. La soluzione trovata considera i valori minimi della velocità che possano soddisfare i vincoli imposti, pur non raggiungendo ancora i valori necessari per

garantire il comfort per questo parametro. Infatti, per questo primo prototipo è stato scelto di non assegnare troppi vincoli e variabili, ma di circoscrivere il problema al fine di comprendere il processo e il comportamento del sistema. In simulazioni future sarebbe interessante inserire ulteriori parametri per raggiungere il comfort interno anche per quanto riguarda la velocità e per indagare altri aspetti come, per esempio, il rumore associato alla ventilazione forzata.

Dunque, questa fase semplificata rappresenta un primo passo fondamentale verso l'applicazione su larga scala dell'ottimizzazione multidisciplinare, consentendo di acquisire conoscenze preliminari, testare l'integrazione tra discipline e raffinare il processo analitico prima di affrontare il caso studio più complesso dell'edificio in cemento armato.

6.2. Ottimizzazione con modelli di ordine ridotto

Il caso applicativo della metodologia di ottimizzazione multidisciplinare (MDO) basato su un modello ad alta fedeltà presentato precedentemente, ha consentito di valutare le potenzialità di questa metodologia nel processo di progettazione. Tuttavia, sebbene il processo MDO abbia dimostrato la sua efficacia, sono emerse alcune limitazioni significative legate alla complessità computazionale e al tempo richiesto per le analisi. Infatti, la possibilità di estendere il numero di soluzioni esaminate attraverso l'automazione si scontra con la necessità di una notevole potenza di calcolo. Inoltre, le analisi fluidodinamiche, che consentono di determinare la distribuzione spaziale e temporale dei parametri climatici (quali temperatura, umidità relativa e velocità dell'aria) all'interno di un ambiente e di valutarne la variazione in funzione delle caratteristiche termofisiche dell'involucro edilizio e, eventualmente, dei carichi termici dovuti alla presenza di persone, rappresentano un aspetto cruciale e particolarmente oneroso in termini di tempo e risorse. Tali problematiche diventano ancora più rilevanti quando si considerano applicazioni su scala più ampia. Per superare questi limiti e rendere possibile l'estensione delle simulazioni MDO all'intero edificio e a più discipline, il modello ad alta fedeltà può essere sostituito dai modelli di ordine ridotto (ROM), che rappresentano

una soluzione efficace per ridurre il costo computazionale, garantendo al contempo un'accuratezza adeguata alle analisi richieste.
Questa sezione esamina l'implementazione della metodologia di ottimizzazione multidisciplinare mediante i ROM, con l'obiettivo di valutare se tale approccio consenta una più agevole applicazione del processo MDO al settore dell'architettura, dell'ingegneria e dell'edilizia. L'analisi si concentra sulle prestazioni dei ROM e sui benefici che essi offrono rispetto all'approccio ad alta fedeltà, evidenziandone il potenziale nell'ambito delle simulazioni condotte. Il caso applicativo semplificato viene quindi ripetuto con lo scopo di valutare la velocità delle simulazioni e comprendere come i modelli di ordine ridotto possano supportare il processo MDO.

6.2.1. ROM basato sulla fisica

La simulazione basata su modelli 1D consente di analizzare problemi che superano i limiti dei tradizionali programmi di simulazione per edifici. I flussi di lavoro attuali sono manuali o semiautomatici e spesso fanno uso di fogli di calcolo, rendendo il processo meno efficiente. Infatti, nella pratica comune gli impianti di riscaldamento e condizionamento vengono solitamente progettati seguendo procedure semplificate, prevalentemente statiche, che si basano sulle condizioni di massimo carico. Si ottiene così un sovradimensionamento degli impianti, con implicazioni negative in termini di costi, efficienza energetica e sostenibilità complessiva.
L'obiettivo è quello di utilizzare modelli ridotti basati sulla fisica per sviluppare la simulazione del comportamento termico ed energetico dell'aula e del suo sistema di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC), nonché la loro interazione secondo il flusso di lavoro proposto nel paragrafo 5.3.1 (Figura 71). Sulla base del potenziale riscontrato nei settori in cui questo tipo di modellazione è attualmente integrato nel processo di progettazione si deduce che è possibile studiare il sistema termico nello stato attuale e valutare le sue variazioni in relazione agli interventi di riqualificazione proposti. Questo approccio innovativo permetterebbe di supportare il progettista durante la fase decisionale e affrontare il problema di progettazione con maggiore

consapevolezza per realizzare soluzioni più sostenibili. Per costruire i modelli basati sulla fisica, determinarne i relativi parametri e ottimizzare i processi termici, è fondamentale una conoscenza dettagliata del sistema e dei meccanismi fisici alla base del trasferimento di calore. La Figura 91 illustra in dettaglio il workflow adottato in questa applicazione. In una prima fase di analisi, oltre a individuare e selezionare le caratteristiche significative dei vari elementi che costituiscono il sistema, come le stratigrafie e le caratteristiche dei materiali, è stato definito anche il contesto esterno (dati climatici e orientamento).

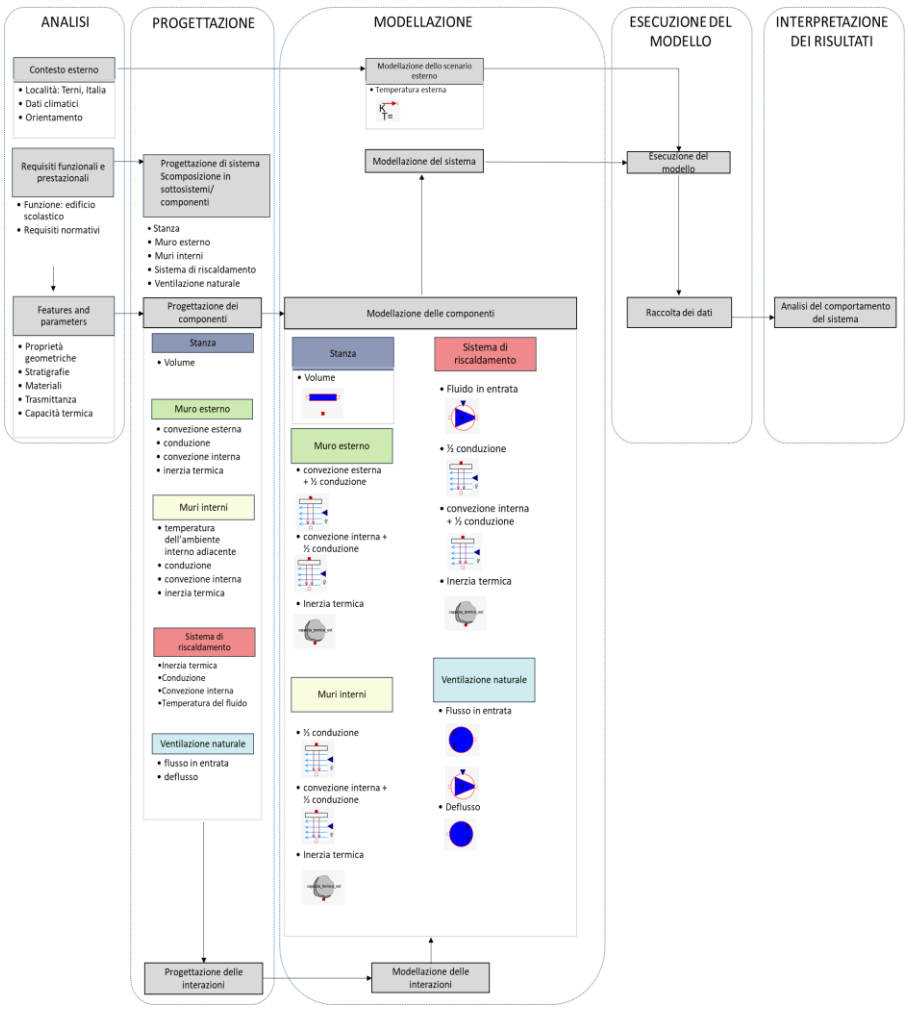


Figura 91 - Worflow operativo del caso applicativo con un modello di ordine ridotto basato sulla fisica.

Successivamente, nella fase di progettazione, il sistema è stato definito scomponendolo in sottosistemi e componenti. Per fare ciò, è necessario comprendere il comportamento fisico generale del sistema in esame. Il comportamento termico caratteristico dell'aula è influenzato dall'immagazzinamento e dalla conduzione del calore attraverso pareti e solai e dall'aria presente sia all'interno che all'esterno dell'edificio, oltre che dalla trasmissione del calore tra questi elementi. Un ruolo cruciale è svolto anche dai sistemi impiantistici, i cui consumi sono strettamente correlati alle perdite di involucro e ai guadagni di calore. I sottosistemi inizialmente progettati sono: aula, pareti esterne, pareti interne, sistema di riscaldamento e ventilazione naturale. Ad esempio, il contributo della parete esterna è descritto attraverso più componenti. Il trasferimento di calore avviene infatti mediante meccanismi di convezione esterna, conduzione all'interno della parete e convezione verso l'ambiente interno. L'inerzia termica della parete rappresenta un ulteriore componente. Dopo aver progettato l'intero sistema, questo viene modellato utilizzando il software Altair Activate [221], che fornisce un ambiente di modellazione e simulazione basato su diagrammi a blocchi. Ogni componente individuato nella fase precedente viene rappresentato attraverso dei blocchi specifici provenienti da librerie, in particolare Modelica. La Figura 92 illustra i diversi sottosistemi coinvolti e fornisce una rappresentazione di come è stato modellato il sistema.

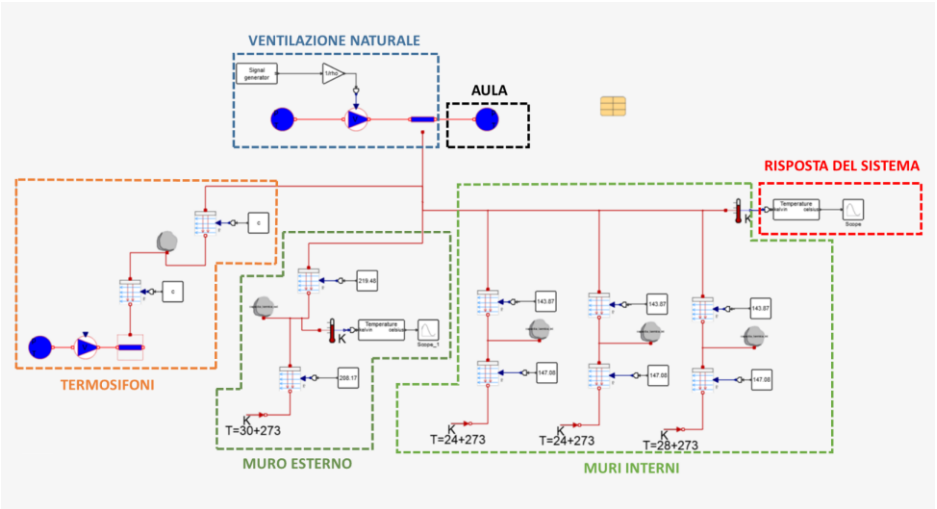


Figura 92 - Modello 1D del sistema implementato con il software Altair Activate.

Le fasi conclusive prevedono l'esecuzione del modello e la successiva visualizzazione e analisi dei risultati ottenuti.
Nonostante le simulazioni siano state eseguite in pochi secondi, sono emerse alcune difficoltà iniziali nell'identificare i domini applicativi coinvolti nel sistema, nell'analizzare tutte le leggi che regolano i fenomeni e, in particolare, nel modellare ciascun componente con i relativi parametri. Sebbene questo processo abbia permesso di acquisire una comprensione approfondita del sistema, esso risulta particolarmente dispendioso in termini di tempo, soprattutto se si considera l'eventualità di estendere tali simulazioni all'intero edificio. Per queste ragioni, la modalità di modellazione adottata non è stata ritenuta adeguata per raggiungere gli obiettivi specifici di questa ricerca.

6.2.2. ROM basato sui dati mediante software commerciale

Sebbene l'applicazione dei modelli 1D basati sulla fisica abbia dimostrato il potenziale per superare alcune delle limitazioni dei modelli ad alta fedeltà, è emerso che la fase di modellazione del sistema risulta particolarmente onerosa in termini di tempi e risorse necessarie. Per ovviare a tale difficoltà e per cercare di rendere le simulazioni di ottimizzazione multidisciplinare più efficienti dal punto di vista dei tempi e dei costi computazionali, è stato sviluppato un modello di ordine ridotto basato sui dati attraverso lo strumento Altair romAI che, tramite la tecnologia del Machine Learning [222], consente di ottenere relazioni non lineari tra un dataset di input e il relativo dataset di output. In questo modo, dopo un processo di training (che richiede un insieme di dati), il ROM potrà essere utilizzato all'interno del processo di ottimizzazione multidisciplinare già formalizzato in precedenza e, potendo avvalersi di una significativa riduzione della capacità computazionale, sostituire totalmente la simulazione ad alta fedeltà svolta nel paragrafo 6.1. Il modello così costruito è infatti in grado di replicare il comportamento del sistema originale consentendo di prevedere con accuratezza gli output corrispondenti a nuovi input in modo rapido ed efficiente.
I modelli di ordine ridotto basati sull'intelligenza artificiale, diversamente da quelli utilizzati nel caso precedente, non necessitano di un'interpretazione fisica

esplicita ma si basano su metodi statistici e matematici per apprendere le relazioni tra variabili di input e output utilizzando diverse tipologie di dati come quelli storici, provenienti da simulazioni (come in questo caso) o rilevati in tempo reale tramite sensori. In generale, le relazioni input-output possono essere di natura:

- statica: input e output sono legati da una funzione lineare o non lineare che mappa i due dataset;
- dinamica: input e output sono legati da una funzione più complessa, che prende in considerazione termini inerziali. Pertanto, rispetto al caso precedente, il tempo costruisce una variabile intrinseca del sistema.

Nel caso sviluppato, il ROM è stato ottenuto come modello statico a partire dai dati di input-output raccolti dal Design of Experiment del modello ad alta fedeltà in cui sono stati fatti variare i valori delle variabili di input (all'interno del rispettivo range di oscillazione) ed è stato misurato l'output di interesse, ossia le temperature nei 13 banchi, sia in condizioni estive che in condizioni invernali. Di seguito, viene descritto più nel dettaglio il processo seguito e il funzionamento della rete neurale, facendo riferimento ai parametri che sono stati utilizzati per la creazione del modello 1D tramite il software romAI. In una seconda parte, verrà anche fornito l'esempio di un codice python tramite cui, sfruttando la libreria Tensorflow, è stato possibile costruire una rete neurale partendo dal medesimo dataset. Il codice è stato sviluppato per poter costruire la rete e svolgere le simulazioni senza essere vincolati a un software commerciale. Inoltre, nel caso del programma romAI, essendo un software commerciale, non è possibile recuperare le informazioni di dettaglio sul metodo utilizzato per l'addestramento della rete.
La scelta di ripetere l'applicazione alla singola aula anche in questo caso è stata guidata da diverse ragioni. In primo luogo, la disponibilità di dati derivanti da simulazioni 3D preesistenti è stata una risorsa fondamentale sia per fornire un dataset adeguato all'addestramento della rete, sia per consentire il confronto diretto e la validazione dei risultati con quelli ottenuti dalle simulazioni con modelli ad alta fedeltà. Inoltre, trattandosi di una prima applicazione, l'analisi di

un caso semplificato come una singola aula ha permesso di esaminare i risultati in modo più agevole rispetto al caso più complesso dell'intero edificio, riducendo la complessità e migliorando la comprensione dei fenomeni analizzati. Questo approccio rappresenta un passo preliminare fondamentale, specialmente nell'ambito delle costruzioni, un'applicazione ancora relativamente nuova per le tecniche di ottimizzazione multidisciplinare. L'applicazione di prova descritta in questo lavoro mira a dimostrare il potenziale dei modelli di ordine ridotto basati sui dati come strumento di supporto per il processo MDO, analizzando in particolare la velocità di esecuzione delle simulazioni e la possibilità di estendere questo approccio a sistemi più complessi. In questo contesto, il modello semplificato della singola stanza si pone come un test per esplorare l'efficacia dei ROM, ponendo le basi per applicazioni future su scala edilizia completa.

Il processo seguito per l'applicazione delle simulazioni id ottimizzazione tramite modello di ordine ridotto basato sui dati riprende le quattro fasi principali descritte dalla Figura 73 nel paragrafo 5.3.2: raccolta e preparazione dei dati, generazione dei dati, generazione del modello di ordine ridotto attraverso l'intelligenza artificiale e ottimizzazione. Il flusso di lavoro viene descritto più nel dettaglio nella Figura 93.

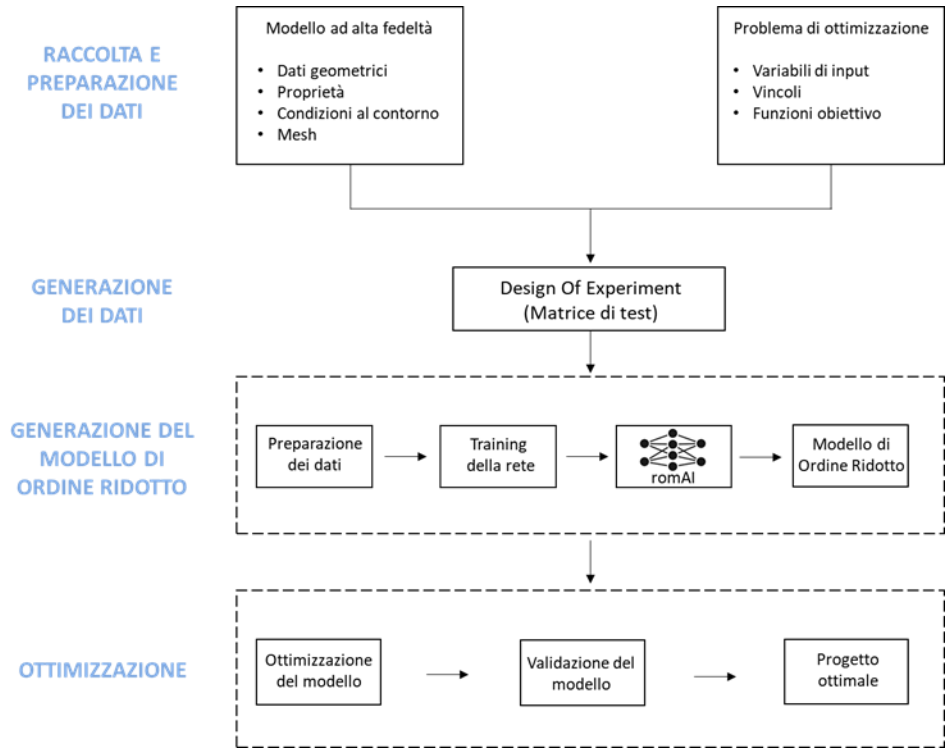


Figura 93 - Workflow operativo del modello di ordine ridotto basato sui dati.

La raccolta e la preparazione dei dati sono già state effettuate nella parte iniziale della simulazione MDO eseguita con il modello ad alta fedeltà. In questa fase viene definito un modello tridimensionale comprensivo delle sue proprietà fisiche e delle condizioni al contorno e viene formulato un problema di ottimizzazione specifico per il caso di studio specifico. Riprendendo l'esempio del caso tridimensionale, per il miglioramento energetico dell'aula sono stati scelti due interventi di retrofit: il cappotto termico esterno con pannelli in EPS e l'installazione di un impianto di condizionamento. L'obiettivo è quello di ottimizzare simultaneamente le prestazioni fluidodinamiche, termiche e di comfort. Le variabili, i vincoli e la funzione obiettivo rimangono quindi gli stessi definiti nel paragrafo 6.1.

Nella seconda fase, viene condotto un Design of Experiment per valutare le tendenze delle prestazioni in tutta l'area di progettazione. L'output, che consiste in una matrice di test che contiene le combinazioni di valori delle variabili

generate durante le iterazioni, costituisce l'insieme dei dati utilizzati per creare il modello di ordine ridotto.

Questa matrice viene quindi importata nel software Altair romAI in cui la rete neurale viene addestrata per acquisire le conoscenze necessarie a risolvere il problema. Gli input, gli output e i parametri di addestramento sono definiti durante la fase di pre-elaborazione dei dati: le variabili del problema di ottimizzazione sono gli input, mentre la temperatura intorno ai banchi di scuola è impostata come output. Il tipo di relazione tra questi ha determinato la scelta di un modello non lineare. Successivamente è stato deciso di costruire una rete neurale per ognuno dei 26 output d'interesse: per quanto riguarda i parametri delle reti, la configurazione degli strati nascosti e del numero di neuroni per strato è stata determinata attraverso un metodo automatizzato (*AutoExploration* in romAI). È stata cioè effettuata un'ottimizzazione per ogni rete variando sia la profondità che il suo spessore per ottenere l'architettura che possa fornire la migliore accuratezza. In particolare, il programma esplora tutte le possibili combinazioni entro un intervallo scelto: in questo caso il numero di strati nascosti è stato fatto variare da un minimo di 2 a un massimo di 4, con incrementi di 1, mentre il numero di neuroni per ciascuno strato spazia da un minimo di 20 a un massimo di 100, con incrementi di 10. Questo processo consente di verificare in modo sistematico e automatizzato diverse configurazioni della rete, analizzandone le prestazioni su ciascuna combinazione al fine di individuare la struttura ottimale per il caso specifico. Tale metodologia garantisce un bilanciamento tra flessibilità e accuratezza, evitando di dover selezionare manualmente i parametri e massimizzando le possibilità di ottenere una rete ben addestrata. È stata poi scelta la funzione di attivazione ReLu (unità lineare rettificata):

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ x, & x \geq 0 \end{cases} \qquad (19)$$

Inoltre, il dataset costituito da 600 campioni (coppia di valori input/output) è stato separato in due parti: il 90% è stato utilizzato per l'addestramento (training) e il restante 10% per realizzare il test. Infatti, per valutare la capacità di predire correttamente i dati di output non analizzati durante il processo di

addestramento, il dataset a disposizione viene generalmente suddiviso in diverse percentuali. Questa suddivisione permette di verificare la rete su un set di input non ancora analizzati dalla rete stessa, fornendo così una stima accurata della sua capacità predittiva: i campioni del dataset utilizzato per i test di verifica, infatti, vengono selezionati casualmente dal dataset completo. Infine, è stato fissato a 1500 il numero di epoche, ossia il numero di aggiornamenti dei coefficienti a_{ji} e b_j di ogni strato.

Dopo l'addestramento delle reti neurali, per verificarne la precisione e le capacità predittive viene utilizzato il valore del coefficiente di determinazione (R^2) che è definito come:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y}_i)^2} \qquad (20)$$

Dove $\hat{y}_i$, y_i e $\bar{y}_i$ rappresentano rispettivamente la risposta prevista (valore atteso), la risposta reale (valore osservato) e la media. Più il valore di R^2 è vicino a 1, migliore è la generalizzazione del modello. Come descritto precedentemente, per ogni output di interesse sono state generate più reti neurali ognuna caratterizzata da una diversa combinazione di strati nascosti e di neuroni per strato. Questo approccio ha consentito di esplorare un ampio numero di configurazioni per individuare quella più adatta a rappresentare le relazioni input/output specifiche di ciascun caso. Al termine di questa fase, per ogni output (cioè la temperatura sulla superficie di ogni banco), è stata selezionata la rete neurale che ha dimostrato le migliori prestazioni in termini di accuratezza predittiva, garantendo così una rappresentazione ottimale del comportamento del sistema analizzato. Ad esempio, la Figura 94 mostra il grafico dell'accuratezza relativo alla rete neurale con 4 strati e 90 neuroni del quinto banco nel caso estivo. I target del dataset originale sono sull'asse delle ascisse e i valori di previsione del modello romAI addestrato sono rappresentati sull'asse delle ordinate.

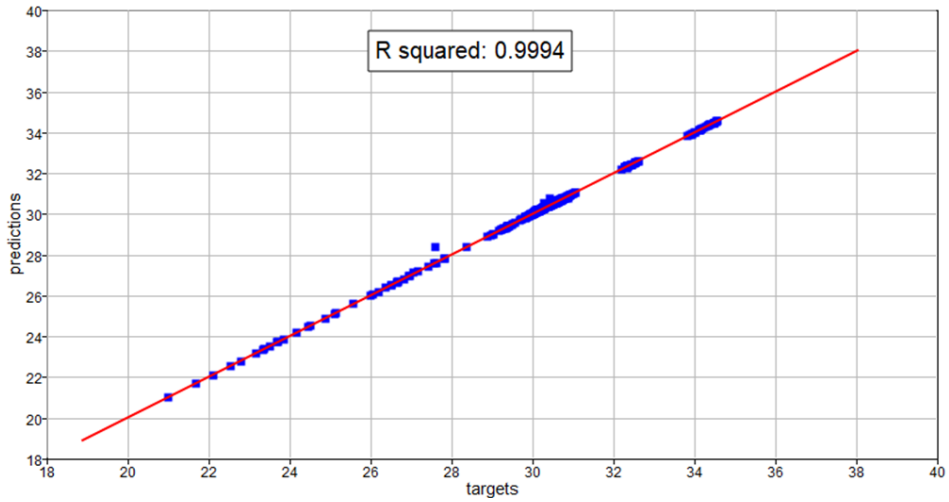


Figura 94 - Diagramma di verifica dell'accuratezza della rete neurale relativa alla temperatura del banco 5 nel caso estivo.

Invece, per quanto riguarda il banco 6 nelle condizioni invernali, il valore di accuratezza più elevato (illustrato in Figura 95) è stato ottenuto dalla rete neurale composta da 3 strati nascosti e 80 neuroni per strato.

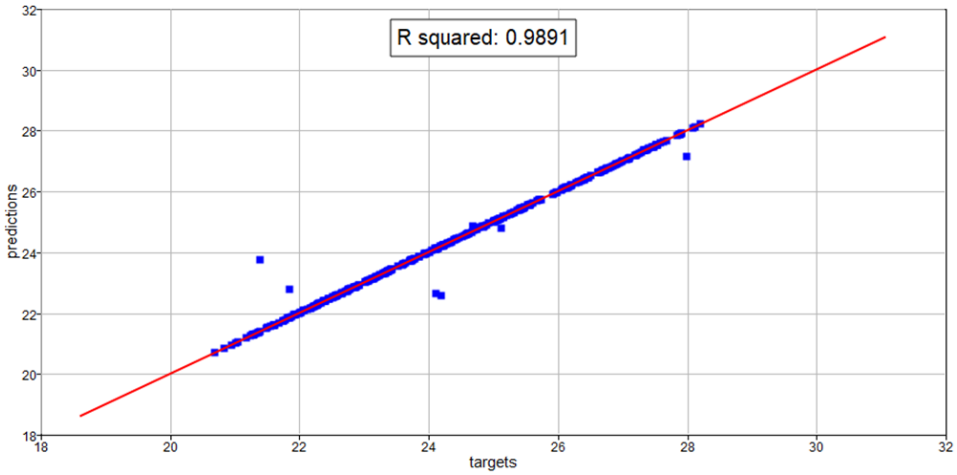


Figura 95 - Diagramma di verifica dell'accuratezza della rete neurale relativa alla temperatura del banco 6 nel caso invernale.

In entrambi i casi la rete risulta affidabile perché ha un comportamento diagonale e quindi un elevato valore di R^2 (0,9994 per il banco 5 nel caso estivo e 0,9891 per il banco 6 nel caso invernale). Nell'Appendice C – Reti neurali viene

riportata per ogni output la rete neurale ottimale con le combinazioni degli strati nascosti e dei neuroni, il relativo valore di accuratezza e il grafico esplicativo.
Una volta addestrata la rete neurale, viene generato il ROM attraverso l'ambiente di modellazione di sistema Altair Activate come mostrato nella Figura 96.

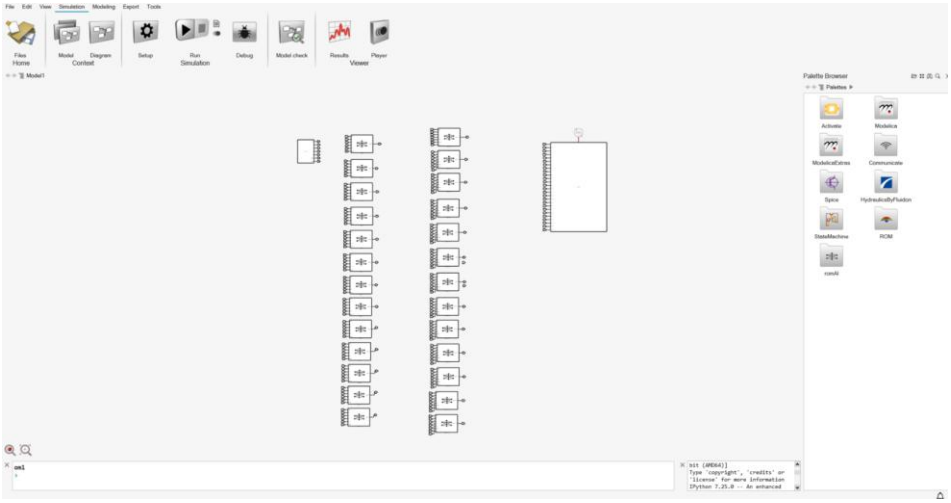


Figura 96 – Rappresentazione del modello di ordine ridotto sviluppato nel software Altair Twin Activate.

Più nel dettaglio, il modello è strutturato in tre parti: acquisizione dei dati di input, calcolo predittivo ed esportazione dei risultati. Nella prima fase di acquisizione dei dati illustrata nella Figura 97, il modello si occupa della lettura e del caricamento delle variabili di input necessarie per l'elaborazione: un blocco *FromCSV* legge i dati di input da un file .csv in cui la prima riga contiene i nomi delle variabili. All'interno del processo di ottimizzazione multidisciplinare MDO questo file corrisponde alla matrice di test generata automaticamanete dal Design of Experiment che raccoglie le combinazioni di variabili. Il valore di ciascuna variabile viene letto e trasferito al modello 1D attraverso i rispettivi blocchi *SetSignal*.

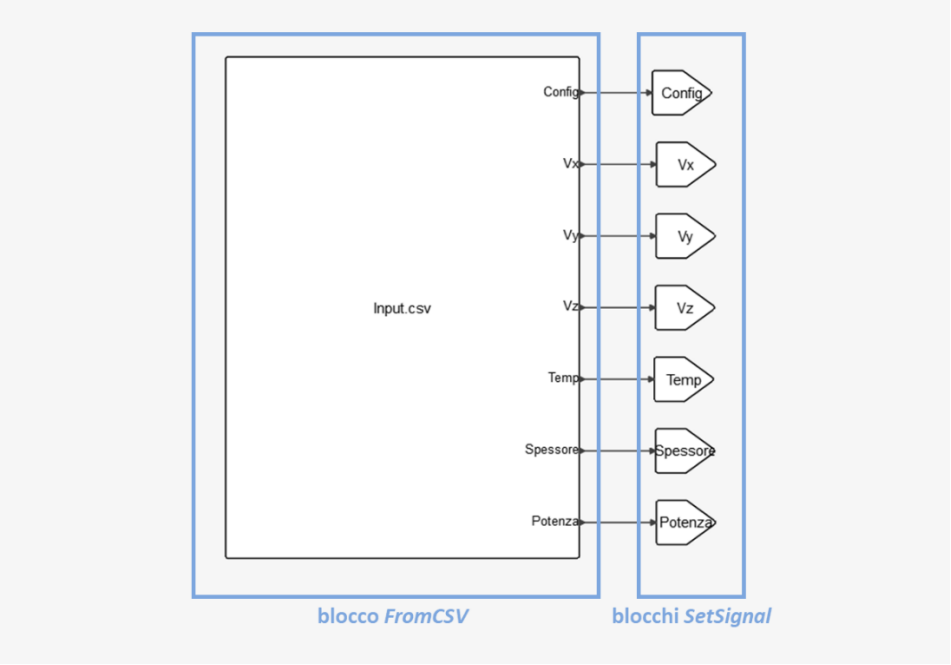


Figura 97 - Dettaglio della fase di acquisizione dei dati di input.

La parte centrale (Figura 98), dedicata al calcolo predittivo, è progettata per gestire il processo di elaborazione delle variabili. I blocchi *GetSignal* acquisiscono i valori delle variabili di input dai corrispondenti blocchi *SetSignal* e li trasmettono ai blocchi *romAI*, consentendo così di connettere le porte di uscita e di entrata rispettivamente dei blocchi *FromCSV* e *romAI* senza un collegamento diretto. Ogni blocco *romAI* rappresenta un banco nel caso estivo o invernale e a ognuno di essi è associata la rispettiva rete neurale con la combinazione più accurata di neuroni e strati nascosti scelta per garantire prestazioni ottimali in presenza di dati non visti. Le reti predicono il valore della temperatura nell'intorno del banco corrispondente, i cui risultati vengono poi raccolti dai blocchi *SetSignal* per essere trasferiti alla fase successiva.

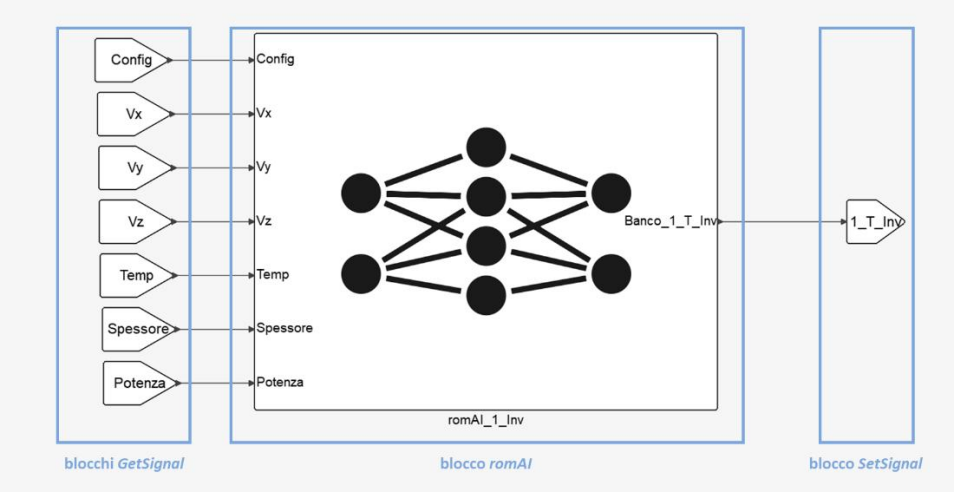


Figura 98 - Dettaglio della fase di calcolo predittivo per il banco 1 nella condizione invernale.

Nella parte di esportazione dei risultati, mostrata in Figura 99, i valori di output generati dai blocchi romAI vengono acquisiti tramite blocchi *GetSignal* e organizzati in un unico file .csv. Questo, creato automaticamente grazie al blocco *ToCSV*, contiene le temperature previste per ogni banco, rendendo i risultati facilmente accessibili per le ulteriori analisi.

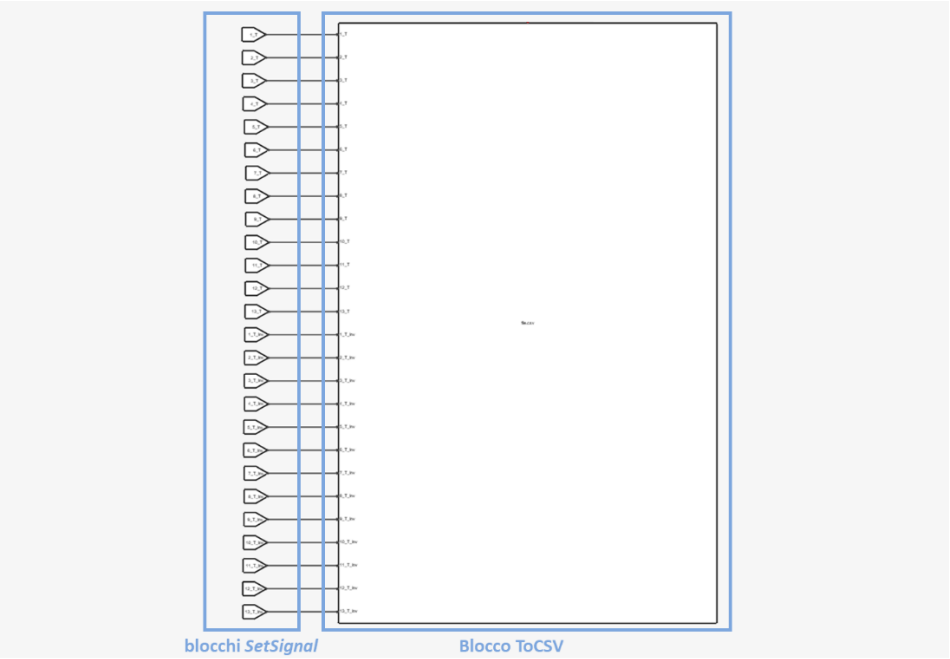


Figura 99 - Dettaglio della fase di esportazione dei risultati.

Infine, durante l'ultima fase del workflow in Figura 93, si svolge lo stesso processo di ottimizzazione già realizzato attraverso il modello ad alta fedeltà con lo scopo di trovare i valori delle variabili che minimizzano gli obiettivi stabiliti e rispettano i vincoli imposti. Lo strumento Hyperstudy, che orchestra l'intero processo, genera combinazioni di valori variabili che vengono utilizzate come input dal modello 1D. Pertanto, in questo caso, invece del solutore CFD Altair AcuSolve, le simulazioni di ottimizzazione vengono eseguite tramite il software Altair Twin Activate con il modello di ordine ridotto. In entrambe le applicazioni l'algoritmo di ottimizzazione utilizzato è il GRSM (Global Response Search Method) [223].
Al termine del processo, l'ottimizzazione eseguita con il modello di ordine ridotto guidato dai dati ha trovato una soluzione che minimizza la funzione. La Tabella 9 mostra i valori delle variabili del punto ottimale individuato.

Variabili	Valori	Unità di misura
Configurazione	0	
Vx	0.0025	m/s
Vy	-0.348	m/s
Vz	-0.783	m/s
Temperatura	295.493	K
Spessore	0.100	m
Potenza termica	1949.311	W

Tabella 9 - Valori della variabili nel punto di ottimo.

Successivamente è stata eseguita una simulazione utilizzando gli stessi valori delle variabili associati al punto ottimale identificato attraverso il modello di ordine ridotto ma con il modello ad alta fedeltà. Ciò permette di confrontare i risultati e validare il modello basato sui dati, verificandone l'affidabilità e la precisione. I risultati ottenuti con il modello di ordine ridotto, in particolare con romAI, sono comparabili a quelli calcolati con il solutore CFD Altair Activate, basato sul modello tridimensionale.
La Figura 100 mostra le relazioni tra i valori di output del punto ottimale ottenuti con romAI (in arancione) e con la simulazione ad alta fedeltà (in blu). L'errore più significativo tra i valori di temperatura è di 1,2 gradi, che equivale a un errore percentuale del 5%. Il principale vantaggio di questo approccio risiede nella drastica riduzione dei tempi di esecuzione della simulazione. In particolare, la simulazione con il modello di ordine ridotto ha richiesto circa 20 minuti con una

CPU con 8 core, mentre la simulazione con il modello ad alta fedeltà ha impiegato circa 20 giorni con una workstation con 32 core. Questo risultato evidenzia l'efficienza computazionale del modello 1D basato sui dati, che lo rende particolarmente adatto per applicazioni iterative e ottimizzazioni complesse.

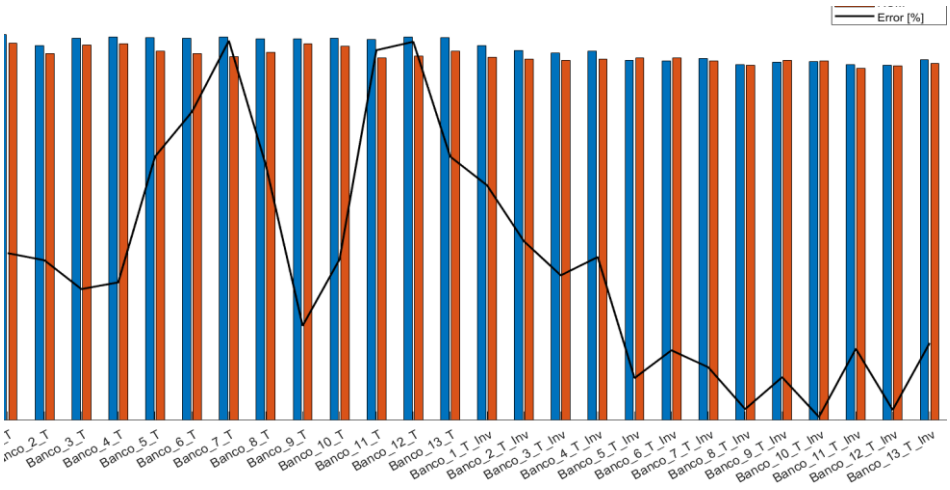


Figura 100 - Confronto tra le temperature ottenute dal modello ad alta fedeltà e quelle del modello di ordine ridotto

Inoltre, è fondamentale notare che le temperature dei banchi scolastici rientrano nell'intervallo necessario a garantire il comfort: gli istogrammi riportati in Figura 101 confermano il rispetto del vincolo assegnato sulla superficie superiore dei banchi scolastici sia nel caso estivo che in quello invernale.

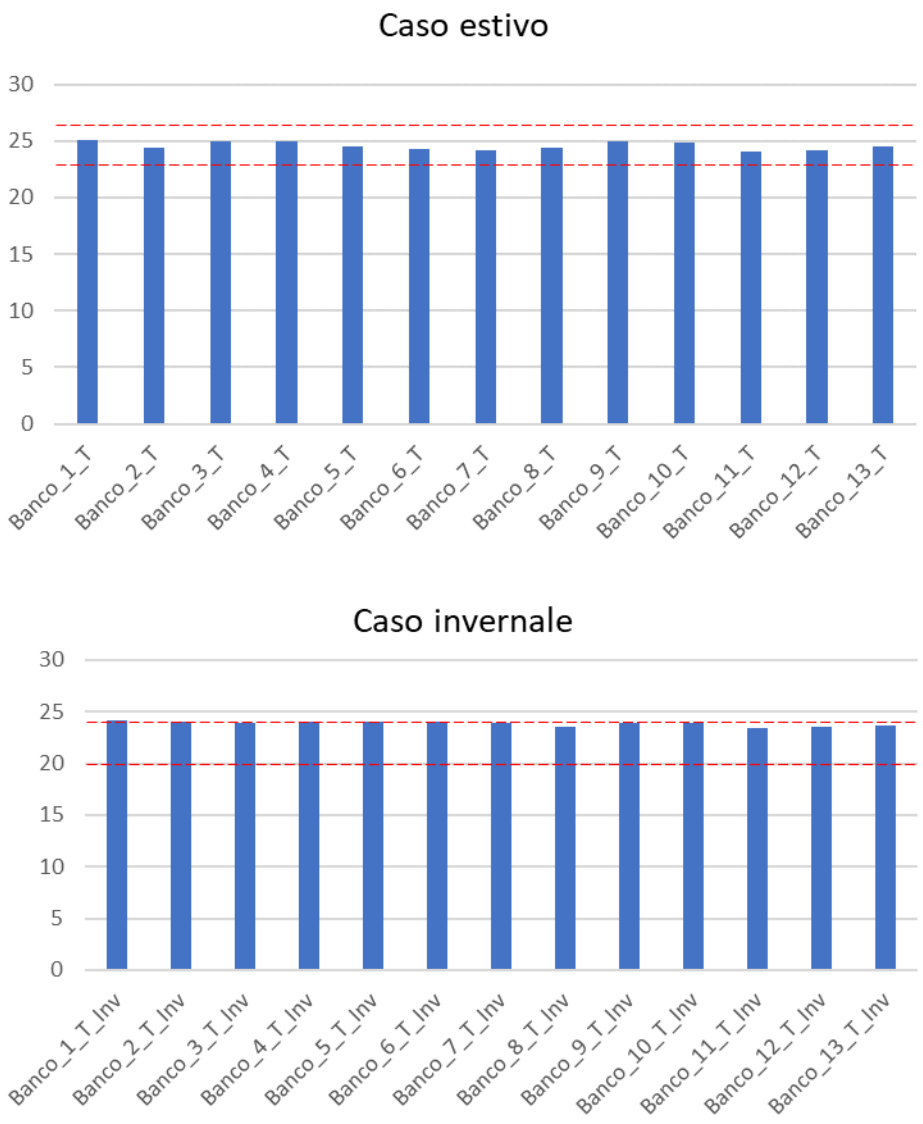


Figura 101 - Rappresentazione grafica della verifica dei vincoli per le condizioni estive e invernali.

Questo caso di applicativo è un esempio iniziale nel settore AEC per poter studiare facilmente come i modelli di ordine ridotto basati sull'intelligenza artificiale possano accelerare significativamente il processo di ottimizzazione multidisciplinare, riducendo in modo sostanziale le risorse computazionali necessarie. I risultati ottenuti dimostrano l'efficacia del metodo e i suoi vantaggi nel processo di simulazione analizzato, come per esempio i tempi di calcolo notevolmente ridotti ai modelli ad alta fedeltà, pur mantenendo un livello di

accuratezza soddisfacente. Questo approccio rappresenta un progresso importante verso la possibilità di adottare le simulazioni MDO nell'intero processo di progettazione edilizia. Oltre a evidenziare i benefici, il caso applicativo offre anche l'opportunità di costruire un quadro metodologico e operativo che faciliti l'estensione delle simulazioni MDO all'intero edificio e a più discipline, come per esempio quella strutturale.

Tuttavia, sebbene la metodologia proposta offra un notevole vantaggio dal punto di vista computazionale, la tecnologia ROM valutata si limita alla stima della relazione statica tra le variabili di progetto e le risposte senza considerare le dipendenze temporali. L'introduzione di modelli di ordine ridotto dinamici rappresenterebbe un ulteriore miglioramento poiché consentirebbe di eseguire il monitoraggio della salute di un sistema o di un sottosistema specifico e di catturare qualsiasi fenomeno rilevante durante il processo di progettazione. Per esempio, fornendo le variabili di stato del sistema (come la temperatura nodale) insieme alle risposte in output (anche esse relative alla temperatura nodale), il software romAI offre la possibilità di generalizzare il comportamento del sistema in diverse condizioni operative, come la variazione della temperatura esterna o del flusso dell'aria condizionata. L'adozione di modelli di ordine ridotto dinamici potrebbe avere un impatto rilevante sul processo di progettazione, favorendo sia le simulazioni di ottimizzazione che la manutenzione predittiva dei sistemi analizzati. Infatti, studi futuri potrebbero per esempio integrare modelli di ordine ridotto guidati dai dati per sviluppare gemelli digitali per esempio di sistemi HVAC, consentendo il monitoraggio in tempo reale delle prestazioni e ottimizzando la gestione energetica in condizioni operative reali.

6.2.3. ROM basato sui dati mediante un codice Python

Per il processo di ottimizzazione multidisciplinare tramite modelli di ordine ridotto basati sui dati, è stato anche sviluppato un programma in Python che permette la creazione di una rete neurale senza essere vincolati all'utilizzo di software commerciali. Di seguito viene descritto il codice affinché possa essere facilmente utilizzato.

I requisiti affinché questo sia replicabile sono:

- Installazione della libreria Tensorflow 2.10.0
- Installazione della libreria numpy
- Installazione della libreria sklearn
- Installazione della libreria matplotlib
- Installazione della libreria pandas

Nel caso queste non fossero installate o disponibili, è possibile procedere nella seguente maniera:

- Aprire il prompt Anaconda
- Scrivere il comando: " pip install *nome_libreria* "

Il codice sviluppato si compone di quattro parti che verranno successivamente descritte nel dettaglio: nella prima viene effettuato il caricamento dei campioni attraverso un file .*csv* e viene applicata la normalizzazione. Quest'ultima, pur non essendo necessaria, è raccomandata; infatti, avere dati che siano nel medesimo range permette alla rete di convergere più facilmente e velocemente alla soluzione finale in quanto i gradienti $\frac{\partial F}{\partial a_{ji}}$ e $\frac{\partial F}{\partial b_j}$ avranno ugual ordine di grandezza. Nella seconda parte viene costruita la rete e scelto l'algoritmo, nella terza avviene il training, mentre nell'ultima vengono visualizzati i risultati *Target-Prediction*.

Come mostrato nella Figura 102, nelle prime righe del codice (da riga 8 a riga 17) vengono richiamate le librerie Python, mentre dalla riga 21 alla riga 26 viene importato il file .csv contente i dati di input e output, definita la matrice (array) di input e quella di output. In questo caso, a differenza dell'approccio con romAI, il vettore output contiene tutti gli output di interesse, potendo quindi realizzare un'unica rete che riesca a predire le 26 temperature di interesse. Successivamente, viene realizzata la normalizzazione sulla matrice di input (righe 34-35) e sulla matrice di output (righe 39-40). In questo caso la normalizzazione è ottenuta tramite la funzione *StandardScaler*, perciò il valore normalizzato ($\hat{x}$) si ottiene con la seguente formula:

$$\hat{x} = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \qquad (21)$$

Dove μ_x rappresenta la media dei valori *x* e σ_x rappresenta la sua deviazione standard.

```
8   import pandas as pd
9   import numpy as np
10  from tensorflow import keras
11  import tensorflow as tf
12  from sklearn.model_selection import train_test_split
13  from tensorflow.keras.optimizers import Adam
14  from sklearn.preprocessing import StandardScaler
15  import matplotlib.pyplot as plt
16  from tensorflow.keras import backend as K
17  from tensorflow.keras.callbacks import EarlyStopping
18
19
20  # Caricamento del file Excel
21  file_path = 'C:/Users/damicofe/Desktop/AcuSolve/DOE-6.csv'
22  df = pd.read_csv(file_path)
23
24  # Estraggo le colonne a cui sono interessato e lo trasformo in una matrice (array). Genero la variabile input e output
25  input_data = df[['Config','Vx','Vy','Vz','Temp','Spessore','Potenza']].to_numpy()
26  output_data = df[['Banco_1_T','Banco_2_T','Banco_3_T','Banco_4_T','Banco_5_T','Banco_6_T',
27                    'Banco_7_T','Banco_8_T','Banco_9_T','Banco_10_T','Banco_11_T','Banco_12_T','Banco_13_T',
28                    'Banco_1_T_Inv','Banco_2_T_Inv','Banco_3_T_Inv','Banco_4_T_Inv','Banco_5_T_Inv',
29                    'Banco_6_T_Inv','Banco_7_T_Inv','Banco_8_T_Inv','Banco_9_T_Inv','Banco_10_T_Inv','Banco_11_T_Inv',
30                    'Banco_12_T_Inv','Banco_13_T_Inv']].to_numpy()
31
32
33  # Applico la normalizzazione ai dati di input
34  scaler_input = StandardScaler()
35  X_scaled = scaler_input.fit_transform(input_data)
36
37
38  # Applico la normalizzazione ai dati di output
39  scaler_output = StandardScaler()
40  y_scaled = scaler_output.fit_transform(output_data)
41
```

Figura 102 – Schermata della prima parte del codice Python.

Nella seconda parte del codice (righe da 45 a 50 mostrate nella Figura 103), viene definita l'architettura della rete come una serie di strati, ciascuno costituito da 64 neuroni, il cui output è determinato dalla funzione di attivazione ReLu, la stessa utilizzata nell'applicazione con il software commerciale. Il numero degli input della rete è definito dal numero di colonne della matrice "*X_scaled*" (tramite la definizione di *input_dim* a riga 46), mentre il numero degli output dal numero di colonne della matrice "*y_scaled*" (ossia il numero di uscite dell'ultimo strato della rete, definito a riga 50). In questo caso è stato utilizzato l'algoritmo di ottimizzazione Adams definito come "un metodo per un'ottimizzazione stocastica efficiente che richiede solo gradienti del primo ordine con bassi requisiti di memoria" [224], il cui nome deriva da "ADAptive Moment estimation". Esso considera:

1) Una media ponderata esponenziale dei gradienti nelle ultime n epoche precedenti:

$$m_t = \beta_1 m_{t-1} + (1 - \beta_1) * \frac{\partial F}{\partial a_{t-1}} \qquad (22)$$

$$a_t = a_{t-1} - \alpha m_t \tag{23}$$

Dove m_t è la media ponderata all'epoca t per il calcolo dei nuovi parametri a_t, β_1 è un iper-parametro che controlla la media ponderata, $\frac{\partial F}{\partial a_{t-1}}$ è il gradiente della funzione errore rispetto ai parametri all'epoca a_{t-1}, α è il learning rate.

2) Una media ponderata esponenziale dei quadrati dei gradienti nelle ultime n epoche precedenti:

$$v_t = \beta_2 m_{t-1} + (1 - \beta_2) * (\frac{\partial F}{\partial a_{t-1}})^2 \tag{24}$$

$$a_t = a_{t-1} - \alpha \frac{\frac{\partial F}{\partial a_{t-1}}}{\sqrt{v_t + \epsilon}} \tag{25}$$

La combinazione dei due approcci porta a:

$$a_t = a_{t-1} - \alpha \frac{m_t}{\sqrt{v_t + \epsilon}} \tag{26}$$

Dove α, β_1 e β_2 sono gli iper-parametri dell'algoritmo. In questo caso, si è scelto $\beta_1 = 0.9$ e $\beta_2 = 0.99$ (valori di default) e $\alpha = 0.001$.
Infine, viene riportata la funzione da dover minimizzare, ossia lo scarto quadratico medio, calcolato tra le variabili vere (*y_true*) e quelle predette (*y_pred*).

```
# Genero la rete utilizzando Tensorflow. Uso 4 layer da 64 neuroni. Prende in input 7 variabili (X_scaled.shape[1])
# e produce 26 output (y_scaled.shape[1]). Utilizzo la funzione attivazione relu
model_1 = keras.Sequential([
    keras.layers.Dense(64, activation='relu', input_dim=X_scaled.shape[1]),
    keras.layers.Dense(64, activation='relu'),
    keras.layers.Dense(64, activation='relu'),
    keras.layers.Dense(64, activation='relu'),
    keras.layers.Dense(y_scaled.shape[1])
])


# Utilizzo come algoritmo di ottimizzazione Adams con un leraning rate di 10^-3
optm = tf.keras.optimizers.Adam(learning_rate=0.001)

# Definisco una funzione custom che riceve in input i valori reali (y_true) e quelli predetti (y_pred).
# Calcolo l'errore sfruttando lo scarto quadratico medio
def custom_mean_squared(y_true,y_pred):

    err = tf.reduce_mean(tf.square(y_true-y_pred))

    return err

```

Figura 103 - Schermata della seconda parte del codice Python.

La Figura 104 mostra la terza parte del codice in cui viene eseguito il training. Dopo aver fissato il numero di epoche (3000, riga 69) e l'aggiornamento dei pesi (coefficienti a_{ij}), il training dei dati avviene tramite un ciclo *for.* In questo modo una determinata porzione di codice può essere eseguita per un numero definito di volte; tramite la funzione *range* vengono stabilite il numero di iterazioni (epoche) che verranno eseguite, cioè quante volte verrà ripetuto lo stesso ciclo. A riga 74, viene effettuata la suddivisione nel dataset training e dataset test: tale operazione è casuale e considera il:

- 90% dei dati utili per il training
- 10% dei dati utili per il test

Dal momento che tale operazione è effettuata all'interno del ciclo *for*, i dataset del training e del test risulteranno sempre differenti, in quanto la loro determinazione si basa su un processo casuale. Nelle righe 76 e 78, viene elaborata la predizione all'epoca *n* a partire rispettivamente dal dataset di training e di test; vengono inoltre calcolati sia l'errore sul training (riga 80) che sul test (riga 82) e i due valori sono salvati nelle matrici *train_history* e *test_history.* A riga 88, vengono determinati i gradienti a partire dall'errore sul dataset di training rispetto ai parametri della rete (*model_1.trainable_variables*), che saranno successivamente passati all'ottimizzatore per il calcolo dei nuovi parametri di rete.

```
65  train_history = []
66  test_history = []
67
68  # Fusso il numero di epoche a 3*10^4
69  num_epochs = 30000
70  for epoch in range(num_epochs):
71      with tf.GradientTape() as tape:
72
73          #Applico lo shuffle al mio dataset, cambiando ogni epoca il campione usato per il training e test
74          X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X_scaled, y_scaled, test_size=0.1)
75          # Realizzo la predizione sui campioni training
76          y_pred = model_1(X_train)
77          # Realizzo la predizione sui campioni test
78          y_pred_test = model_1(X_test)
79          # Calcolo l'errore sui campioni del training richiamando la funzione
80          train_loss = custom_mean_squared(y_train,y_pred)
81          # Calcolo l'errore sui campioni del test richiamando la funzione
82          test_loss = custom_mean_squared(y_test,y_pred_test)
83          # Mi salvo l'errore sui campioni del training
84          train_history.append(train_loss.numpy())
85          # Mi salvo l'errore sui campioni del test
86          test_history.append(test_loss.numpy())
87          # Calcolo il gradiente dell'errore rispetto alle variabili della rete
88          grad_w = tape.gradient(train_loss, model_1.trainable_variables)
89          # Utilizzo i gradienti per aggiornare il valore delle variabili della rete, sfruttando l'algoritmo di aggiornamento Adams
90          optm.apply_gradients(zip(grad_w, model_1.trainable_variables))
91
92          print(f'Epoch [{epoch + 1}/{num_epochs}], Train Loss: {train_loss.numpy()}, Test Loss: {test_loss.numpy()}')
93
```

Figura 104 - Schermata della terza parte del codice Python.

L'ultima parte del codice mostrata in Figura 105 è dedicata alla rappresentazione dei grafici dello scarto quadratico medio e della relazione *valore target – predizione* con lo scopo di per poter visualizzare e analizzare i risultati.

```
predictions_1 = model_1.predict(X_scaled)
plt.figure()
plt.plot(np.log10(train_history),label='Training')
plt.plot(np.log10(train_history),label='Validation')
plt.title('Loss function')
plt.xlabel('Epoch')
plt.legend()
plt.ylabel('Log10(Loss)')
plt.grid(True)
plt.show()

for jj in range(y_scaled.shape[1]):
    plt.figure()
    plt.plot(y_scaled[:,jj:jj+1],predictions_1[:,jj:jj+1],label='Training',marker='o',linestyle='None')
    plt.title('R^2')
    plt.xlabel('Target')
    plt.legend()
    plt.ylabel('Predictions')
    plt.grid(True)
    plt.show()

```

Figura 105 - Schermata della quarta parte del codice Python.

In particolare l'andamento su scala logaritmica dello scarto quadratico medio (Figura 106) sia sul dataset training che su quello test fornisce informazioni sull'ordine di grandezza della funzione di perdita. In questo caso il grafico mostra che la curva dei valori predetti (linea arancione) è quasi coincidente con quella dei valori del training (linea blu) e che l'errore medio tra i dati predetti e quelli veri è dell'ordine di 10^{-4}.

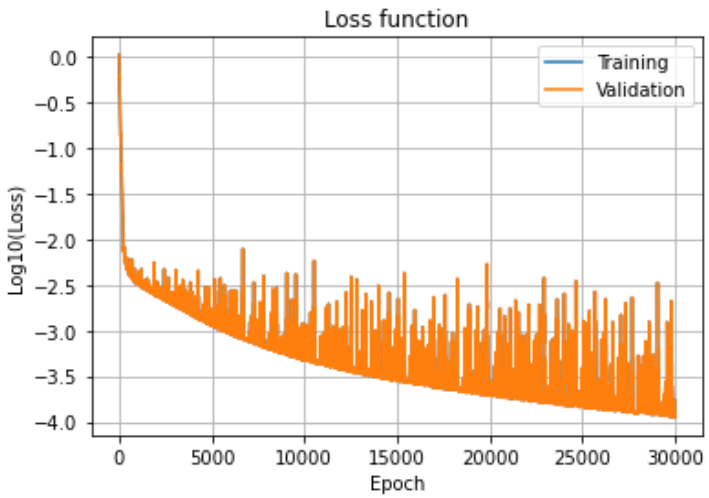


Figura 106 - Errore (Loss function) prodotta dal dataset di training (linea blu) e dal dataset di test (linea arancione).

Un altro grafico che viene rappresentato tramite il codice è la relazione *valore target – predizione* (da riga 106 a 114). Questo viene generato per ogni output (quindi in totale si avranno 26 grafici) e il suo significato è quello di fornire l'accuratezza della rete: tanto più la relazione è descritta da una retta a inclinazione unitaria, tanto più la predizione è accurata. Questa informazione viene riassunta dal coefficiente di determinazione, o R^2:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_{campioni}} (y_i - \tilde{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{N_{campioni}} (y_i - \bar{y})^2} \quad (27)$$

Dove $\tilde{y}_i$ è il valore predetto, y_i è il valore reale, $\bar{y}$ è la media del dataset utilizzato e $N_{campioni}$ è la lunghezza del dataset utilizzato. Di seguito vengono riportati i grafici *valore target – predizione* per quattro output di interesse (Figura 107): i valori del quinto e del dodicesimo banco nel caso estivo, la cui accuratezza ha un valore rispettivamente di 0,99982 e di 0,99981, del primo e dell'ottavo banco nel caso invernale la cui accuratezza ha un valore rispettivamente di 0,99998 e di 0,9994. L'ultima sezione del codice (da riga 117 a riga 128) è infatti destinata al calcolo dei valori dei coefficienti di determinazione (Figura 108). Dal momento che più il valore del coefficiente di determinazione è vicino a 1, migliore è la generalizzazione del modello, in questo caso la capacità di previsione dei risultati della rete neurale risulta affidabile.

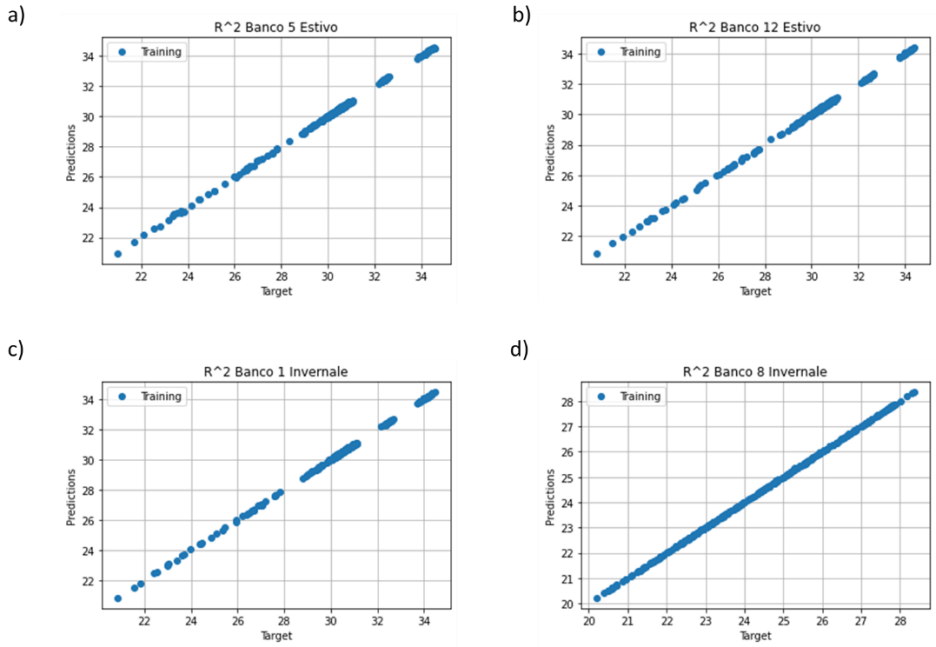


Figura 107 - Rappresentazione target-predictions ottenuto considerando l'intero dataset a) del quinto output (Banco_5_T) b) del dodicesimo output (Banco_12_T) c) del quattordicesimo output (Banco_1_T_Inv) d) del ventunesimo output (Banco_21_T_Inv).

```
# Definisco la funzione R^2. La funzione prende in input il vettore output predetto (y_pred) e quello reale (y_true)
def r_squared(y_true,y_pred):
    ss_total = np.sum(np.square(y_true - np.mean(y_true)))
    ss_residual = np.sum(np.square(y_true - y_pred))
    return 1-ss_residual/ss_total

# Definisco il vettore vuoto dove raccogliere gli R^2
r_squared_vector = []
# Si applica un ciclo for sugli output (26), richiamando la funzione "r_squared" e fornendo in input sia i valori reali che quelli predetti
for jj in range(y_scaled.shape[1]):
    r_squared_value = r_squared(y_scaled[:,jj:jj+1],predictions_1[:,jj:jj+1])
    r_squared_vector.append(r_squared_value)
```

Figura 108 - Schermata dell'ultima sezione del codice Python.

Dunque, questo codice può essere inserito nel processo di ottimizzazione multidisciplinare tramite modelli di ordine ridotto basati sui dati applicato precedentemente. In questo caso, invece di utilizzare ulteriori software commerciali, è possibile collegare il codice Python direttamente nel processo che il software PIDO[35] (*Process Integration and Design Optimization*) deve orchestrare.

[35] Hyperstudy per il caso applicativo in esame.

6.3. Risultati e discussioni

I risultati ottenuti dall'applicazione della metodologia di ottimizzazione multidisciplinare a un caso di studio semplificato tramite differenti approcci di modellazione hanno consentito di identificare i vantaggi e i limiti associati a ciascun metodo, fornendo una base comparativa utile per la valutazione delle loro prestazioni applicabili anche ad altri contesti applicativi.

In particolare, il modello tridimensionale si è rivelato altamente performante nella rappresentazione della complessità geometrica e fisica dell'aula e ha garantito un'elevata accuratezza delle simulazioni; il processo è risultato relativamente lineare nella gestione complessiva del flusso di lavoro. Allo stesso tempo, uno dei principali vantaggi offerti dalle simulazioni tridimensionali è la possibilità di visualizzare in modo dettagliato e intuitivo i risultati ottenuti: questo aspetto consente non solo di interpretare con maggiore facilità i fenomeni fisici analizzati ma, attraverso rappresentazioni grafiche come mappe di temperatura (Figura 109) o distribuzioni di pressione, è anche possibile identificare rapidamente le criticità, verificare visivamente il comportamento delle soluzioni progettuali proposte e individuazione facilmente eventuali errori o incongruenze nei modelli.

Nonostante ciò, i tempi di simulazione sono stati significativamente elevati, questo rende tale approccio poco consono all'estensione a problemi di ottimizzazione più complessi che coinvolgono più discipline e/o parti più estese dell'oggetto edilizio e limita l'utilizzo di tale metodologia in contesti che richiedono numerose e rapide iterazioni progettuali. Inoltre, l'alto costo computazionale rappresenta un ulteriore vincolo operativo per applicazioni pratiche nel settore edile.

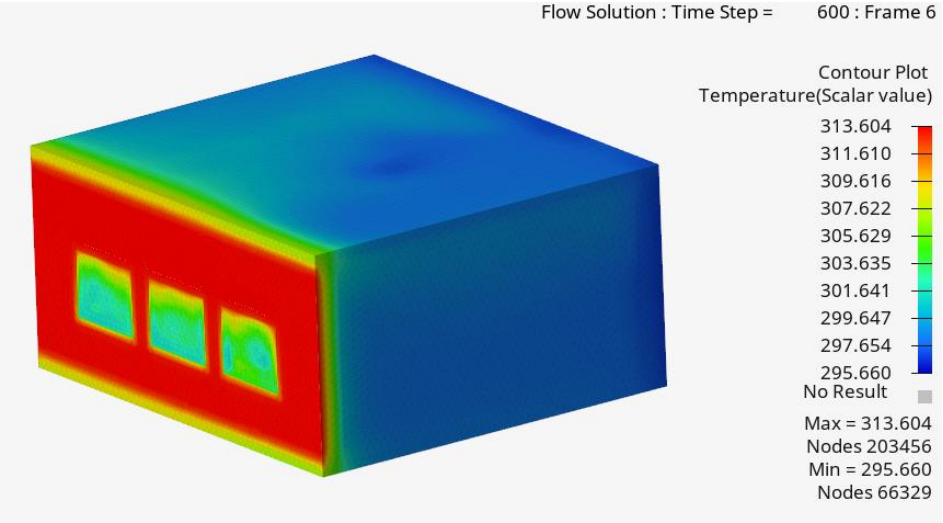


Figura 109 – Rappresentazione grafica con scala cromatica della distribuzione della temperatura dell'aula.

L'approccio monodimensionale basato sulla fisica, pur consentendo una riduzione significativa dei tempi di simulazione, presenta una complessità intrinseca nella fase di modellazione dovuta alla necessità di rappresentare dettagliatamente le leggi fisiche che governano il sistema. Questo si è tradotto in un significativo investimento in termini di tempo e risorse per la preparazione del modello, rendendo il bilancio tra complessità di implementazione e benefici non favorevole, e costituisce anche un ostacolo significativo per l'applicabilità su larga scala. Pertanto, questo approccio è stato escluso dalle strategie operative adottabili in quanto non compatibile con le esigenze di ottimizzazione multidisciplinare e con gli obiettivi del presente studio.

Gli approcci monodimensionali basati sui dati, implementati sia mediante un software commerciale sia attraverso un codice Python sviluppato ad hoc, hanno introdotto un workflow più articolato rispetto a quello seguito per le simulazioni con il modello 3D (come mostrato in Figura 110).

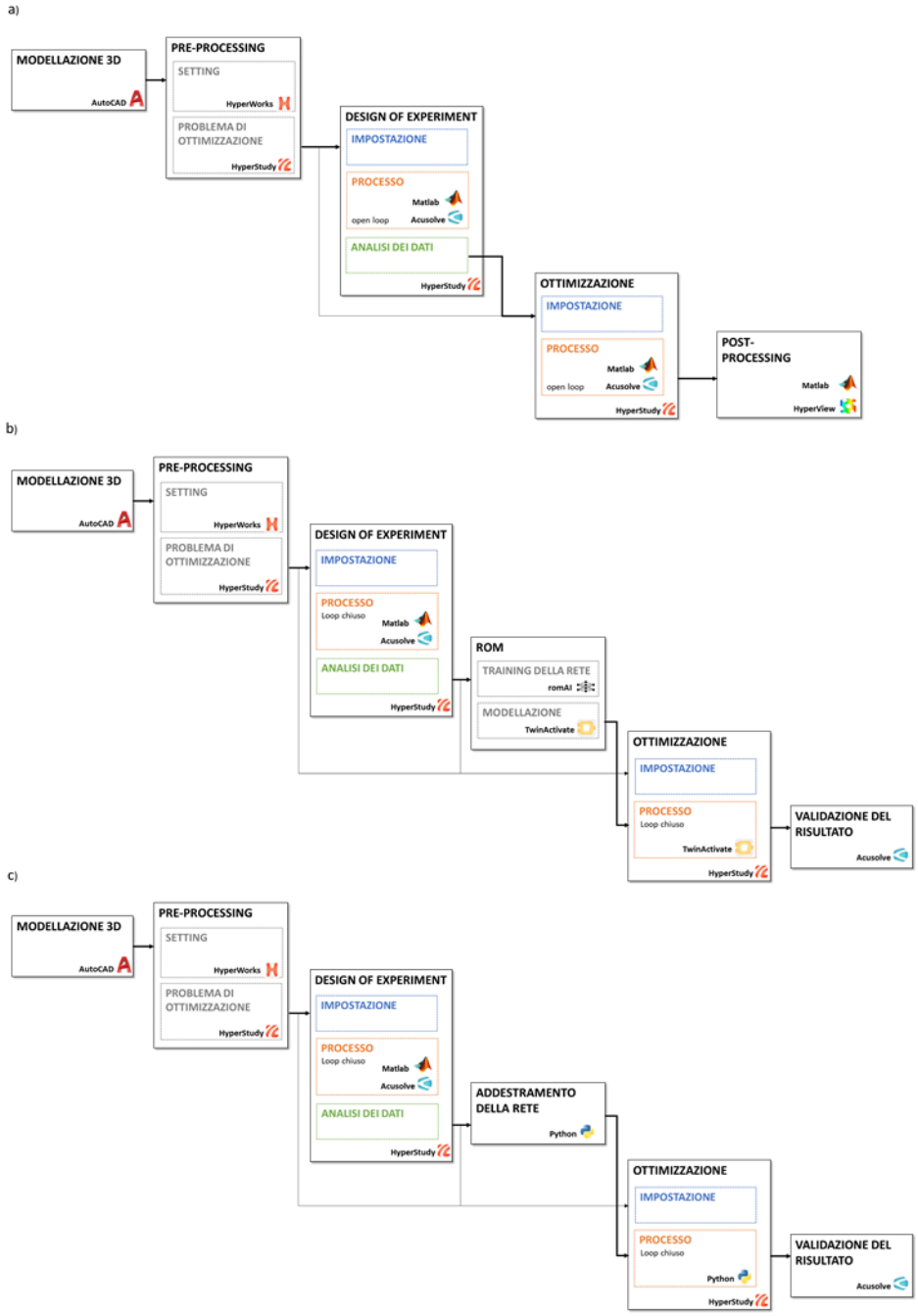


Figura 110 - Processo di modellazione multidisciplicare con a) modello tridimensionale, b) modello monodimensionale basato sui dati con software commerciale e c) modello monodimensionale basato sui dati con codice Python.

In questi casi il processo richiede una fase aggiuntiva che comprende l'addestramento della rete neurale e la costruzione del modello 1D; questa si colloca tra il Design of Experiment (DoE), che fornisce i dati necessari per il training della rete, e l'ottimizzazione vera e propria, in cui la rete neurale sostituisce il solver utilizzato per condurre le analisi con il modello ad alta fedeltà. Nonostante questa maggiore complessità, i tempi di simulazione risultano nettamente ridotti e la capacità computazionale richiesta è sensibilmente inferiore rispetto all'applicazione con il modello tridimensionale, come mostrato in Tabella 10.

Modello	Tempo	CPU
1D	20 minuti	8 core
3D	20 giorni	32 core

Tabella 10 - Confronto tra tempi di esecuzione e capacità computazionale delle simulazioni in relazione all'approccio di modellazione adottato.

L'uso del software commerciale ha garantito una rapida configurazione del modello e una gestione efficiente delle simulazioni, rendendolo particolarmente idoneo alle finalità applicative di questa ricerca. Invece il codice Python ha reso possibile l'addestramento della rete neurale anche senza il vincolo di un programma commerciale offrendo nello stesso tempo una maggiore flessibilità e opportunità di personalizzazione. Infine, l'architettura della rete neurale costituisce un altro elemento di confronto tra i due approcci: mentre con il codice Python è stata definita una struttura unica per tutti gli output, l'uso del software commerciale ha permesso di ottimizzare in modo specifico la configurazione della rete associata a ciascun output. In particolare, è stato possibile individuare per ogni banco la combinazione di strati nascosti e del numero di neuroni, selezionando quella in grado di garantire la massima accuratezza predittiva.

Un confronto tra i tre approcci risultati più vantaggiosi (modello 3D e modelli 1D basati sui dati) evidenzia come la scelta ottimale dipenda da un equilibrio tra precisione, tempi di simulazione e complessità di modellazione. Mentre il modello ad alta fedeltà rappresenta la soluzione con maggiore accuratezza dei risultati e fluidità in termini di workflow, i tempi di simulazione e i requisiti

computazionali ne limitano l'applicabilità a problemi complessi ed estesi. Al contrario, i modelli di ordine ridotto basati sui dati, pur necessitando di un dataset di input e di una fase aggiuntiva per l'addestramento della rete neurale, si caratterizzano per la loro efficienza computazionale e adattabilità a diversi contesti operativi.

Alla luce delle analisi condotte, si può concludere che l'applicazione della metodologia MDO alla progettazione di interventi integrati per il recupero di edifici esistenti rappresenta una strategia promettente e contribuisce a rendere più consapevole ed efficiente l'integrazione delle discipline. Tuttavia, la scelta del modello dipende strettamente dagli obiettivi specifici del caso di studio, dalle risorse computazionali disponibili e dai vincoli temporali del progetto. I risultati di questa fase della ricerca, derivanti dall'applicazione della metodologia di ottimizzazione multidisciplinare a uno stesso caso di studio semplificato con diverse tecniche di modellazione, offrono un riferimento utile per orientare la selezione del metodo più appropriato in contesti analoghi, in funzione delle necessità operative e progettuali. Infatti, in alcuni casi, può risultare vantaggioso utilizzare all'interno di un singolo processo MDO differenti metodologie di modellazione a seconda delle discipline coinvolte, oppure si possono impiegare modelli surrogati per le analisi preliminari, sfruttandone la rapidità, e riservare i modelli ad alta fedeltà alle fasi più avanzate o per la valutazione di elementi di dettaglio. Uno dei principali vantaggi offerti dai modelli surrogati è la possibilità di snellire le simulazioni, consentendo di applicare strategie di ottimizzazione anche nelle fasi iniziali della progettazione. Questo approccio permette di identificare le opzioni di intervento più appropriate già nelle prime fasi, con importanti benefici, come la riduzione dei costi complessivi.

7. CASO STUDIO: L'EDILIZIA SCOLASTICA A TERNI

Questo capitolo è dedicato alla parte applicativa della ricerca focalizzata sull'analisi degli edifici scolastici di Terni individuati come caso di studio generale. La scelta del Comune di Terni come oggetto di studio è stata guidata da due principali considerazioni: la varietà di tipologie costruttive presenti, che offre un ampio scenario rappresentativo delle diverse epoche e tecniche edilizie, e il campione relativamente contenuto di edifici scolastici, che ha reso possibile l'analisi e il reperimento sistematico del materiale documentale disponibile. Questi elementi consentono di costruire una base di conoscenze utile per comprendere le principali criticità e potenzialità del patrimonio scolastico esistente. Va inoltre evidenziato che sulla città di Terni non esistono studi specifici e strutturati riguardanti le scuole: le informazioni disponibili sono sparse tra documenti comunali, archivi locali e altre fonti, prive di un'organizzazione organica che ne faciliti l'accesso e la fruizione.

Dopo un'analisi approfondita dell'evoluzione dell'edilizia scolastica a Terni, svolta attraverso ricerche bibliografiche e storiche che hanno permesso di contestualizzare lo sviluppo degli edifici scolastici in relazione alle vicende sociali, economiche e urbanistiche della città, è stata condotta una valutazione della situazione attuale, circoscrivendo l'indagine alle scuole primarie. Questa seconda fase si è basata sull'esame di documenti forniti dall'amministrazione comunale, dall'Anagrafe Nazionale dell'Edilizia Scolastica e dalle banche dati regionali, al fine di raccogliere informazioni aggiornate sullo stato del patrimonio edilizio scolastico. Inoltre, all'interno del campione analizzato, è stato scelto un edificio di riferimento, individuato sulla base della tipologia costruttiva e delle condizioni attuali, su cui è stato sviluppato il progetto dell'esoscheletro. Questo edificio ha costituito il caso studio per l'elaborazione di strategie progettuali finalizzate a migliorare le prestazioni strutturali, energetiche e funzionali, adottando un approccio integrato.

7.1. Evoluzione della città e dell'edilizia scolastica

7.1.1. Il periodo preunitario

Terni nell'epoca precedente all'unificazione era un centro principalmente agricolo compreso nell'antica cerchia delle mura medievali. Nella città la formazione scolastica fino al 1860 era soprattutto di competenza degli ordini religiosi e presentava gli aspetti generali delle scuole dello Stato Pontificio. Infatti, i gesuiti gestivano l'istruzione dei giovani nel collegio di Santa Lucia fin dal 1624, anno in cui venne fondato: "l'insegnamento si estendeva dai primi rudimenti del leggere e dello scrivere, corrispondente alle attuali elementari; a quello della Grammatica, Umanità e retorica, equivalente in certo modo al Ginnasio; e alla Filosofia e Morale, corrispondenti al Liceo" [225]. Sebbene la Compagnia del Gesù fosse stata soppressa due volte, nel luglio del 1773 da parte del Pontefice Clemente XIV e nel 1826 poco dopo il Pontificato di Leone XII, le lezioni per gli alunni maschi continuavano comunque a svolgersi in quella sede. Infatti, dalla pianta della città del Catasto Gregoriano (Figura 111) emerge che la strada che delimitava il lotto in cui c'erano il Collegio e la Chiesa di S. Lucia era denominata "Via delle scuole pubbliche".

L'istruzione femminile, invece, iniziò ad affermarsi a Terni solo alla fine del Settecento per opera di tre istituzioni: le Maestre Pie, il Conservatorio Pio e il Convitto del Bambin Gesù [226]. Le prime notizie, per la precisione, si hanno con la fondazione del Convitto delle Maestre Pie del 1763, la cui opera educativa fu sottoposta a regole precise nel 1828. Dopo questa data, di tale istituzione scolastica si perdono completamente le tracce, visto che probabilmente fu assorbita dal Conservatorio Pio. Quest'ultimo venne fondato a Terni dopo che Pio VI, con un breve apostolico del 9 luglio 1788, ordinò l'istituzione di un Orfanotrofio per fanciulle in tutte le città dei suoi Stati. Inizialmente la sede sarebbe dovuta essere il vecchio Collegio dei Gesuiti con il trasferimento delle scuole pubbliche maschili in locali nuovi costruiti al posto della chiesa di S. Lucia. Questo progetto non venne però accolto favorevolmente da parte dei cittadini e quindi si decise di mantenere invariata la sede delle scuole maschili e di ospitare l'Orfanotrofio nei locali annessi alla chiesa, che in questo modo non venne demolita. Infine, il Convitto del Bambin Gesù, istituto di donne laiche che

si erano riunite con lo scopo di dedicarsi all'istruzione femminile, avviò la sua attività educativa a Terni nel 1794 in una casa privata nei pressi del Duomo. Dal momento che nel 1814 questi locali non erano idonei ad ospitare tutte le alunne, grazie al sostegno del vescovo Monsignor Benigni, le convittrici ottennero dal Pontefice Pio VII, che era di passaggio a Terni per raggiungere Roma, il permesso di poter utilizzare parte dei locali del monastero delle Clarisse di S. Caterina[36].

[36] L'edificio, che sorgeva nei pressi della Chiesa di San Cristoforo, fu gravemente danneggiato dopo i bombardamenti, per cui se ne decise l'intera demolizione e attualmente non rimane alcun resto.



Figura 111 - Catasto Gregoriano 1854.

7.1.2. Terni diventa una città industriale (1860-1920)

Durante la seconda metà dell'Ottocento, Terni vede mutare progressivamente la propria immagine: da un centro in prevalenza agricolo arriverà ad affermarsi come polo industriale. Infatti fino a quel momento la sua economia, pur differenziandosi dalle altre città della regione per la presenza di industrie tessili e di trasformazione dei prodotti agricoli e di una ferriera sorta nel 1794, si era basata principalmente sull'agricoltura. A seguito dell'annessione allo Stato Unitario, la difficile concorrenza con la realtà economica più sviluppata dell'Italia settentrionale e l'interruzione improvvisa dei rapporti economici con Roma e con il Lazio, suoi tradizionali sbocchi di mercato, provocarono un decennio di crisi economica che portò alla chiusura delle fabbriche tessili e alla perdita di importanza della ferriera.

Dopo l'unità, con la soppressione delle corporazioni religiose, i beni conventuali divennero di proprietà dell'Amministrazione comunale che dovette anche farsi carico della formazione scolastica della città. Gli spazi del complesso di Santa Lucia, che accoglievano le scuole elementari maschili, vennero destinati anche al Pubblico Liceo, che aveva il compito di impartire l'educazione secondaria inferiore e superiore, e alle scuole notturne (Figura 112) per i giovani che non potevano frequentare le lezioni regolari perché durante il giorno dovevano svolgere attività lavorative a fianco dei genitori [227]. Il Convitto di S. Caterina, invece, fu inizialmente considerato ente religioso e quindi interessato dal Decreto Pepoli dell'11 dicembre 1860 [228] ma, a seguito del ricorso della Superiora Maria Teresa Bracci, il Convitto poté sopravvivere mantenendo la gestione delle scuole elementari femminili fino al 1890.



SOCIETA TERNANA
D'INCORAGGIAMENTO
DELLE ARTI INDUSTRIE E MESTIERI

SCUOLE SERALI

Il Comitato direttivo delle scuole predette rende noto che col giorno 19 corrente alle ore 6 (sei) pom. avranno principio nei soliti locali di S. Lucia le lezioni serali per gli analfabeti adulti e per gli operai.

L'insegnamento sarà in quest'anno ripartito come segue:

Scuola di disegno ornamentale.

Scuola di disegno Geometrico applicato ai vari mestieri.

Ognuna di queste due scuole è suddivisa in due classi; la prima pei nuovi alunni che intenderanno farsi iscrivere pel nuovo anno scolastico e per quelli che, avendo frequentato i corsi degli anni precedenti, non poterono raggiungere quel grado d'istruzione che occorre per passare alla classe superiore; la seconda classe è diretta a fornire agli alunni operai, tanto nel disegno ornamentale, quanto in quello geometrico, il necessario complemento d'istruzione adattato ai vari mestieri che esercitano.

Alle due classi della scuola per gli analfabeti, che saranno aperte come nello scorso anno, verrà aggiunta una terza classe diretta a fornire agli alunni che compiranno i due primi corsi con profitto, una più completa istruzione di aritmetica e di lingua italiana.

Il giorno 2 Dicembre avrà luogo nella grand'aula del R. Istituto Tecnico la solenne distribuzione dei premi agli alunni delle scuole serali che ne furono giudicati meritevoli dalle Commissioni a ciò delegate, e la esposizione dei lavori di disegno eseguiti.

Il Comitato direttivo assicura, a nome proprio e della Società, che nulla sarà omesso da sua parte perchè le scuole continuino con ordine e con efficacia come in passato, e confida che gli alunni cercheranno di corrispondere col proprio contegno e coll'assidua frequenza, alle cure affettuose degl'insegnanti e della Società.

PEL COMITATO DIRETTIVO
IL PRESIDENTE
OTTAVIO COLETTI

Figura 112 - Manifesto per l'apertura delle Scuole Serali, 1877.

Come accadde in molte altre città, il nuovo sistema scolastico imposto dopo l'annessione al Regno d'Italia non riuscì a sanare il tasso molto alto di analfabetismo. Una delle cause principali, secondo l' "Unione liberale"[37], era l'inefficienza dell'amministrazione locale nel controllare l'evasione dall'obbligo scolastico e nel richiamare i genitori degli studenti inadempienti. Questa situazione trova conferma anche nella "Relazione sull'andamento delle scuole elementari maschili, femminili e rurali della città di Terni durante l'anno 1875-76, per Cavallero Sebastiano"[38] in cui viene pubblicato l'elevato numero di studenti che non partecipavano alle attività didattiche. Nel documento viene denunciato anche un altro problema: quello della scarsa salubrità delle aule: "nelle giornate piovose le sale della 4, delle due sezioni della 3 e delle due sezioni della 1 superiore sono così buie, che difficilmente si può leggere o scrivere." [229]. Nonostante l'evasione scolastica, molti erano gli alunni costretti a seguire le lezioni in spazi non adeguati alla funzione che dovevano ricoprire, sovraffollati e antigienici. Infatti la legge Casati del 1859, che prevedeva l'istruzione elementare gratuita e obbligatoria, delegava la gestione ai Comuni i quali, però, non sempre riuscivano ad assolvere ai loro obblighi a causa delle scarse risorse economiche. Il fattore principale che contribuiva alla formazione di classi molto numerose era il numero insufficiente di scuole di cui disponeva la città. Come evidenziato dal Sebastiano, la scuola di S. Lucia non era frequentata solo dagli studenti del centro, ma anche da quelli di tutto il territorio che si estendeva fino a Cesi e a Rossa S. Zenone, passando per Colle dell'Oro. Data la situazione critica, nella sezione finale "Proposte della Direzione" si suggeriva all'Amministrazione locale di ridurre le sezioni della scuola urbana da 9 a 5 e la costruzione di una nuova scuola rurale fuori Porta Spoletina, dove era in progetto la costruzione della Fabbrica d'Armi, e di una fuori Porta S. Angelo. Infatti, sebbene anche le scuole rurali[39] versassero in un grave stato di abbandono, l'invito a occuparsi

[37] Settimanale politico, letterario, commerciale stampato a Terni dal 1880 al 1926.

[38] Opera di un direttore scolastico che, sul punto di lasciare la città, si rivolgeva alle autorità in modo particolarmente libero con un tono diretto e primo di retorica: "io ho creduto di adempiere ad un sacro dovere di coscienza, ponendo a nudo le vere condizioni di queste scuole elementari" [229].

[39] Dai dati riportati in una tabella della relazione del Sebastiano, in questo periodo le scuole rurali si trovavano a: Acquapalombo, Cecalocco e Battiferro (dove lo stesso

soprattutto delle scuole della città era dettato dal fatto che questa, sempre più avviata verso l'industrializzazione, avrebbe dovuto provvedere anche all'educazione della futura classe operaia:

> "Ma, se essa vuol giungere con mezzi propri a quel grado di prosperità cui è chiamata e vincere la concorrenza delle altre città italiane, è d'uopo che volga incessanti cure agli interessi della pubblica istruzione e seriamente pensi soprattutto alla educazione delle classi operaje". [229]

Proprio per questo motivo, secondo l'Unione Liberale, l'amministrazione comunale si interessò molto di più agli istituti superiori, in particolar modo all'Istituto Tecnico, piuttosto che alle scuole elementari [230]. Infatti, la necessità di formare cittadini qualificati per la futura industria ternana portò all'apertura nel 1861, a seguito del decreto istitutivo del 10 novembre 1860 del Regio Commissario Straordinario per le Province dell'Umbria Gioacchino Pepoli [231], del Regio Istituto Tecnico, uno dei primi in Italia.

maestro impartiva alternativamente le lezioni per tre giorni a settimana), Collelicino, Poggio Lavarino e Miranda. Negli anni precedenti c'erano due scuole distinte per Rocca S. Zenone e Collelicino che però vennero soppresse e sostituite da una scuola mista collocata al casino Cardelli-Santucci che, però, sia per la distanza sia per le dimensioni ridotte dei locali, non riusciva di fatto ad accogliere gli alunni della prima borgata. Data la situazione disagiata, il consiglio provinciale scolastico programmò l'apertura di una nuova scuola a Rocca S. Zenone per gli anni successivi.



MUNICIPIO DI TERNI

CONCITTADINI

I nostri desiderii sono appagati. Sospirammo un' Istituto Tecnico normale, ed è pubblicato il Decreto col quale si onora la Città nostra di un tanto bene. I frutti della libertà cominciano a manifestarsi, e poichè base di tutto è l' istruzione, ecco largitoci un beneficio degno d' un libero Governo, e d' un Paese che vuole sfuggire alla peggiore delle tirannidi, l' ignoranza.

Concittadini, Richiamate in petto quell' amore che vi scaldò sempre per le cose buone, e pensando che tale Istituto decretato è il pane dell' intelligenza diffuso nel Popolo; esultiamo di tutto cuore per la concessione fattaci, preparandoci ad esserne degni. Pensate che con questo Istituto tutti i Giovinetti dell' Umbria sono chiamati qui a ricevere la dottrina che è la benedizione della vita, e nella massa sempre crescente dell' umano sapere verrà infusa qui nella Città nostra l' unità di quella civile sapienza, che forma la saldezza, e l' armonia della Nazione.

Intanto a tramandare alla posterità il nome dell' Egregio Commissario Generale che concede quanto più è caro, ed appropriato ad una Città manifatturiera, e Commerciale, la Giunta del Municipio interprete de' pubblici voti ha stabilito, che appena sia fissato il Locale, e messo degnamente in pronto per l' Istituto, la strada che ad esso conduce si chiami STRADA PEPOLI.

Dal Palazzo Comunale li 24. Novembre 1860.

LA GIUNTA MUNICIPALE

BERNARDINO FAUSTINI
PAOLO GAROFOLI
PIETRO FONZOLI
ANTONIO SILVESTRI
STANISLAO CARACIOTTI
AUGUSTO FRATINI

Terni, Tipi Paresi

Figura 113 - Manifesto di presentazione dell'Istituto Tecnico.

L'Istituto ebbe un avvio piuttosto faticoso a causa della scarsità di allievi e della mancanza di alunni regolari, per questo inizialmente non aveva delle sezioni definite ma solo corsi frequentati da uditori. Con il D.M. 03/10/1878 questo venne intitolato a "Caio Cornelio Tacito"[40] e nel corso degli anni iniziò ad avere una struttura più definita al punto da presentarsi, alla fine del secolo, "come una

[40] Denominazione dell'attuale Liceo Classico cittadino.

realtà scolastica di grande prestigio e di rilievo nazionale. […] La sua struttura nell'articolazione di quattro sezioni (Agrimensura, Industriale, Fisico-Matematica e Ragioneria) e nei vari insediamenti adotta sperimentazioni di concreto interesse tanto da apparire veramente una Scuola aperta sulla città." [232]. La sua crescita fu determinata anche dalle industrie locali come per esempio la Società Altiforni Acciaierie che, mettendo a disposizione le proprie officine, contribuì allo sviluppo della sezione industriale. Come mostrato nella Figura 114, la prima sede dell'Istituto era l'ex Convento di S. Lucia "già sede di un ordine religioso che lo adibiva anche a pubblico insegnamento, il fabbricato venne opportunamente ridotto, in più volte, al nuovo scopo" [233].

Dalla seconda metà degli anni '60, Terni divenne dunque protagonista di una ripresa economica che culminò negli anni '80 con l'apertura di nuove fabbriche: la Regia Fabbrica d'Armi nel 1881[41], le Acciaierie nel 1884-87 [234], la SAFFAT (Società degli Altiforni, Fonderie e Acciaierie di Terni), lo Jutificio Centurini nel 1886, la Società Industriale della Valnerina nel 1886, le Officine Meccaniche Bosco nel 1890 [235] e, successivamente (1897), la SICCAG (Società Italiana per il Carburo di Calcio e altri Gas) con gli impianti elettrochimici di Papigno e di Collestatte. È dunque possibile individuare una prima fase, che durò fino agli anni Venti del '900, di appropriazione della città da parte dell'industria, che si impose prepotentemente in una realtà che aveva ancora una fisionomia economica e sociale arretrata. Tra la città e l'industria si instaura un rapporto estremamente complesso; infatti, sebbene in questo periodo il proliferare di nuovi stabilimenti portasse alla crescita della realtà urbana dal punto di vista demografico ed economico, il carattere chiuso dell'industria e la scarsa volontà di investire i profitti sul territorio data l'insufficiente attenzione dei dirigenti, spesso provenienti da altre regioni, allo sviluppo del mercato locale, non consentirono alla città un solido sviluppo sociale ed economico. Le piccole e medie industrie e le attività commerciali e artigianali che erano nate a Terni in quegli anni, infatti, erano fortemente condizionate dall'industria che, in base ai

[41] La costruzione della Regia Fabbrica d'Armi era stata approvata dal Parlamento nel 1873, ma assunse il pieno ritmo produttivo nel 1881.

suoi ritmi produttivi, era allo stesso tempo il motore dell'economia cittadina e la principale responsabile della crisi del mercato locale.

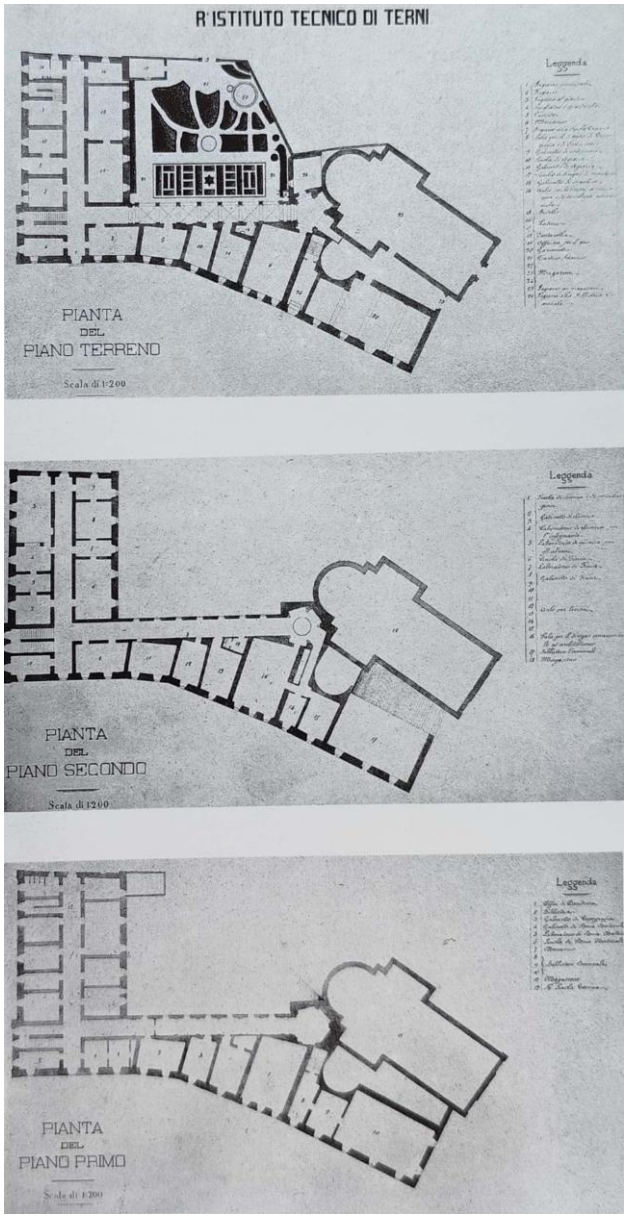


Figura 114 - Piante della prima sede dell'Istituto Tecnico nell'ex collegio di S. Lucia.

Tra il 1880 e il 1900 circa, la presenza degli stabilimenti industriali, che aprivano nuove prospettive di lavoro, provocò un flusso migratorio di persone in cerca di occupazione sia dai centri limitrofi sia da altre regioni e quindi un forte

incremento demografico che, però, Terni non era pronta a gestire. Questo portò inizialmente a un elevato sovraffollamento del centro storico; infatti, alla fine dell'Ottocento, il tessuto urbano era ancora compreso all'interno delle mura medievali. Successivamente, in mancanza di una normativa urbanistica che controllasse l'espansione della città secondo un piano definito, nacquero i primi borghi operai (Sant'Agnese e Borgo Bovio) come aggregazioni edilizie spontanee di scarsa qualità senza i servizi necessari e le condizioni igienico-sanitarie adeguate. Allo stesso tempo sorsero senza un programma predefinito anche le prime zone residenziali signorili, per permettere alla fascia più elevata della popolazione di vivere in un'area isolata rispetto ai nuovi borghi popolari urbani. Questi insediamenti elitari, infatti, nacquero prevalentemente al di là del fiume Nera; il fenomeno culminò nel 1920 con la costruzione del quartiere Città Giardino, su progetto dell'architetto Cesare Bazzani. In quegli anni, date le trasformazioni in atto nella città, vennero elaborati diversi piani urbanistici, che però non vennero approvati per mancanza di finanziamenti.

Un altro grande problema provocato dall'esplosione demografica che il Comune si trovava ad affrontare era quello dell'istruzione dell'elevato numero di persone giunte a Terni, soprattutto dalle campagne, per cercare occupazione nelle nuove industrie. Se prima la formazione scolastica era poco efficiente, ora risultava totalmente inadeguata e impreparata a "far fronte alla inaspettata massa di potenziali scolari, non solo fanciulli, ma anche adulti" [230]. Per esempio, la situazione igienica dei locali della scuola maschile non era affatto migliorata: "Di otto scuole (aule), tutte situate a pianterreno, ve ne sono 5 prive di luce e umide quanto una cantina sotterranea. Al primo difetto viene in parte rimediato, facendo entrare una luce ausiliaria dagli usci, che si lasciano aperti sotto il porticato, di fianco al cortile. Ciò per altro peggiora le condizioni di temperatura e di umidità dei locali, cosicché qualche maestro, per istinto di conservazione, si permette, talvolta, contro i precetti del galateo, tenere il proprio cappello in testa, in presenza degli alunni, che, spesso, guadagnano difteriti, raffreddori, e altri malanni." [236] Infatti, l'amministrazione locale, sovrastata dai problemi legati ai rapidi cambiamenti che stava subendo la città, non definì un programma strutturato per la gestione della scuola né dal punto di vista pedagogico né edilizio, trovandosi così ad intervenire sugli edifici

scolastici con interventi isolati[42] a seguito delle richieste e delle segnalazioni degli insegnanti limitatamente alle disponibilità economiche del Comune [238]. La situazione dell'edilizia scolastica rimaneva critica anche all'inizio del Novecento, con aule insufficienti e sovraffollate perché di dimensioni inadeguate per accogliere fino a sessanta-settanta alunni, nonostante fosse ancora molto alto il tasso di analfabetismo. "Per gli alunni della scuola ternana nei primi anni del secolo Ventesimo, la vita in classe non doveva essere facile. Raccolti in due soli edifici – due vecchi conventi tetri ed inadatti – "G. Mazzini" i maschi e "S. Caterina"[43] le femmine" [237]. Inoltre, sebbene fosse stata aperta una scuola rurale nel quartiere Borgo Garibaldi (San Valentino) nel 1900, un ufficiale sanitario denunciò al sindaco che gli alunni erano costretti a frequentare le lezioni all'interno del Lazzaretto[44] [239].

A seguito delle richieste da parte degli operai, consapevoli della necessità di ricevere un'istruzione adeguata, vennero aumentati i corsi serali, che però non sempre garantivano la preparazione e la qualificazione richiesta dalle industrie. Perciò l'amministrazione comunale rivolse maggiore attenzione alle scuole tecniche professionali, che rispondevano alle esigenze delle fabbriche. Nel 1909, grazie all'iniziativa di un comitato cittadino, che trovò l'appoggio del Comune e di alcune industrie del territorio, venne istituita la Scuola d'Arte e Mestieri, una scuola media di carattere tecnico-pratico che avrebbe dovuto preparare i futuri operai. "In questa Scuola le giovanili energie dovranno essere razionalmente avviate al lavoro, che poi nelle officine troverà le sue utili e poderose applicazioni." [240] Mentre la Società Italiana per il Carburo di Calcio concesse un sussidio della durata di cinque anni, la Società Altiforni, Fonderie e Acciaierie

[42] Nel 1901 il comune spende L.500 per lavori di restauro nelle scuole femminili (Archivio di Stato Terni – Fondo archivio comunale, busta 927 (a. 1900-1901). Nel 1906, interviene con urgenza nell'edificio della scuola di S. Valentino [237] e chiede un prestito per il completamento del secondo piano della scuola elementare "Mazzini" (Archivio di Stato Terni – Fondo archivio comunale, busta 1008 (a.1096)).

[43] In quest'ultima, l'istruzione non era più gestita dalle Convittrici poiché nel 1890 l'Amministrazione le rimosse dal pubblico insegnamento. Aprirono comunque una scuola privata a Palazzo Spada (attuale sede del Comune di Terni) che, insieme all'Istituto delle Suore della Provvidenza a cui furono aggregate nel 1901, rimase aperta fino al 1940 [226].

[44] "E questo nonostante fosse stato possibile alloggiare la scuola rurale nel convento "Le Grazie"" [237]

cedette a titolo gratuito un'area in viale Brin su cui realizzare l'edificio, che venne progettato dall'architetto Cesare Bazzani (Figura 115).

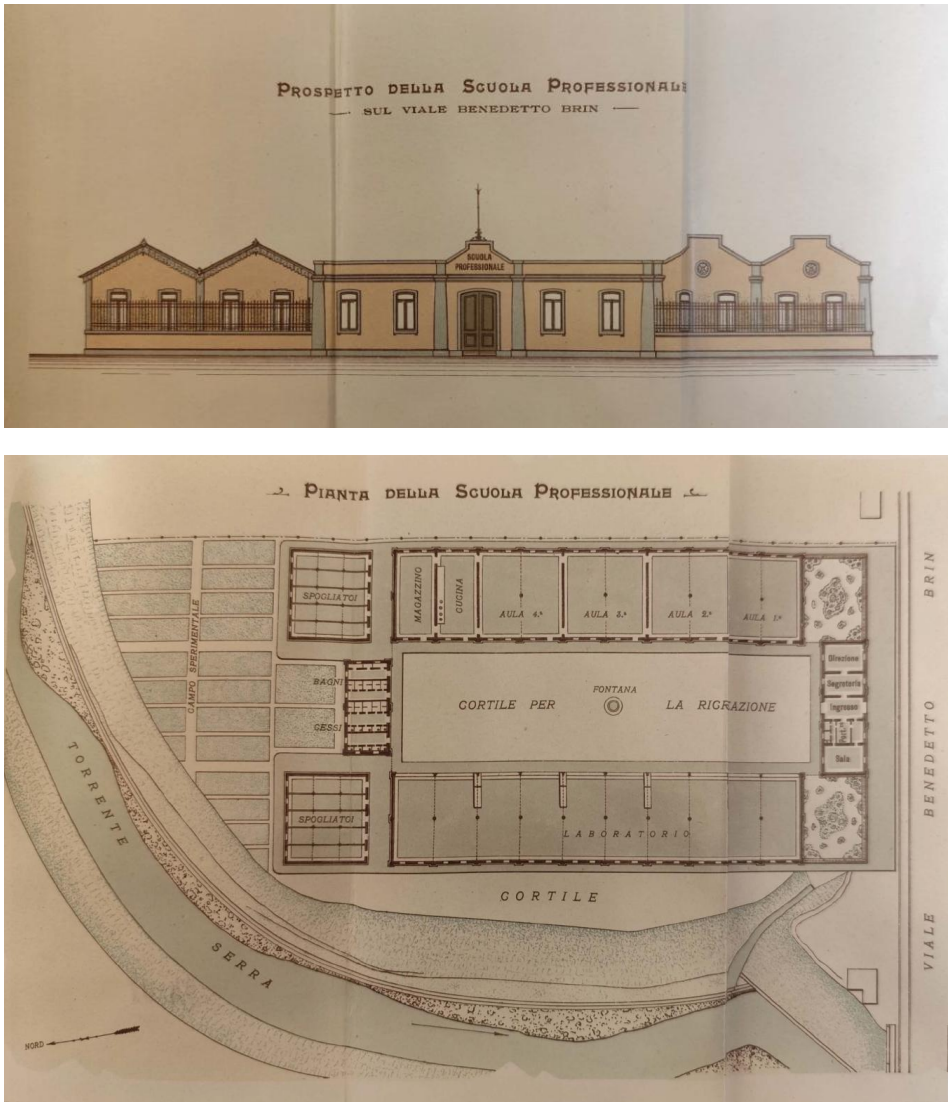


Figura 115 - Prospetto principale (in alto) e pianta (in basso) della Scuola Professionale. Fonte: Scuola professionale per la città di Terni [240].

L'11 settembre 1910 venne trasferito sotto l'amministrazione diretta dello stato con un decreto del Ministro di Agricoltura Industria e Commercio che ribadiva che il fine di questo istituto era quello di istruire le future maestranze degli stabilimenti locali riconoscendo quindi il legame imprescindibile tra la scuola e l'economica locale. Oltre alla Scuola d'Arte e Mestieri, "l'edificio ospitava una

scuola secondaria di avviamento al lavoro industriale di durata triennale e una scuola di tirocinio industriale di secondo grado articolata in due sezioni. Nella scuola venivano inoltre svolti i corsi serali di arte edile, motoristi preareonautica, premilitare radiotelegrafisti, serale per maestranze del Dopolavoro Provinciale" [241]. "Il fabbricato, in base ad una descrizione del 1930, risultava articolato in un corpo principale (quello posto su Viale Brin) strutturato su tre piani e uno scantinato e in due padiglioni adibiti ad officine" [241].



Figura 116 – Prospetto su viale Brin del corpo principale della Scuola Industriale.

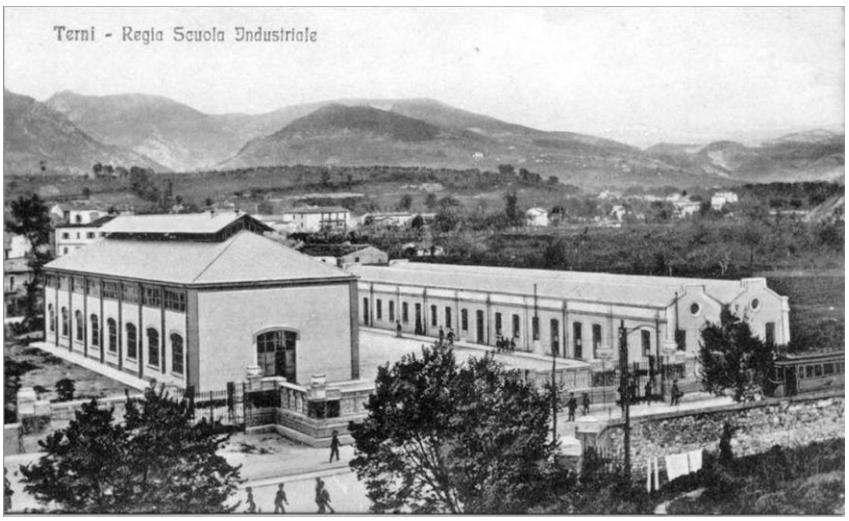


Figura 117 - Padiglioni della Scuola Industriale.

Durante la Prima Guerra Mondiale, a causa della crescente domanda, le industrie del territorio convertirono la propria produzione al settore bellico, ciò determinò un ulteriore aumento della popolazione. Il problema dell'abitazione operaia si acutizzò al punto che, anche se alcune industrie, come la SAFFAT e la Società Terni, iniziarono a costruire degli alloggi per gli operai nelle vicinanze delle fabbriche, questo non riuscì ad arginare l'affollamento degli operai nel centro storico e a contrastare lo sviluppo dell'edilizia spontanea. Nei primi due decenni del Novecento, oltre a Costa (Sant'Agnese) e Bovio, si erano formati nuovi borghi operai intorno al centro cittadino: San Pietro in Campo, Garibaldi (San Valentino), Cavallotti e Brin in cui vivevano complessivamente circa tredicimila persone [242]. C'è da osservare, però, che la città subì una crisi legata al declino dell'industria bellica del primo dopoguerra: la produzione della Fabbrica d'Armi era attiva solo tre giorni a settimana, mentre le Acciaierie, i cui dirigenti investirono gli altissimi profitti ricavati dalla produzione bellica in operazioni finanziarie e per l'espansione della società in altre regioni, furono costrette a una difficile opera di ricostruzione che comportò il licenziamento di numerosi operai.

Nonostante le vicende economiche locali, gli iscritti dell'Istituto Tecnico crebbero costantemente fino al 1920 rendendo la sede inadeguata. Perciò, già dal 1914-15 cominciò a nascere l'esigenza di costruire un nuovo edificio. Su incarico del Comune di Terni nel 1916 l'ing. Angelo Guazzaroni presentò il "Piano regolatore degli edifici scolastici di tutte le scuole della città" nel quale veniva proposta la costruzione di due nuove scuole: una tra corso Tacito e via del Teatro Goldoni destinata al R. Liceo-Ginnasio e alle Scuole Tecniche e un'altra in via dei Camporeali per il R. Istituto Tecnico. Il primo progetto non venne realizzato probabilmente per la mancanza di fondi viste le difficoltà economiche legate al periodo bellico, quindi il Liceo-Ginnasio e le Scuole Tecniche rimasero ancora nel palazzo Mariani, edificio inadeguato alle esigenze dei due istituti scolastici [243]. Invece, il progetto nella nuova sede dell'Istituto Tecnico, di cui si tratterà nel paragrafo successivo, fu realizzato nel 1922.

7.1.3. Dall'età del fascismo alla fine del secondo conflitto mondiale (1921-1945)

Negli anni successivi alla prima Guerra Mondiale, che contribuì in modo rilevante alla crescita della città grazie all'aumento della produzione dell'industria siderurgica, Terni subì diversi cambiamenti determinati sia dalla situazione nazionale sia locale.

Dopo il 1920 in Italia iniziò a diffondersi e a consolidarsi l'ideologia fascista e anche la realtà ternana ne fu investita a livello politico, economico, sociale e formativo. Per quanto riguarda le vicende strettamente legate alla città, a livello amministrativo nel 1927 Terni divenne Provincia: questo comporterà, tra i vari aspetti, un ampliamento dei confini comunali, lo sviluppo del settore terziario, la costruzione di nuove scuole per rispondere alla crescente domanda educativa e all'esigenza di nuove strutture pubbliche adeguate al nuovo ruolo istituzionale. In questo contesto, furono progettati e realizzati edifici come la Prefettura, la Questura, il Palazzo del Governo e la sede del Consiglio Provinciale dell'Economia (che diverrà nel 1944 la attuale Camera di Commercio) e della Banca d'Italia. Tale fenomeno modifica profondamente l'assetto demografico e urbanistico cittadino ed influisce profondamente sulla composizione del nuovo tessuto sociale ed economico. Ed è all'interno di questo nuovo fervore che nasce, nella mente di molti intellettuali ternani l'idea di affrontare il problema del sistema scolastico cittadino, carente, in particolare, di istituti di istruzione secondaria superiore e delle loro sedi.

Relativamente all'industria, la Società Terni, che assorbì la Società del Carburo di Calcio, divenne "fabbrica di regime" [244] e, a fronte della crescente domanda del settore bellico, incrementò nuovamente la produzione, operando in un clima di intensi conflitti sindacali prontamente repressi dal regime autarchico. Tuttavia lo scenario economico dell'epoca non fu privo di difficoltà: la deflazione e le crisi del mercato delle materie prime colpirono duramente il settore tessile. Nei primi anni Trenta, la situazione dell'edilizia operaia era ancora estremamente critica. Una svolta si ebbe con l'elaborazione del nuovo piano regolatore, redatto da Lattes-Staderini tra il 1934 e il 1936, che rappresentò il primo tentativo di fornire linee guida per una ristrutturazione generale di tutta la città, integrando lo sviluppo residenziale con la previsione di nuove strutture

ed infrastrutture. Tra queste, si annoverano aree verdi e sportive, un nuovo ospedale e un mattatoio, progettati per rispondere alle esigenze di una popolazione in crescita e sempre più diversificata. La trasformazione del tessuto urbano rifletteva infatti una progressiva articolazione delle attività economiche e sociali presenti nella città, che incidevano sulla composizione sociale della comunità ternana. L'attività edilizia promossa in questi anni evidenziò, infatti, un marcato divario, sia in termini quantitativi che qualitativi, tra gli interventi destinati alla costruzione di abitazioni residenziali e quelli relativi alla realizzazione di alloggi popolari: fu favorita l'edilizia destinata ai ceti medi, a discapito di quella per la classe operaia contribuendo a mantenere drasticamente aperta la questione abitativa di questi lavoratori e accentuando le disparità sociali all'interno del tessuto urbano. Le abitazioni destinate agli impiegati furono infatti costruite all'interno del centro cittadino adottando il tipo a blocco, tipico dell'espansione a carattere speculativo e si inserirono armonicamente nel tessuto privilegiato della città. Al contrario, i quartieri operai furono collocati in aree marginali rispetto al centro, in prossimità degli insediamenti industriali, come nelle zone di Borgo Bovio e Campomicciolo. Tali quartieri erano costituiti prevalentemente da blocchi di edifici a ballatoio o in linea che riflettevano la necessità di garantire una soluzione abitativa essenziale e funzionale per la classe operaia. Per il Villaggio Matteotti, allora denominato Italo Balbo, viene ipotizzato un intervento semirurale, con case a schiera provviste di giardini privati e integrate nel contesto agricolo circostante al fine di offrire ai lavoratori un margine di autosufficienza attraverso attività agricole; tale scelta progettuale intendeva rispondere alle difficoltà economiche derivanti dai periodi di disoccupazione, garantendo un'opportunità di sostentamento. Con l'insediamento dello stabilimento chimico della S.A.I.G.S. anche la zona periferica di Cospea iniziò la sua trasformazione. Inoltre, tra il 1938 e il 1941 vennero realizzati altri due nuclei residenziali vicini al polo chimico, oggi noti come villaggio Polymer, realizzato direttamente dell'industria [241] e villaggio Cianferini.

In quegli anni anche l'istruzione venne rinnovata in seguito all'approvazione della riforma Gentile che riguardava tutti gli ordini scolastici e aggiornava i vecchi sistemi pedagogici. La scuola elementare, la prima forma di istruzione di

base, ebbe grande importanza perché utile per realizzare il processo di fascistizzazione della società. Nonostante il regime assegnasse un ruolo fondamentale alla formazione dei giovani, a Terni la scuola era ancora molto legata alla grande industria: la frequenza scolastica era condizionata nella maggior parte dei casi dal lavoro e/o dalle condizioni economiche. L'andamento delle assenze nelle scuole rurali era influenzato dai ritmi stagionali tipici del lavoro nei campi e, per quanto riguarda le scuole del centro, dalle fabbriche poiché la maggior parte degli studenti proveniva da famiglie operaie; infatti, durante i periodi di crisi anche i giovani dovevano contribuire al sostentamento della famiglia [244]. Il tasso molto alto di evasione all'obbligo scolastico insieme al fenomeno dell'abbandono della scuola dopo l'inizio dell'anno scolastico rendevano la situazione molto grave. Nel 1931, come mostrano i dati riportati nella Tabella 11, circa la metà dei bambini non frequentava la scuola dell'obbligo.

	Obbligati	Iscritti	Frequentanti
Maschi	3086	1561 (50,58 %)	1550 (50,22 %)
Femmine	3074	1313 (42,71 %)	1293 (42,06 %)

Tabella 11 - Dati relativi alla frequenza scolastica degli alunni nel 1931. Fonte: Panfili O. [238].

La situazione era già stata denunciata pubblicamente da Camosci, il direttore delle scuole elementari di Terni, il quale in una relazione del 1927 esprime le sue riserve sulle capacità degli insegnanti a comprendere e attuare le novità della riforma Gentile. Nella stessa nota, viene anche descritta la situazione dell'edilizia scolastica della città. Le scuole urbane in quel periodo erano quattro. Le classi maschili del centro erano ospitate nell'edificio Mazzini, in buone condizioni, nella scuola Anita Garibaldi e in alcune aule dell'ex scuola industriale, che invece necessitavano di interventi urgenti. Destava preoccupazione anche la situazione delle due scuole miste in periferia, a borgo Bovio, dove le scuole erano allocate in poveri e angusti ambienti di privati presi in affitto, e a borgo Garibaldi. Quest'ultima, un ex convento, ospitava contemporaneamente alcune famiglie che vivevano in spazi adiacenti alle aule [238]. Nella relazione vengono prese in considerazione anche le scuole rurali: le condizioni degli edifici a San Giovanni, Colle dell'Oro, Pentima e Rocca San Zenone erano precarie, mentre

erano ottime quelle delle scuole di Maratta, Palmetta, Campitelli e San Carlo. Inoltre a Valenza e Piefossato era prevista la costruzione di nuovi locali scolastici. Per quanto riguarda i paesi di campagna, invece, le lezioni erano ancora svolte in case di privati che il Comune prendeva in affitto[45].

Nel 1927 il comune di Terni presentò un piano organico per la costruzione di undici scuole rurali[46] (tra cui Poggio Lavarino, Acquapalombo, Cecalocco, Battiferro, Pentima, Colle dell'Oro, Rocca S. Zenone, Valenza, Piefossato), per poter usufruire dei contributi di legge [230].

Bisognerà attendere il 1933 per la costruzione di altre due scuole urbane, la "Vittorio Veneto" e la "XXVIII Ottobre", che si aggiunsero alle due già esistenti con l'obiettivo di decongestionare le scuole del centro cittadino [245]. Inoltre, la scuola "G. Oberdan" fu destinata a servire il quartiere Serra (Borgo Bovio) rispondendo alle crescenti esigenze educative di una popolazione in espansione. La costruzione di queste scuole rientrava nella prima fase di attuazione del piano elaborato dall'Ufficio Tecnico comunale, che suddivise la città in comprensori, prevedendo per ciascuno la realizzazione di un edificio scolastico con un massimo di venti aule. Oltre agli edifici a Porta Romana (Vittorio Veneto), nel quartiere di S. Pietro in Campo (XXVIII Ottobre) e di Borgo Bovio (Oberdan), il piano includeva ulteriori strutture scolastiche per i quartieri di S. Valentino, Cospea, Giardino e Battisti.

La scuola Vittorio Veneto (Figura 118), inaugurata il 21 Aprile 1933, fu progettata per accogliere 500 alunni distribuiti in 10 aule. L'edificio era situato all'estremo sud del nucleo urbano storico, vicino a case di minore importanza, ma affacciato sulla nuova piazza circondata da edifici di rilevanza simbolica, tra cui la Casa del Balilla e il monumento ai Caduti in Guerra, oltre a essere prospicente alla nuova Via Littoria, prevista nel piano regolatore dell'epoca. Gli spazi interni riflettevano pienamente le norme vigenti sull'edilizia scolastica; le aule ampiamente illuminate presentavano finestre la cui superficie non è mai inferiore a un sesto della superficie del pavimento, che era dimensionato per

[45] Archivio di Stato di Terni – Fondo archivistico storico comunale, Busta 1254 (1927), Direzione didattica di Terni: Relazione richiesta dall'Ufficio Tecnico della Direzione Generale dell'Istruzione Elementare per il museo tecnico-didattico.

[46] Archivio di Stato di Terni – Fondo archivistico storico comunale, Busta 1146 (a. 1927), Progetti di scuole rurali

garantire a ciascun allievo 1,5 m^2 di spazio. I soffitti alti contribuivano al miglioramento delle condizioni igieniche. Inoltre, i pavimenti erano realizzati in linoleum, impreziositi da una cornice di lega leggera e inossidabile e le scale, realizzate tramite una soletta a sbalzo in cemento armato, erano completamente rivestite in marmo [246].



Figura 118 - Prospetto principale della scuola Vittorio Veneto. Fonte: FOTOedu, archivio fotografico per la storia della scuola e dell'educazione dell'Istituto Nazionale di Documentazione, Innovazione e Ricerca Educativa (INDIRE).

L'edificio XXVIII Ottobre (Figura 119), inaugurato il 21 Aprile 1934, fu realizzato nell'area nord della città, nel quartiere di S. Pietro in Campo in un contesto urbanistico privo di vincoli storici: questo permise ai progettisti di sperimentare, conferendo alla struttura quelle caratteristiche di "sobria e maschia intersezione di masse e quei raccordi curvilinei" che definivano l'architettura razionalista [246]. L'edificio rispetta pienamente le caratteristiche tipiche delle scuole dell'epoca, testimoniandone l'aderenza ai principi architettonici e funzionali del periodo: ampie finestre dotate di infissi metallici a specchio unico garantivano un'illuminazione ottimale, mentre i solai in cemento armato e laterizio con camere d'aria assicuravano isolamento e robustezza. La scala in marmo era

collocata in una delle masse volumetriche sporgenti in pianta e sopraelevate in alzato, creando un effetto di movimento e monumentalità, mentre l'ingresso per le alunne era progettato in un emiciclo che, oltre a conferire morbidezza alle linee architettoniche, risolveva una situazione progettuale complessa di un angolo del lotto determinata dalla vicinanza a una via laterale sotto squadro. L'edificio aveva le medesime caratteristiche tecniche e funzionali della scuola Vittorio Veneto, tra cui gli spazi interni dimensionati secondo le norme igieniche vigenti e arredi come banchi di rovere lucido collegati a catena. Inoltre, era stato predisposto un cortile per ospitare una futura palestra coperta, dimostrando attenzione alle esigenze didattiche e sportive. Complessivamente l'edificio era capace di ospitare 500 alunni in un ambiente funzionale e rappresentativo dei principi ideologici del periodo.

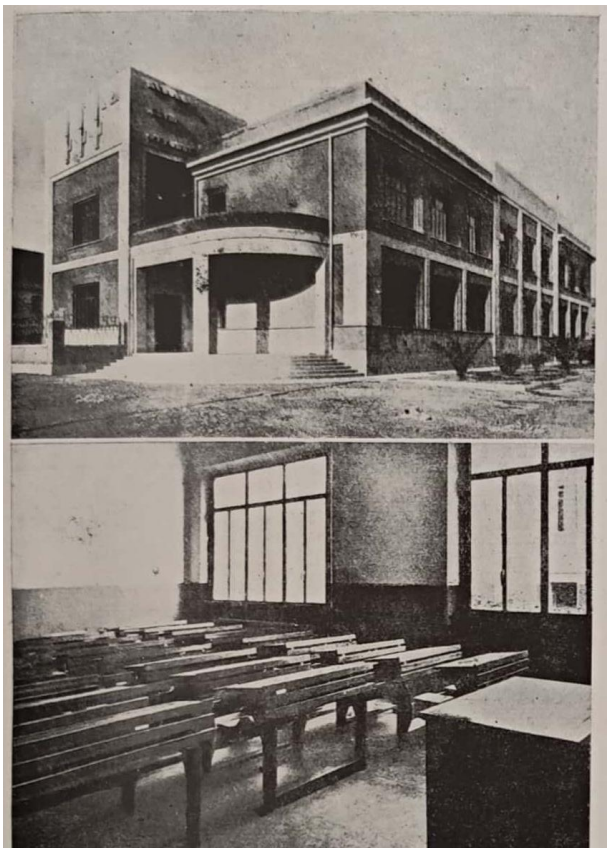


Figura 119 - Prospetto principale (in alto) e interno di un'aula (in basso) della scuola XXVIII Ottobre: Fonte: Rivista tecnica Costruzioni civili e industriali illustrate febbraio 1935 [246].

Infine, la scuola G. Oberdan (Figura 120), situata nel cuore del quartiere popolare Serra (Borgo Bovio), fu progettata per ospitare 400 studenti distribuiti in 8 aule. L'edificio presenta le stesse caratteristiche costruttive degli altri includendo, in aggiunta, un reparto sportivo-sanitario [247].



Figura 120 - Prospetto principale della scuola Guglielmo Oberdan. Fonte: Rassegna delle opere pubbliche 1932-1936 [247].



Figura 121 - Particolari costruttivi dell'edificio scolastico G. Oberdan: scavi di fondazione con le teste dei pali compressi (in alto), armatura della pensilina (al centro), solaio di copertura (in basso). Fonte: Rassegna delle opere pubbliche 1932-1936 [247].

Durante questo periodo si delinea anche il quadro degli istituti d'istruzione secondaria ancora oggi presenti a Terni:

- La Regia Scuola Tecnica Industriale, evoluzione della Scuola di Arte e Mestieri che nel 1923 si stabilizza in una scuola secondaria di avviamento professionale a indirizzo industriale della durata di tre anni e un corso biennale industriale e artigiano.
- L'Istituto Tecnico Industriale, istituito nel 1935 quando il Comune, sostenuto dagli industriali locali, dal Consiglio provinciale dell'economia corporativa e dal Direttorio del fascio di Terni, ottenne dal Ministero dell'Economia nazionale di creare a sue spese una sezione di studi per periti meccanici-metallurgici. L'Istituto Industriale Comunale fu poi classificato statale con R.D. 16 ottobre 1940 n. 1973. La sede di Viale Brin della scuola professionale si dimostrò non più sufficiente, ma la costruzione del nuovo (ed attuale) edificio di via Battisti riprenderà da parte della Provincia soltanto negli anni della ricostruzione post-bellica [232].
- Il Regio Istituto Tecnico, venne trasferito nella nuova sede (Figura 122) nel settembre del 1924. "Tale edificio riuscirà anche un'opera architettonica apprezzabilissima da cui trarrà grande vantaggio, oltre l'Istituto l'edilizia e l'estetica cittadina" (da "Il Messaggero" 18 novembre 1921, p. 6) [248]. Nel 1936 l'istituto venne intitolato a Federico Cesi, mentre il nome precedente "Caio Cornelio Tacito" venne attribuito al Liceo.

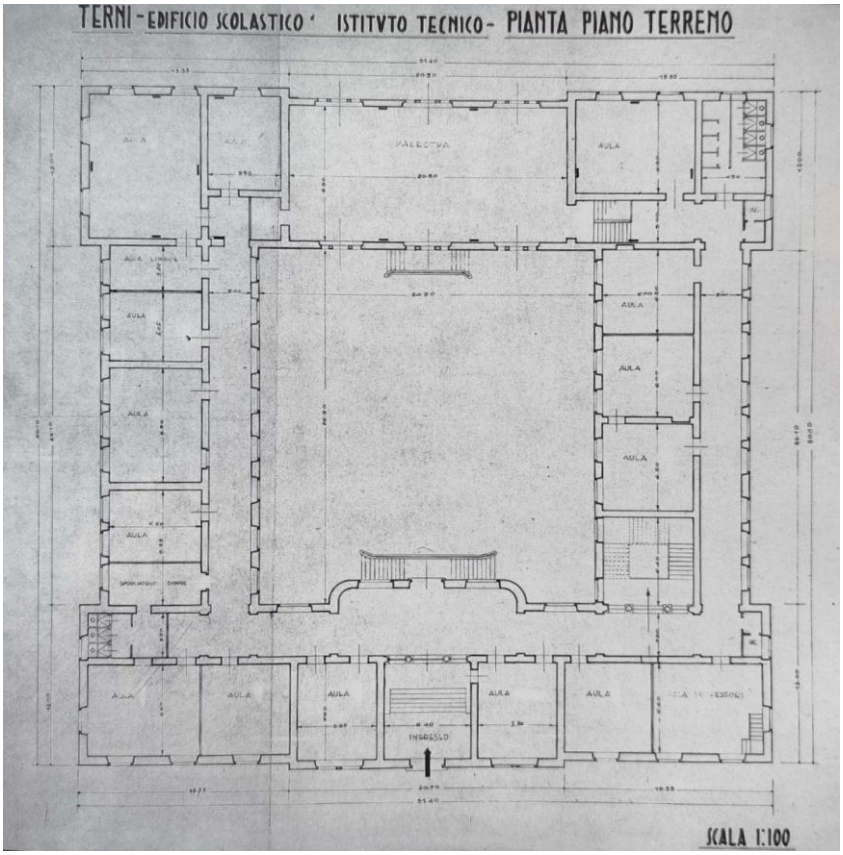


Figura 122 - Pianta del piano terra della sede dell'Istituto Tecnico su progetto dell'ingegnere Angelo Guazzaroni. Fonte: Paolucci M. [248].

- Il Regio Liceo Ginnasio "T. Maccio Plauto", che con la costruzione della nuova sede[47] prenderà l'attuale nome di "Cornelio Tacito". La nuova struttura (Figura 123), inaugurata il 28 ottobre 1936, fu progettata dall'ingegnere Angelo Guazzaroni, che si ispirò ai principi architettonici del Razionalismo e del Novecentismo, stili che il regime fascista aveva accolto come espressione della nuova epoca [243]. L'edificio, situato al centro della città, si sviluppa su tre piani e fu concepito per accogliere due sezioni complete di ginnasio e liceo, con un totale di sedici classi. Gli ambienti interni, includono aule ampie e luminose, laboratori, una sala professori, una biblioteca, un'aula magna e una palestra. Per la modernità delle

[47] Prima era alloggiato presso l'Istituto Tecnico.

attrezzature e per la ricchezza delle finiture, l'edificio è stato descritto come "una delle migliori sedi per Scuole medie d'Italia" [247].

- L'Istituto Magistrale Comunale, che all'atto della sua istituzione nel 1932 portava il nome di "Anastasio De Filis" e solo in seguito alla sua regificazione (avvenuta nel 1936) acquisì la denominazione di Istituto Magistrale Statale "Francesco Angeloni". Fino al 1965 l'istituto Magistrale non ebbe una sua sede autonoma, occupando, come risulta da documenti dell'Archivio di Stato di Terni, il piano rialzato del Liceo Ginnasio.
- Il Regio Liceo Scientifico, istituito il 3 settembre 1942 dal Ministero dell'Educazione Nazionale, iniziò la propria attività il 1 ottobre 1942, con una popolazione scolastica di 46 alunni (45 maschi e 1 femmina), ospitato presso i locali del Liceo Ginnasio. E' l'attuale Liceo scientifico Statale "G.Galilei".
- La Regia Scuola Secondaria di Avviamento Commerciale "O. Nucola" istituita nel 1930 che diventò Scuola Tecnica Commerciale nel 1960 e quindi Istituto Professionale di Stato nel 1961, intitolato ad "A. Casagrande" nel 1966.



Figura 123 - Edificio del Regio Liceo Ginnasio. Fonte: Rassegna delle opere pubbliche 1932-1936 [247].

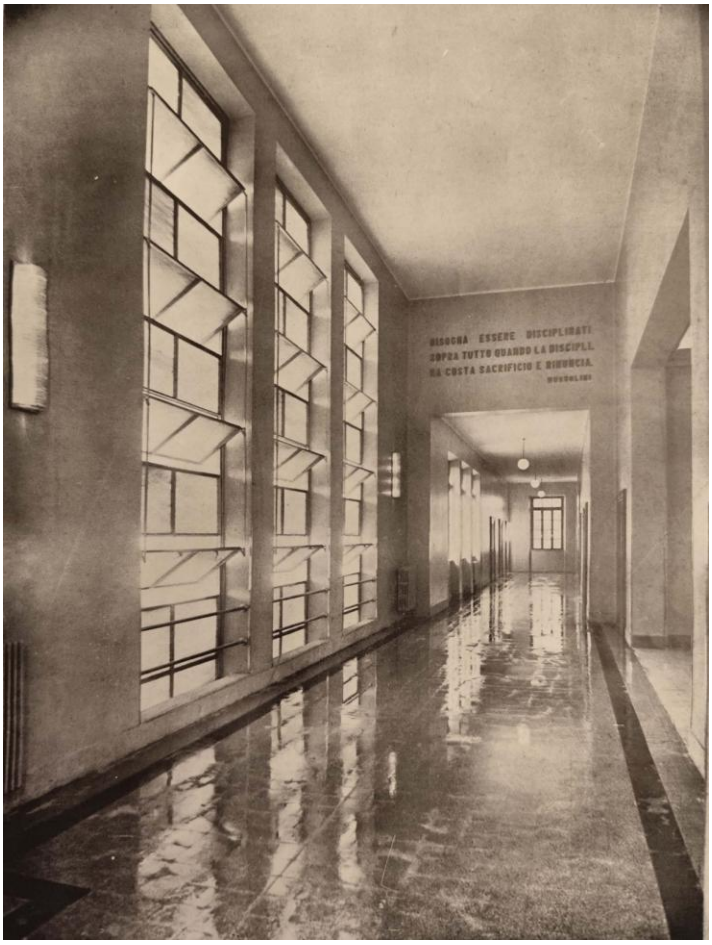


Figura 124 - Corridoio del secondo piano del Regio Liceo Ginnasio. Fonte: Rassegna delle opere pubbliche 1932-1936 [247].

La “Carta della Scuola” del 1939 non riuscì ad avere un impatto significativo sulla realtà scolastica ternana a causa dello scoppio della guerra e dei pesanti e numerosi bombardamenti che colpirono la città a partire dal luglio del 1943 [238]. Questi eventi provocarono un massiccio esodo di cittadini verso le campagne e i paesi circostanti, lasciando in città le fasce più povere della popolazione e coloro che erano strettamente legati al lavoro nelle industrie. Anche per loro, tuttavia, l’attività scolastica subì una drastica riduzione, poiché quasi tutti gli edifici delle scuole elementari furono colpiti dalle bombe [237]. L’attività didattica riprese soltanto l’8 gennaio 1945 per decisione del Comando Alleato – Divisione educazione [243].

7.1.4. Dal periodo postbellico alla metà degli anni Settanta

La seconda guerra mondiale e la lotta di liberazione segnarono la fine del periodo fascista, lasciando una città profondamente segnata dai bombardamenti: Terni infatti, nel corso del secondo conflitto mondiale, fu oggetto di numerosi attacchi aerei a causa della sua rilevanza nel settore industriale siderurgico e bellico. Tuttavia, i bombardamenti dell'11 agosto del 1943 ebbero obiettivi civili, causando la distruzione di molti edifici del centro cittadino. Furono rasi al suolo o gravemente danneggiati otto edifici pubblici, 135 aule scolastiche, 800 uffici pubblici e privati, 13 chiese e 986 case di abitazioni. Come mostrato nella Figura 125, una delle scuole maggiormente colpite fu la nuova sede dell'Istituto Tecnico che, nel periodo 1944-1945, riprese la sua attività didattica ospite prima dell'Istituto Industriale e successivamente del Liceo Classico, dove le lezioni venivano svolte in orario pomeridiano. Solo due anni dopo poté tornare nella propria sede, ricostruita dopo i danni subiti.



Figura 125 - Inizio della ricostruzione della sede dell'Istituto Tecnico. Fonte: Paolucci M. [248].

La grave situazione in cui si trovata la città determinò l'esigenza di progettare un nuovo piano urbanistico che fu affidato agli architetti Mario Ridolfi e Wolfgang Frankl. Il piano di ricostruzione, definitivamente approvato nel 1947, nacque in un contesto politico e culturale caratterizzato per la prima volta dalla partecipazione attiva della classe operaia. Nel secondo dopoguerra infatti, il problema dell'abitazione operaia venne finalmente integrato nella pianificazione generale della nuova città. La prima fase della trasformazione della città, fino al 1960, è caratterizzata prevalentemente dalla ricostruzione del centro storico e dallo sviluppo delle aree centrali, la seconda fase, compresa fra il 1960 e il 1970, vede il completamento delle aree centrali (via dello Stadio, Leopardi, Cardeto), accompagnato da interventi di ristrutturazione urbanistica nelle zone semicentrali e dalla realizzazione dei nuclei di case popolari nelle periferie. Questi interventi contribuiscono a delineare un'immagine della città fortemente influenzata dal disegno e dall'approccio progettuale di Mario Ridolfi e Walfgang Frankl. Infatti, la traccia più significativa di Ridolfi, autore non solo del piano di ricostruzione ma anche del piano regolatore nel 1960, è indubbiamente nella progettazione degli edifici che, pur facendo parte di un piano d'insieme, si distinguono per la loro specificità e "una inconfondibile personalità che si fanno ammirare non solo per l'armonia delle forme ma per la bellezza delle materie impiegate e la sapienza artigianale profusa dai progettisti e dagli artigiani che li realizzarono" [249]. Tra gli edifici privati come Casa Chitarrini e le case Franconi, Briganti e Pallotta, spicca un edificio pubblico: la scuola Leonardo da Vinci. Fu fatta progettare come scuola media dall'amministrazione comunale nel 1951, a causa della scarsità di spazi riservati all'istruzione. Da quanto risulta da una relazione del sindaco di Terni nell'archivio storico comunale, i numerosi alunni della scuola media, vista la scarsità degli spazi, erano distribuiti in due istituti (A e B). Le ventidue classi del primo istituto vennero ospitate in sette aule del Liceo-Ginnasio determinando una riduzione dell'orario scolastico e l'adozione di due turni pomeridiani; stesse misure vennero adottate per consentire ai 785 alunni del secondo istituto di frequentare le lezioni nella scuola elementare di Santa Caterina.

Infine, la terza fase comprende la costruzione di alcuni nuclei residenziali da parte dello I.A.C.P. (Istituto Autonomo per la Case Popolari) nelle zone San

Giovanni e Le Grazie. Tra il 1954 e il 1975 nacque il quartiere San Giovanni, mentre durante gli anni Sessanta furono edificati i quartieri Cesure e Le Grazie. Le case popolari di borgo San Valentino vennero completate nel 1960, seguite dalla realizzazione dei villaggi Metelli, Iclis, Astra e Thyrus tra il 1962 e il 1975. Nel 1970 fu progettato il nuovo villaggio Matteotti e nel corso degli anni Settanta presero forma il quartiere Cospea e il complesso residenziale CEP. Contestualmente, si procedette al completamento del Villaggio Italia, accompagnato da uno sviluppo spontaneo dell'autocostruzione nei borghi periferici (B. Rivo, B. Bovio, Flaminia ed in parte Campomicciolo) [250].

Già alla fine del 1944, tra notevoli difficoltà, ebbe inizio l'opera di ricostruzione della Società Terni, favorita dalla disponibilità, seppur limitata, di energia elettrica e dalla possibilità di riparare i danni subiti dagli impianti industriali. Tuttavia, l'obbligo imposto alla Terni di effettuare forniture per l'amministrazione militare alleata rallentò il suo completo ripristino operativo. A partire dal 1948 la Società Terni, principale industria della città, avviò un lungo processo di ristrutturazione e ridimensionamento dovuto alla riconversione dell'intero settore siderurgico a industria di pace. Nonostante ciò, la città di Terni registrò un lento progresso di crescita che porterà gli abitanti dagli 80 mila circa dell'immediato dopoguerra ai circa 110 mila degli anni Settanta.

Nel contesto della ricostruzione della città e del mutato quadro politico nazionale, il problema della scuola rimase in secondo piano, inserito nel più ampio quadro delle sfide legate alla ricostruzione urbana. Tra il 1945 e il 1953 furono riparati i danni subiti dagli edifici scolastici durante i bombardamenti, ma l'amministrazione comunale di Terni si limitò a riadattare i quattro grandi edifici scolastici presenti nel centro cittadino all'inizio della seconda guerra mondiale, senza tenere adeguatamente conto dei mutamenti che stavano interessando l'assetto urbanistico della città rispetto al periodo prebellico. Il progressivo svuotamento del centro storico, destinato ad attività del settore terziario, e la creazione di nuovi quartieri in periferia avrebbero richiesto un approccio basato sul decentramento delle strutture scolastiche. Tale politica venne adottata dal Comune solo negli anni Sessanta, quando fu avviata la costruzione di una serie di nuove scuole nelle frazioni di Cesi, Collescipoli, Cecalocco, Collestatte,

Campomicciolo, Villaggio Cianferini, Villaggio Matteotti, vocabolo Fiori, oltre ad un nuovo edificio in città nel quartiere di Città Giardino.

A differenza della maggior parte delle nuove scuole, progettate secondo il tradizionale schema distributivo a corridoio, nel 1973 venne realizzata, nel centro della città, la scuola Aldo Moro, caratterizzata da un modello morfo-tipologico a padiglione. Un elemento distintivo di questo edificio è rappresentato dal sistema di scale e rampe che permette l'accesso alle coperture dei padiglioni. Queste, progettate con superfici piane o inclinate dotate di gradoni (Figura 126), permettono di svolgere anche attività didattiche all'aperto, integrando funzionalmente l'architettura con modalità educative innovative.

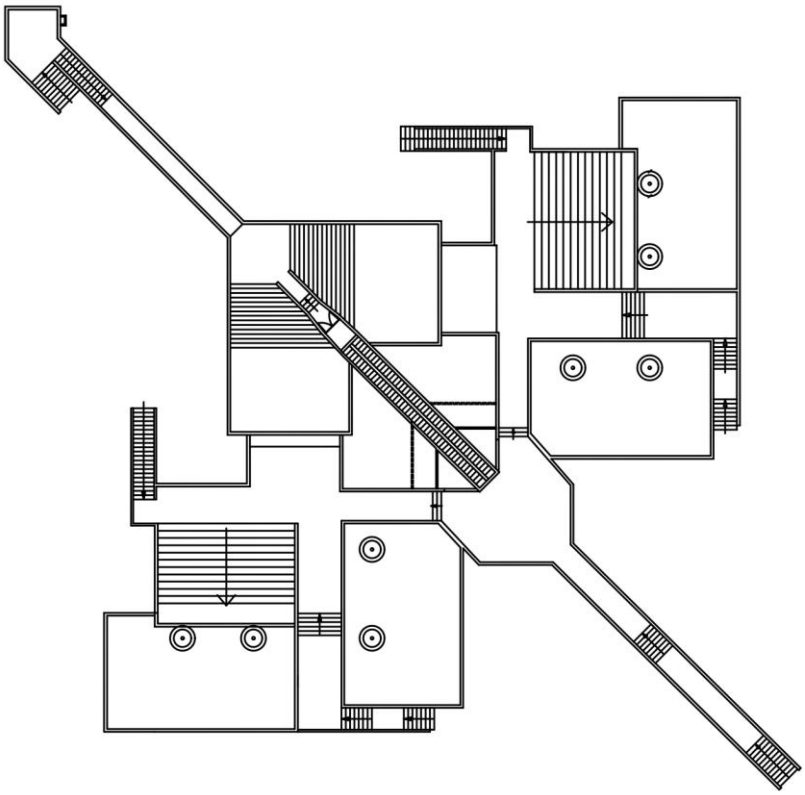


Figura 126 - Pianta delle coperture della scuola Aldo Moro. Scala 1:500 Fonte: Comune di Terni.

Dopo la guerra, il Comune di Terni, sollecitato da artisti locali tra cui Aurelio De Felice, Ilario Ciaurro, Aldo Montesi e Guido Mirimao, avviò l'iter per ottenere

l'autorizzazione all'istituzione di una Scuola Comunale di Arte Applicata. La richiesta venne accolta solo nel 1961 quando il Comune, evidenziando il valore culturale dell'iniziativa, si impegnò a farsi carico degli oneri finanziari. Finalmente, nell'ottobre dello stesso anno l'Istituto entrò ufficialmente in funzione [232].

L'attività didattica dell'Istituto Tecnico Industriale, svolta nella storica sede di viale Brin, venne estesa nel 1945 anche alla formazione di periti chimici-industriali. Questo nuovo indirizzo rispondeva a precise esigenze poste dalla presenza a Terni dell'industria chimica, che si sarebbe consolidata ulteriormente con la costruzione dello stabilimento Polymer [251]. Superata la situazione di emergenza creata dalla guerra, negli anni Cinquanta venne riaffrontato dall'amministrazione provinciale e dal Comune il problema del completamento degli indirizzi didattici e della necessità di una nuova sede per l'Istituto. Vennero così istituiti i corsi di specializzazione in elettrotecnica e in elettronica industriale. L'ampliamento dei corsi finì per vanificare l'utilità della Scuola tecnica che fu quindi soppressa per consentire la nascita dell'Istituto professionale di Stato, che mantenne la sede di viale Brin. I lavori di costruzione della nuova sede, sospesi più volte a causa degli eventi bellici (nel 1940 del progetto dell'ingegnere Piero Grassini erano stati realizzati solo il padiglione dei laboratori e le fondazioni dell'edificio principale) sono stati portati a termine solo nel 1961. Il nuovo edificio, sviluppato su tre piani e situato su un'area di mq. 22.000, si distingue per la densa sequenza di aperture regolari. Nella parte retrostante si trovano i laboratori e le attrezzature sportive.

Approfondimento sulla scuola Leonardo da Vinci

Negli anni Cinquanta, il Comune di Terni affidò a Mario Ridolfi la progettazione di un nuovo istituto scolastico, inserendosi in un percorso progettuale che l'architetto aveva già intrapreso con altri edifici scolastici di rilievo. Tra questi, si annoverano l'Istituto in Piazza d'Armi a Roma, realizzato in collaborazione con l'architetto Adalberto Libera (1925-1926), il Regio Liceo Scientifico di Perugia (1937-1938) e l'Istituto Tecnico Antonio Bordoni a Pavia (1934-1938). La progettazione scolastica rappresentava per Ridolfi un tema di grande interesse, che egli considerava essenziale per la società moderna, come esplicitato dalla sua concezione della scuola quale "tempio della società moderna". Tale visione si radicava non solo nella sua esperienza di progettista, ma anche nel suo ruolo di docente presso l'Istituto Tecnico Galilei di Roma, che gli aveva permesso di maturare una conoscenza diretta delle esigenze funzionali e pratiche degli spazi didattici. Il sito destinato alla nuova scuola media Leonardo da Vinci fu individuato nel piano di ricostruzione postbellica come area per servizi pubblici, in sostituzione di edifici residenziali distrutti dai bombardamenti e classificati come non ricostruibili. Collocato nei pressi della chiesa medievale di San Francesco e del Liceo Ginnasio progettato da Angelo Guazzaroni, il lotto era delimitato da via Antonio Fratti, che costeggiava la chiesa, via Alceo Massarucci, che separava l'area dal liceo, e via Luigi Lanzi, il cui asse visivo terminava nel campanile della chiesa.

L'iter progettuale della scuola si rivelò lungo e articolato, sviluppandosi tra il 1951 e il 1961 con tre versioni principali e sei stesure. La prima versione, elaborata nel 1951, prevedeva un edificio lineare per le aule, disposto parallelamente a via Massarucci, sul quale si innestava ortogonalmente un volume più corto destinato ad accogliere, su ciascun piano, un'aula speciale. La palestra, invece, era concepita come un volume autonomo collocato a sud-est. L'edificio lineare era stato progettato dall'architetto con una sezione gradonata, concepita per garantire l'illuminazione naturale su entrambi i lati delle aule; questo risultato era ottenuto mediante una differenza di altezza tra i corridoi e le aule e attraverso una disposizione sfalsata dei piani. Tale approccio progettuale si ispirava a principi pedagogici avanzati, mirati a favorire una flessibilità spaziale in grado di adattarsi alle esigenze dei metodi didattici

moderni, come chiaramente espresso dallo stesso Ridolfi in una lettera indirizzata al sindaco di Terni nel febbraio del 1952: “l'applicazione di un metodo di insegnamento moderno con possibili variazioni nella disposizione dell'arredo delle aule, con diverse utilizzazioni ed impiego di mezzi didattici variati, richiesti dai pedagoghi più avveduti e dalla età dei giovani ospiti, i quali mal sopportano di stare per ore ed ore fermi nei banchi inchiodati eternamente al suolo, per anni, mentre la loro immaginazione spazia nell'infinito campo del sapere”. Tuttavia, questa soluzione incontrò resistenze da parte del Comitato Tecnico Amministrativo, portando a successive modifiche.

La seconda versione, progettata nel 1953, trasformò l’edificio in una pianta ad L, con un’ala parallela a via Massarucci e una seconda ortogonale lungo via Fratti. Anche in questa nuova configurazione Ridolfi mantenne il principio dell’illuminazione bilaterale (Figura 127), aumentando inoltre l’altezza interpiano delle aule senza variare quella dei corridoi; tuttavia ulteriori richieste di modifica avanzate dal Comitato bloccarono l'approvazione del progetto.

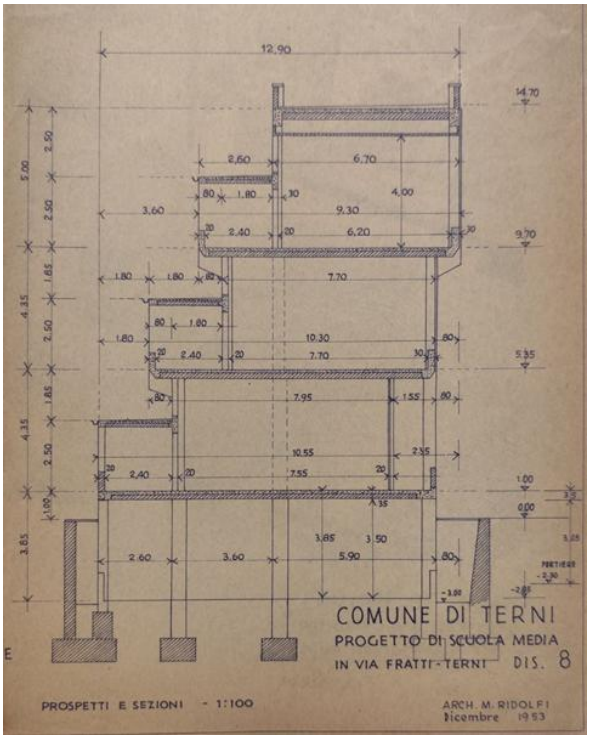


Figura 127 - Sezione trasversale della seconda versione progettuale della scuola Leonardo da Vinci. Disegno dell'arch. Mario Ridolfi del dicembre 1953. Fonte: Archivio di Stato di Terni.

Nella terza versione, sviluppata nel 1955, si discostò significativamente dalle due precedenti, adottando una nuova impostazione progettuale. La pianta dell'edificio assunse una configurazione a U (Figura 128), con *i lati nord e ovest allineati agli assi stradali circostanti, mentre sul lato sud* venne a crearsi una piazza. In questa impostazione vennero abbandonate delle soluzioni previste nelle versioni precedenti, come la palestra autonoma, che fu integrata nel corpo principale dell'edificio, e l'illuminazione naturale bilaterale delle aule, che rappresentava uno degli elementi distintivi delle prime proposte progettuali che Ridolfi privilegiava, come si evince da un suo scritto indirizzato all'assessore alla Pubblica Istruzione del Comune di Terni nel 1957 nel quale esprime il suo rammarico dovuto alla circostanza che "[...] stupidamente il primo progetto, quello con le aule illuminate da ambo i lati, non fu capito dai piccoli funzionari del Genio Civile". Nonostante i significativi cambiamenti, il progetto conservò l'attenzione per i dettagli costruttivi, come i pilastri rastremati in cemento armato, l'uso della pietra sponga[48] per le tamponature esterne e l'integrazione di elementi ceramici decorativi che richiamavano i colori dei motivi decorativi del campanile della chiesa di San Francesco.

[48] L'uso della pietra sponga, materiale tradizionale di Terni, costituisce un richiamo alla storia locale. Si tratta di una roccia tenera, simile al travertino fitoermale, comunemente nota come pietra sponga o spugna, che veniva estratta dalle cave situate vicino alla Cascata delle Marmore sin dall'età romana [252]. Sebbene l'estrazione di questa pietra fosse vietata a partire dal XV secolo, il suo utilizzo fu ripreso da Mario Ridolfi, che la impiegò per le tamponature di alcuni suoi edifici in cemento armato, ristabilendo un legame materiale con la tradizione architettonica della città.

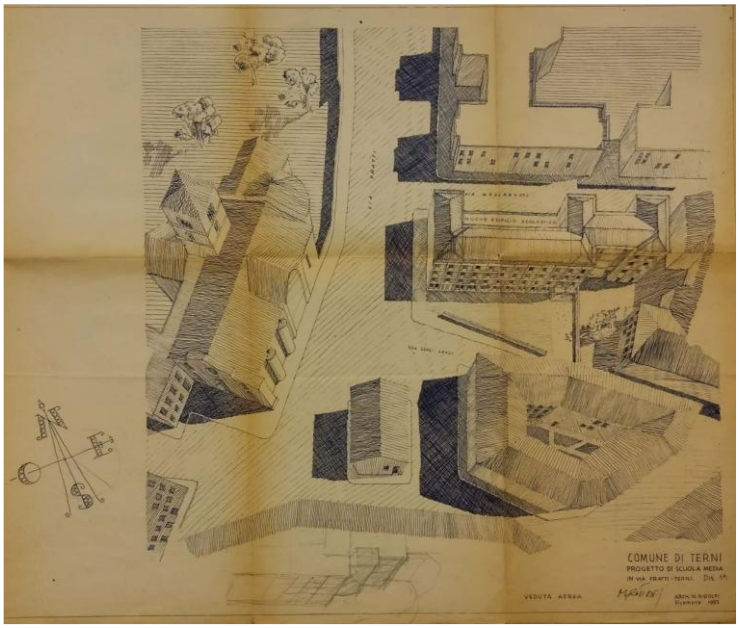


Figura 128 - Veduta aerea dell'area di progetto. Disegno dell'arch. Mario Ridolfi del dicembre 1955. Fonte: Accademia di San Luca.

La versione definitiva del 1956 introdusse ulteriori variazioni, tra cui l'aggiunta di due avancorpi loggiati a capanna sul prospetto sud, che definivano gli ingressi principali e stabilivano un dialogo visivo con il campanile della chiesa medievale (Figura 129). Tale relazione, ricercata da Ridolfi fin dal primo progetto, veniva inoltre rafforzata dagli elementi ceramici presenti nelle sottofinestra e dalla pietra sponga. La struttura in cemento armato, con un passo di 3,40 metri sul fronte longitudinale e di 4,00 metri nei due avancorpi, delineava la composizione metrica dell'edificio, mentre gli infissi e i rivestimenti esterni riflettevano la funzione degli spazi interni, rendendo evidente la destinazione d'uso di ciascun ambiente. La distribuzione complessiva dei piani riflette sostanzialmente quella della prima versione del 1955, con alcune modifiche. In particolare, la scala venne spostata verso il fronte su via Lanzi, dove fu previsto un ingresso secondario per consentire l'accesso alla palestra anche agli studenti delle scuole limitrofe. Inoltre, venne ridotta la profondità dell'edificio nella zona dell'alloggio del custode, con una conseguente riduzione dell'ampiezza dell'atrio di ingresso e l'eliminazione del secondo accesso su via Massarucci. La distribuzione spaziale dei piani superiori, invece, rimase invariata, con le 24 aule orientate prevalentemente verso sud.



Figura 129 - Particolare della facciata principale dell'edificio che si confronta con il campanile della chiesa adiacente. Fotografia dell'autrice.

L'approccio di Ridolfi integrava sensibilità compositiva, attenzione al dettaglio costruttivo e interpretazione innovativa degli spazi scolastici. I suoi progetti rispecchiano infatti la concezione che aveva degli edifici scolastici, che è espressa in una lettera del febbraio 1952 indirizzata al sindaco di Terni, nella quale evidenziava che "è superfluo sottolineare l'importanza che la Scuola, intesa come edificio, assume nello svolgimento dell'insegnamento soprattutto nei giovani individui, e come sia preoccupazione costante di architetti e pedagoghi quella di conferire agli edifici scolastici le migliori condizioni di ambiente, dal punto di vista igienico, psicologico e didattico". Nella configurazione finale, Ridolfi introdusse una serie di spazi destinate ad altre attività, anticipando così principi che sarebbero stati formalizzati solo successivamente con la normativa del 1975 sull'edilizia scolastica.

La scuola media Leonardo da Vinci, con il suo equilibrio tra estetica, funzionalità e tradizione locale, rimane un esempio emblematico della capacità di Ridolfi di progettare un edificio che rispondesse non solo alle necessità educative, ma anche a quelle sociali e culturali del contesto in cui si inseriva.

7.1.5. Dal 1975 ad oggi

L'unica legge operante nel settore dell'edilizia scolastica era la legge n. 412 del 5 agosto 1975 che prevedeva l'assegnazione di finanziamenti a Province e Comuni per il periodo 1975-1980, suddiviso in due trienni. Tuttavia, i finanziamenti stanziati risultavano notevolmente inferiori rispetto alle richieste degli enti locali: in Umbria, a fronte di una richiesta complessiva di 175 miliardi di lire, la legge destinava appena 20 miliardi, pari a circa un nono della cifra richiesta, di cui 1005 milioni assegnati al Comune di Terni [253]. Nel breve periodo, la mobilità interna dovuta ai nuovi insediamenti residenziali nelle aree di Cospea, Campomicciolo, Cesure e Campitello, aveva già iniziato a generare una significativa redistribuzione della popolazione. Questo fenomeno causava uno squilibrio nel fabbisogno scolastico, penalizzando le zone di nuova concentrazione urbana, dove le strutture esistenti risultavano inadeguate rispetto all'aumento della popolazione scolastica. In risposta a tali criticità, l'Amministrazione Comunale di Terni, in conformità con la legge n. 412, elaborò un programma operativo per la realizzazione di nuove attrezzature scolastiche. Gli interventi previsti inclusero l'ampliamento delle scuole elementari del quartiere Le Grazie e di via XX Settembre, l'ampliamento delle scuole medie di Borgo Rivo e la costruzione di una nuova scuola materna, sempre nello stesso quartiere.

Inoltre, l'Amministrazione Comunale cercò di colmare le carenze della politica governativa in materia di edilizia scolastica attingendo alle risorse del proprio bilancio. Questa scelta, sebbene complessa e condizionata dalle ristrettezze della finanza locale, permise di conseguire risultati significativi. Gli sforzi intrapresi consentirono infatti di ampliare notevolmente la rete delle scuole comunali e statali per l'infanzia, di ridurre quasi del tutto il fenomeno dei doppi turni, di limitare il ricorso alle pluriclassi e di costruire nuovi edifici destinati alle scuole elementari e medie. Per esempio dal 1975 ad oggi sono state realizzate nuove scuole per l'infanzia in quartieri come Marmore, Prisciano, Gabelletta, Torre Orsina, S. Martino, Guglielmi, Campitelli, Cardeto, Q. Matteotti, Polymer, Borgo Rivo, S. Giovanni, Cospea, Cardeto, Città Giardino. In totale sono state create 30 sezioni in grado di accogliere 900 bambini.

Secondo quanto riportato in una Nota sul profilo statistico della situazione scolastica a Terni [253], al termine del periodo 1975-1978 il quadro relativo ai lavori effettuati sugli edifici scolastici risultava quello riportato nella Tabella 12.

Grado di istruzione	Da iniziare		Iniziate		Terminate	
	Nuona costr. Completam.	Ristruttur. Ampliamento	Nuona costr. Completam.	Ristruttur. Ampliamento	Nuona costr. Completam.	Ristruttur. Ampliamento
Materne			Polymer B. Rivo S. Giovanni (Cospea) Cardeto	Giardino - campeggiani	Torre orsina S. Martino - Campitelli - Q. Matteotti	Marmore Prisciano Gabelletta Guglielmi Cardeto
Elementari		Campitelli Campomicciolo	Le Grazie S. Giovanni XX Settembre		Stadio (Moro)	Campitelli V. Fiore - S. Rocco - C. Obito - V. Medici
Medie inferiori	Piediluco (Palestra)	Istituto Guglielmi	B. Rivo		B. Bovio	Campitelli S. Martino V. Medici
Medie superiori		IPSIA (Brin)				

Tabella 12 - Quadro delle opere realizzate dal Comune di Terni nell'ambito dell'edilizia scolastica nel periodo 1975 – 1978. Fonte: Nota sul profilo statistico della situazione scolastica a Terni [253].

Nel settembre 1985 l'Istituto Tecnico lasciò la sua sede storica, adeguata sotto il profilo delle strutture e delle dotazioni didattiche, ma divenuta insufficiente a soddisfare le esigenze di una popolazione scolastica in costante crescita. L'istituto si trasferì nella nuova sede di viale Trieste Vicino all'edificio che ospitava l'Istituto tecnico per geometri [254] progettato nel 1969 da Enrico Ascione e Vittorio De Feo. L'edificio è articolato in due blocchi distinti, separati longitudinalmente da un percorso sopraelevato lungo il quale si affacciano i corridoi e le aule speciali. La differenziazione formale tra le due parti riflette la diversa destinazione funzionale (Figura 130): il prospetto principale, caratterizzato da un grande volume inclinato con aperture per la luce naturale e gradoni che formano un piccolo teatro, ospita le aule speciali; l'altro blocco, definito da una maglia regolare di cemento e vetro, è dedicato alle attività didattiche ordinarie [255].

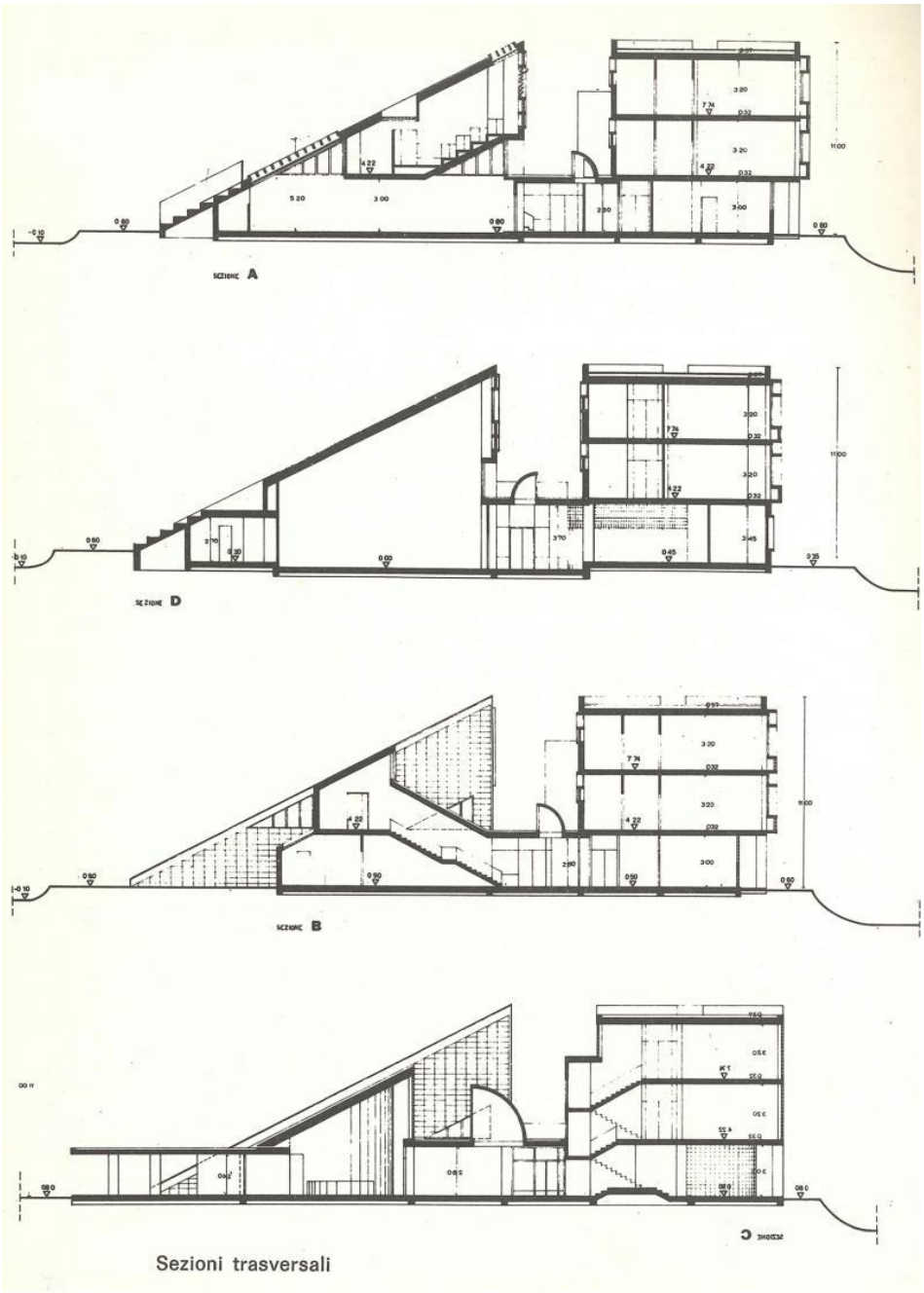


Figura 130 - Sezioni trasversali. Disegni di progetto dell'arch. Vittorio De Feo. Fonte: Conforti C, Dal Co F. [256].

7.2. Situazione attuale e caratterizzazione del campione di studio

La popolazione scolastica della città di Terni relativa all'anno scolastico 2023-2024 è costituita da 11.611 studenti, suddivisi tra scuola dell'infanzia, primaria, secondaria di primo e secondo grado, come illustrato nella Figura 131.

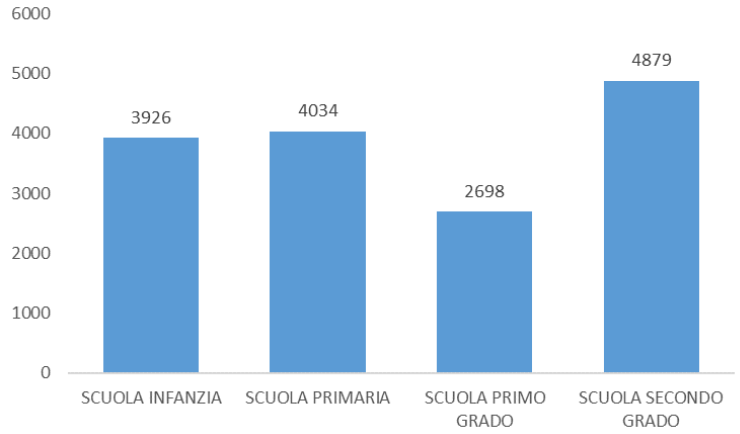


Figura 131 – Popolazione scolastica nel Comune di Terni a.s 2023-2024.
Fonte: Ufficio scolastico del Comune.

L'offerta scolastica pubblicata nel Comune di Terni, al netto dei corsi serali, è attualmente costituita da 79 scuole distribuite su 77 edifici (Tabella 13).

TIPOLOGIA DI SCUOLA - GRADO DI I STRUZIONE	SCUOLE	EDIFICI
SCUOLA INFANZIA	30	34
SCUOLA PRIMARIA	29	25
SCUOLA PRIMO GRADO	8	8
SCUOLA SECONDO GRADO	12	10
ISTITUTO PROFESSIONALE INDUSTRIA E ARTIGIANATO	1	1
ISTITUTO PROFESSIONALE PER I SERVIZI ALBERGHIERI E RISTORAZIONE	2	2
ISTITUTO TECNICO ECONOMICO	1	1
ISTITUTO TECNICO TECNOLOGICO	1	1
LICEO SCIENZE UMANE	1	1
LICEO LINGUISTICO	2	0
LICEO ARTISTICO	1	1
LICEO SCIENTIFICO	2	2
LICEO CLASSICO	1	1

Tabella 13 - Tipologia delle scuole di Terni.

Il grafico riportato in Figura 132 illustra la distribuzione degli edifici scolastici in relazione al loro periodo di costruzione, offrendo una visione d'insieme sull'evoluzione nel tempo descritta nei paragrafi precedenti. I risultati di tale analisi risultano in linea con le tendenze registrate a livello nazionale.

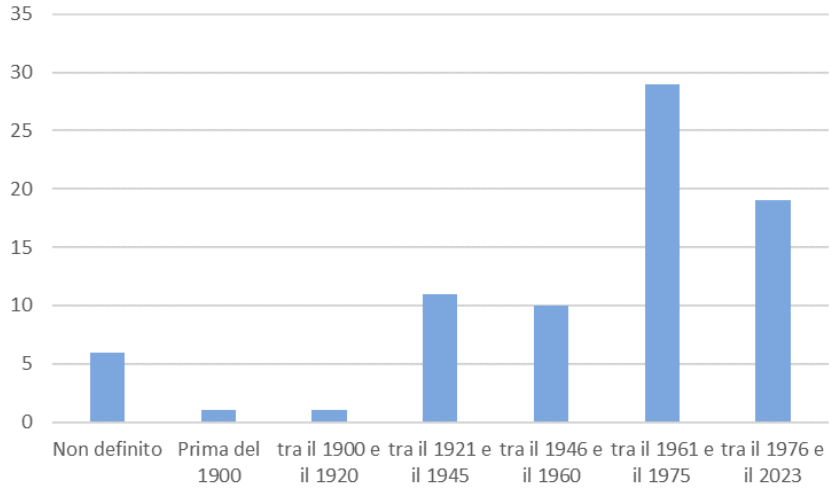


Figura 132 - Distribuzione degli edifici scolastici a Terni in base al periodo di costruzione.

La maggior parte degli edifici scolastici attualmente in uso risulta progettata e realizzata sin dall'origine per ospitare attività didattiche, come evidenziato dalla Figura 133. Nonostante ciò, anche a Terni, esiste una quota non trascurabile di edifici che, pur essendo oggi adibiti a scuole, non erano originariamente destinati a tale funzione.

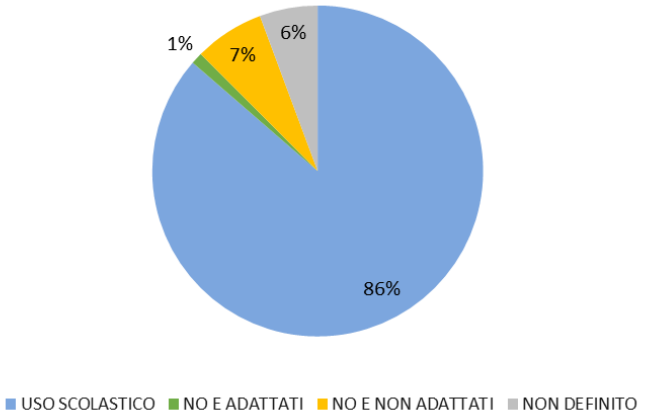
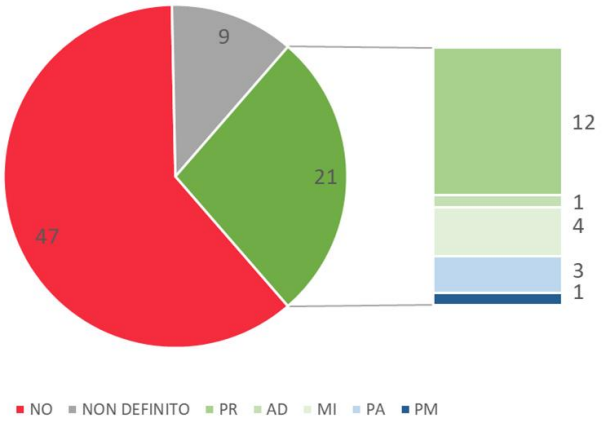


Figura 133 - Destinazioni d'uso originarie degli edifici scolastici a Terni.

Il Comune di Terni si trova in zona sismica 2. La situazione rispetto alla normativa antisismica risulta leggermente migliore rispetto alla media nazionale (Figura 134): il 27% degli edifici scolastici risulta progettato e/o adeguato e/o migliorato sismicamente, a fronte di una media nazionale del 21%.



LEGENDA		
NON DEFINITO	Edifici per cui risulta NON DEFINITO progettazione, adeguamento o miglioramento antisismico	
NO	Edifici per cui NON risultano progettazione, adeguamento o miglioramento antisismico	
P-A-M	Edifici per cui risulta esserci stata una progettazione e/o adeguamento e/o miglioramento antisismico. Comprende i casi seguenti:	
	PR	Edifici per cui risulta la sola progettazione antisismica
	AD	Edifici per cui risulta il solo adeguamento antisismico
	MI	Edifici per cui risulta il solo miglioramento antisismico
	PA	Edifici per cui risulta sia progettazione che adeguamento antisismico
	PM	Edifici per cui risulta sia progettazione che miglioramento antisismico

Figura 134 - Distribuzione degli edifici scolastici del Comune di Terni rispetto alla normativa antisismica.

Per quanto riguarda invece gli accorgimenti per la riduzione dei consumi (Figura 135), la percentuale (23%) degli edifici che ne sono sprovvisti è esattamente in linea con il dato nazionale, mentre è migliore la situazione relativa agli edifici con accorgimenti (65% rispetto al 57%).

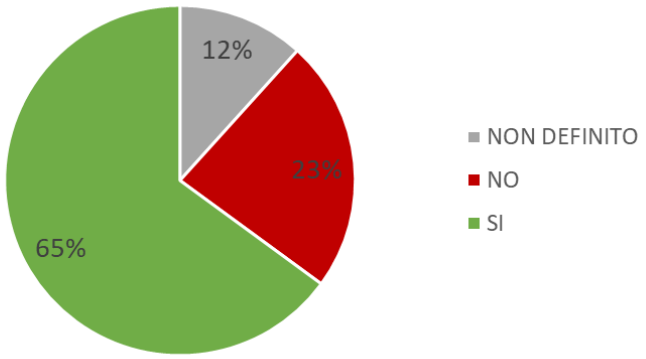


Figura 135 – Adozione di accorgimenti per la riduzione dei consumi energetici a Terni.

Analizzando più nel dettaglio, gli interventi più diffusi per il miglioramento dell'efficienza energetica sono quelli illustrati nella Figura 136.

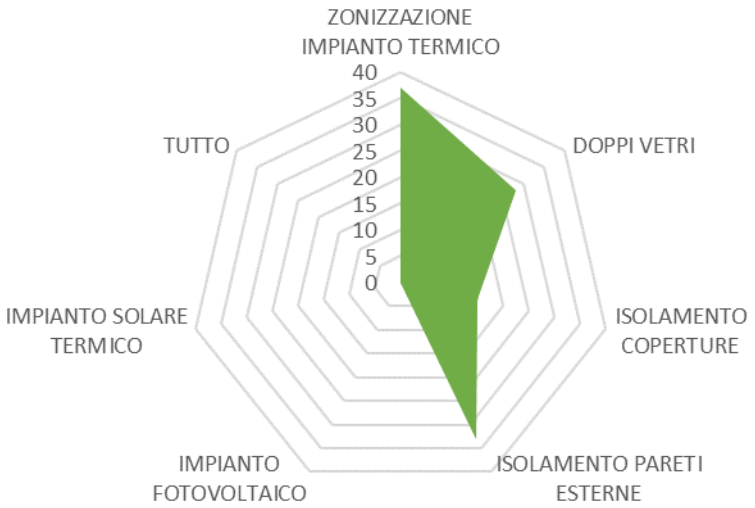


Figura 136 - Interventi di riduzione dei consumi energetici adottati a Terni.

Tra gli accorgimenti indicati nello schema, sono stati analizzati (Figura 137) i tre adottati più frequentemente: doppi vetri, isolamento delle coperture e isolamento delle pareti esterne. Risulta che nella maggior parte (90%) si ha almeno un accorgimento, anche se una porzione rilevante (pari al 20% del campione esaminato) si limita ad adottare esclusivamente i doppi vetri, una

soluzione che, pur utile, risulta insufficiente per un miglioramento sostanziale delle prestazioni energetiche complessive dell'edificio. Solo il 14%, invece, ha implementato tutti e tre gli interventi. Nel complesso, i dati risultano leggermente migliori rispetto alla media nazionale.

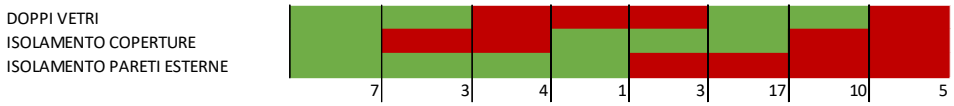


Figura 137 - Interventi di riduzione energetica più adottati a Terni.

Per condurre un'analisi più approfondita, si è deciso di focalizzare lo studio su una categoria specifica di edifici scolastici. La scelta è ricaduta sulle scuole primarie (Tabella 14), che rappresentano un campione significativo sia dal punto di vista della tipologia strutturale sia in relazione al periodo di costruzione, offrendo al contempo una maggiore disponibilità di materiali utili per l'analisi. In una fase successiva, tra queste scuole sarà selezionato un edificio di riferimento per il progetto di intervento integrato.

Il materiale raccolto include rilievi, relazioni tecniche e prove sui materiali forniti dal Comune di Terni, i dati dell'Anagrafe dell'Edilizia Scolastica Nazionale, disponibili sul sito Scuola in Chiaro, e quelli non pubblicati messi a disposizione dall'Anagrafe Regionale. Al fine di gestire e organizzare in maniera efficace tutte le informazioni, è stata elaborata una scheda, articolata in sei sezioni. Le prime tre comprendono i dati identificativi dell'edificio, il suo inquadramento e le informazioni di carattere generale. Le ultime tre sezioni si concentrano su aspetti specifici, comprendendo l'analisi morfo-dimensionale, l'involucro e gli impianti e gli aspetti costruttivi. In Appendice D - Schede sono riportati il manuale di compilazione e una versione della scheda non compilata con lo scopo di renderla uno strumento utile per la raccolta e l'organizzazione delle informazioni in ambito edilizio scolastico e favorire un utilizzo esteso e generalizzabile. Inoltre, vengono presentati due esempi di applicazione alle scuole di Terni. Per l'elaborazione di questa scheda, sono state prese come riferimento la Scheda Edificio di rilevazione dei dati dell'Anagrafe dell'Edilizia Scolastica [80], implementata nel software ARES 2.0, e la scheda di censimento e catalogazione dei beni industriali del Comune di Roma [257], sviluppata nell'ambito della collaborazione scientifica tra l'Associazione Italiana per il

Patrimonio Archeologico Industriale (AIPAI) e il Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale (DICEA) della Sapienza Università di Roma.

Istituto Principale	Scuola	Tipo di scuola	Anno di costruzione	Tipologia strutturale
Mazzini	G. Mazzini	Primaria	1961/75	muratura / cemento armato
	Anita Garibaldi	Primaria	1945	muratura
San Giovanni	San Giovanni	Primaria	1964	muratura
	Cianferini	Primaria	1962	muratura
Aldo Moro	Aldo Moro	Primaria	1973-1976	cemento armato
	Cesare Battisti	Primaria	1969	muratura
Don Milani	Valenza	Primaria	1967	muratura
	Teofoli	Primaria	1990	cemento armato
Oberdan	Oberdan	Primaria	1936	muratura
	Oberdan succursale	Primaria	2008	cemento armato
	Marco di Sarra	Primaria	1968	muratura
Marconi	Giacomo Matteotti	Primaria	1970	muratura / cemento armato
Giovanni XXIII	Giosuè Carducci	Primaria	1960	muratura
	Campitello	Primaria	ante 1970	muratura
Felice Fatati	Gabelletta	Primaria	ante 1960	muratura
	Cesi Stazione	Primaria	1968	muratura
Benedetto Brin	Vascigliano	Primaria	1959	muratura / cemento armato

Tabella 14 - Elenco scuole primarie con anno di costruzione e tipologia strutturale.

Conclusa questa fase, tra il campione di scuole primarie ne è stata scelta una come oggetto di studio per il progetto di intervento integrato. I criteri di selezione hanno previsto che l'edificio fosse in cemento armato, dotato di uno spazio circostante adeguato e costruito senza alcun accorgimento sismico, caratteristiche che lo rendono adatto all'applicazione dell'esoscheletro.

8. APPLICAZIONE DELL'ESOSCHELETRO ALL'EDIFICIO CASO DI STUDIO

8.1. Edificio di riferimento

Tra le scuole primarie analizzate, è stato selezionato un edificio di riferimento per l'applicazione dell'intervento integrato oggetto della ricerca. La scelta è avvenuta successivamente all'individuazione di specifici criteri quali l'epoca di costruzione precedente all'introduzione delle normative sismiche attuali, l'assenza di interventi di adeguamento strutturale nel tempo, lo scheletro portante in cemento armato, la geometria semplice e lineare della costruzione, priva di complessità architettoniche significative, che lo rende idoneo all'inserimento di un esoscheletro e la disponibilità di spazi liberi intorno alla scuola. Dunque, l'edificio che soddisfa tali requisiti e che è stato scelto come caso di studio applicativo è la scuola primaria Matteotti (vedi Scheda SP_TR_19), situata nella zona sud-est della città di Terni, nei pressi del quartiere omonimo, costituito da due distinti agglomerati sviluppati in periodi storici differenti.

L'insediamento semirurale del Villaggio "Italo Balbo", oggi chiamato Matteotti I, fu costruito per accogliere gli operai della Società Terni ed è stato uno dei primi interventi volti a favorire l'espansione urbana verso l'area a sud del fiume Nera. La Società, sulla base di un progetto realizzato nel 1938 dal proprio ufficio tecnico, chiese al Comune l'autorizzazione per la costruzione di due lotti in un'area di sua proprietà da realizzare in più fasi che si sarebbero susseguite nel tempo. Nonostante nel 1940 fossero già stati completati 164 alloggi, l'inizio del secondo conflitto mondiale e le mutate politiche aziendali della Società Terni ostacolarono l'esecuzione del progetto, determinando presto l'interruzione delle attività; di conseguenza, il villaggio rimase privo dei servizi previsti, tra cui la scuola elementare, che venne temporaneamente collocata in uno degli alloggi. Al termine della guerra, la Società Terni avviò un'opera di ricostruzione del quartiere che comprendeva la riparazione dei danni subiti durante i bombardamenti e la costruzione di un secondo lotto di 124 alloggi distribuiti in 31 palazzine. Attualmente il quartiere Matteotti I è costituito da 59 palazzine quadrifamiliari sviluppate su più livelli e caratterizzate da un'architettura essenziale. Le unità abitative, articolate in quattro diverse tipologie, sono dotate di ingressi indipendenti per ciascuna famiglia e di porzioni di terreno destinate

a uso agricolo (Figura 138). Questa configurazione riflette un modello insediativo ricorrente per quanto riguarda i quartieri operai dell'epoca, spesso integrati in contesti rurali e progettati con orti-giardino. Tali spazi non solo rispondevano all'esigenza di autosostentamento, ma rappresentavano anche una misura compensativa per garantire risorse alimentari agli operai in caso di interruzioni lavorative o licenziamenti temporanei.



Figura 138 - Villaggio semirurale Matteotti I. Fonte: Valter Ballarini [241].

Nel secondo dopoguerra, l'Amministrazione Comunale assunse un ruolo attivo nella promozione di numerose iniziative relative all'edilizia popolare. In questo contesto, accanto al tessuto edilizio preesistente, venne realizzato il nuovo villaggio, chiamato Matteotti II, progettato nel 1970 dall'architetto Giancarlo De Carlo [258] su commissione della Società Terni. Questo nasce come un intervento di rinnovamento urbano volto a sostituire il vecchio quartiere, con l'obiettivo di creare un complesso che comprendesse 800 abitazioni, l'inserimento di spazi verdi e servizi pubblici e la separazione dei flussi automobilistici e pedonali. Inoltre, l'approccio adottato si fondava su un processo partecipativo finalizzato a coinvolgere attivamente i futuri abitanti nella progettazione. I lavori ebbero inizio nel 1972 e si conclusero nel 1975, ma l'attuazione del progetto fu ostacolata dalle notevoli difficoltà economiche legate alla costruzione del primo lotto, che portarono la Società Terni a

interrompere la realizzazione delle opere previste, tra cui anche le infrastrutture. Ciò impedì ancora una volta al villaggio Matteotti di ottenere l'autonomia necessaria per essere considerato come un quartiere indipendente, lasciando così l'area urbana segnata da un continuo processo di trasformazione. Comunque, nonostante la mancata conclusione dell'intero piano, il villaggio Matteotti II rappresenta un esempio di innovazione urbanistica di grande rilevanza storica e architettonica per la città di Terni. Il suo disegno, che si sviluppa attraverso un sistema di unità abitative sovrapposte e intervallate da spazi destinati alla circolazione sia pedonale che veicolare, crea un complesso urbano particolarmente articolato.



Figura 139 - Villaggio Matteotti II progettato dall'architetto Giancarlo De Carlo. Foto © Alessandro Lanzetta.

L'edificio scolastico del villaggio Matteotti è stato realizzato tra la fine degli anni Sessanta e l'inizio degli anni Settanta ed è situato all'interno di un isolato delimitato dal tracciato stradale di Via Marie Curie, dal verde pubblico attrezzato su due lati e da un parcheggio lungo Via Visetti utilizzato per le necessità dell'attività scolastica. L'area si estende su un lotto di forma pressoché

rettangolare di circa 5.280 mq il cui terreno presenta un dislivello di circa 2 metri, che sale verso il lato sud-ovest, dove si trova il complesso di edifici che ospita la scuola primaria Matteotti. Questa (Figura 140) è costituita da tre corpi di fabbrica distinti e scindibili per modalità costruttiva, epoca di realizzazione e forma: il primo edificio (Edificio 1) ha una pianta rettangolare e si sviluppa su tre livelli, mentre il secondo (Edificio 2), adiacente al precedente e di forma analoga, si sviluppa su un unico livello. Il terzo blocco (Edificio 3), invece, presenta una configurazione a 'L', con il lato lungo disposto parallelamente ai primi due edifici e il lato corto che funge da elemento di connessione tra questi ultimi. Nel 1966 è iniziata la costruzione del primo edificio; successivamente, a partire dal 1972, sono stati aggiunti gli Edifici 2 e 3, completando il complesso nella sua configurazione attuale.

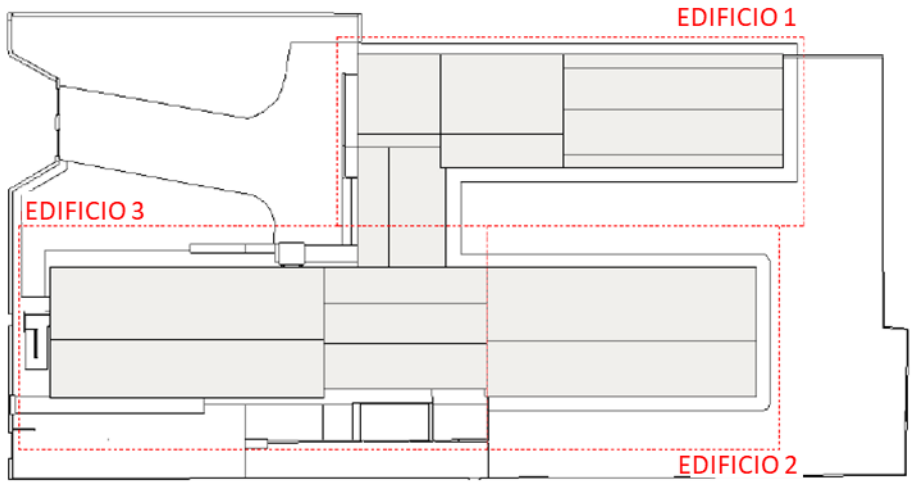


Figura 140 – Complesso di edifici della scuola primaria Matteotti.

La superficie coperta dell'edificio è di circa 2.800 m², con un volume complessivo di circa 11.700 m³. L'altezza in gronda varia da 4,00 m a 10,50 m, conferendo alla struttura una significativa articolazione volumetrica. Nel corso degli anni l'edificio non è stato oggetto di interventi significativi di ristrutturazione né di adeguamenti normativi specifici, pertanto presenta rilevanti carenze sotto il profilo strutturale, impiantistico e igienico-sanitario. Data l'estrema necessità, è stato elaborato un progetto di recupero, finanziato grazie ai fondi del MIUR (ora Ministero dell'Istruzione e del Merito) e al cofinanziamento del bilancio

comunale, con l'avvio dei lavori nel 2022. Gli interventi previsti riguardano la riorganizzazione funzionale degli spazi, il miglioramento dell'efficienza e del risparmio energetico, l'adeguamento alle normative sismiche e antincendio, oltre all'eliminazione delle barriere architettoniche. Nonostante il progetto sia significativo, poiché affronta congiuntamente molteplici aspetti e riconosce l'importanza di un approccio integrato, non tiene conto delle interazioni tra le diverse discipline progettuali e delle possibili sinergie o interferenze che possono emergere. Ad esempio, a livello strutturale, la scelta di inserire setti portanti risponde alle necessità di sicurezza sismica, ma risulta penalizzante rispetto alla creazione di spazi flessibili e innovativi, necessari per rispondere alle nuove esigenze educative. Questa mancanza di coordinamento multidisciplinare rappresenta un limite del progetto, che potrebbe essere superato attraverso una maggiore integrazione tra i diversi ambiti progettuali. Inoltre, sebbene il progetto sia stato concepito per intervenire sull'intero edificio, le difficoltà realizzative e le limitazioni economiche hanno permesso di realizzarlo esclusivamente sugli edifici 1 e 2.

Dal momento che l'immobile è attualmente oggetto degli interventi di ristrutturazione, non è stato possibile effettuare un rilievo diretto per lo studio dell'edificio in esame. Pertanto, l'analisi si è basata sui disegni originali, gli studi forniti dal Comune, i rilievi, le elaborazioni grafiche, le relazioni e le indagini condotte dallo studio di progettazione responsabile dei lavori in corso che sono stati messi a disposizione. Le informazioni raccolte hanno consentito di esaminare e analizzare lo stato di fatto dell'edificio antecedente l'inizio degli interventi, costituendo la base per lo sviluppo della proposta progettuale. Inoltre, il modello BIM fornito (Figura 141) ha permesso non solo una comprensione dettagliata della configurazione spaziale e distributiva dell'edificio, ma è stato altresì utilizzato come base per l'elaborazione e la rappresentazione della proposta progettuale presentata.

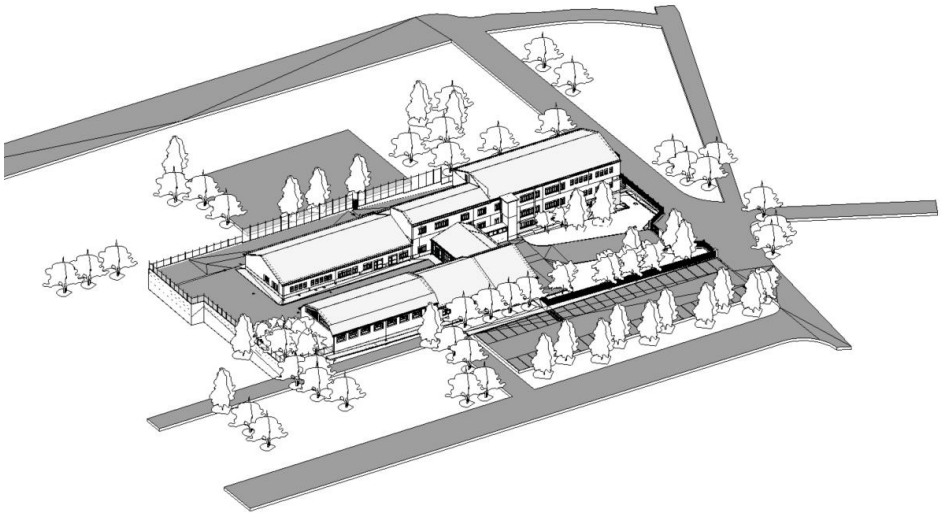


Figura 141 – Modello BIM dell'edificio scolastico Matteotti. Fonte: studio ATIproject.

8.1.1. Analisi funzionale

Dal punto di vista compositivo, i tre corpi di fabbrica sono collegati tramite un ampio atrio centrale, che svolge la funzione sia di spazio di distribuzione sia di elemento di connessione tra le diverse parti della scuola. Tale atrio, situato all'interno dell'Edificio 3, funge anche da ingresso principale, localizzato sul fronte prospiciente via Maria Curie. Il primo edificio si sviluppa su tre livelli: il piano seminterrato (Figura 142), all'interno del quale sono presenti la mensa, con un accesso indipendente in prossimità dell'area di carico/scarico per garantire la separazione dei flussi, e i locali ad essa connessi (cucina, due dispense, due bagni per il personale e accesso di servizio), servizi igienici, archivio e locali tecnici; il piano terra (Figura 143) e il piano primo (Figura 144), dedicati alle aule didattiche, ai laboratori e a una biblioteca, oltre ai servizi igienici. Il secondo corpo, limitrofo a quello precedente e anch'esso di forma rettangolare, si sviluppa unicamente al piano terra in cui sono presenti la direzione didattica, la biblioteca insegnanti, i laboratori, le aule e i bagni; anche il terzo blocco si estende esclusivamente al piano terra ed è composto da atrio, aula informatica, sala polivalente, palestra e spazi di servizio ad essa connessi (spogliatoi, deposito attrezzi, ripostiglio e locale medico) con accesso

indipendente per attività extrascolastiche. Come emerge dal disegno in pianta (Figura 143) viene adottato uno schema distributivo a corridoio.

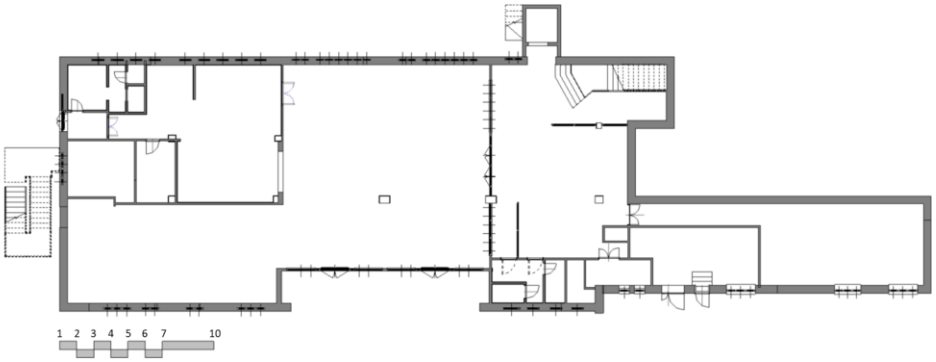


Figura 142 - Pianta del piano seminterrato. Fonte: modello Revit elaborato dallo studio ATIproject.



Figura 143 - Pianta del piano terra. Fonte: modello Revit elaborato dallo studio ATIproject.

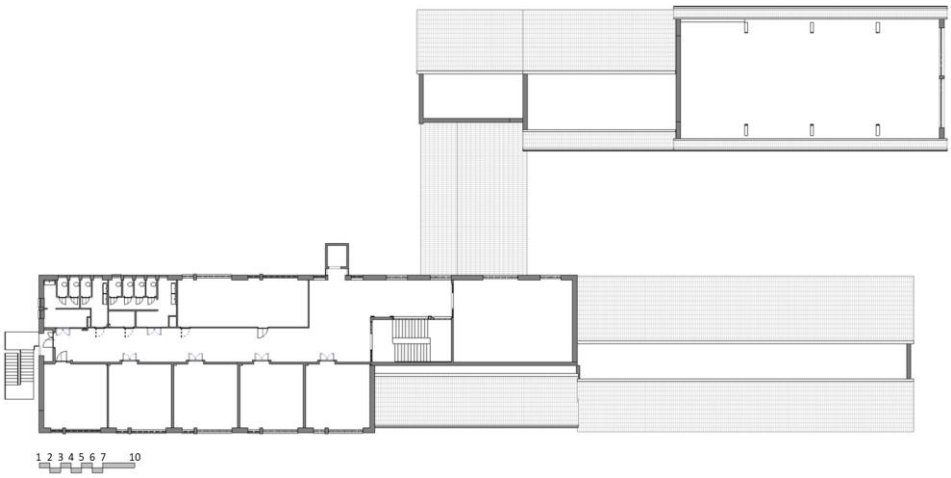


Figura 144 - Pianta del primo piano. Fonte: modello Revit elaborato dallo studio ATIproject.

Per valutare l'adeguatezza degli spazi rispetto alle normative vigenti, sono state effettuate verifiche basate sui parametri minimi definiti dal D.M. 18 dicembre 1975 "Norme tecniche relative all'edilizia scolastica" e dalle Linee Guida MIUR del 2013. L'analisi degli spazi evidenzia il rispetto delle superfici minime richieste, pur emergendo alcune criticità in termini di flessibilità e innovazione degli ambienti didattici, che saranno discusse nei capitoli successivi. Inoltre, si rileva l'assenza degli spazi interciclo previsti dalla normativa del 1975, sottolineando ulteriormente la necessità di adeguamenti per soddisfare pienamente gli standard normativi e funzionali.

L'analisi del sistema distributivo consente di valutare sia la quantità che l'organizzazione degli spazi all'interno dell'edificio. Nel plesso Matteotti sono presenti quindici classi che possono ospitare un massimo di 20 alunni ciascuna. Le aule destinate alle attività didattiche occupano circa 600 mq, corrispondenti al 21% della superficie complessiva della scuola. Dall'analisi condotta si evince che la maggior parte degli spazi della scuola, pari a 820 mq ovvero circa il 29% della superficie totale, è attualmente destinata esclusivamente a funzioni distributive (Figura 145). Questi spazi, sebbene essenziali per garantire la circolazione e l'accessibilità all'interno dell'edificio, risultano al momento sottoutilizzati; in molti casi, infatti, gli spazi connettivi della scuola sono concepiti come semplici corridoi o atri di passaggio, privi di una funzione attiva o integrata con le attività didattiche e sociali. Per questo l'ampiezza e

l'articolazione di tali spazi rappresentano una risorsa di primaria importanza nell'ottica di un intervento di riqualificazione poiché costituiscono uno dei principali elementi di potenziale trasformazione dell'edificio. La presenza di ambienti di connettività così ampi offre l'opportunità di ripensarli non solo come luoghi di transito, ma anche come spazi multifunzionali e adattabili ad altre funzioni. Grazie alla loro flessibilità, infatti, tali spazi possono essere riconfigurati per ospitare attività complementari, quali aree di apprendimento informale, spazi di incontro e collaborazione o ambienti dedicati al relax e alla creatività degli studenti. Infine, l'edificio ospita numerosi altri ambienti che, se opportunamente riorganizzati, potrebbero rivelarsi risorse strategiche in vista di un ripensamento complessivo della scuola, sia nel breve che nel lungo periodo.

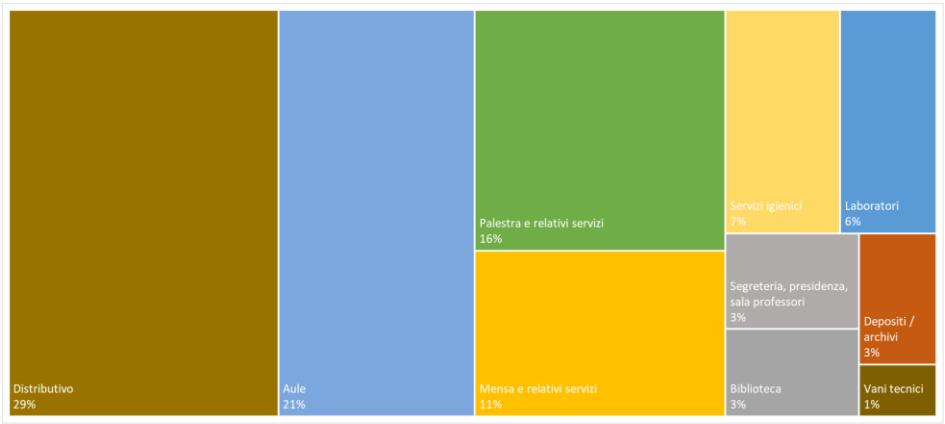


Figura 145 - Analisi delle quantità degli spazi della scuola primaria Matteotti.

8.1.2. Caratteristiche costruttive

L'edificio scolastico analizzato non presenta nessuna peculiarità architettonica di pregio. Dal punto di vista strutturale, presenta un sistema costruttivo in calcestruzzo armato tipico dell'epoca della sua costruzione. Le strutture orizzontali sono realizzate con solai latero-cementizi di diverse altezze e solai auto portanti SAP che verranno analizzati nel dettaglio nell'analisi strutturale. Per tutti i vari blocchi vengono realizzati sistemi di copertura a più falde, inclinate con diversi angoli.

Le tamponature sono realizzate con una muratura a cassetta composta esternamente da blocchi di laterizio semipieni con spessore variabile tra 120 mm e 130 mm, e internamente da tavelloni in laterizio con spessore di 40 mm, separati da un'intercapedine d'aria di spessore variabile.
Le finestre, caratterizzate da una struttura in alluminio a taglio freddo, presentano uno spessore complessivo di 6 cm e sono dotate di vetro singolo.
Infine, per quanto riguarda gli elementi di comunicazione verticale, le rampe delle scale sono realizzate interamente con solai SAP; l'ascensore, non previsto nel progetto originale, è stato aggiunto successivamente nel corso di un intervento effettuato nel 2015, insieme alla scala antincendio. Entrambi questi elementi sono stati collocati all'esterno del primo corpo di fabbrica, in conformità con le normative vigenti e al fine di migliorare l'accessibilità e la sicurezza dell'edificio.

8.1.3. Analisi strutturale

Tutti e tre i blocchi che compongono l'edificio della scuola primaria Matteotti sono delle strutture intelaiate in cemento armato (Figura 146), realizzate sulla base di un progetto redatto secondo le norme vigenti all'epoca di costruzione e quindi molto probabilmente non rispettose dei vincoli, molto più stringenti, imposti dalle attuali normative tecniche di riferimento. Il sistema di fondazioni è a plinti isolati ad eccezione dell'edificio 1, e di parte dell'edificio 3, in cui sono presenti alcune travi di collegamento tra gli elementi di fondazione. La differenza dei tempi realizzativi tra l'edificio 1, costruito nel 1966, e gli edifici 2 e 3, costruiti nel 1972, si traduce in una differenziazione del comportamento strutturale dell'edificio nel suo insieme: i blocchi 2 e 3, infatti, anche se realizzati in adiacenza al primo blocco, sono separati da giunti che eliminano ogni dipendenza strutturale reciproca tra le diverse unità.

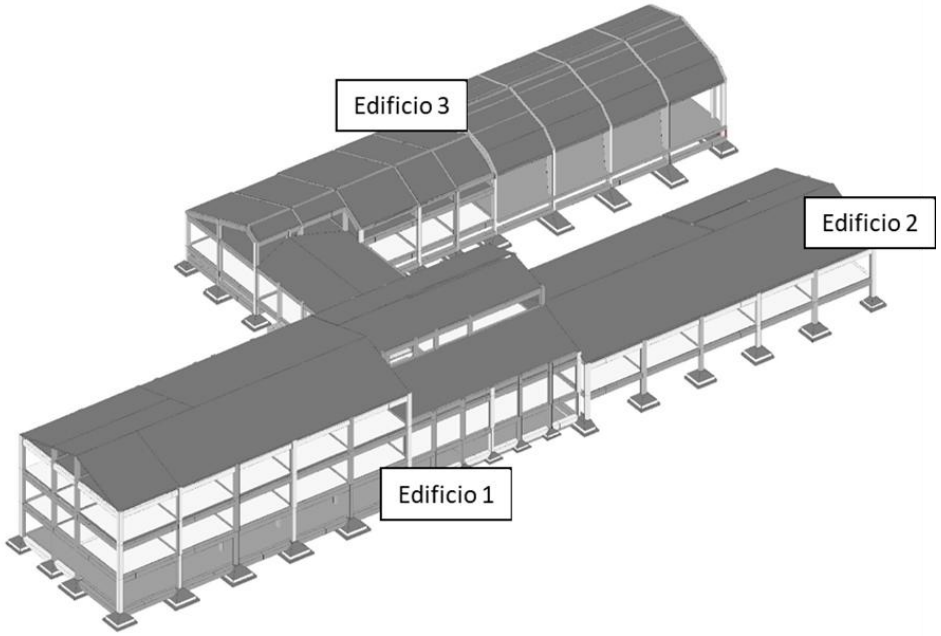


Figura 146 - Modello Revit della struttura dell'edificio scolastico con suddivisione nei tre blocchi principali. Fonte: Studio ATI Project.

Dunque, dal momento che ciascun blocco può essere considerato come una struttura indipendente, è stato scelto di svolgere le analisi e le verifiche sul blocco 1 che, oltre a essere il primo fabbricato costruito, rappresenta l'unità strutturale più complessa e articolata sia per la configurazione geometrica che per la distribuzione dei carichi (Figura 147). La struttura è stata completamente realizzata in cemento armato gettato in opera.

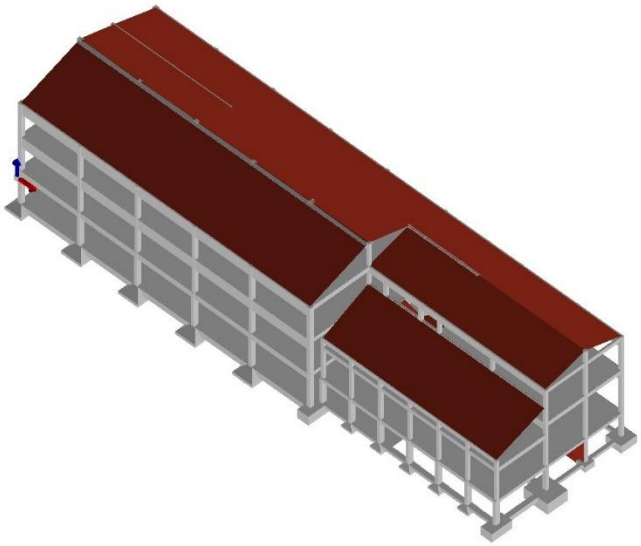


Figura 147 - Vista tridimensionale del modello strutturale realizzato con il programma PRO_SAP.

Considerata l'epoca di costruzione, l'edificio è stato progettato secondo le Norme Tecniche emanate con il Regio Decreto n. 2229 del 16 novembre 1939 dal titolo "Norme per la esecuzione delle opere in conglomerato cementizio semplice od armato"; la struttura, infatti, è tipica degli edifici costruiti negli anni '60 per soli carichi gravitazionali. Poiché non è stato possibile effettuare un rilievo diretto in quanto l'edificio è attualmente oggetto di lavori di riqualificazione, le elaborazioni grafiche e il modello strutturale sono stati realizzate grazie alle informazioni presenti nella documentazione fornita dal Comune di Terni che ha messo a disposizione gli elaborati originali di progetto (Figura 148) e le relazioni tecniche e i rilievi effettuati da professionisti. Questi documenti riportano le informazioni generali sulla geometria e sulle caratteristiche costruttive del manufatto e quelle di dettaglio sugli elementi che compongono la struttura; hanno quindi permesso di identificare l'organizzazione strutturale nel suo complesso, la posizione, le dimensioni e le armature di travi, pilastri e scale, la tipologia e l'orditura dei solai e gli elementi non strutturali quali tamponamenti e tramezzature come richiesto dalla normativa attuale.

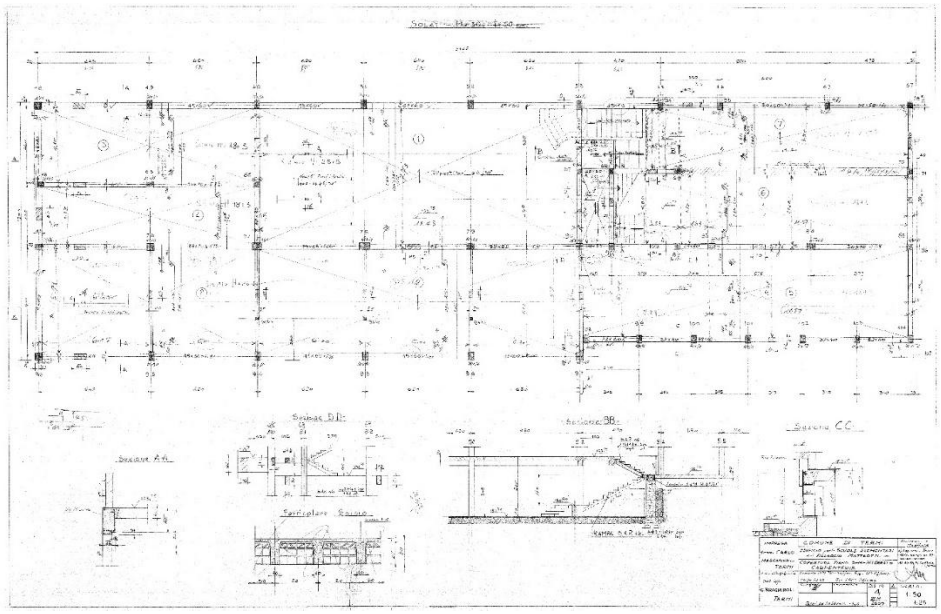


Figura 148 - Disegno originale della carpenteria del primo piano del blocco 1.
Fonte: Comune di Terni.

Per quanto riguarda la caratterizzazione meccanica dei materiali, sono state consultate le relazioni delle due campagne di indagine effettuate nelle date del 16/03/2015 e 01/04/2021. La Tabella 15 illustra i valori adottati per le resistenze del calcestruzzo e dell'acciaio dei ferri di armatura, che derivano dalla media complessiva delle resistenze ottenute dai due diversi piani di indagine.
Le informazioni desunte dai documenti analizzati permettono di raggiungere un livello di conoscenza[49] accurata corrispondente a LC3, che rende possibile l'adozione di un fattore di confidenza FC pari ad 1.

[49] Il livello di conoscenza è definito nel paragrafo C8.5.4 della Circolare Esplicativa per le NTC 2018 in cui, tra i diversi requisiti necessari per raggiungere il livello LC3, si specifica che: "la disponibilità di un rilievo geometrico completo e l'acquisizione di una conoscenza esaustiva dei dettagli costruttivi sono da considerarsi equivalenti alla disponibilità di documenti progettuali originali, comunque da verificare opportunamente nella loro completezza e rispondenza alla situazione reale". In questo caso, dunque, le carpenterie originali e il rilievo effettuato dallo studio di progettazione responsabile degli interventi di riqualificazione attualmente in corso, hanno compensato l'impossibilità di eseguire un rilievo diretto.

CALCESTRUZZO			
R_{ck}	24,07	N/mm^2	Resistenza cubica caratteristica a compressione
f_{ck}	19,98	N/mm^2	Resistenza cilindrica a compressione
α_{cc}	0,85	-	Coefficiente riduttivo per resistenze di lunga durata
γ_c	1,5	-	Coefficiente parziale di sicurezza
f_{cd}	11,32	N/mm^2	Resistenza di compressione di calcolo
f_{ctm}	2,21	N/mm^2	Resistenza media a trazione
f_{ctd}	1,03	N/mm^2	Resistenza di trazione del calcestruzzo
f_{cm}	27,98	N/mm^2	Resistenza cilindrica media
E_{cm}	29955,53	N/mm^2	Modulo di resistenza del calcestruzzo
ACCIAIO			
f_{yk}	378,55	N/mm^2	Tensione di snervamento acciaio
γ_s	1,15	-	Coefficiente parziale di sicurezza
f_{yd}	329,17	N/mm^2	Resistenza di calcolo acciaio
E_s	200000	N/mm^2	Modulo di resistenza dell'acciaio

Tabella 15 - Caratteristiche meccaniche dei materiali esistenti.

La modellazione e la verifica della struttura nel suo insieme è stata condotta con l'ausilio del programma di calcolo agli elementi finiti PRO_SAP. In generale, le strutture portanti sono state modellate come strutture intelaiate in cemento armato e quindi rappresentate da elementi monodimensionali (elementi frame D2) caratterizzati dalle rispettive proprietà di deformabilità e resistenza degli elementi che rappresentano (travi e pilastri). Gli orizzontamenti sono stati modellati con elementi bidimensionali (elementi shell); i solai latero-cementizi con caldana uguale o superiore a 4 cm sono stati considerati infinitamente rigidi nel proprio piano. Infine, la sovrastruttura è stata modellata con vincoli di

incastro alla base, in corrispondenza della quota d'attacco dei pilastri sul plinto di fondazione.

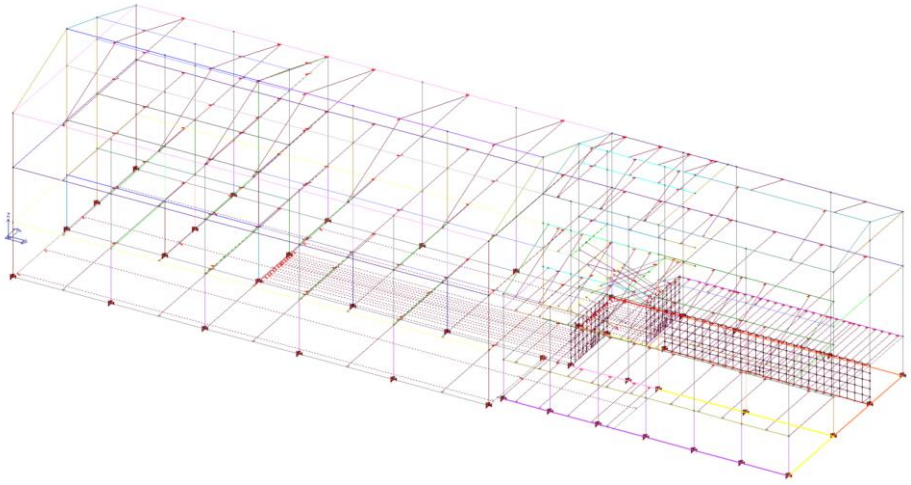


Figura 149 - Rappresentazione grafica del modello strutturale creato con il software agli elementi finiti PRO_SAP.

In generale, nell'edificio 1 ci sono due tipi di solaio: quello latero-cementizio gettato in opera e il solaio SAP. Grazie alle indagini condotte tramite videoendoscopia, è stato possibile individuare nel dettaglio nove differenti tipologie di chiusure orizzontali. In particolare, facendo riferimento ai vari piani del primo blocco si ha (Tabella 16):

Identificativo	Tipologia
S1	Latero-cementizio 24+6
S2	Latero-cementizio 18+4
S3	SAP 16 (rampe scale)
S4	Latero-cementizio 24+8
S5	Latero-cementizio 28+9
S6	Latero-cementizio H16
S9	SAP 18
S10	SAP 20
S11	SAP 16

Tabella 16 - Tipologie dei solai dell'edificio 1.

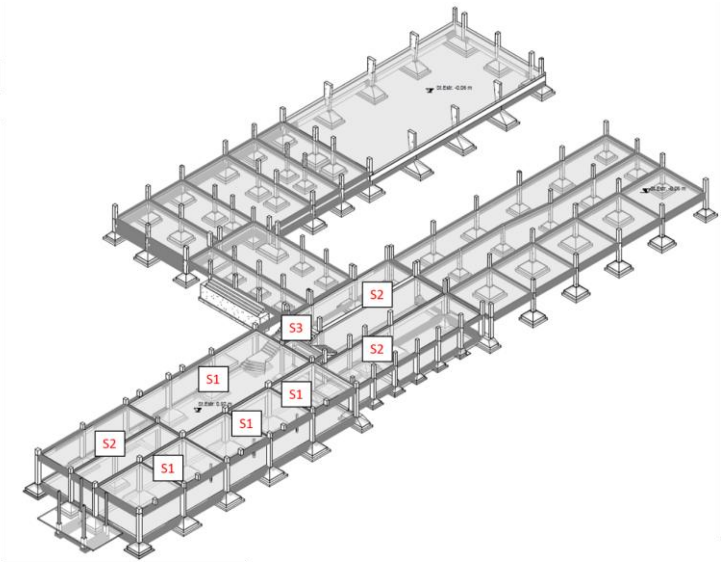


Figura 150 - Individuazione delle tipologie dei solai del primo piano dell'edificio 1.

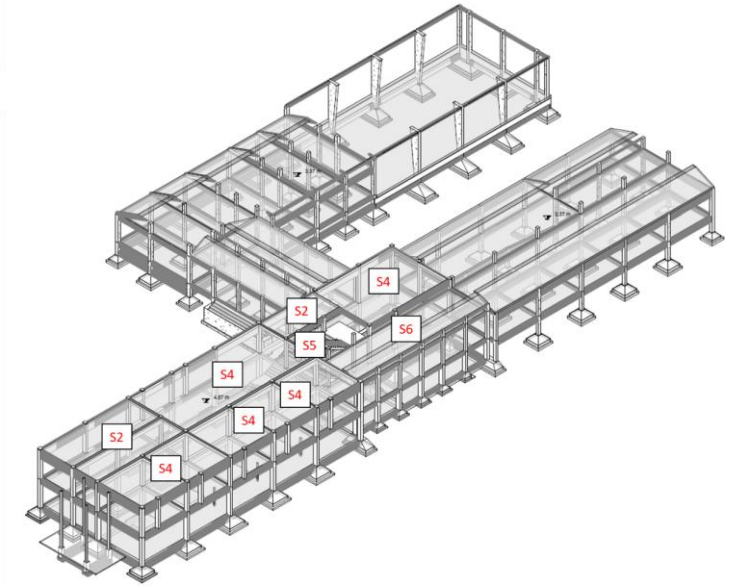


Figura 151 - Individuazione delle tipologie dei solai del sottotetto dell'edificio 1.

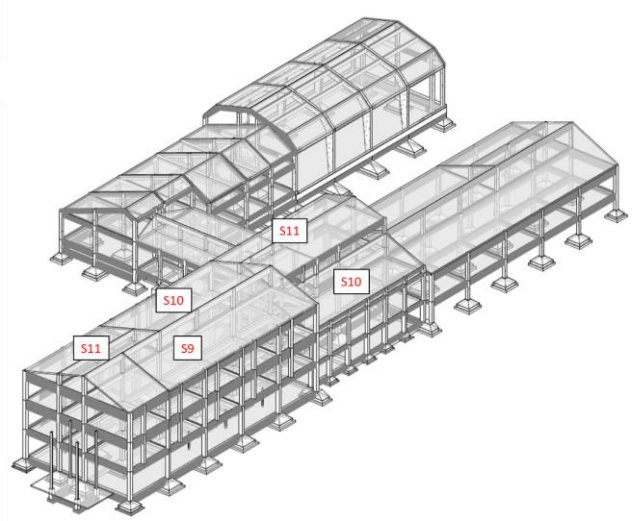


Figura 152 - Individuazione delle tipologie dei solai della copertura dell'edificio 1.

I carichi verticali agenti sulla struttura sono suddivisi in permanenti strutturali (G1), permanenti portati (G2) e variabili (Q). Per consentire una lettura più scorrevole, le tabelle contenenti l'analisi dettagliata dei carichi dei solai sono state allegate nell'Appendice E – Analisi dei carichi. I pesi propri delle travi e dei pilastri vengono valutati automaticamente dal software in funzione delle dimensioni assegnate ai singoli elementi e del peso specifico del relativo materiale. Inoltre, le tamponature esterne sono state considerate come un carico lineare assegnato alle travi perimetrali, come mostrato in Figura 153.

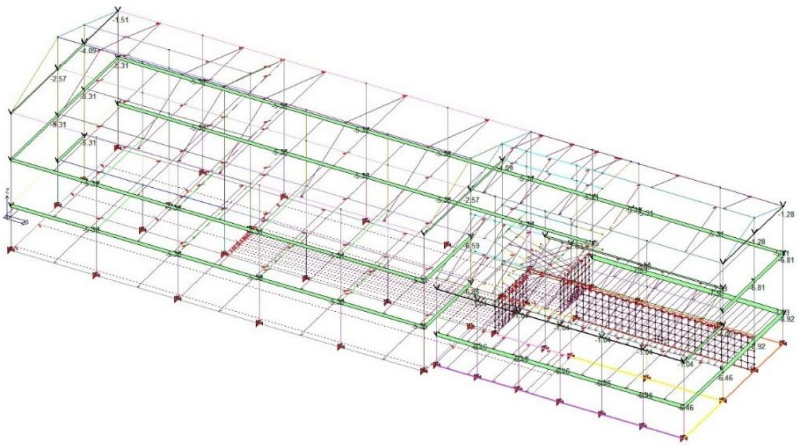


Figura 153 - Modello strutturale dell'edificio in PRO_SAP con rappresentazione dell'applicazione dei carichi delle tamponature.

Per quanto riguarda il carico della neve e del vento, i calcoli sono stati riportati nell'Appendice F – Calcolo delle azioni della neve e del vento.
L'azione sismica è stata valutata in conformità alle indicazioni riportate al capitolo 3.2 della normativa vigente. In particolare, il procedimento per la definizione degli spettri di progetto per i vari Stati Limite, in base ai quali sono state effettuate le verifiche, è il seguente:

- definizione della vita nominale e della classe d'uso della struttura, la cui combinazione ha consentito di stabilire il periodo di riferimento dell'azione sismica;
- individuazione, tramite latitudine e longitudine, dei parametri sismici di base ag, F0 e Tc per tutti e quattro gli Stati Limite previsti (SLO, SLD, SLV e SLC), effettuata tramite interpolazione tra i 4 punti fissi del reticolo sismico più vicini al punto di riferimento dell'edificio;
- determinazione dei coefficienti di amplificazione stratigrafica e topografica;
- calcolo del periodo Tc corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello Spettro.

I dati sono stati utilizzati per determinare gli spettri di progetto nelle verifiche agli stati limite considerati.
Nelle NTC 2018 il periodo di riferimento V_R, che non può essere inferiore a 35 anni, è dato dalla seguente relazione:

$$V_R = V_N \times C_U \qquad (28)$$

dove V_N è la vita nominale e C_U è il coefficiente d'uso. La vita nominale è definita dalla normativa come "il numero di anni nel quale è previsto che l'opera, purchè soggetta alla necessaria manutenzione, mantenga specifici livelli prestazionali" e viene stabilita attraverso tre diversi valori, in funzione dell'importanza dell'opera e delle relative esigenze di durabilità. Il caso specifico rientra in "costruzioni con livelli di prestazioni ordinari" (paragrafo 2.4.1 della normativa) e quindi il valore della vita nominale è pari a 50 anni. Inoltre, in presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso. Le NTC

2018 prevedono quattro classi d'uso a ciascuna delle quali è associato un coefficiente. Nel caso dell'edificio in esame, essendo una scuola primaria, viene presa in considerazione la classe d'uso III[50], in quanto ricade nel caso di costruzioni con funzioni pubbliche rilevanti il cui uso preveda affollamenti significativi; pertanto il coefficiente d'uso considerato nei calcoli è C_U=1,5. Di seguito sono riassunti in forma tabellare i valori della vita nominale, della classe d'uso ed del periodo di riferimento calcolato secondo la formula *(28)*:

Vita Nominale	Classe d'Uso	Periodo di Riferimento
50 anni	III	75 anni

I parametri sismici di base sono quelli mostrati in Figura 154.

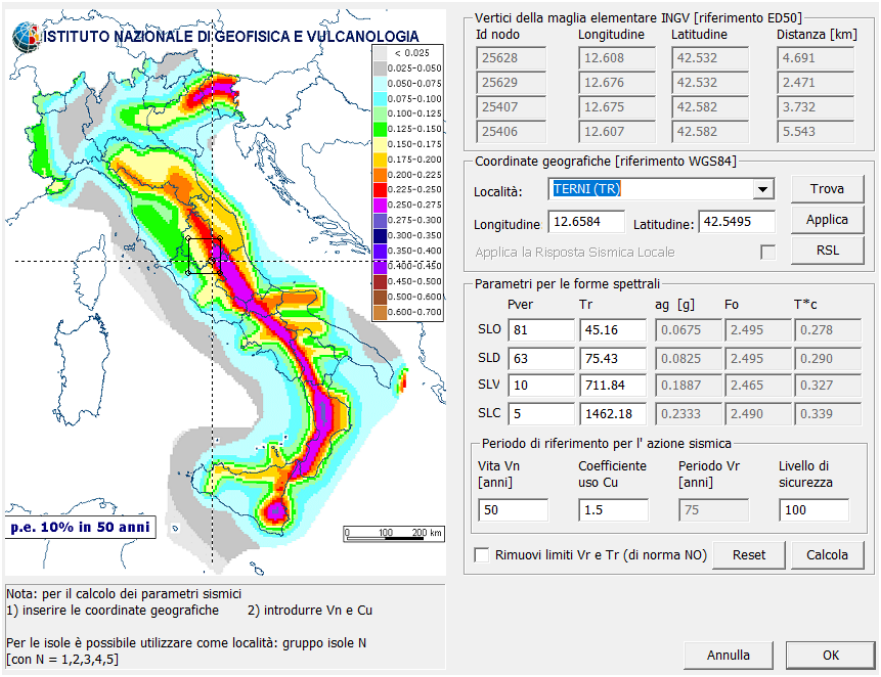


Figura 154 - Schermata del software Pro_Sap relativa alla valutazione della pericolosità sismica.

[50] Secondo la Circolare Esplicativa per le NTC 2018 nel paragrafo C8.5.4 : "in classe III ricadono scuole, teatri, musei, in quanto edifici soggetti ad affollamento e con la presenza contemporanea di comunità di dimensioni significative".

Inoltre, dalle indagini geognostiche, geofisiche e dalle prove di laboratorio effettuate in precedenza il terreno viene classificato nella categoria di sottosuolo C: “depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/n e 360 m/s2” (paragrafo 3.2.2. delle NTC 2018). Per quanto attiene le condizioni topografiche, le caratteristiche dell’area permettono di inserirla nella categoria T1, che si riferisce a una superficie pianeggiante, a pendii e a rilievi isolati con inclinazione media minore o uguale a 15°.

Per la scelta del metodo di calcolo e per la valutazione del fattore di struttura adottato, deve essere effettuato il controllo della regolarità della struttura. La tabella seguente riepiloga le condizioni di regolarità in pianta ed in altezza per la struttura in esame.

Regolarità della struttura in pianta	
La configurazione in pianta è compatta e approssimativamente simmetrica rispetto a due direzioni ortogonali, in relazione alla distribuzione di masse e rigidezze	SI
Il rapporto tra i lati di un rettangolo in cui la costruzione risulta inscritta è inferiore a 4	SI
Nessuna dimensione di eventuali rientri o sporgenze supera il 25 % della dimensione totale della costruzione nella corrispondente direzione	SI
Gli orizzontamenti possono essere considerati infinitamente rigidi nel loro piano rispetto agli elementi verticali e sufficientemente resistenti	SI
Regolarità della struttura in altezza	
Tutti i sistemi resistenti verticali (quali telai e pareti) si estendono per tutta l'altezza della costruzione	SI
Massa e rigidezza rimangono costanti o variano gradualmente, senza bruschi cambiamenti, dalla base alla sommità della costruzione (le variazioni di massa da un orizzontamento all'altro non superano il 25 %, la rigidezza non si riduce da un orizzontamento a quello sovrastante più del 30% e non aumenta più del 10%); ai fini della rigidezza si possono considerare regolari in altezza strutture dotate di pareti o nuclei in c.a. o pareti e nuclei in muratura di sezione costante sull'altezza o di telai controventati in acciaio, ai quali sia affidato almeno il 50% dell'azione sismica alla base	SI
Nelle strutture intelaiate progettate in CD "B" il rapporto tra resistenza effettiva e resistenza richiesta dal calcolo non è significativamente diverso per orizzontamenti diversi (il rapporto fra la resistenza effettiva e quella richiesta, calcolata ad un generico orizzontamento, non deve differire più del 20% dall'analogo rapporto determinato per un altro orizzontamento); può fare eccezione l'ultimo orizzontamento di strutture intelaiate di almeno tre orizzontamenti	SI

Eventuali restringimenti della sezione orizzontale della costruzione avvengono in modo graduale da un orizzontamento al successivo, rispettando i seguenti limiti: ad ogni orizzontamento il rientro non supera il 30% della dimensione corrispondente al primo orizzontamento, né il 20% della dimensione corrispondente all'orizzontamento immediatamente sottostante. Fa eccezione l'ultimo orizzontamento di costruzioni di almeno quattro piani per il quale non sono previste limitazioni di restringimento	SI

Tabella 17 - Parametri di verifica della regolarità della struttura in pianta e in altezza.

Pertanto, dalla Tabella 17 si desume che la struttura è regolare in pianta e in altezza.

Per quanto concerne le verifiche agli stati limite ultimi (SLU) e quelle agli stati limite d'esercizio (SLE), le condizioni elementari di carico vengono tra loro combinate in modo da determinare le sollecitazioni più sfavorevoli. Le combinazioni di carico che sono state considerate nel calcolo delle sollecitazioni rispettano le prescrizioni fornite delle NTC 2018. Ai fini delle verifiche agli stati limite sono state definite le seguenti combinazioni delle azioni (2.5.3 – NTC18):

Combinazione fondamentale SLU

$$\gamma G1 \cdot G1 + \gamma G2 \cdot G2 + \gamma P \cdot P + \gamma Q1 \cdot Qk1 + \gamma Q2 \cdot \psi 02 \cdot Qk2 + \gamma Q3 \cdot \psi 03 \cdot Qk3 + \ldots$$

Combinazione caratteristica (rara) SLE

$$G1 + G2 + P + Qk1 + \psi 02 \cdot Qk2 + \psi 03 \cdot Qk3 + \ldots$$

Combinazione frequente SLE

$$G1 + G2 + P + \psi 11 \cdot Qk1 + \psi 22 \cdot Qk2 + \psi 23 \cdot Qk3 + \ldots$$

Combinazione quasi permanente SLE

$$G1 + G2 + P + \psi 21 \cdot Qk1 + \psi 22 \cdot Qk2 + \psi 23 \cdot Qk3 + \ldots$$

Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E

$$E + G1 + G2 + P + \psi 21 \cdot Qk1 + \psi 22 \cdot Qk2 + \ldots$$

Combinazione eccezionale, impiegata per gli stati limite connessi alle azioni eccezionali

$$G1 + G2 + Ad + P + \psi 21 \cdot Qk1 + \psi 22 \cdot Qk2 + \ldots$$

Dove G sono le azioni permanenti, Q le azioni variabili, P quelle di precompressione, A le azioni eccezionali ed E quelle sismiche. I valori dei coefficienti che tengono conto della non contemporaneità dei massimi valori delle azioni sono riportati nella Tabella 2.5.I delle NTC 2018, mentre i valori dei coefficienti parziali di sicurezza γ_{G_i} e γ_{Q_i} sono definiti nel paragrafo 2.6.1, Tabella 2.6.I della stessa normativa. Le combinazioni di carico vengono generate automaticamente dal software di calcolo impiegato e sono riportate nell'Appendice G – Combinazioni di carico. Le combinazioni previste sono destinate al controllo di sicurezza della struttura e alla verifica degli spostamenti e delle sollecitazioni.

Dopo un'attenta valutazione delle informazioni e delle risorse disponibili, si è deciso di procedere alla verifica di sicurezza della struttura in esame attraverso un'analisi lineare dinamica. Tale scelta risulta coerente con il livello di conoscenza raggiunto nella fase preliminare che, come riportato nella Tabella C8.5.IV della circolare alle NTC 2018, essendo pari al livello 3, consente l'utilizzo di una qualsiasi delle quattro tipologie di analisi previste dalla normativa vigente. Inoltre, in sede di verifica, si è anche tenuto conto delle capacità degli elementi e dei meccanismi resistenti, che possono essere di tipo duttile o fragile. Per quanto riguarda la verifica degli elementi duttili è stato utilizzato un fattore di struttura q pari a 3, mentre per i fragili pari a 1.5. Da ciò scaturisce il seguente spettro di risposta della struttura (Figura 155):

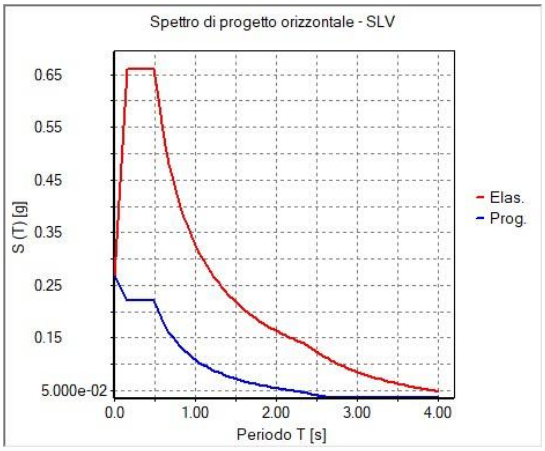


Figura 155 - Spettro di progetto orizzontale allo Stato Limite di salvaguardia della Vita.

Di seguito (Figura 156) vengono riportati i primi tre modi di vibrare della struttura:

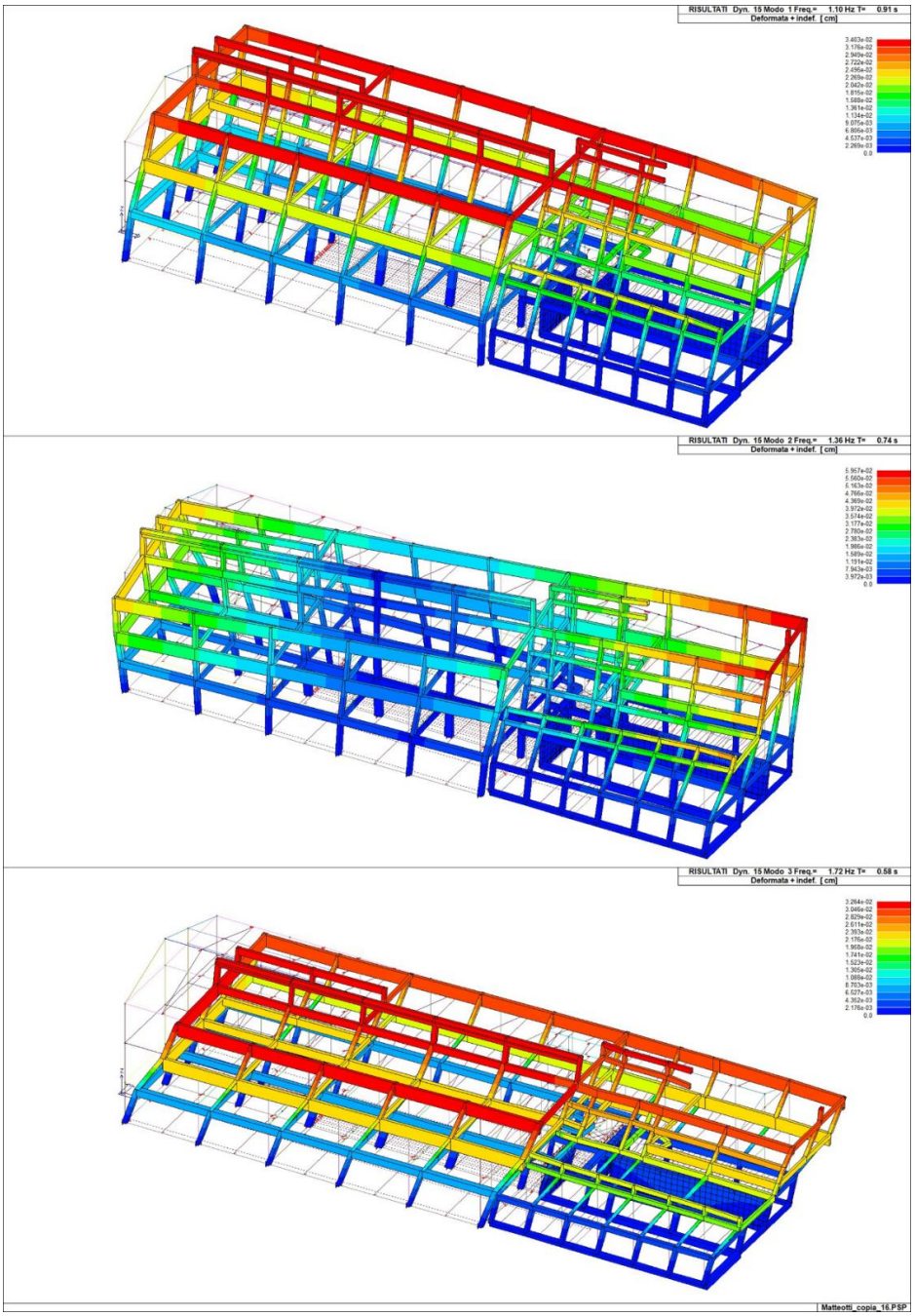


Figura 156 - Primi tre modi di vibrare della struttura.

Inoltre, in seguito all'analisi svolta, vengono presentati gli schemi dei tagli e dei momenti delle travi e dei pilastri, che forniscono una rappresentazione visiva delle sollecitazioni interne e del comportamento della struttura sotto carico. Ciascuna delle sollecitazioni mostrate nelle Figure seguenti è riferita alla combinazione più gravosa.

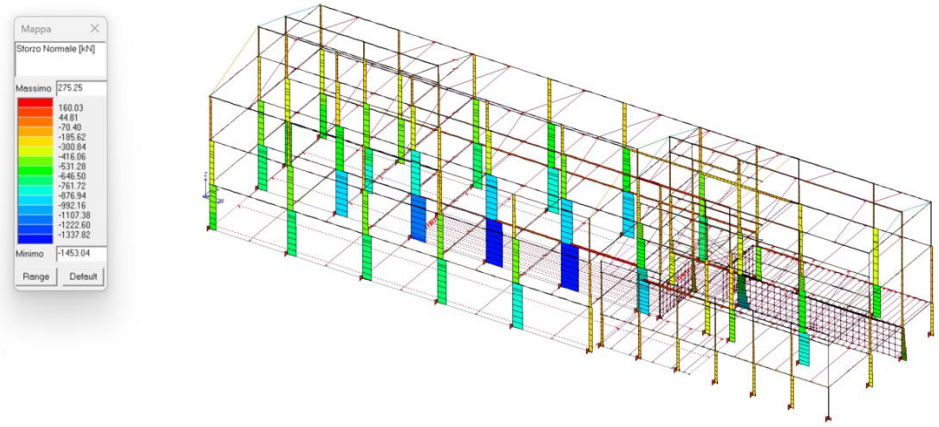


Figura 157 – Distribuzione dello sforzo normale [kN] per la combinazione 49.

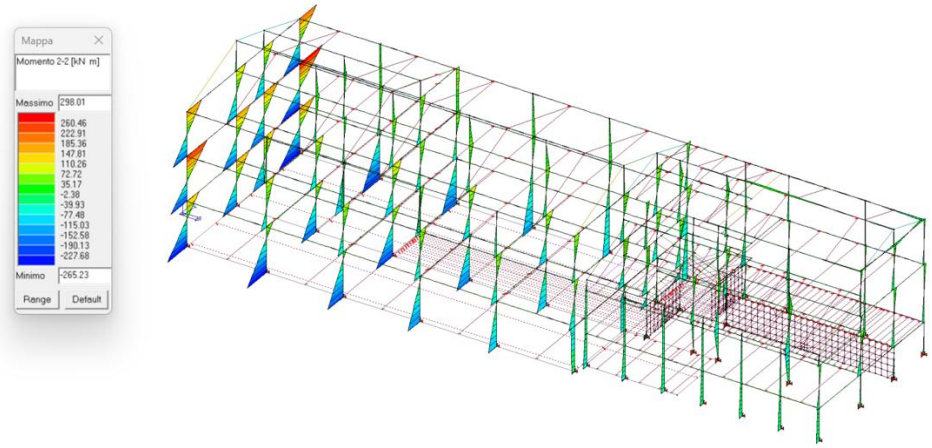


Figura 158 - Distribuzione del momento 2-2 [kN m] per la combinazione 75.

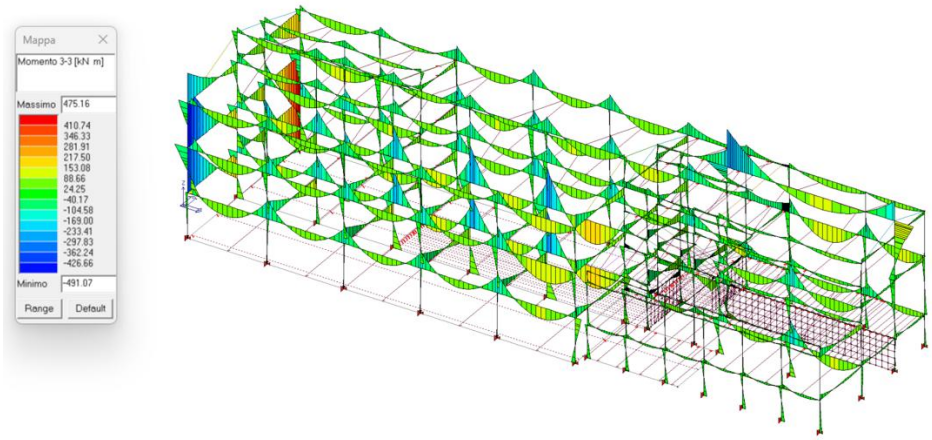


Figura 159 - Distribuzione del momento 3-3 [kN m] per la combinazione 78.

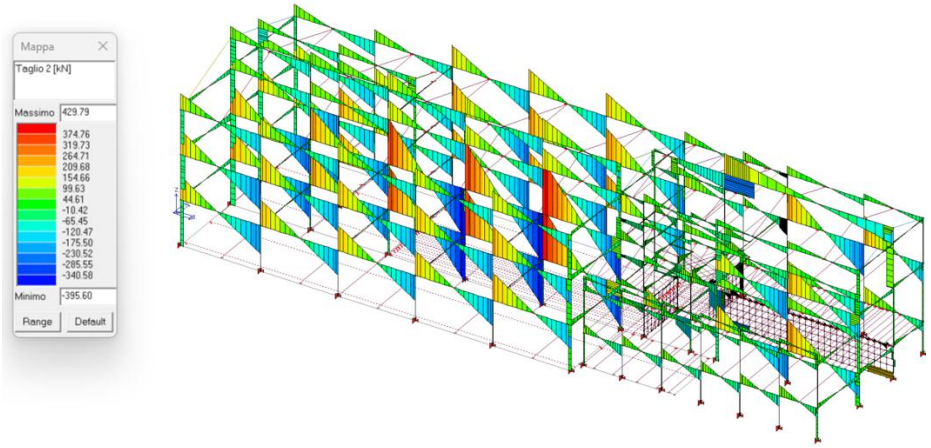


Figura 160 - Distribuzione del taglio 2 [kN] per la combinazione 3.

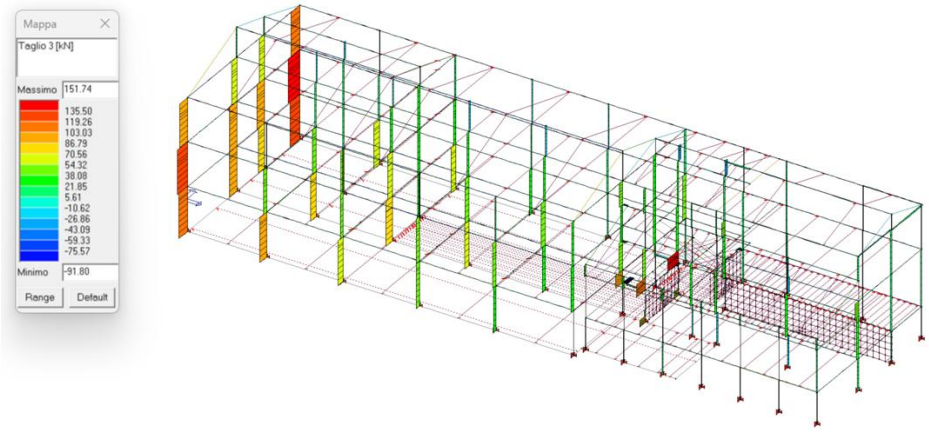


Figura 161 - Distribuzione del taglio 3 [kN] per la combinazione 75.

È stata poi effettuata la verifica della struttura esistente per l'identificazione delle carenze e del livello di azione sismica per la quale viene raggiunto lo SLU. Per la determinazione di tale livello si è proceduto riducendo progressivamente il valore del tempo di ritorno dell'azione sismica (indipendentemente dagli altri parametri quali vita nominale, classe d'uso e vita di riferimento della costruzione), al fine di raggiungere il suo valore massimo e la corrispondente accelerazione al suolo per la quale tutte le verifiche risultano soddisfatte. Pur imponendo un tempo di ritorno pari a 30 anni, valore minimo ammesso dalla normativa, le verifiche di travi e pilastri non risultano soddisfatte.

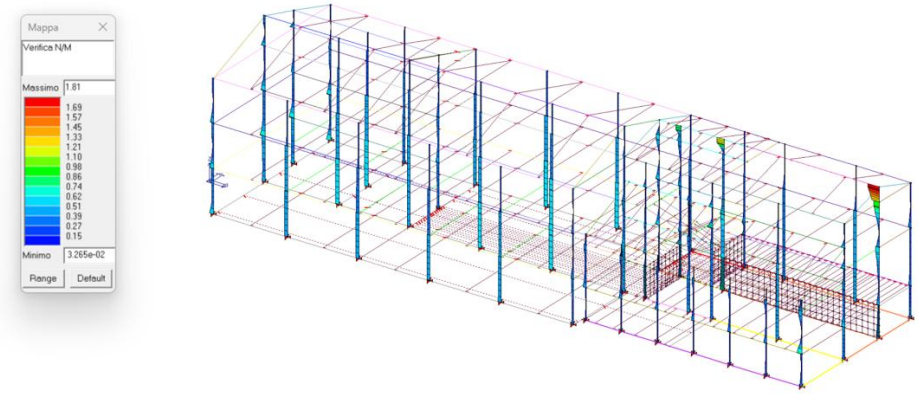


Figura 162 - Verifica N/M pilastri con $T_R = 30$.

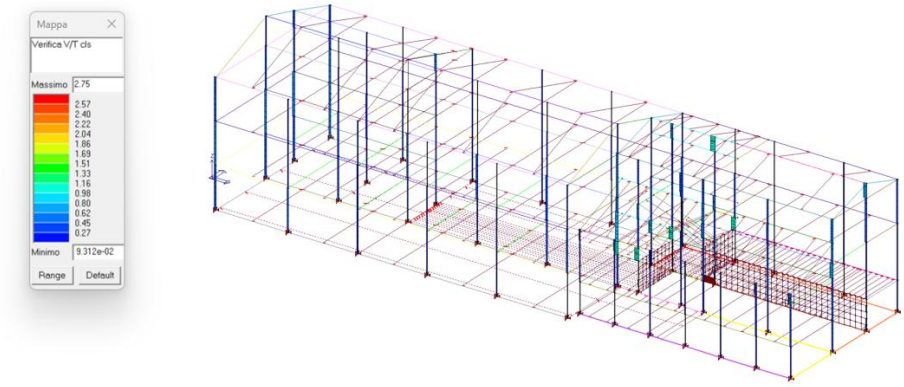


Figura 163 - Verifica V/T cls pilastri con $T_R = 30$.

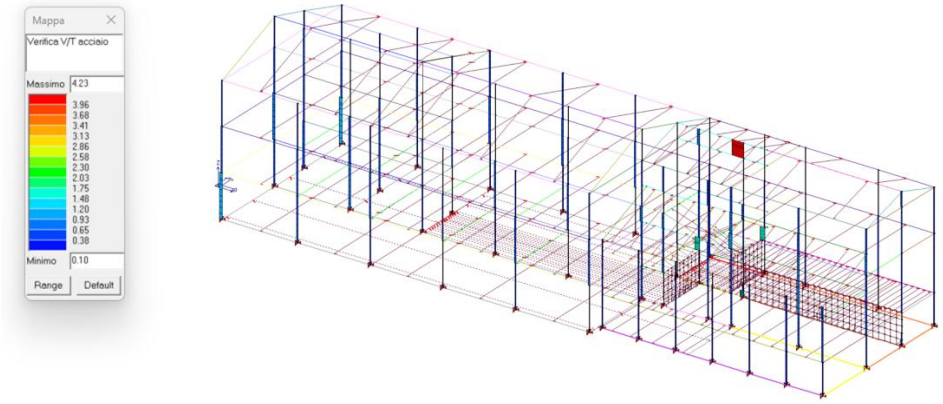


Figura 164 - Verifica V/T acciaio pilastri con $T_R = 30$.

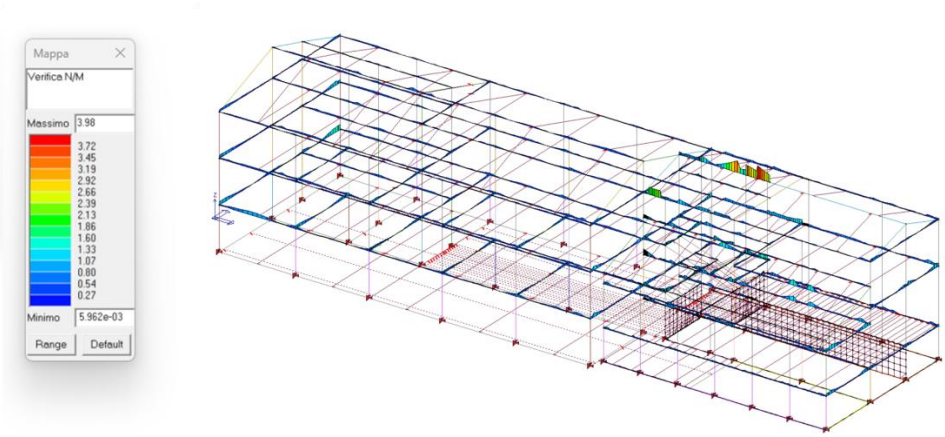


Figura 165 - Verifica N/M travi con $T_R = 30$.

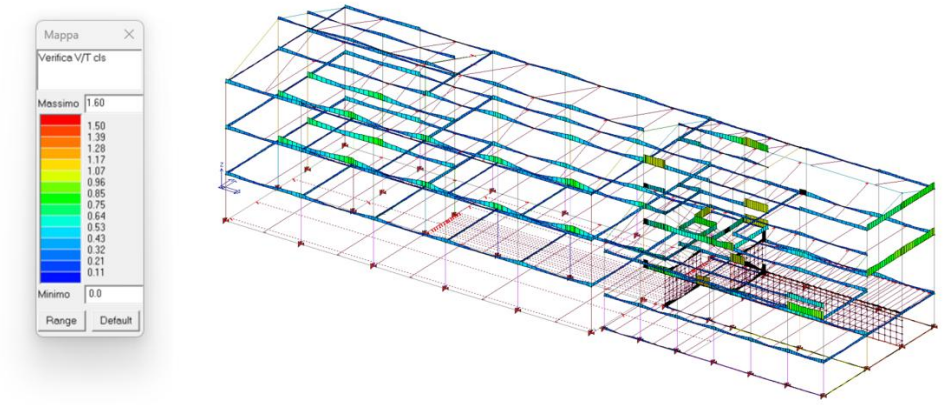


Figura 166 - Verifica V/T cls travi con $T_R = 30$.

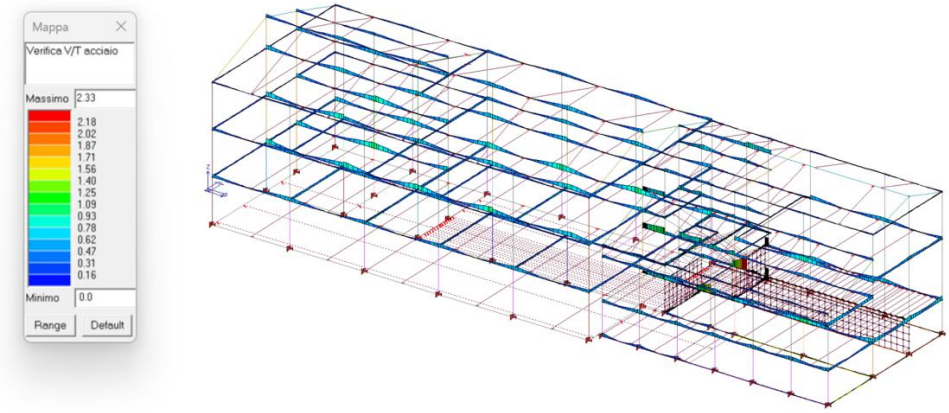


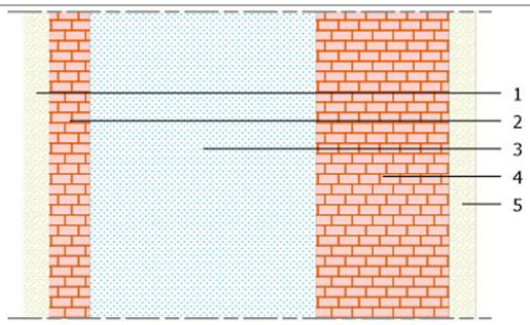
Figura 167 - verifica V/T acciaio travi con $T_R = 30$.

In conclusione, la verifica strutturale non può essere considerata soddisfatta nemmeno nel caso in cui si adotti un tempo di ritorno minimo di 30 anni. Tale risultato evidenzia chiaramente la necessità di un intervento volto a rafforzare la struttura al fine di garantire il rispetto dei requisiti normativi di sicurezza e la protezione contro i carichi sismici.

8.1.4. Analisi energetica

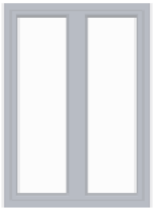
L'analisi energetica, condotta utilizzando il software Termus-Bim, ha come obiettivo la comprensione del comportamento termico dell'edificio. Per iniziare, sono stati creati nella libreria degli oggetti BIM del programma tutti i componenti del modello, come le stratigrafie delle pareti (Figura 168) e dei solai, le finestre (Figura 169) e le porte, con l'indicazione dei relativi spessori e materiali. Per ciascun elemento, il programma ha calcolato il valore di trasmittanza termica U.

Strato	Descrizione	Spessore [mm]	Conduttività [W/mK]	Conduttanza [W/m²K]	Massa superficiale [kg/m²]	Resistenza al vapore [-]	Calore specifico [J/kgK]	Resistenza [m²K/W]
	Adduttanza interna	0		7.7000				0.1299
1	Intonaco di calce e gesso	25	0.7000	28.0000	35.00	10.7222	1´000	0.0357
2	Mattoni pieni, forati, leggeri - densità 1400	40	0.5000	12.5000	56.00	7.5068	840	0.0800
3	Strato d'aria verticale da 22 cm	220		5.5556	0.29	1.0000	1´008	0.1800
4	Mattoni pieni, forati, leggeri - densità 1400	130	0.5000	3.8462	182.00	7.5068	840	0.2600
5	Intonaco di gesso puro	25	0.3500	14.0000	30.00	10.7222	1´000	0.0714
	Adduttanza esterna	0		25.0000				0.0400



Spessore totale = 440 [mm]
Trasmittanza termica globale = 1.2547 [W/m²K]
Resistenza termica globale = 0.7970 [m²K/W]
Massa superficiale (netto intonaci|verifiche di legge) = 238.29 [kg/m²]
Massa superficiale totale = 303.29 [kg/m²]
Capacità termica areica = 59.911[kJ/m2K]
Trasmittanza termica periodica = 0.55[W/m2K]
Fattore di attenuazione = 0.44[-]
Sfasamento = 7.89[h]

Figura 168 – Caratteristiche termiche della tamponatura esterna.

INFISSO INTERNO		
Titolo	FN[R] 2AB[1V] MF	
Descrizione	Finestra [Rettangolare] 2 Ante Battenti [1 Vetro] con Montante Fisso	
	VETRO Tipo vetro = Singolo Area - A_g = 1.00 m² Perimetro - L_g = 6.86 m Trasmittanza - U_g = 5.40 W/m²K Fattore solare normale - f_g = 0.85	TELAIO Tipo telaio = Metallo senza taglio termico Area - A_f = 0.69 m² Trasmittanza - U_f = 7.00 W/m²K
	Area totale infisso - A_w = 1.69 m²	

Cassonetto		-
Parapetto		PP1
Resistenza superficiale interna	0.13	m²K/W
Resistenza superficiale esterna	0.04	m²K/W
Resistenza intercapedine	-	m²K/W
Coefficiente riduzione area telaio	0.41	
Trasmittanza totale infisso - U_w	**6.0508**	**W/m²K**
Trasmittanza totale infisso con resistenza chiusura Oscurante - U_{WDR}	**6.0508**	**W/m²K**
Resistenza totale infisso - R_w	**0.17**	**m²K/W**

Figura 169 – Caratteristiche termiche relative a una tipologia di finestra.

È stata poi modellata la centrale termica, includendo l'impianto di distribuzione e generazione per il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria ACS; per ciascun componente sono state specificate le caratteristiche tecniche e i relativi rendimenti. Successivamente è stata definita la zona termica, specificando gli impianti presenti, tra cui riscaldamento, ventilazione, ACS e illuminazione. Sono stati inoltre inseriti anche gli ambienti confinanti, distinguendo tra climatizzati, come gli edifici 2 e 3 adiacenti a quello modellato, e non climatizzati, quali sottotetto, scala e seminterrato. Una volta definiti tutti i componenti dell'edificio, si è proceduto con la realizzazione del modello mostrato in Figura 170.

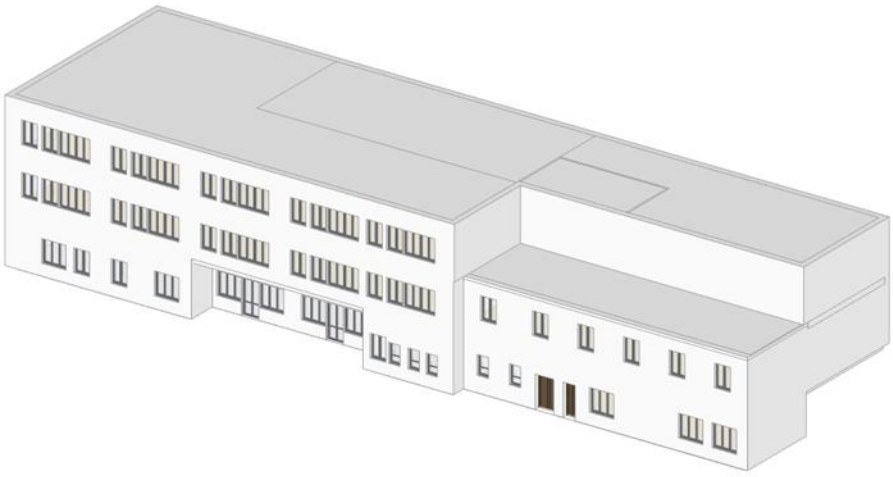


Figura 170 - Modello energetico dell'edificio scolastico realizzato con il software Termus BIM.

Si è passato poi a definire i vani, corrispondenti alle stanze esistenti, e assegnati gli ambienti di confine. Dopo aver completato il modello, è stato avviato il calcolo, che ha consentito di determinare la classe energetica dell'Edificio Oggetto di Studio (EOdC) nello stato di fatto. Per la classificazione di un edificio, infatti, è fondamentale determinare la sua prestazione energetica, espressa attraverso l'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile ($EP_{\text{gl,nren}}$).
La scuola, in base ai risultati ottenuti, si colloca in classe energetica F (Figura 171), evidenziando una bassa efficienza energetica. Questo dato conferma la necessità di interventi mirati per migliorare le prestazioni termiche e ridurre i consumi energetici complessivi.

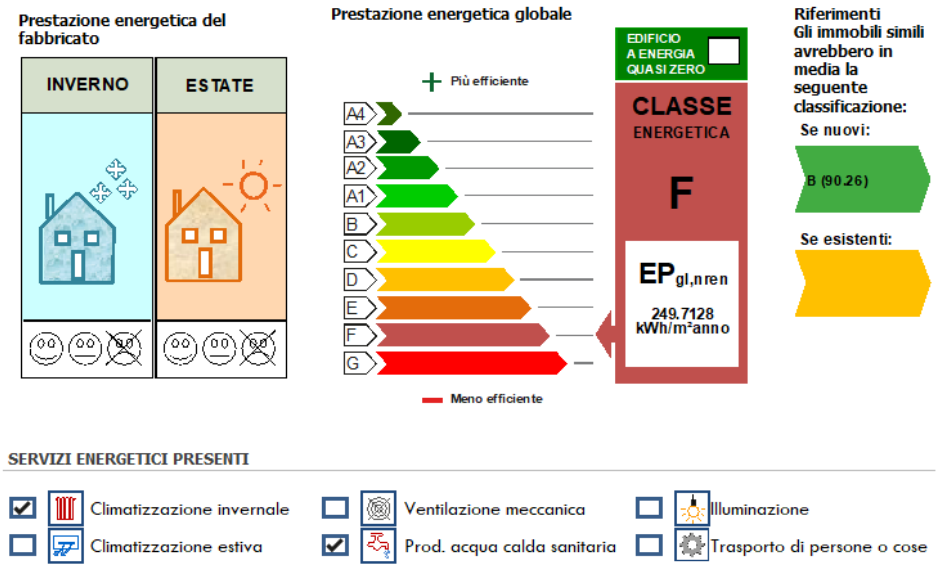


Figura 171 - Prestazione energetica globale e del fabbricato.

8.2. Intervento integrato di riqualificazione

L'intervento progettato per l'edificio scolastico in analisi si basa sull'adozione di un esoscheletro esterno in acciaio, soluzione capace di rispondere alle principali criticità emerse dall'analisi preliminare: vulnerabilità sismica, necessità di adeguamento funzionale e carenze dal punto di vista energetico. Come precedentemente indicato i tre blocchi che compongono il complesso scolastico sono separati da giunti sismici e, di conseguenza, devono essere analizzati singolarmente dal punto di vista strutturale. L'esoscheletro è stato posizionato lungo il perimetro libero del blocco 1, oggetto dell'analisi, in quanto non è stato possibile collocarlo nelle zone in cui questo risulta adiacente agli altri due edifici, come illustrato in Figura 172.

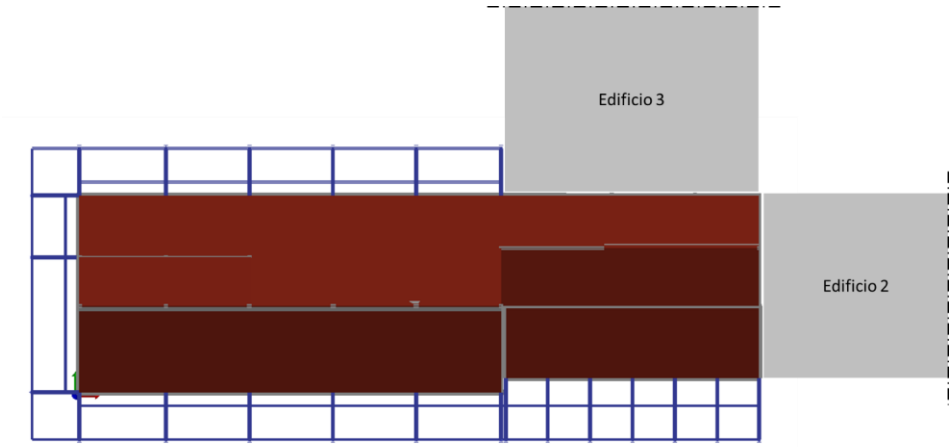


Figura 172 - Pianta della copertura dell'Edificio 1 con posizionamento dell'esoscheletro.

I telai resistenti sono stati disposti in direzione ortogonale alle facciate. Oltre al significativo miglioramento del comportamento complessivo della struttura derivante dal fatto che l'assorbimento delle azioni orizzontali generate dal sisma è affidato all'esoscheletro, questa configurazione consente di limitare l'impatto sugli spazi interni rispetto ad altre tipologie di intervento, come ad esempio l'inserimento di setti in cemento armato per la creazione di pareti di taglio, preservando allo stesso tempo la fruibilità degli ambienti durante le fasi di intervento. Inoltre, favorisce l'integrazione di soluzioni energetiche, come le serre solari, e funzionali, come l'aggiunta di nuovi spazi per le esigenze pedagogiche, sfruttando le campate dell'esoscheletro. Dunque, la scelta del posizionamento e della configurazione dell'esoscheletro è stata guidata sia da considerazioni tecniche che dalla volontà di migliorare le prestazioni complessive dell'edificio in termini di sicurezza, efficienza e funzionalità.

La progettazione dell'intervento integrato è stata effettuata seguendo il flusso di lavoro indicato in Figura 173. La prima fase ha riguardato l'analisi preliminare, durante la quale sono stati raccolti e analizzati i dati relativi all'edificio oggetto di studio al fine di comprenderne le caratteristiche salienti e le principali criticità anche rispetto alle normative vigenti, come vulnerabilità strutturali, carenze energetiche e problematiche funzionali.

Successivamente, sono stati definiti gli obiettivi principali dell'intervento: il miglioramento sismico, l'efficientamento energetico e la ridistribuzione

funzionale degli spazi. In particolare, l'intervento si è posto l'obiettivo di incrementare la capacità portante della struttura e migliorare il comportamento globale dell'edificio sotto azioni sismiche, di ridurre i consumi energetici mediante l'isolamento termico e soluzioni passive, come le serre solari, e di migliorare la fruibilità degli spazi interni, adeguandoli alle nuove esigenze pedagogiche.

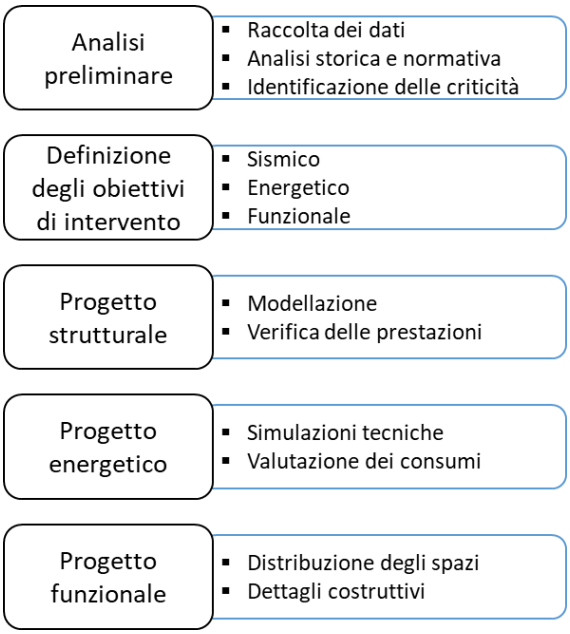


Figura 173 - Workflow del processo progettuale.

La fase iniziale della progettazione vera e propria si concentra sugli aspetti strutturali, considerati un requisito indispensabile per garantire l'integrità e la sicurezza in qualsiasi intervento di riqualificazione edilizia. La stabilità e la resistenza della struttura costituiscono infatti la base su cui possono essere realizzati ulteriori interventi, poiché un edificio privo delle necessarie garanzie di sicurezza rischia di compromettere la vita degli occupanti e la funzionalità stessa dell'edificio. Il miglioramento sismico e strutturale è dunque prioritario rispetto ad altre esigenze progettuali, come la riduzione dei consumi energetici o l'incremento della qualità degli spazi interni. Intervenire direttamente sugli aspetti energetici o funzionali senza prima aver assicurato la sicurezza della

struttura potrebbe portare a scenari di inefficacia o addirittura a interventi vanificati in caso di eventi come terremoti o condizioni ambientali severe. Inoltre, dal punto di vista della progettazione integrata, la sicurezza strutturale non solo è essenziale, ma condiziona direttamente tutte le altre componenti dell'intervento: le scelte tecniche influenzano, ad esempio, la possibilità di implementare sistemi di isolamento termico, pannelli fotovoltaici o serre solari, così come la configurazione spaziale e funzionale degli ambienti interni. Il progetto strutturale è stato sviluppato mediante la modellazione numerica dell'edificio esistente e dell'esoscheletro, con particolare attenzione alle interazioni tra le due strutture e alle verifiche del comportamento complessivo. La componente energetica è stata affrontata successivamente attraverso simulazioni termiche che hanno permesso di analizzare le prestazioni dell'edificio prima e dopo l'intervento, evidenziando i benefici derivanti dall'integrazione di soluzioni passive, come le serre solari, realizzate in alcuni spazi tra le campate dell'esoscheletro.
Parallelamente, anche il progetto funzionale ha preso in esame gli spazi creati tra i telai dell'esoscheletro, prevedendone l'utilizzo come ambienti aggiuntivi. Questo approccio consente una ridistribuzione complessiva degli spazi scolastici al fine di renderli idonei a ospitare anche modelli educativi più innovativi, che richiedono ambienti flessibili e adattabili. In tal modo, la scuola si configura come un luogo capace di rispondere alle mutevoli esigenze pedagogiche, favorendo metodi di insegnamento più dinamici e inclusivi, senza compromettere la funzionalità e la sicurezza degli spazi.

8.2.1. Progetto strutturale

Tenendo conto delle caratteristiche morfologiche e strutturali dell'edificio esistente, si è proceduto alla definizione dell'esoscheletro di progetto. È stata scelta la soluzione costituita da telai in acciaio con orientamento perpendicolare rispetto alle pareti esistenti. Tale configurazione consente di soddisfare molteplici esigenze progettuali, tra cui la creazione di nuovi spazi di pertinenza della scuola, sia interni che esterni, l'integrazione di elementi di comunicazione verticale come l'ascensore e le scale esterne e l'implementazione di sistemi

energetici passivi, come le serre solari. I telai in acciaio sono stati posizionati in corrispondenza dei pilastri in cemento armato della struttura esistente, come illustrato in Figura 174, al fine di garantire un efficace trasferimento dei carichi e una connessione ottimale tra le due strutture.

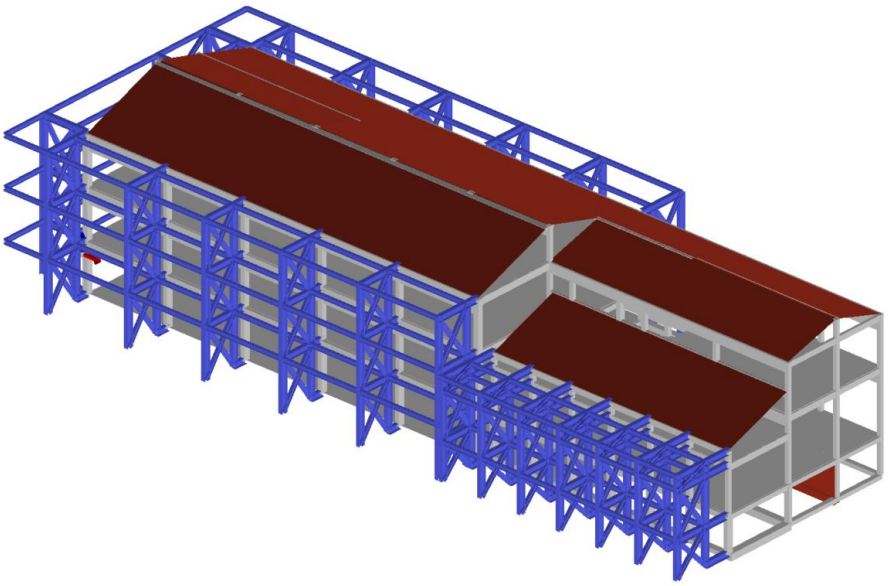


Figura 174 - Rappresentazione tridimensionale dell'esoscheletro progettato, elaborata tramite il software PRO_SAP.

Non è stato possibile disporre l'esoscheletro lungo tutto il perimetro dell'edificio poiché alcune porzioni risultano adiacenti agli altri blocchi che compongono il complesso scolastico. Di conseguenza, i telai resistenti nella direzione y (trasversale) sono stati collocati solo su un lato dell'edificio, mentre nella direzione x (longitudinale) i telai sono presenti in una zona su entrambi i lati e in un'altra solo su un lato.

In generale, l'edificio dotato di esoscheletro reagisce complessivamente alle azioni orizzontali come un sistema costituito dall'accoppiamento in parallelo della struttura esistente e dell'esoscheletro. La rigidezza laterale globale dell'esoscheletro è distribuita su ciascun livello della costruzione, come mostrato in Figura 175, in cui K_e rappresenta la rigidezza laterale globale dell'esoscheletro e K_{ES} indica la rigidezza laterale globale della struttura allo stato di fatto.

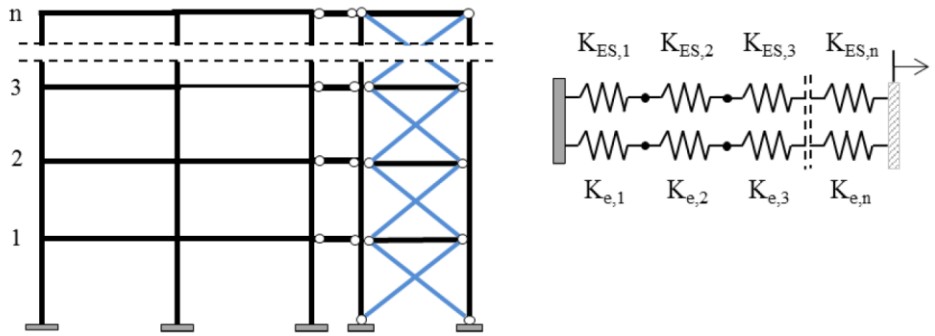


Figura 175 - Accoppiamento tra la struttura esistente e l'esoscheletro. Fonte: Landolfo et al. [103].

A partire dal modello della struttura esistente realizzato con il programma di calcolo PRO_SAP, è stata aggiunta la modellazione dell'esoscheletro. Successivamente, è stata verificata la struttura nella sua configurazione post-intervento tramite un'analisi sismica di tipo dinamica lineare analoga a quella condotta per lo stato di fatto, al fine di valutare il miglioramento delle prestazioni rispetto alla condizione iniziale. Durante la fase progettuale sono state analizzate diverse opzioni, riportate in Tabella 18, variando le sezioni degli elementi che compongono l'esoscheletro:

Configurazione	Pilastri e travi principali	Controventi e travi secondarie
1	HEA 220	2 UPN 180
2	HEB 300	2 UPN 240
3	HEB 450	2 UPN 300
4	Tubolare 273 x 10	Tubolare 114,3 x 6,3
5	Tubolare 323,9 x 10	Tubolare 133 x 6,3

Tabella 18 - Opzioni delle configurazioni dell'esoscheletro analizzate.

Dai risultati delle analisi, condotte tramite il software di modellazione agli elementi finiti, è emerso che la configurazione 3 è quella che meglio soddisfa le verifiche. Secondo la normativa vigente, per le costruzioni di classe III destinate a uso scolastico, il valore di ζ_E[51], a seguito di interventi di miglioramento, deve

[51] Secondo quanto riportato nella Circolare esplicativa al paragrafo C8.3 ζ_E "è definito come il rapporto tra l'azione sismica massima sopportabile dalla struttura e l'azione sismica massima che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione sul

essere comunque non inferiore a 0,6. In questo caso si osserva un miglioramento generale delle prestazioni dell'edificio rispetto allo stato di fatto ma, nella zona in cui l'esoscheletro è presente solo su un lato con i telai resistenti lungo la direzione y, risultano necessari interventi locali su alcuni elementi che non soddisfano le verifiche. Invece, per confermare l'efficacia dell'esoscheletro, è stato isolato il comportamento della porzione in cui i telai in direzione y sono presenti in entrambi i lati (Figura 176). In questa zona tutti gli elementi soddisfano le verifiche con un valore di $\zeta_E = 0{,}8$.

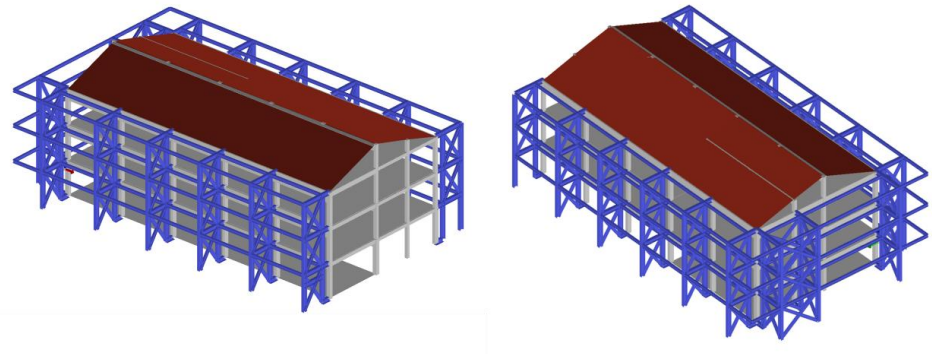


Figura 176 - Porzione di edificio isolata per la verifica dell'efficacia dell'esoscheletro, visualizzata da due angolazioni differenti.

Di seguito vengono riportati i confronti tra le verifiche dell'edificio nello stato di fatto e nella configurazione con l'esoscheletro. È importante sottolineare che le verifiche risultano soddisfatte quando il valore è inferiore a 1.

medesimo suolo e con le medesime caratteristiche (periodo proprio, fattore di comportamento ecc.). Il parametro di confronto dell'azione sismica da adottare per la definizione di ζ_E è, salvo casi particolari, l'accelerazione al suolo $a_g \times S$."

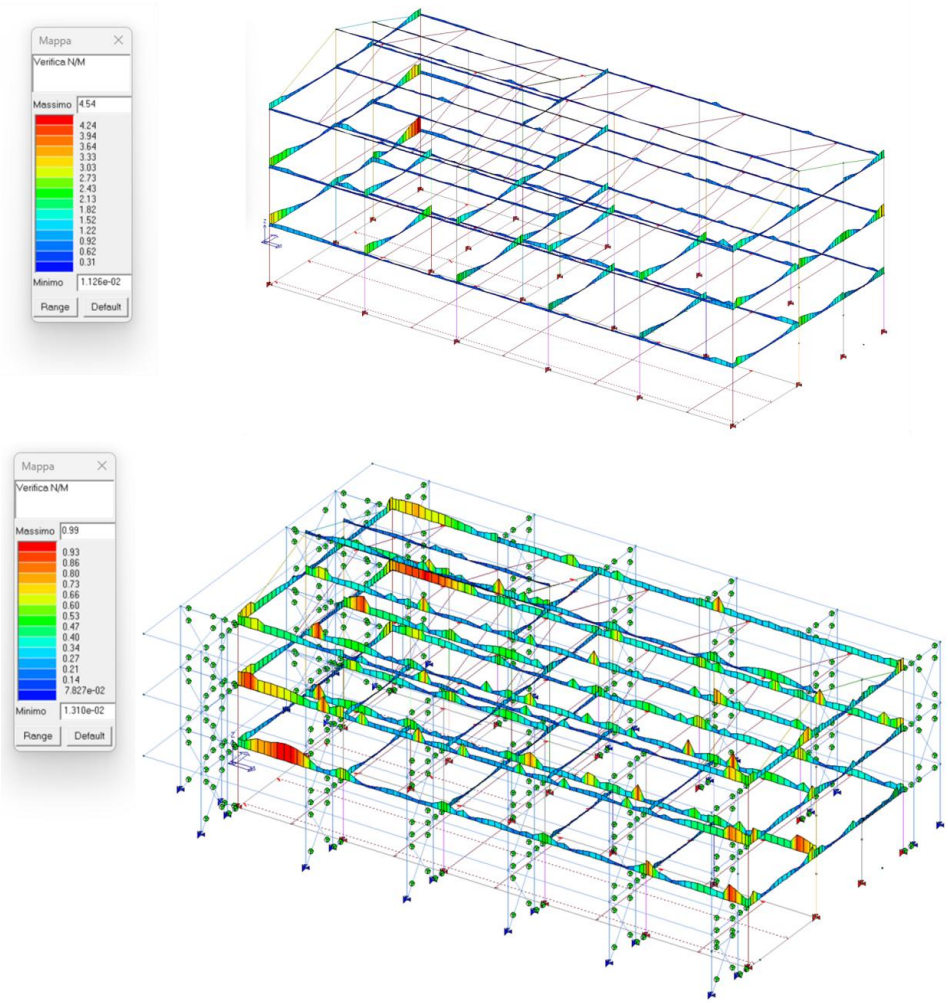


Figura 177 - Verifica N/M delle travi: in alto la configurazione nello stato attuale, in basso quella con l'esoscheletro.

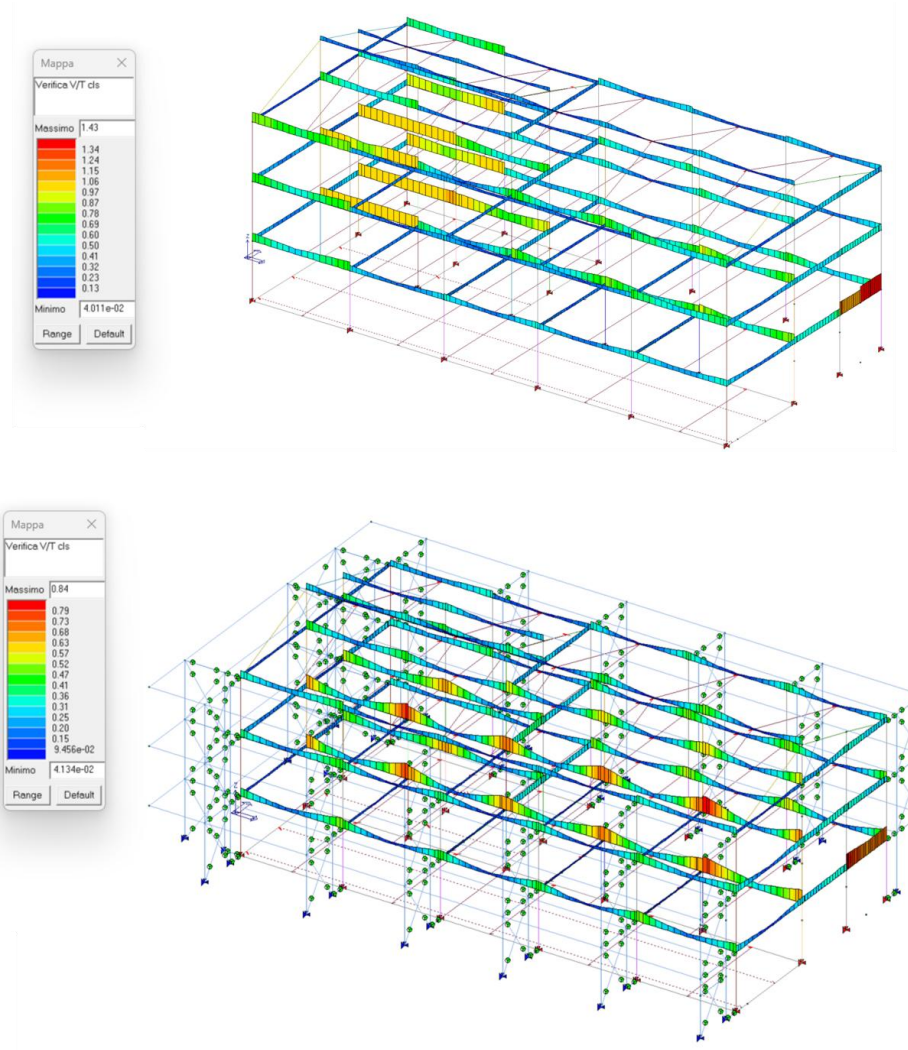


Figura 178 - Verifica V/T cls delle travi: in alto la configurazione nello stato attuale, in basso quella con l'esoscheletro.

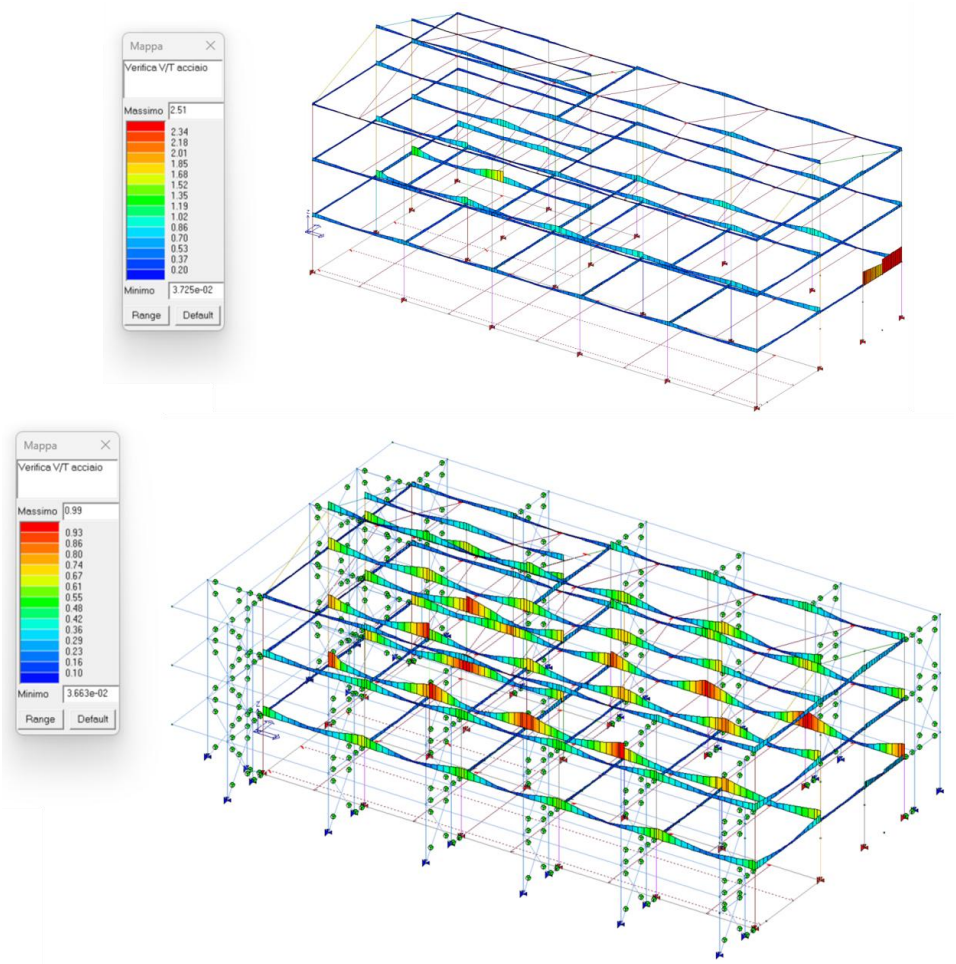


Figura 179 - Verifica V/T acciaio delle travi: in alto la configurazione nello stato attuale, in basso quella con l'esoscheletro.

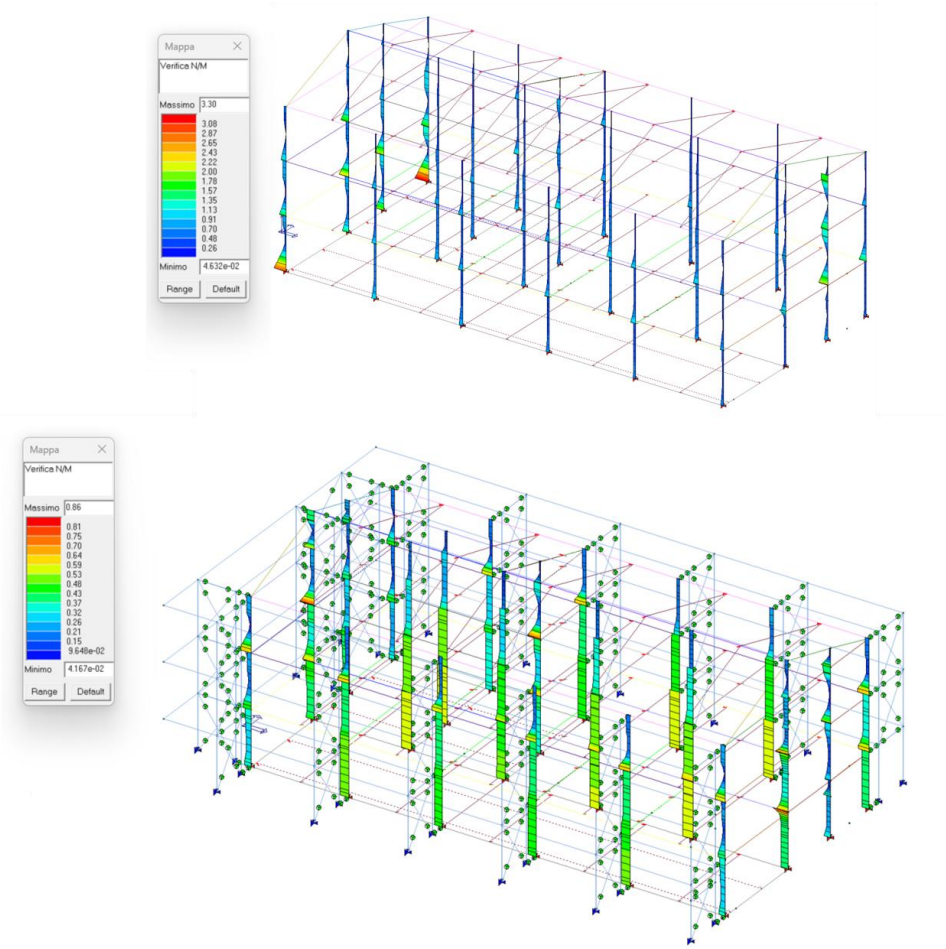


Figura 180 - Verifica N/M dei pilastri: in alto la configurazione nello stato attuale, in basso quella con l'esoscheletro.

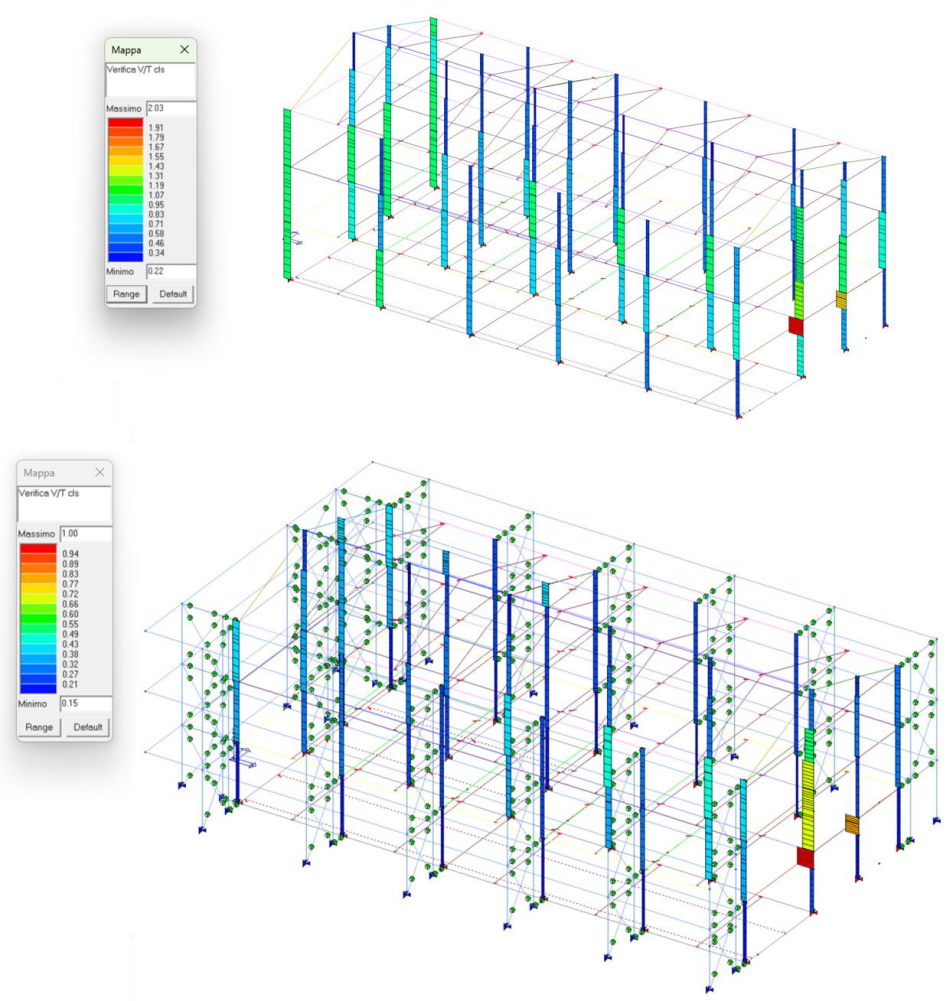


Figura 181 - Verifica V/T cls dei pilastri: in alto la configurazione nello stato attuale, in basso quella con l'esoscheletro.

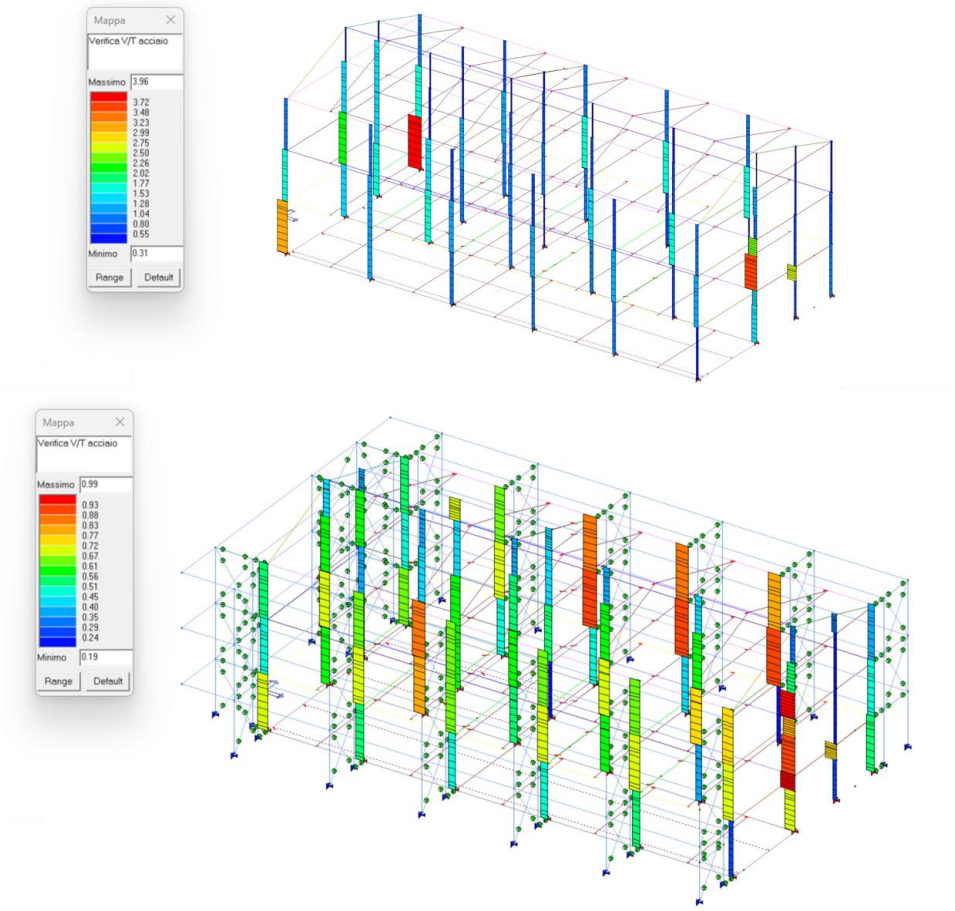


Figura 182 - Verifica V/T acciaio dei pilastri: in alto la configurazione nello stato attuale, in basso quella con l'esoscheletro.

In entrambi i casi confrontati, è stata assegnata un'azione sismica ridotta: fissando il livello di sicurezza all'80%, il software di analisi riduce tutte le azioni sismiche in modo che $a_g \times S$ sia l'80% del valore previsto per una struttura nuova, come mostrato in Figura 183:

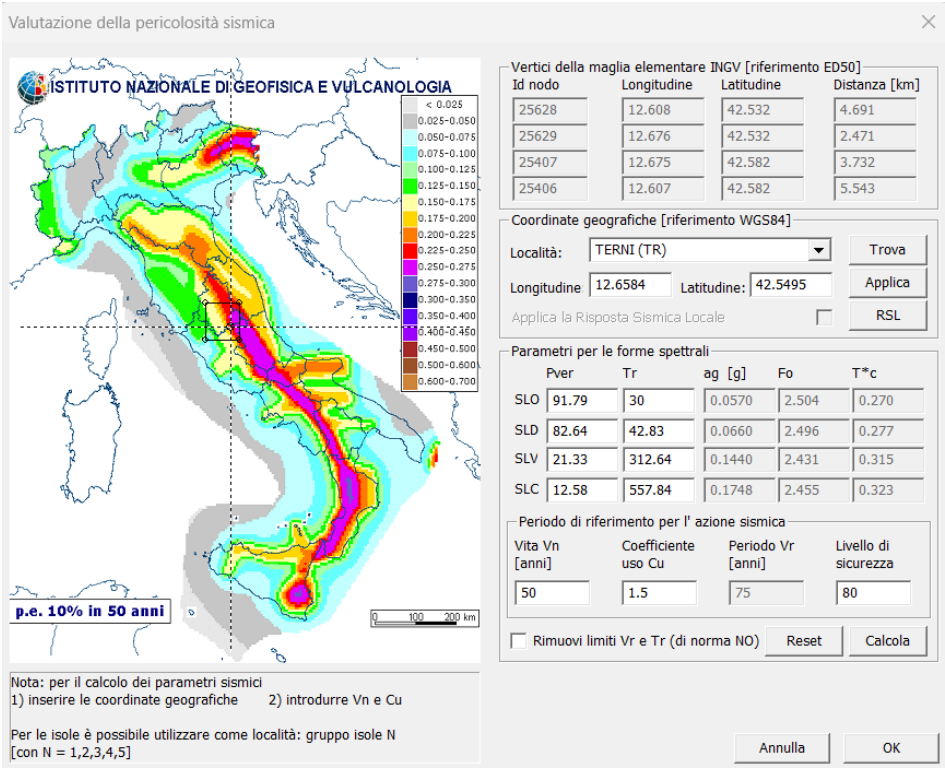


Figura 183 - Schermata del software Pro_Sap relativa alla valutazione della pericolosità sismica con i valori calcolati all'80% del livello di sicurezza.

Poiché tutte le verifiche dell'edificio post-intervento risultano soddisfatte, si può concludere che questa configurazione dell'esoscheletro, caratterizzata dai telai lungo la direzione y su entrambi i lati dell'edificio e quelli lungo la direzione x su un solo lato, ha permesso di raggiungere un valore di $\zeta_E = 0{,}8$.

Per quanto riguarda gli elementi in acciaio, di seguito sono rappresentate graficamente le sollecitazioni di sforzo normale. È importante evidenziare che, sotto l'azione sismica, i controventi a X risultano correttamente sollecitati, con un elemento soggetto a trazione e l'altro a compressione.

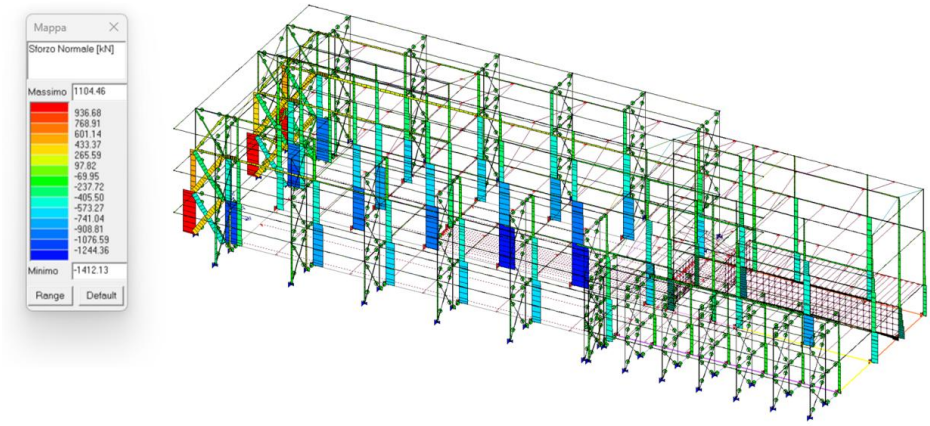


Figura 184 - Distribuzione dello sforzo normale [kN] per la combinazione SLV sismica 20.

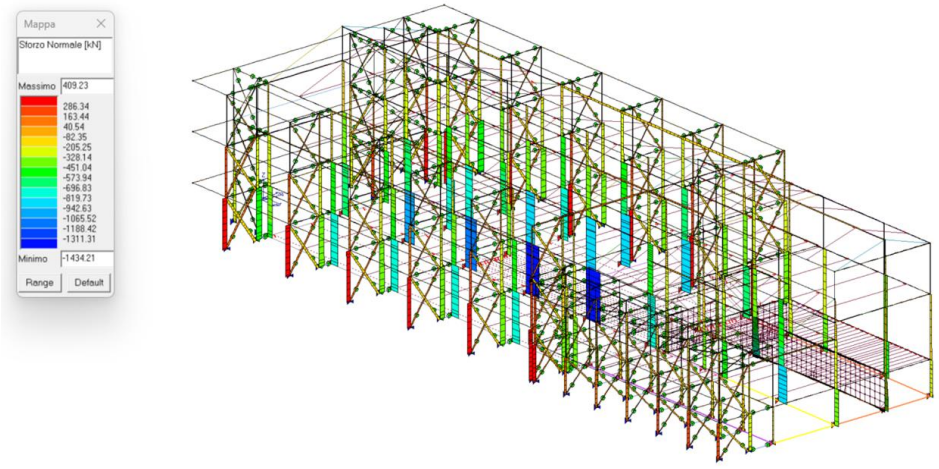


Figura 185 - Distribuzione dello sforzo normale [kN] per la combinazione SLV sismica 33.

Inoltre, tutti gli elementi dell'esoscheletro risultano verificati, come illustrato in Figura 186.

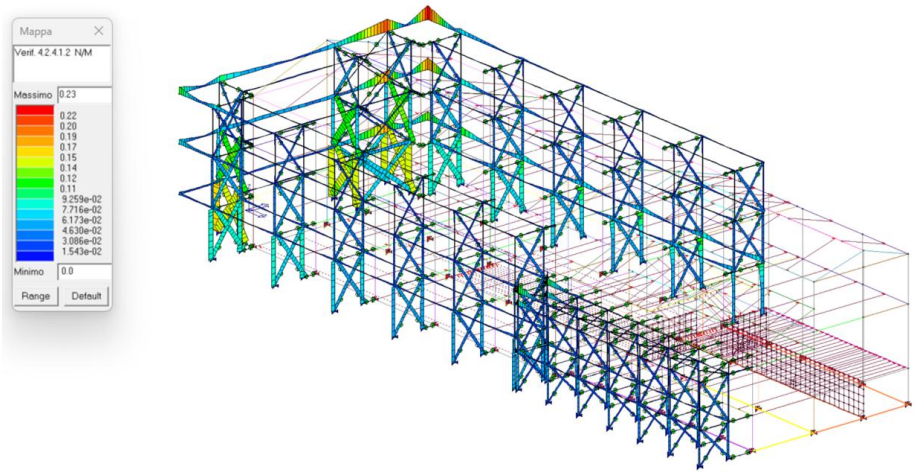


Figura 186 - Verifica N/M degli elementi in acciaio.

Dunque, nella configurazione finale dell'esoscheletro, le travi e i pilastri del telaio nella direzione resistente, illustrato in Figura 187, sono stati progettati con profili HEB450, mentre per i controventi e le travi nella direzione ortogonale sono stati adottati profili composti da due UPN300 accoppiati. Il collegamento tra il portale e la trave esistente è stato realizzato tramite dei profili HEB450 saldati a dei piatti in acciaio, successivamente imbullonati alle travi in cemento armato esistenti tramite otto tasselli chimici M20 fissati con resina epossidica bicomponente.

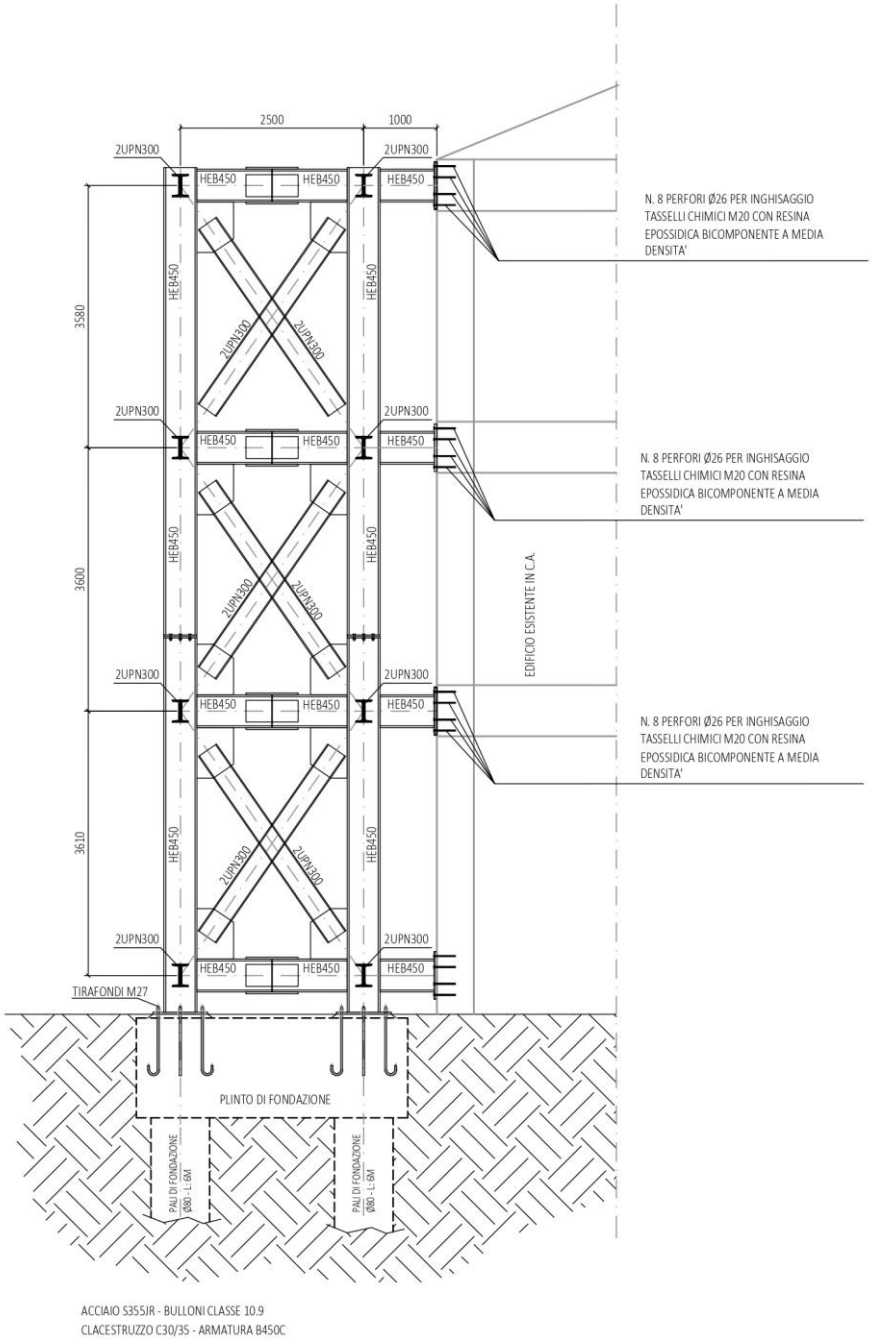


Figura 187 - Vista frontale del telaio resistente dell'esoscheletro. Scala 1:100.

Per quanto riguarda il collegamento con la fondazione, i pilastri sono stati saldati a piastre di base di dimensioni 75x75 cm, a loro volta ancorate al plinto di fondazione mediante dei tirafondi M27, come mostrato in Figura 188.

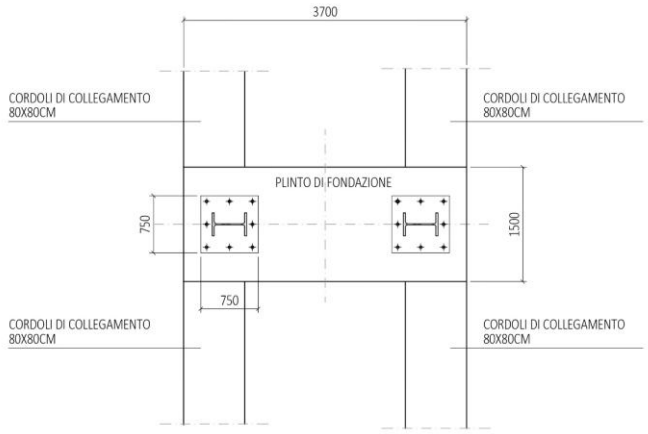


Figura 188 -Piastre di base e fondazioni. Scala 1:100.

Poiché l'esoscheletro non svolge esclusivamente funzione di rinforzo strutturale ma rientra in un progetto integrato, alcune campate sono destinate a ospitare serre solari o spazi di ampliamento per la scuola. Per questo, tra i telai perpendicolari alla facciata, è stato previsto l'inserimento di un solaio composto, nella sua parte resistente, da una lamiera grecata con una soletta di completamento in calcestruzzo armato rinforzata con rete elettrosaldata al fine di garantire prestazioni adeguate. La Figura 189 illustra i particolari costruttivi.

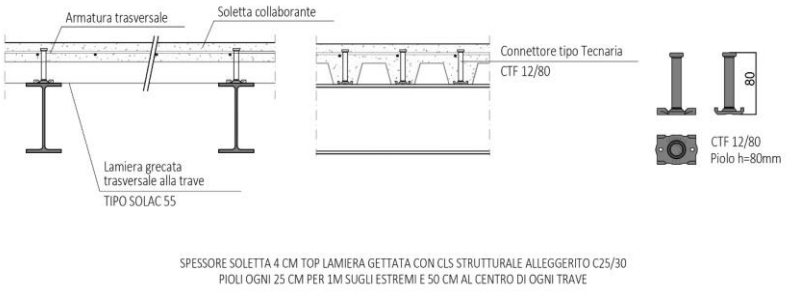


Figura 189 - Particolare del solaio in acciaio con lamiera grecata tipo Solac 55 e pioli tipo Tecnaria CTF 12/80. Scala 1:100.

In conclusione, le analisi hanno evidenziato che l'esoscheletro, assumendo il carico delle azioni orizzontali indotte dal sisma, protegge la struttura esistente, che rimane così destinata a sopportare esclusivamente i carichi gravitazionali per cui era stata originariamente progettata. In particolare, l'esoscheletro si è dimostrato un intervento di rinforzo efficace nella zona in cui i telai in direzione y erano presenti su entrambi i lati dell'edificio, mentre in direzione x è stato sufficiente posizionarlo su un solo lato, incrementando il numero di controventi. In questo modo è stato possibile raggiungere complessivamente un valore di $\zeta_E = 0{,}8$. Tuttavia, una limitazione emersa riguarda la conformazione della struttura esistente, che potrebbe rendere complessa l'installazione dell'esoscheletro in alcune aree. In questi casi, l'esoscheletro da solo non risulta sufficiente e deve essere integrato con altre tipologie di intervento, come evidenziato nella porzione dell'edificio in cui è stato possibile collocarlo solamente in un lato. In questa configurazione, sebbene siano stati ottenuti miglioramenti nel comportamento strutturale, non è stato possibile raggiungere il livello di sicurezza richiesto dalla normativa senza ricorrere anche a interventi locali su alcuni pilastri o travi.

8.2.2. Progetto funzionale

Il progetto funzionale della scuola è stato sviluppato con l'obiettivo di integrare le nuove esigenze didattiche e migliorare l'accessibilità e la fruibilità degli ambienti esistenti. Gli spazi tra le campate dei telai in acciaio dell'esoscheletro sono stati utilizzati per creare vani aggiuntivi, consentendo all'edificio di accogliere soluzioni flessibili e innovative, adatte alle attività didattiche contemporanee. Per l'edificio 1, che rappresenta il fabbricato più critico dal punto di vista strutturale, l'esoscheletro è stato progettato e verificato, mentre negli altri blocchi, costituiti da edifici a un solo piano, è stata ipotizzata una disposizione dell'esoscheletro in cui i telai resistenti sono disposti ortogonalmente alla struttura esistente su un lato e parallelamente su un altro. Nel piano seminterrato del blocco 1, come mostrato in Figura 190, la distribuzione degli spazi è stata riorganizzata per ampliare la mensa e inserire un'aula polifunzionale.



Figura 190 - Pianta del piano seminterrato.

Al piano terra (Figura 191), il blocco 3 è stato progettato per essere utilizzabile anche in orari extrascolastici, ospitando i laboratori, che rispondono alle crescenti esigenze di spazi comuni e multifunzionali, la palestra e i relativi ambienti di servizio, come spogliatoi e depositi. Questa configurazione è stata pensata per favorire un uso flessibile e diversificato degli ambienti, anche al di fuori dell'orario scolastico. Negli altri due blocchi in cui sono presenti le aule, sono stati ricavati gli spazi interciclo, assenti nella configurazione originaria dell'edificio poiché è stato costruito prima dell'entrata in vigore della normativa del 1975. Questi ambienti ampi e flessibili possono essere utilizzati per attività di gruppo e per forme di didattica non frontale, come laboratori creativi o attività collaborative. Inoltre, sono stati previsti ulteriori spazi per la segreteria e per i professori, per le attività amministrative e di supporto.

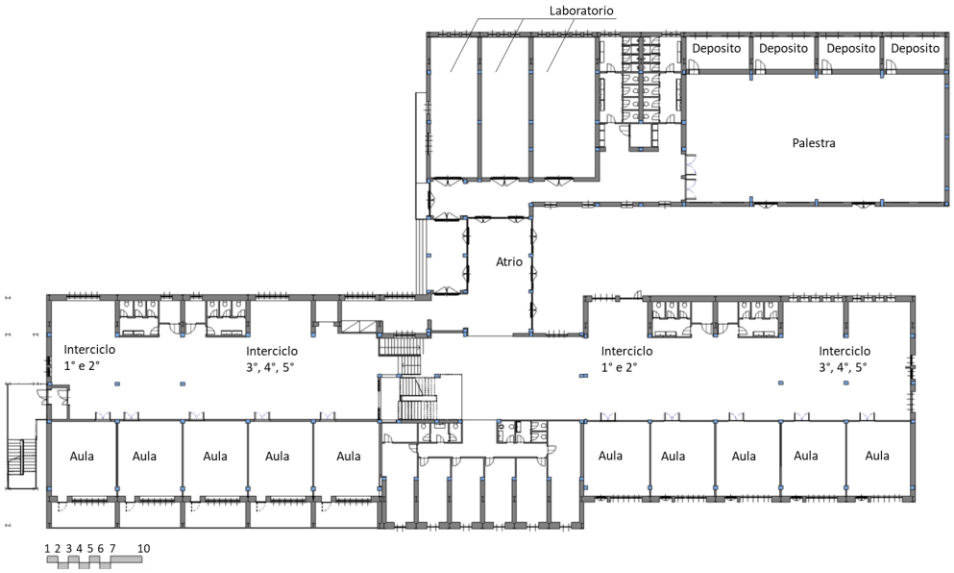


Figura 191 - Pianta del piano terra.

Anche al primo piano (Figura 192), che riguarda esclusivamente l'edificio 1, sono stati creati gli spazi interciclo e inoltre è stata ampliata la biblioteca per accogliere un maggior numero di utenti e di materiali didattici. Le aule di questo piano orientate a sud, così come quelle al piano inferiore, sono state dotate di serre solari, contribuendo al miglioramento delle prestazioni energetiche dell'edificio.

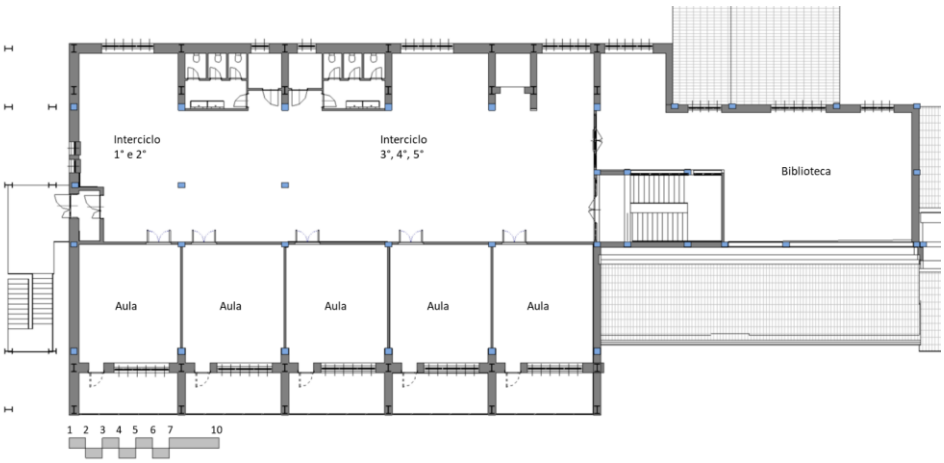


Figura 192 - Pianta del primo piano.

Inoltre, tutti i piani sono stati progettati per garantire piena accessibilità, includendo l'uso dell'ascensore e l'installazione di bagni per persone con disabilità, assicurando così il rispetto delle normative vigenti e promuovendo l'inclusività. Infine, la scala antincendio esterna e l'ascensore, posti all'esterno dell'edificio esistente, sono stati integrati nell'esoscheletro.

In seguito alla riorganizzazione funzionale degli spazi, la superficie coperta della scuola passa da 2.820 m^2 a oltre 3.640 m^2, con un incremento di quasi il 30%. La distribuzione degli ambienti, illustrata in Figura 193, mostra che, ad eccezione degli spazi distributivi, che hanno subito una riduzione del 15%, tutti gli altri sono aumentati.

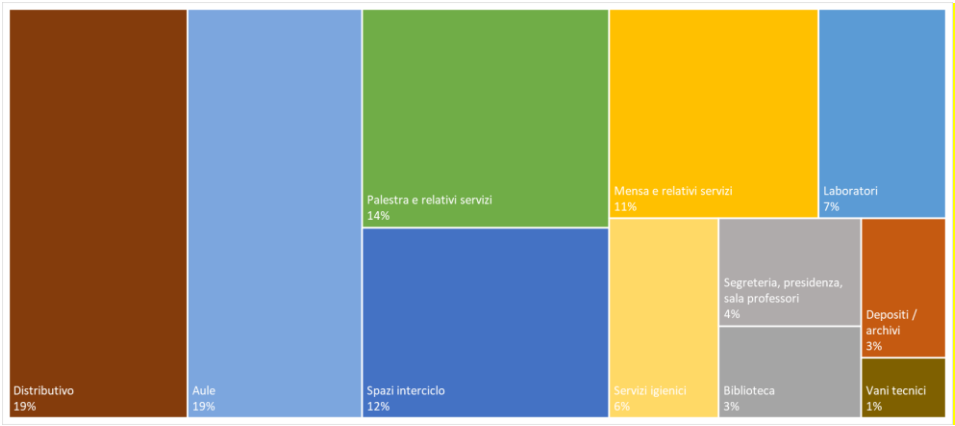


Figura 193 - Analisi delle quantità degli spazi dopo l'intervento.

La valutazione complessiva degli spazi prima e dopo l'intervento, suddivisi per singola destinazione d'uso, viene riportata in Tabella 19.

I maggiori cambiamenti proposti riguardano la realizzazione di spazi dedicati ad attività didattiche alternative a quelle svolte in aula (attività interciclo), che favoriscono l'interazione tra la comunità scolastica. L'intervento di riqualificazione ha permesso di ripensare l'organizzazione degli spazi distributivi trasformandoli da semplici luoghi di transito in aree multifunzionali, adattabili a diverse attività didattiche interciclo. Sono state inoltre aggiunte aule destinate ad attività di laboratorio e, in particolare, uno spazio polifunzionale nei pressi della mensa che potrà essere utilizzato dagli studenti in orario pre e post scolastico. Inoltre, è stata anche ampliata la zona destinata alla presidenza, alla segreteria e all'aula insegnanti, includendo due ulteriori locali, uno destinato ad

attività di studio e preparazione degli insegnanti, l'altro da dedicare al ricevimento dei genitori.

DESTINAZIONE D'USO	ESISTENTE (m2)	POST INTERVENTO (m2)	DIFFERENZA (m2)	%
Attività didattiche	595,95	677,46	81,51	14%
Attività integrative e parascolastiche	160,34	254,47	94,13	59%
Mensa e relativi servizi	310,89	417,26	106,37	34%
Spazi interciclo		446,21	446,21	-
Biblioteca	87,1	124,27	37,17	43%
Distributivo	819,95	695,67	-124,28	-15%
Servizi igienici	192,35	207,8	15,45	8%
Spazi per l'eduzione fisica	452,22	514,018	61,798	14%
Segreteria, presidenza, sala professori	95,64	146,08	50,44	53%
Depositi/archivi	75,77	112,29	36,52	48%
Vani tecnici	29,8	48,24	18,44	62%
TOTALE	**2820,01**	**3643,768**	**823,758**	**29%**

Tabella 19 - Confronto degli disponibili spazi pre e post-intervento.

8.2.3. Progetto energetico

Nell'ambito della progettazione integrata, successivamente alla definizione degli interventi strutturali e alla riorganizzazione degli spazi interni, è stato sviluppato il progetto energetico dell'edificio, con l'obiettivo di migliorare significativamente le prestazioni attraverso l'adozione di soluzioni passive e attive.

Un elemento centrale dell'intervento è stato l'inserimento di serre solari tra le campate dell'esoscheletro, progettate con orientamento a sud per ottimizzare il guadagno solare passivo. Queste, costituite da superfici vetrate ad alte prestazioni, consentono di catturare e immagazzinare l'energia solare riducendo il fabbisogno di riscaldamento nei mesi invernali. Tale spazio, interposto tra

l'esterno e gli ambienti riscaldati interni, funge da barriera termica naturale, contribuendo a minimizzare le dispersioni di calore attraverso l'involucro. Inoltre, le serre sono state progettate in sinergia con la struttura portante dell'esoscheletro, che ne costituisce l'ossatura principale: tale integrazione ha permesso di ridurre i costi di realizzazione, massimizzando al contempo le prestazioni energetiche e strutturali del sistema. Durante i mesi estivi, il surriscaldamento delle serre è controllato attraverso schermature mobili e sistemi di ventilazione naturale, che permettono di evitare l'effetto serra indesiderato, mantenendo un microclima confortevole.

A questo intervento passivo si è aggiunta l'installazione di un sistema di isolamento esterno a cappotto, fondamentale per migliorare le prestazioni termiche delle superfici opache dell'edificio. L'involucro originario, costruito in assenza di normative energetiche, presentava infatti elevate dispersioni. L'introduzione del cappotto ha consentito di ridurre significativamente le perdite di calore in inverno e il guadagno termico indesiderato in estate, passando da una trasmittanza della parete esterna di 1,2547 W/m^2K a 0,2142 W/m^2K. Parallelamente, le finestre esistenti sono state sostituite con infissi a taglio termico e doppi vetri ad alte prestazioni, per ridurre ulteriormente le dispersioni attraverso le superfici trasparenti.

L'esoscheletro, oltre a fornire il necessario supporto strutturale per le serre solari, ha contribuito significativamente alla riorganizzazione funzionale dell'edificio, creando nuovi spazi interni fruibili e consentendo un miglioramento nella distribuzione degli ambienti, in linea con le nuove esigenze della didattica. Questa trasformazione ha comportato un incremento del volume riscaldato dell'edificio, aspetto che è stato considerato nel modello energetico aggiornato tramite il software Termus, al fine di valutare in modo accurato le prestazioni energetiche complessive del sistema.

Nonostante ciò, l'intervento ha consentito di ottenere un significativo miglioramento delle prestazioni energetiche dell'edificio (Tabella 20), con un avanzamento complessivo di tre classi energetiche rispetto allo stato di fatto, come illustrato in Figura 194.

Indici	Prima dell'intervento	Dopo l'intervento
Indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale non rinnovabile EPhnren	248,540 kWh/m²anno	123,551 kWh/m²anno
Indice di prestazione termica utile per riscaldamento Eph,nd	173,183 kWh/m²anno	85,607 kWh/m²anno
Trasmittanza termica periodica media Yie	0,791 W/m²K	0,152 W/m²K
Coefficiente globale di scambio termico medio per prasmissione H'T	1,679 W/m²K	0,527 W/m²K
Area solare equivalente estiva Asol'	0,0433	0,0122

Tabella 20 - Confronto degli indici energetici dell'edificio prima e dopo l'intervento.

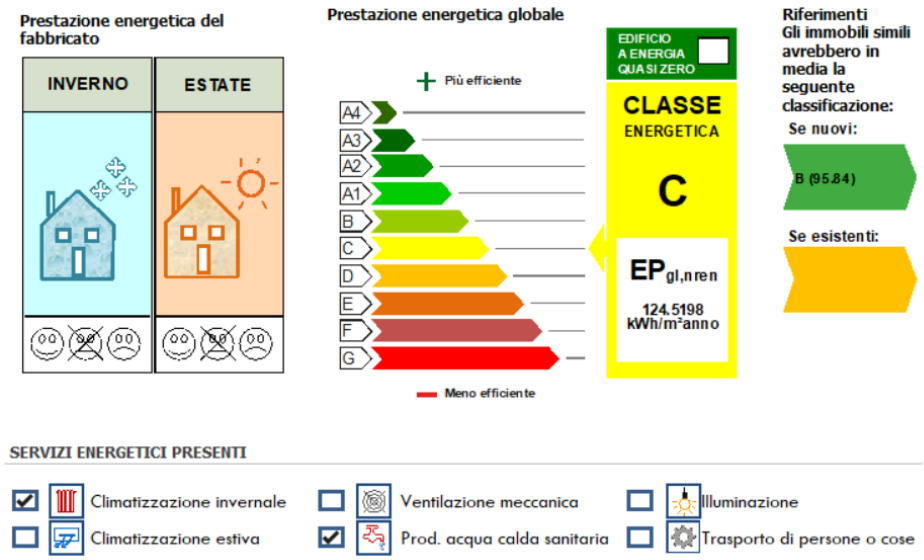


Figura 194 - Prestazione energetica del fabbricato dopo l'intervento.

L'approccio integrato ha dimostrato l'efficacia della combinazione tra soluzioni passive, come le serre solari, e interventi di riqualificazione strutturale e funzionale. Questo risultato sottolinea come l'esoscheletro possa fungere non solo da sistema per il miglioramento sismico, ma anche da infrastruttura per la creazione di nuovi spazi funzionali ed energeticamente efficienti, in un'ottica di sostenibilità e valorizzazione del patrimonio edilizio esistente.

8.3. Applicazione della metodologia MDO

Sebbene gli interventi che seguono un approccio olistico, come l'esoscheletro esaminato precedentemente, rappresentino un significativo miglioramento nella riqualificazione del patrimonio di edilizia scolastica esistente, l'analisi condotta sulle singole discipline (funzionale, energetica e strutturale) risulta spesso frammentata. Le interazioni tra gli obiettivi disciplinari, così come i potenziali conflitti o le sinergie tra di essi, non vengono pienamente esplorati. Per superare questa limitazione, la ricerca ha esteso l'analisi proponendo l'applicazione della metodologia di ottimizzazione multidisciplinare (MDO) con l'obiettivo di studiarne la fattibilità e i potenziali vantaggi nella fase di progettazione degli interventi per la riqualificazione dell'edilizia esistente. Infatti, facendo riferimento alle applicazioni già consolidate in altri settori in cui questa metodologia è stata integrata in modo operativo nei processi progettuali, l'MDO consente un approccio per integrare in maniera sistematica i diversi aspetti progettuali, analizzare le interazioni tra le discipline, garantire un equilibrio ottimale tra le prestazioni richieste e automatizzare il processo di generazione di numerose alternative progettuali.

Dopo aver definito e validato il workflow operativo dell'ottimizzazione multidisciplinare tramite il caso semplificato della singola aula, l'approccio è stato esteso al caso generale dell'esoscheletro applicato all'intero edificio della scuola primaria Matteotti. Data la necessità di gestire l'integrazione tra la piattaforma PIDO e i software comunemente usati nel settore edilizio e le complessità computazionali legate all'analisi di un edificio completo, particolarmente rilevanti nell'ambito di simulazioni di ottimizzazione multidisciplinare, è stato deciso di concentrarsi sull'ottimizzazione degli aspetti strutturali dell'intervento. Questo approccio ha consentito di esplorare in dettaglio le potenzialità dell'esoscheletro come soluzione di retrofit sismico e di stabilire una base metodologica solida per future estensioni della ricerca, che potranno includere l'integrazione degli aspetti energetici. La scelta di una progressione graduale, dalla validazione su un caso semplificato all'applicazione su scala completa, è stata fondamentale per testare l'efficacia della metodologia e fornire un quadro più solido per eventuali estensioni e applicazioni su larga scala. In particolare, ha offerto l'opportunità di affinare le procedure di

ottimizzazione, migliorare l'efficienza delle analisi computazionali e identificare potenziali strategie per affrontare le complessità derivanti dall'applicazione su edifici reali.

Per l'ottimizzazione dell'esoscheletro, si è scelto di adottare l'approccio con il modello 1D basato sui dati che consente di semplificare significativamente la complessità computazionale, mantenendo al contempo un livello adeguato di accuratezza nell'analisi. Grazie all'utilizzo di dati derivati dalle simulazioni ad alta fedeltà, il modello 1D è in grado di rappresentare in modo efficace il comportamento strutturale dell'esoscheletro, facilitando l'esplorazione di numerose configurazioni progettuali in tempi ridotti. Il workflow adottato e gli strumenti impiegati nel processo di ottimizzazione sono illustrati in Figura 195, che fornisce una rappresentazione sistematica delle fasi seguite, evidenziando la sequenza delle operazioni che verranno descritte dettagliatamente in seguito.

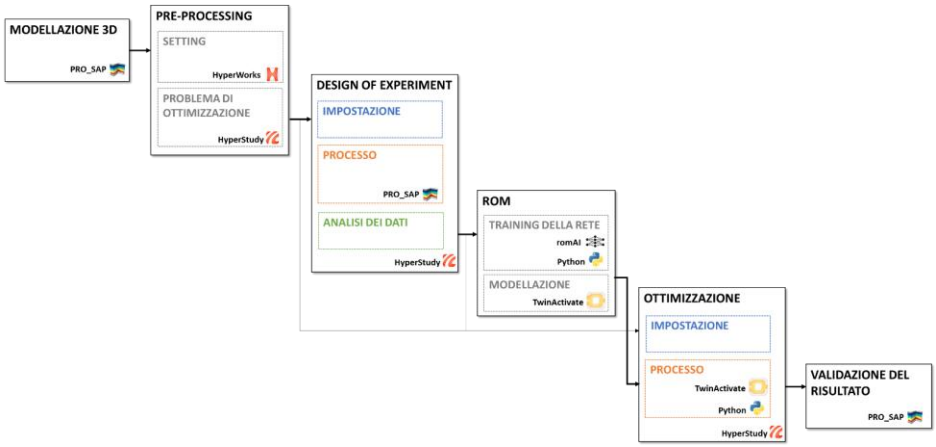


Figura 195 - Workflow del processo adottato per l'ottimizzazione dell'esoscheletro.

Il modello tridimensionale di partenza corrisponde a quello realizzato nell'ambito della progettazione strutturale tradizionale dell'esoscheletro. Nella fase di pre-processing viene definito il problema di ottimizzazione: l'obiettivo è quello di minimizzare la massa di acciaio utilizzata al fine di contenere i costi complessivi dell'intervento. Le sei variabili di progetto, rappresentate in Figura 196, sono state definite per guidare il processo di generazione delle combinazioni da analizzare nell'ambito dell'ottimizzazione.

Bounds | Modes | Distributions | Links | Constraints

+ Add Input Variable | Remove Input Variable

	Active	Label	Varname	Lower Bound	Nominal	Upper Bound	Comment	Category
1	☑	X	var_1	-350.00000	-250.000...	-240.00000		Controlled
2	☑	Y1	var_2	-350.00000	-250.000...	-100.00000		Controlled
3	☑	Mat	var_3	11	11	13		Controlled
4	☑	Sez 1	var_4	86	86	101		Controlled
5	☑	Sez 3	var_6	81	81	102		Controlled
6	☑	Y2	var_7	N/A	N/A	N/A		Controlled

Figura 196 - Variabili di progetto.

La prima variabile rappresenta la traslazione lungo l'asse x dell'esoscheletro situato lungo il lato corto dell'edificio: la lunghezza della campata del telaio in questa direzione può variare da -250 cm (dimensione minima necessaria per includere anche la scala antincendio all'interno dell'esoscheletro) a -350 cm. La seconda variabile si riferisce alla traslazione lungo l'asse y dell'esoscheletro posto nella parte longitudinale verso est (in basso nella Figura 197), con la grandezza della campata che può variare da -100 cm a -350 cm.

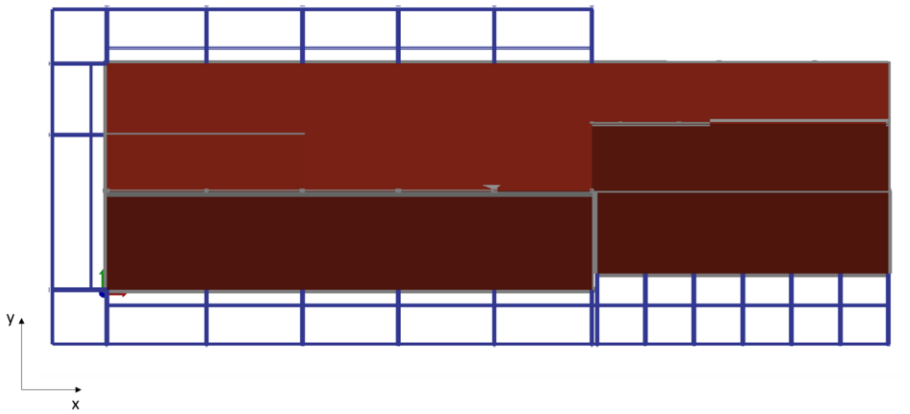


Figura 197 - Pianta della copertura dell'Edificio 1 con posizionamento dell'esoscheletro.

La terza variabile (Mat) riguarda il tipo di acciaio impiegato, la quarta (Sez 1) si riferisce alla tipologia di sezione HEB, la quinta (Sez 3) è relativa al tipo di profilo degli elementi UPN. Nello specifico, i valori che queste variabili possono assumere sono definiti nella Tabella 21. Infine, l'ultima variabile rappresenta la traslazione lungo l'asse y dell'esoscheletro posto nella parte longitudinale verso nord (in alto nella Figura 197): in questo caso la variabile assume un valore tale

da garantire che la lunghezza della campata del telaio corrisponda a quella definita dalla seconda variabile.

Numero variabile	Nome variabile	Valore assunto	ID
3	Mat	S235	11
		S275	12
		S355	13
4	Sez 1	HEB 360	86
		HEB 400	92
		HEB 450	94
		HEB 500	100
		HEB 340	101
5	Sez 3	2 UPN 240	81
		2 UPN 280	87
		2 UPN 300	93
		2 UPN 260	102

Tabella 21 - Valori assunti dalla terza, quarta e quinta variabile.

Dopo aver impostato il problema di ottimizzazione all'interno dell'orchestratore, è possibile avviare il Design of Experiment (DoE) e iniziare il processo automatico di generazione delle combinazioni di variabili da analizzare, che in questo caso sono 50.

Evaluation Tasks | **Evaluation Data** | Evaluation Plot | Evaluation Scatter

Show in Study Directory | Show in Explorer | Verify

	X	Y1	Mat	Sez 1	Sez 3	Y2
1	-328.00000	-250.00000	13	100	95	1750.0000
2	-306.00000	-150.00000	12	92	87	1650.0000
3	-284.00000	-300.00000	12	101	95	1800.0000
4	-262.00000	-200.00000	11	94	81	1700.0000
5	-345.60000	-130.00000	12	101	81	1630.0000
6	-323.60000	-280.00000	11	94	102	1780.0000
7	-301.60000	-180.00000	13	86	87	1680.0000
8	-279.60000	-330.00000	13	100	95	1830.0000

Figura 198 - Schermata del software Hyperstudy che mostra una parte della test matrix contenente i valori delle combinazioni di variabili generate dal Design of Experiment (DoE).

Una volta che il DoE è stato realizzato, le diverse configurazioni sono state valutate all'interno del software di analisi agli elementi finiti PRO_SAP, impostando i parametri suggeriti dall'algoritmo MELS di Hyperstudy. Tuttavia è emerso un problema relativo alla compatibilità di questo tipo di programma con i software PIDO, poiché il software di analisi strutturale non permette l'esecuzione in modalità batch, impedendo così l'automazione del processo. Di conseguenza, è stato necessario creare manualmente i modelli con i parametri modificati, un'operazione che ha comportato un notevole aumento dei tempi di lavoro.

Le configurazioni sono state salvate in cartelle "run_xxxx" (Figura 199) dove xxxx rappresenta l'identificativo del caso analizzato (da 0001 a 0050).

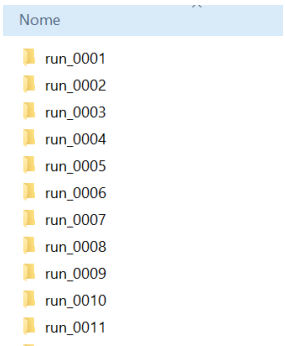


Figura 199 - Struttura delle cartelle contenenti le configurazioni salvate.

All'interno di ciascuna cartella, sono presenti i due output generati dal software PRO_SAP, insieme al modello strutturale *.PSP* creato con le variabili di input assegnate:

1) *prova.csv*: è il file contenente diverse informazioni, tra cui la massa totale delle travi e dei pilasti in acciaio, espressi in kN.
2) *prova.doc*: è il file della relazione finale del modello, contenente specifiche tecniche del progetto (nodi, materiali, elementi, carichi, ecc.) e i risultati dell'analisi, come ad esempio la verifica delle travi e dei pilastri dell'edificio esistente in cemento armato.

Per automatizzare il processo di lettura delle informazioni utili, è stato realizzato un codice Matlab, il cui scopo è:

1) leggere i file *prova.doc* e *prova.csv* all'interno delle 50 cartelle;
2) salvare per ogni elemento lo stato della verifica del requisito progettuale, sia delle travi che dei pilastri;
3) salvare il valore della massa delle travi e pilastri;
4) escludere dal punto 2) i risultati degli elementi a cui non si è interessati (mentre l'analisi riguarda l'intero edificio 1, la verifica delle travi e dei pilastri esistenti in cemento armato, e quindi il controllo dell'efficacia dell'esoscheletro, si concentra solo sulla parte della struttura dove esso è posizionato lungo l'intero perimetro. Automatizzare questa fase consente di risparmiare molto tempo poiché, altrimenti, sarebbe stato necessario aprire manualmente ogni modello e verificare, tramite l'interfaccia grafica, se tutti gli elementi risultano conformi alle normative);
5) generare una matrice finale, contenente 172 colonne (il numero degli elementi individuati sopra) e 50 righe (il numero di valutazioni effettuate durante il DOE);
6) generare una matrice finale, contenente 2 colonne (il numero dei due contributi di massa da valutare) e 50 righe (il numero di valutazioni effettuate durante il DOE);
7) salvare la matrice 6) e 7) come file *.csv*.

Il codice è descritto in dettaglio nell'

Appendice H – Codice Matlab per applicazione MDO al caso di studio. Nella Figura 200 sono riportati i valori della distribuzione della massa, rappresentati mediante una scala cromatica, per le 50 configurazioni identificate nel DoE, relative alle traslazioni lungo gli assi X e Y.

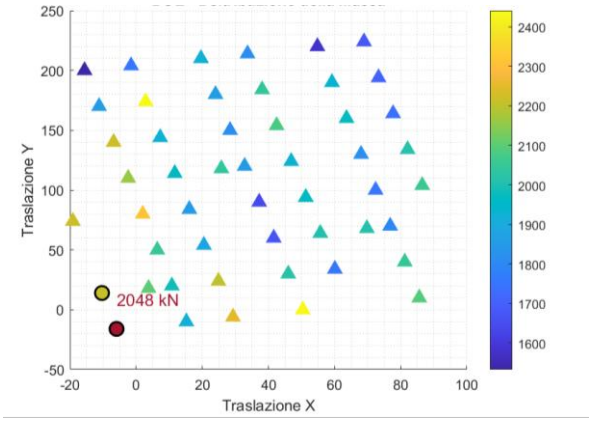


Figura 200 - Distribuzione della massa nelle configurazioni di variabili del DoE.

Una volta terminato il DoE e raccolto gli output per ogni combinazione di variabili di progetto, è possibile realizzare la loro ottimizzazione, sfruttando nuovamente lo strumento Hyperstudy. Tuttavia, rispetto al software Acusolve, PRO_SAP non prevede un'automatizzazione, come già descritto precedentemente. Pertanto, volendo ottenere un processo di ottimizzazione che non preveda alcun intervento umano e che riduca il tempo di generazione dati, è stato deciso di creare delle reti neurali partendo dai dati a disposizione del DoE. La bontà della metodologia è stata provata nel paragrafo 6.2.2, dove è stato dimostrato come sia possibile accelerare significativamente i tempi di simulazione, con una modesta perdita di accuratezza dovuta all'utilizzo di reti neurali. Queste, per definizione, sono funzioni matematiche che interpolano i dati impiegati durante il processo di apprendimento.
Il dataset a disposizione prevede:

1) 5 Input
    a. Traslazione lungo asse X
    b. Traslazione lungo asse Y
    c. ID del materiale in Acciaio
    d. ID della sezione HEB

    e. ID della sezione UPN
2) 172 output binari (sono le travi e i pilastri in cemento armato della porzione di edificio esistente da verificare):
    a. 1 indica che l'elemento verifica il requisito progettuale
    b. 0 indice che l'elemento non verifica il requisito
3) 2 output scalari:
    a. Massa delle travi (in kN)
    b. Massa dei pilastri (in kN)

Considerando la natura indipendente di ciascun output, è stato deciso di generare 174 reti neurali separate, al fine di ottenere delle relazioni matematiche che siano più specifiche possibili al problema valutato, con il conseguente aumento dell'accuratezza della rete. Inoltre, questa scelta semplifica la struttura della rete, in quanto questa avrà bisogno di meno neuroni e strati per apprendere la relazione input-output.
Prima di procedere con il processo di addestramento della rete, gli input sono stati ulteriormente manipolati. In particolare, gli ID dei materiali e delle sezioni, essendo valori scalari, non presentano una relazione diretta con l'output. Infatti, ID crescenti non corrispondono necessariamente a proprietà crescenti o decrescenti, come invece avviene per la traslazione. Pertanto, per garantire una corretta interpretazione da parte della rete neurale, è stato necessario applicare una trasformazione adeguata a questi dati, in modo che possano essere trattati in modo significativo durante l'addestramento:

1) la 3° colonna è stata manipolata in modo tale che si ottengano 3 colonne:
    a. La 1° assume valore 1 se l'ID = 11, 0 viceversa
    b. La 2° assume valore 1 se l'ID = 12, 0 viceversa
    c. La 3° assume valore 1 se l'ID = 13, 0 viceversa
2) la 4° colonna è stata manipolata in modo tale che si ottengano 5 colonne:
    a. La 1° assume valore 1 se l'ID = 86, 0 viceversa
    b. La 2° assume valore 1 se l'ID = 92, 0 viceversa
    c. La 3° assume valore 1 se l'ID = 94, 0 viceversa
    d. La 4° assume valore 1 se l'ID = 100, 0 viceversa

e. La 5° assume valore 1 se l'ID = 101, 0 viceversa

3) la 5° colonna è stata manipolata in modo tale che si ottengano 4 colonne:
    a. La 1° assume valore 1 se l'ID = 81, 0 viceversa
    b. La 2° assume valore 1 se l'ID = 87, 0 viceversa
    c. La 3° assume valore 1 se l'ID = 93, 0 viceversa
    d. La 4° assume valore 1 se l'ID = 102, 0 viceversa

Tale processo si chiama *one-hot encoding*. Si ottengono complessivamente ulteriori 12 colonne, che vengono sostituite alle 3 colonne di partenza: in questo modo, il dataset finale risulta essere costituito da 14 colonne di input e 174 colonne di output, che mantengono la stessa struttura descritta precedentemente.

La generazione delle reti neurali è stata effettuata valutando sia romAI, strumento commerciale della suite Altair, sia codici Python personalizzati, come descritto nel caso applicativo dell'aula. Tradizionalmente, esistono due tipologie di reti neurali:

1) Regressione: la rete ha lo scopo di apprendere la relazione input-output. Un esempio quello descritto nel paragrafo 6.2.3, dove è stata descritta la relazione tra le variabili di progetto e la temperatura registrata.
2) Classificazione: la rete ha lo scopo di capire come può essere categorizzato l'output, partendo dai dati di input. Un esempio classico è quello di capire se un'immagine rappresenta un cane o un gatto, assegnando un'etichetta di categoria specifica all'output.

Mentre nel caso dell'aula, gli output contenevano valori scalari (problema di regressione), in questo caso le 172 colonne di output contengono valori binari: è necessario, pertanto, realizzare una rete neurale di classificazione. La struttura di una rete neurale di questo tipo è molto simile a quella di regressione, con eccezione dell'ultimo strato, dove tipicamente si utilizza una funzione di attivazione specifica, il sigmoide:

$$P(x) = \frac{1}{1 + e^{-t}} \tag{29}$$

Questa funzione di attivazione riceve come input l'uscita dell'ultimo strato della rete e fornisce un output confinato nell'intervallo [0, 1]. Inoltre, è una curva fortemente non lineare con andamento a S, come si nota nella Figura 201: questo comportamento permette di catturare efficacemente le relazioni tra le caratteristiche di input e le classi di output.

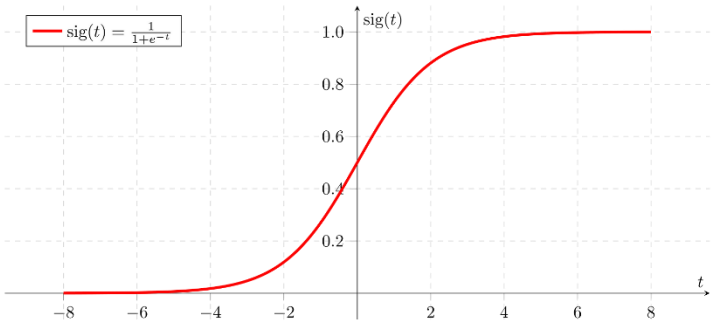


Figura 201 - Andamento della funzione sigmoide.

La scelta di considerare questa funzione di attivazione impone la necessità di costruire le reti neurali dei 172 output mediante codice Python personalizzato, in quanto romAI non consente di applicare una funzione di attivazione di questo tipo, né tanto meno l'applicazione sull'ultimo strato della rete. Per quanto riguarda invece i due output delle masse delle travi e pilastri, è stato utilizzato il software romAI, facendo riferimento all'esperienza dell'aula. Il codice Python e il modello romAI, sviluppati per gestire rispettivamente gli output binari degli elementi da verificare e quelli scalari delle masse, vengono descritti nel dettaglio nell'Appendice I – Rete neurale output binari e nell'Appendice L – Rete neurale output scalari.

Di seguito, viene riportato un riassunto delle accuratezze delle 172 reti create con il codice Python:

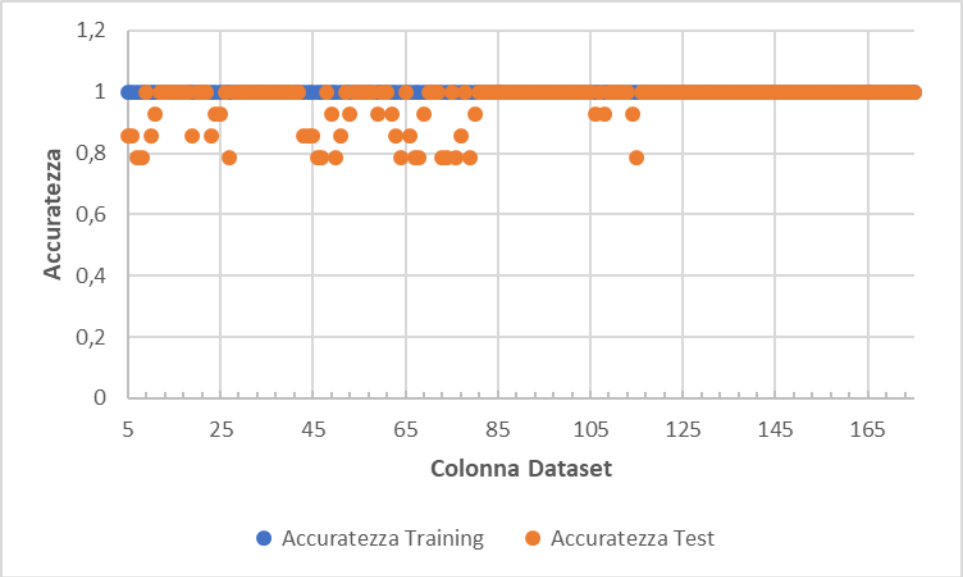


Figura 202 - Accuratezza delle reti generate con il codice Python.

In Figura 202, si può notare che tutte le reti raggiungono un'accuratezza pari ad 1 (predizione perfetta) sul dataset di addestramento; sul dataset di test, tuttavia, 38 reti presentano un'accuratezza minore di 1, con un minimo di 0.8 per 14 elementi. Considerando che le varie reti sono state addestrate su pochi dati (50) e il rapporto tra il numero di caratteristiche (12) e il numero di campioni utilizzati (40), il valore dell'accuratezza basso sul dataset di test era un dato atteso. Inoltre, sebbene l'approfondimento della rete o l'incremento del suo spessore possano migliorare l'accuratezza sul dataset di addestramento (già molto buoni), questi interventi non contribuirebbero a migliorare la capacità di generalizzazione del modello. Al contrario, un modello più complesso potrebbe portare a una riduzione dell'accuratezza sul dataset di test, a causa di un eccessivo adattamento ai dati di addestramento (overfitting).
Completata la fase di generazione delle reti, è necessario costruire dei modelli che:

- ricevano in input la nuova combinazione di variabili di progetto da valutare;
- forniscano gli input alle varie reti, sia degli output binari che quelli scalari delle masse;
- stampino i valori predetti.

In particolare, sono stati utilizzati:

- un codice Python, che fornirà in output i valori binari mediante l'uso di reti neurali (Appendice M – Codice Python);
- un modello tramite il software TwinActivate dove sono stati caricate le due reti romAI allenate per la predizione degli output scalari delle masse delle travi e pilasti (Appendice N – Modello TwinActivate).

Dopo aver impostato l'intero processo, generato il Design of Experiment e addestrato le reti neurali, nella fase successiva avvengono le simulazioni di ottimizzazione finalizzate a individuare la configurazione ottimale, cioè quella che con il minor peso e in cui tutti i 172 elementi della struttura in cemento armato soddisfano le verifiche. L'ottimizzazione è stata implementata tramite il software Altair Hyperstudy utilizzando un processo totalmente automatizzato che sfrutta le reti neurali addestrate e i vari modelli, Python o TwinActivate, descritti precedentemente. Di seguito, viene illustrato come è stato configurato l'orchestratore Hyperstudy, definite le variabili di progetto, raccolti gli output e applicati i vincoli. Il primo passo consiste nell'impostazione del processo baseline, ossia il processo che, a partire dalla definizione di alcune variabili di progetto, permette di ottenere gli output desiderati. In questa fase vengono definite sia le variabili di progetto che gli output, in modo tale che l'ottimizzatore possa operare utilizzando variabili predefinite. In particolare sono stati definiti due *modelli* Hyperstudy, ossia due sotto-processi che vengono eseguiti in serie con lo scopo di generare gli output a cui si è interessati (Figura 203).

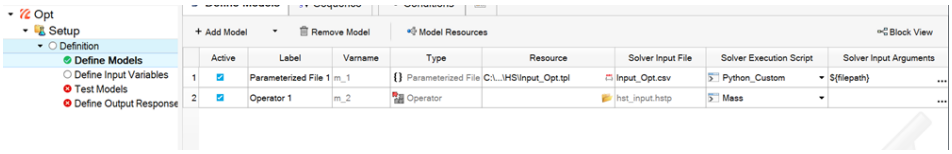


Figura 203 - Definizione dei modelli (sotto-processi) in Hyperstudy.

Il primo modello è un *Parametrized File*, una tipologia che consente di definire un file all'interno del quale è possibile selezionare ed evidenziare (come mostrato in Figura 204) i valori che si vuole manipolare durante l'ottimizzazione. Per questo scopo è stato scelto il file *Input_Opt.csv*, ossia il file che viene letto dal codice Python descritto nell'Appendice N – Modello TwinActivate.



Figura 204 - File che consente la selezione dei valori da manipolare durante il processo di ottimizzazione.

Inoltre, è possibile definire l'operazione (ossia un processo) che viene eseguita appena il file *Input_Opt.csv* è stato generato con le variabili di progetto aggiornate (in *Solver Execution Script*). Le operazioni da eseguire sono salvate dentro un file *.bat,* riportato in Figura 205. Si può notare come, nella riga 1, viene inizializzato l'ambiente Python dove sono state installate le librerie necessarie. Successivamente, viene sottomesso in batch il codice Python.

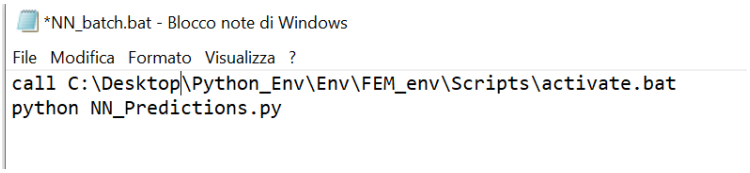


Figura 205 - Sottomissione del codice Python in batch per l'automatizzazione del processo.

Il secondo modello è un *Operator*, una tipologia che non richiede alcun file o modello da dover manipolare, ma permette di eseguire esclusivamente un'operazione. In questo caso, è stato definito (sempre in *Solver Execution Script*) un altro file *.bat*, riportato in Figura 206, in cui nella prima riga viene sottomesso il modello TwinActivate.

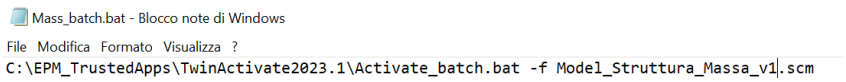


Figura 206 - Sottomissione del modello TwinActivate in batch per l'automatizzazione del processo.

Una volta definiti i *modelli* in Hyperstudy, è possibile configurare le variabili di progetto (Figura 207), specificandone i relativi range di oscillazione (Figura 208) e, se necessario, eventuali relazioni tra di esse. Le seguenti figure riportano

rispettivamente l'elenco delle variabili di progetto (già definite all'inizio del processo) e i loro intervalli di oscillazione.

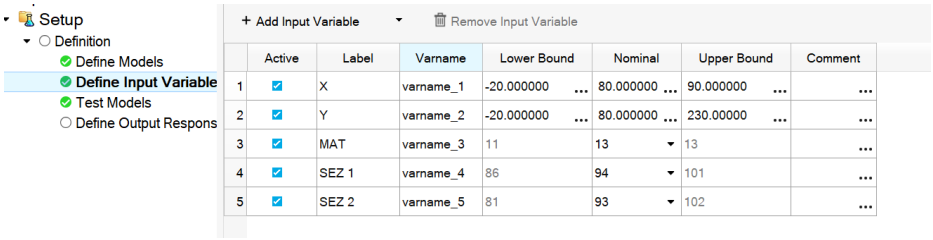


Figura 207 - Variabili di progetto.

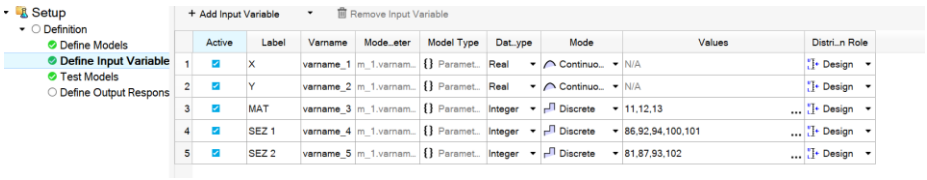


Figura 208 - intervalli di oscillazione delle variabili di progetto.

Dopo aver assegnato le variabili di progetto, è possibile verificare l'automatizzazione del processo baseline, testando i due sotto-processi. Come mostrato in Figura 209, ogni sotto-processo prevede tre step differenti:

- *Write*: genera il nuovo file o modello con le variabili di progetto aggiornate. In alcuni casi, come nel caso dell'Operator, questo step potrebbe non prevedere alcun output;
- *Execute*: prevede la sottomissione del "*Solver Execution Step*", ossia i due file *.bat*;
- *Extract*: raccogli gli output generati.

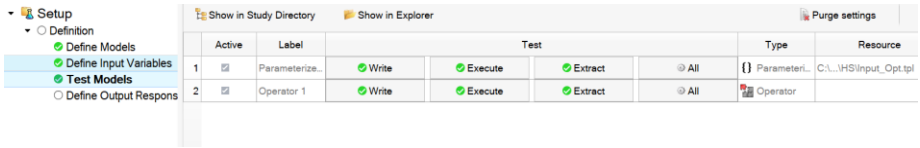


Figura 209 - Verifica dell'automatizzazione del processo baseline.

Dal momento che tutti gli step indicati sono verdi, il processo baseline risulta completato con successo, consentendo di procedere alla fase finale: la raccolta dei valori di output da monitorare. I file generati dai due modelli, Python e TwinActivate, sono stati caricati in *DataSource* (Figura 210), ottenendo:

- *ds_1*: rappresenta il file *predizioni_finali.csv*, che contiene la predizione degli output binari. Come illustrato in Figura 211, grazie al reader di Hyperstudy, vengono rappresentati i 172 valori presenti nella Colonna 1;
- *ds_2*: rappresenta il file *output.csv*, generato dal modello TwinActivate. In questo caso, viene caricata la prima colonna del file;
- *ds_3*: rappresenta il file *output.csv*, analogo a *ds_2*, ma con caricamento della seconda colonna.

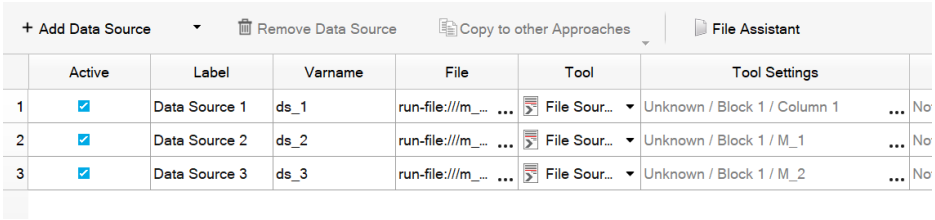


Figura 210 - Caricamento in DataSource dei dati generati.

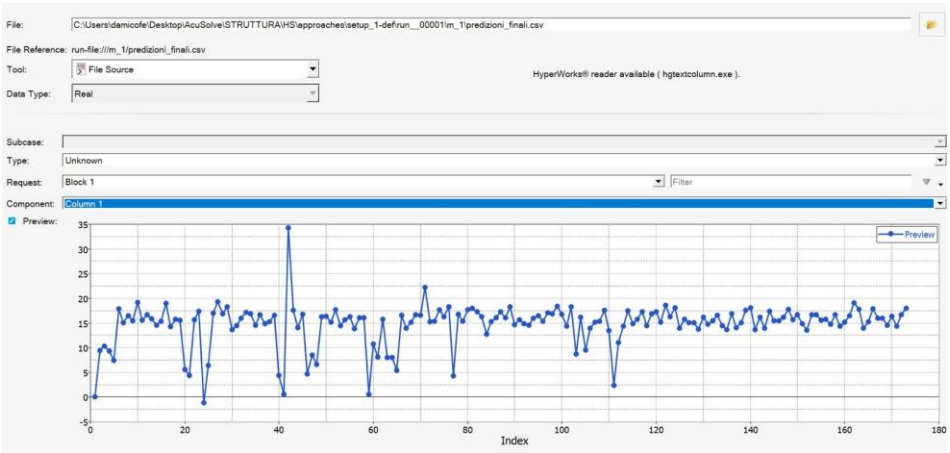


Figura 211 - Rappresentazione dei valori dei 172 elementi.

Definiti i file da cui leggere i valori finali, è possibile assegnare gli output da estrarre a partire dai DataSources. Come si nota in Figura 212:

- i 172 valori binari sono stati caricati tramite la variabile *ds_1* (per esempio, il 172° valore corrisponde al valore di posto 171 nella variabile *ds_1*);
- la massa delle travi (M_1) è definita tramite la variabile *ds_2;*
- la massa dei pilastri (M_2) è definita tramite la variabile *ds_3;*
- la massa totale (M) è definita come la somma M_1+M_2.

170	☑	298	r_170	ds_1[169] ...	1.0284464	>= 0.5000000 ...	Real
171	☑	299	r_171	ds_1[170] ...	1.0191764	>= 0.5000000 ...	Real
172	☑	300	r_172	ds_1[171] ...	1.0074909	>= 0.5000000 ...	Real
173	☑	M_1	r_173	ds_2[1] ...	780.88981	+	Real
174	☑	M_2	r_174	ds_3[1] ...	1568.1363	+	Real
175	☑	M	r_175	r_173+r_174 ...	2349.0261	Minimize ...	Real

Figura 212 - Definizione degli output da estrarre.

Infine, sugli output sono stati applicati degli obiettivi. In particolare:

- Gli output binari dovranno rispettare la condizione per cui $x \geq 0.5$. Tale soglia è stata scelta perché gli output forniti dalle reti non sono esclusivamente 0 o 1, ma possono assumere un qualsiasi valore in tale intervallo. Pertanto,

$$\begin{cases} x = 1 & se\ x \geq 0.5 \\ x = 0 & se\ x < 0.5 \end{cases} \qquad (30)$$

- La massa totale dell'acciaio deve essere minimizzata.

Conclusa la fase di definizione del processo baseline, è possibile importare il setup realizzato per eseguire l'ottimizzazione. Come mostrato in Figura 213, è stato utilizzato l'algoritmo *Global Response Search Method* (GRMS) con un numero di valutazioni pari a 70. Inoltre, per consentire all'algoritmo di avere maggiori informazioni sul comportamento degli output all'interno dello spazio di progetto, sono state importate, tramite file .csv, le 50 configurazioni valutate nella fase di generazione del DoE.

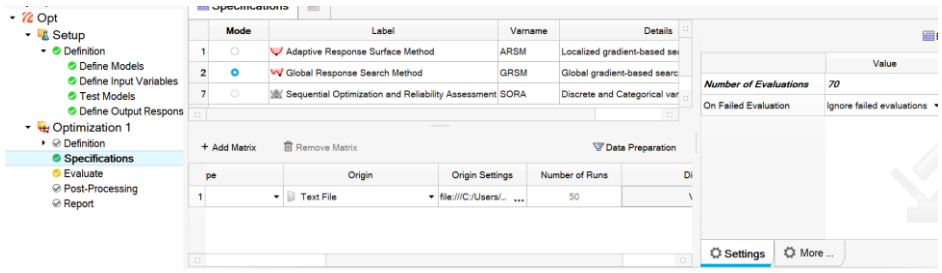


Figura 213 - Definizione dell'algoritmo di ottimizzazione.

Al termine delle simulazioni di ottimizzazione, è stato ottenuta una configurazione ottimale, che assume i valori delle variabili riportati in Tabella 22:

Variabile	Valore
Traslazione X	-19.41 m
Traslazione Y	-11.92 m
ID materiale Acciaio	13 (S355)
ID sezione HEB	86 (HEB 360)
ID sezione UPN	102 (2 UPN 260)
Massa Totale Acciaio	1897.4 kN

Tabella 22 - Valori delle variabili nella configurazione ottimale.

Come è possibile notare, il valore della massa ottenuta è inferiore del 17.78% rispetto alla configurazione di partenza; ciò è dovuto principalmente alla traslazione negativa in X e Y, che permette di contenere la massa. Infatti, analizzando la Figura 214, si osserva come l'ottimizzazione abbia concentrato le nuove configurazioni, candidate ad essere le migliori, principalmente nel quadrante in basso a sinistra, corrispondente ai range di traslazione X e Y inferiori.

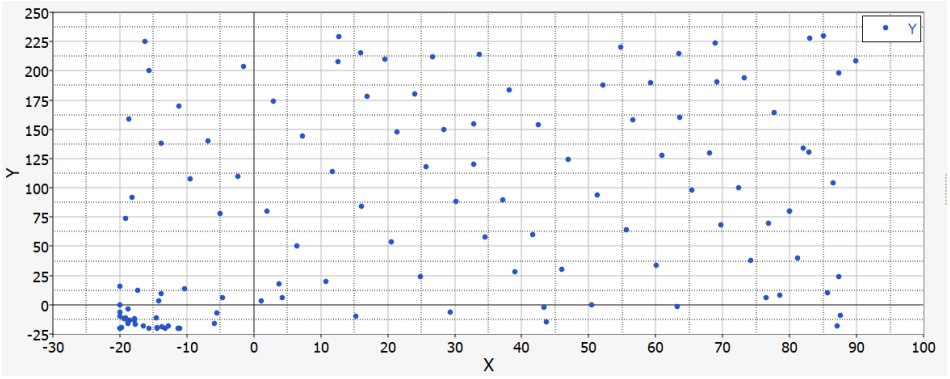


Figura 214 - Andamento della traslazione lungo l'asse x e y nelle configurazioni analizzate nell'ottimizzazione.

Guardando invece l'andamento del grafico in Figura 215, si osserva come i valori della massa oscillino intorno a un valore più o meno costante, che è definito dalla linea rossa, che risulta pressoché coincidente con il valore della massa minima accettabile trovata. Questo comportamento evidenzia che l'ottimizzatore sta convergendo verso un valore della massa, dimostrando che il limite di 70 valutazioni inizialmente impostato è stato sufficiente per identificare una configurazione ottimale.

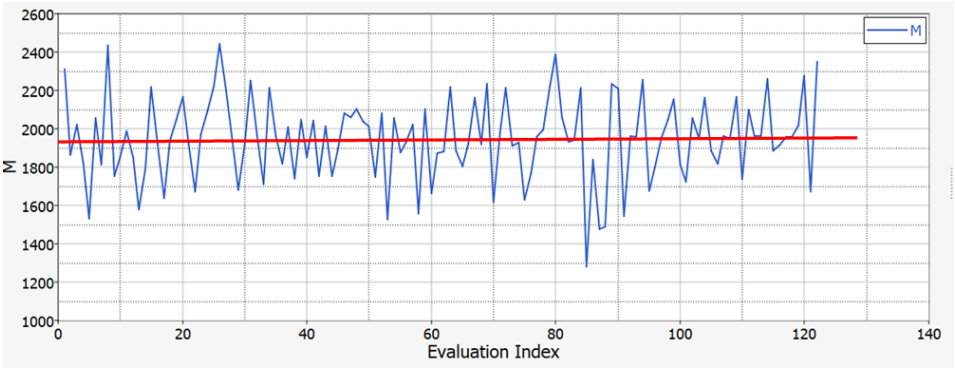


Figura 215 - Valutazione dell'andamento della massa nelle configurazioni.

Inoltre, i profili degli elementi in acciaio risultano essere più piccoli rispetto al riferimento iniziale: si passa da un profilo UPN 300 a un UPN 260 e da un HEB 450 a un HEB 360.

L'ultimo passo eseguito è la verifica della configurazione che Hyperstudy considera ottimale, derivante dai modelli guidati dai dati: per la validazione, è stato necessario riportare i valori ottimali delle variabili nel modello PRO_SAP ed eseguire l'analisi per valutare l'accuratezza della configurazione trovata, verificando che:

- la massa sia in linea con quanto predetto dai due modelli romAI;
- ciascun elemento soddisfi effettivamente i requisiti progettuali.

A seguito del processo di validazione, si è ottenuto che la massa effettiva risulta maggiore solo del 2.74% rispetto a quella predetta, essendo 1949.3 kN. Inoltre, ogni trave e pilastro della struttura in cemento armato esistente soddisfa le verifiche, dimostrando la perfetta accuratezza delle reti neurali Python. Nelle figure seguenti sono riportati alcuni esempi della verifica degli elementi nel modello agli elementi finiti:

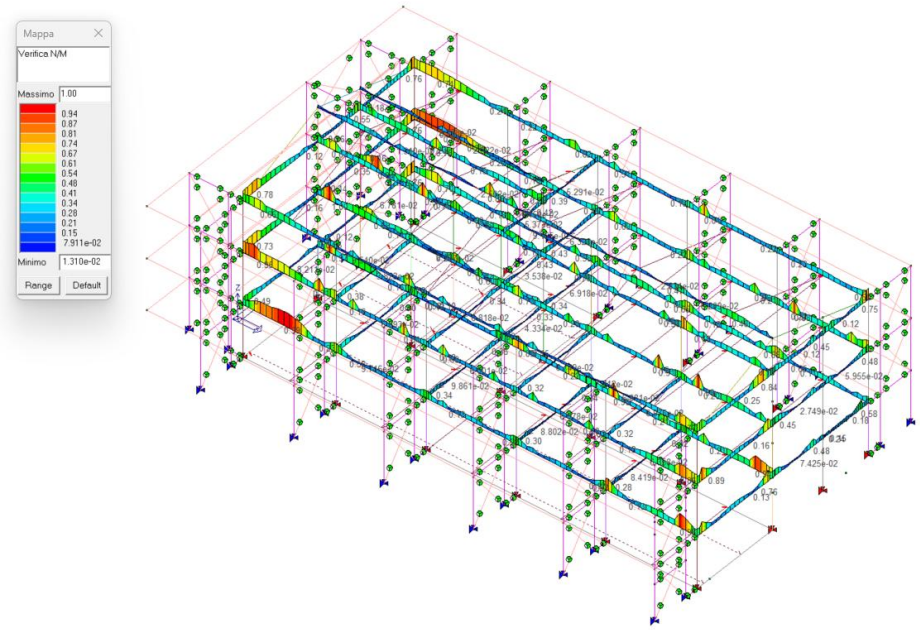


Figura 216 - Verifica N/M delle travi in cemento armato.

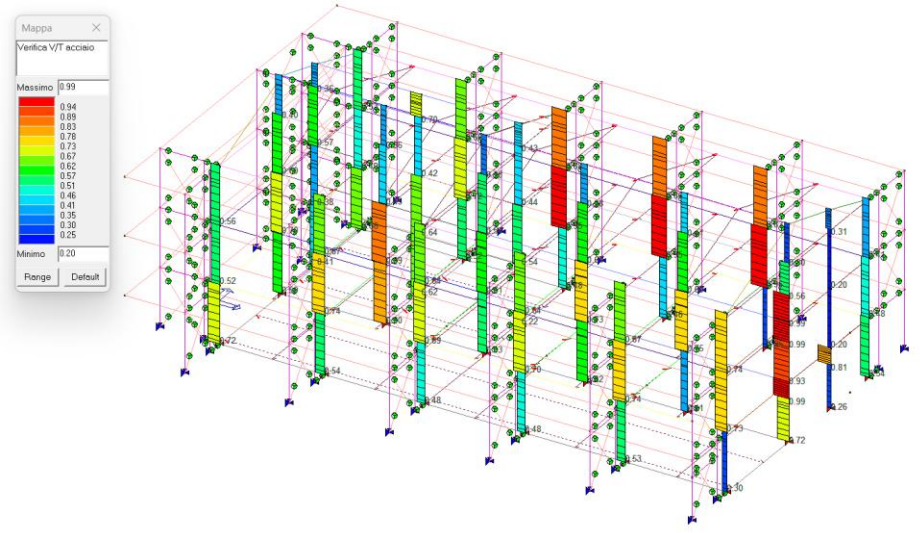


Figura 217 - Verifica V/T acciaio dei pilastri in cemento armato.

È importante sottolineare che la scelta di definire 70 iterazioni per l'ottimizzazione è stata influenzata anche dalla limitata disponibilità di dati nel dataset di addestramento delle reti. Poiché non è stato possibile automatizzare

l'esecuzione dei modelli tridimensionali in PRO_SAP, il processo è stato eseguito manualmente, limitando le iterazioni a 50. Avere un dataset di addestramento con pochi dati potrebbe portare dei problemi in quanto le reti neurali hanno una bassa capacità di predire comportamenti in regioni con pochi dati: infatti, durante il training le reti hanno dimostrato un buon comportamento sul dataset di addestramento ma una prestazione inferiore su quello di test. Poiché sono stati impostati 172 output, la probabilità di una predizione errata in regioni con dati insufficienti è più elevata. Se fosse stato possibile avere un numero maggiore di iterazioni iniziali con PRO_SAP, l'ottimizzatore avrebbe portato a ulteriori benefici nella massa.

I risultati hanno dimostrato che l'applicazione della metodologia MDO all'intero edificio è stata eseguita con successo. Tuttavia, il limite principale riscontrato riguarda l'incompatibilità tra i software specifici della progettazione edilizia e i software PIDO, che al momento non consente un'automatizzazione completa del processo. Tuttavia, come emerso dall'analisi della letteratura, problematiche analoghe erano inizialmente presenti anche in altri settori dove la metodologia di ottimizzazione multidisciplinare viene attualmente applicata in modo operativo. Si tratta di una criticità superabile, soprattutto considerando che alcune case produttrici di software hanno confermato che l'implementazione della funzione per lanciare analisi in batch è già prevista nei loro futuri aggiornamenti.

Sebbene i risultati di questo caso applicativo riguardino esclusivamente l'ottimizzazione della parte strutturale, l'aspetto di maggior rilievo consiste nell'aver verificato il funzionamento del flusso di lavoro esteso all'intero edificio. Questo rappresenta un passo fondamentale verso l'integrazione multidisciplinare, poiché il processo, impostato all'interno dell'orchestratore, consente di aggiungere facilmente le esigenze relative ad altre discipline, come la componente energetica. Tuttavia, quest'ultima, al momento, risulterebbe soggetta alle stesse limitazioni riscontrate per la simulazione strutturale, principalmente legate all'automatizzazione del flusso di lavoro. In generale, sarà sufficiente definire le variabili e i vincoli specifici di questo ambito e collegare il solver appropriato per eseguire le analisi energetiche e trovare la soluzione

ottimale che rappresenta il compromesso tra le due discipline, come mostrato in Figura 218.

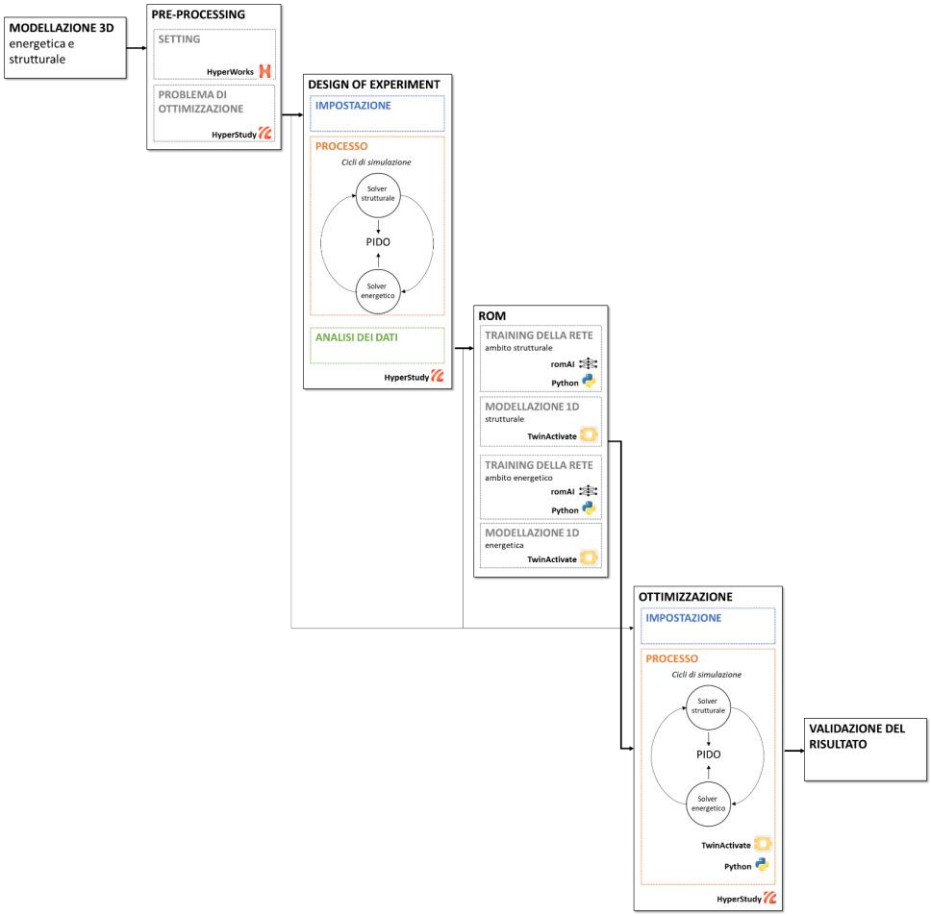


Figura 218 - Processo di ottimizzazione multidisciplinare con integrazione degli aspetti strutturali ed energetici.

La soluzione ottimale che si otterrà al termine del processo sarà inevitabilmente diversa da quella individuata con la simulazione esclusivamente strutturale, poiché rappresenterà un compromesso tra le esigenze delle diverse discipline coinvolte. Nello specifico, mentre l'ottimizzazione strutturale tende a privilegiare configurazioni con una larghezza delle campate ridotta, al fine di minimizzare la massa e migliorare le prestazioni sismiche, la componente energetica potrebbe richiedere configurazioni opposte. Per esempio, per garantire una dimensione adeguata alle serre solari, potrebbe essere necessario

aumentare la larghezza delle campate, al fine di ottimizzare l'apporto energetico legato al guadagno solare e alle prestazioni termiche. Questo compromesso multidisciplinare rappresenta uno degli aspetti più significativi dell'approccio integrato, poiché dimostra come la metodologia MDO consenta di bilanciare esigenze spesso contrastanti, generando una configurazione finale che rispetta simultaneamente i requisiti strutturali ed energetici. Si tratta di un passaggio cruciale nella progettazione avanzata, in cui l'obiettivo è ottenere una soluzione globale che tenga conto delle interazioni e delle interdipendenze tra più ambiti progettuali. Questo approccio consente di massimizzare i benefici complessivi dell'intervento, garantendo sia la sicurezza strutturale sia un miglioramento significativo delle prestazioni energetiche.

9. CONCLUSIONI

L'obiettivo della ricerca è stato quello di analizzare, sia dal punto di vista teorico che pratico, la fattibilità, i limiti e i potenziali vantaggi di un approccio integrato alla riqualificazione degli edifici scolastici esistenti. Particolare attenzione è stata dedicata alla valutazione dell'applicabilità della metodologia di ottimizzazione multidisciplinare, già utilizzata in altri settori per la progettazione di sistemi complessi, al fine di sfruttare in modo sistematico e coerente le sinergie derivanti dall'interazione tra diversi fenomeni.

È stato pertanto elaborato un quadro conoscitivo su come il patrimonio scolastico esistente in Italia si sia evoluto dal punto di vista morfologico e costruttivo, analizzando i principali periodi storici e le relative influenze normative, tecnologiche e culturali. Parallelamente, è stata condotta un'analisi delle attuali tendenze progettuali nel campo dell'edilizia scolastica, con particolare attenzione agli approcci in grado di rispondere alle sfide contemporanee di sostenibilità ambientale, sicurezza strutturale e innovazione didattica. È stata inoltre svolta un'analisi sullo stato attuale dell'edilizia scolastica che ha evidenziato criticità significative dal punto di vista strutturale, legate alla vulnerabilità sismica degli edifici esistenti, energetico, dovute all'assenza di adeguati sistemi di isolamento termico e all'inefficienza degli impianti, e funzionale, con spazi spesso rigidi e inadatti alle moderne esigenze educative e pedagogiche. Il lavoro di ricerca ha analizzato i principali programmi di finanziamento destinati alla riqualificazione dell'edilizia scolastica in Italia, evidenziando le linee di intervento che hanno contribuito a migliorarne la sicurezza e l'efficienza. Questi programmi rappresentano esempi concreti degli sforzi compiuti per affrontare le criticità dell'edilizia scolastica. Tuttavia, nonostante i progressi compiuti e l'impatto positivo di tali iniziative, i risultati ottenuti si dimostrano ancora insufficienti rispetto alla vastità e alla complessità delle problematiche che interessano questo patrimonio sul territorio nazionale. Alla luce della situazione attuale delineata nel quadro conoscitivo elaborato, emerge chiaramente come i miglioramenti ottenuti non siano ancora sufficienti per risolvere le problematiche esistenti. Sulla base di queste considerazioni, da un lato emerge la necessità di proseguire e intensificare il percorso di riqualificazione dell'edilizia scolastica esistente, dall'altro si propone di adottare

un approccio progettuale integrato, capace di affrontare simultaneamente le diverse esigenze di questi edifici, massimizzando le sinergie tra gli interventi strutturali, energetici e funzionali per ottenere risultati più efficaci e sostenibili nel lungo periodo. Negli ultimi anni, infatti, l'interesse per l'integrazione tra gli aspetti strutturali ed energetici è cresciuto notevolmente, mettendo in luce il potenziale di questo approccio e proponendo soluzioni innovative per la riqualificazione degli edifici. È fondamentale, fin dalla fase di progettazione, analizzare la compatibilità delle tecniche di adeguamento sismico ed energetico, tenendo in considerazione fattori come sovrapposizioni spaziali, scala di applicazione, livello di disturbo e prestazioni desiderate.

Tra le diverse tecniche di intervento, è stato deciso di approfondire l'uso dell'esoscheletro come soluzione per il miglioramento sismico, energetico e funzionale. Questa tipologia di intervento offre una risposta completa a tutte e tre le esigenze, combinando il rafforzamento strutturale con il miglioramento dell'efficienza energetica e la riorganizzazione funzionale degli spazi. Grazie alla possibilità di integrare serre solari e nuove aree fruibili, l'esoscheletro consente di migliorare la sicurezza sismica senza interrompere l'uso dell'edificio, ottimizzare le prestazioni energetiche e creare spazi interni che rispondano alle moderne esigenze didattiche.

Inoltre, nel lavoro di ricerca è stato analizzato come analoghe problematiche di progettazione multidisciplinare vengano affrontate in altri settori, al fine di valutarne l'applicazione al settore edilizio. Lo studio ha dimostrato come, da un punto di vista teorico, la metodologia di ottimizzazione multidisciplinare MDO, utilizzata nei settori della progettazione aeronautica ed automobilistica, possa essere utilizzata anche nel settore edilizio. In particolare, l'applicazione di tale metodologia potrebbe rivelarsi particolarmente vantaggiosa nella fase di progettazione iniziale, consentendo un approccio più integrato e ottimizzato alla soluzione delle problematiche che riguardano più discipline con obiettivi tra loro contrastanti.

Per valutare i benefici e le limitazioni derivanti dall'utilizzo dell'esoscheletro come intervento integrato e della metodologia di ottimizzazione multidisciplinare nel contesto della riqualificazione edilizia, è stato individuato un caso di studio applicativo. In particolare è stato deciso di focalizzare lo studio

sull’edilizia scolastica del Comune di Terni, al fine di analizzare in modo più approfondito rispetto al quadro generale l’evoluzione nel tempo delle caratteristiche costruttive e morfologiche degli edifici scolastici presenti nel Comune. I risultati di questa ricerca confermano il quadro già emerso in ambito nazionale. Inoltre, è stato deciso di restringere il campione di studio alle scuole primarie per consentire un’analisi più mirata e approfondita; dal momento che sono stati acquisiti molti dati di dettaglio, forniti da molteplici fonti, si è ritenuto opportuno definire una scheda di raccolta e catalogazione delle informazioni. Successivamente, è stato individuato un edificio di riferimento da analizzare più approfonditamente, sul quale è stato sviluppato il progetto dell'esoscheletro. La progettazione integrata ha confermato l’efficacia dell’approccio proposto per il miglioramento degli aspetti strutturali, energetici e funzionali, rispondendo così a tutte le caratteristiche richieste per l’adeguamento degli edifici scolastici esistenti.

Il caso applicativo ha inoltre fornito indicazioni significative riguardo l'applicazione dell'ottimizzazione multidisciplinare nella progettazione di interventi su edifici esistenti. Questa metodologia offre vantaggi in quanto amplia lo spazio di progettazione, generando e analizzando numerose alternative. La possibilità di esaminare un ampio ventaglio di soluzioni già nella fase concettuale e di visualizzare direttamente gli effetti delle variazioni dei parametri di input permette ai progettisti di valutare diverse opzioni che, in questo modo, considerano il problema nella sua interezza e di migliorare le prestazioni dell'edificio oggetto di analisi. Le simulazioni condotte su un modello semplificato hanno permesso di comprendere meglio il processo operativo di applicazione della metodologia, portando alla sua formalizzazione nel settore di interesse tramite la definizione di un flusso di lavoro specifico e la sua automatizzazione. Durante il processo, nell'ambiente di simulazione e ottimizzazione, gli strumenti hanno eseguito le analisi previste, trasferito i dati in modo efficace e interpretato correttamente le informazioni ricevute. Infine, la simulazione ha prodotto gli output attesi, completando con successo l'iter operativo. Nonostante ciò, è evidente che la ricerca per determinare l'applicabilità delle simulazioni di ottimizzazione multidisciplinare nei progetti edilizi complessi e la sua integrazione con strumenti e metodi convenzionali è

ancora nelle sue fasi iniziali. Uno dei limiti maggiori è che questo tipo di simulazioni con modelli ad alta fedeltà richiedono macchine di calcolo con elevate capacità computazionali. Per superare queste limitazioni, è stata valutata l'implementazione della metodologia MDO tramite modelli di ordine ridotto sia basati sulla fisica sia su tecniche di intelligenza artificiale di tipo machine learning. Mentre quello basato sulla fisica si è rivelato di difficile applicazione a causa della complessità e dei tempi molto lunghi richiesti dalla modellazione, il secondo è risultato efficace e adeguato a un uso operativo, sia in termini prestazionali che di tollerabilità dell'errore. Il lavoro ha permesso di definire i workflow operativi per le varie tipologie di modelli (altà fedeltà o ridotti) e di verificarne il corretto funzionamento sia con prodotti software commerciali che con un codice appositamente sviluppato.

La ricerca ha inoltre sperimentato la possibilità di estendere l'applicazione all'intero edificio, prendendo in considerazione il caso di studio generale dell'esoscheletro. Questo ha comportato la necessità di integrare i software tradizionalmente utilizzati nell'ambito della progettazione con gli orchestratori necessari per gestire le simulazioni richieste dal processo di ottimizzazione, riscontrando la mancanza della minima predisposizione necessaria, ovvero la possibilità di una esecuzione delle analisi in modalità batch.

Per superare in parte le limitazioni dei software commerciali e ottenere un processo di ottimizzazione automatica dei vari scenari, sono state progettate e sviluppate reti neurali che sono state utilizzate per individuare una configurazione ottimale dell'esoscheletro. In particolare, impostando come funzione obiettivo la minimizzazione del peso dell'acciaio per l'esoscheletro, il processo di ottimizzazione è riuscito a identificare almeno una configurazione che rispetta tutte le verifiche e che ha un peso complessivo inferiore a quello previsto nella progettazione tradizionale dell'esoscheletro. L'utilizzo di questa metodologia, insieme agli algoritmi di Intelligenza Artificiale, ha permesso di analizzare rapidamente numerose alternative progettuali e selezionare la configurazione strutturale più efficiente, rispettando i requisiti normativi e minimizzando l'uso dei materiali e dei costi.

Il lavoro di ricerca apre diverse prospettive per approfondire ulteriormente le tematiche trattate. Un campo di indagine riguarda la validazione dei risultati

ottenuti con l'applicazione della metodologia MDO alla progettazione dell'esoscheletro in acciaio, valutandone l'efficacia in termini di efficientemento energetico e funzionalità architettonica dell'edificio scolastico attraverso un confronto con altre soluzioni costruttive ugualmente rispondenti alle esigenze di progetto. Altre linee di sviluppo futuro della ricerca riguardano la progettazione integrata, con l'obiettivo di includere ulteriori discipline come acustica, illuminazione e qualità dell'aria interna, oltre all'ingegneria strutturale e all'efficienza energetica, e la progettazione generativa basata sull'Intelligenza Artificiale, finalizzata alla generazione autonoma di alternative di progettazione in base a vincoli e obiettivi specifici. Infine, un ulteriore campo di indagine riguarda la validazione dei risultati ottenuti dall'applicazione della MDO alla progettazione dell'esoscheletro in acciaio in termini di efficientemente energetico e funzionalità architettonica dell'edificio scuola attraverso un confronto con altre soluzioni costruttive ugualmente rispondenti alle esigenze di progetto.La ricerca condotta ha inoltre evidenziato che, nonostante gli sforzi compiuti e le risorse stanziate, la frammentarietà degli interventi e l'assenza di un indirizzo complessivo sia strategico (es. priorità degli interventi) che operativo limitano l'efficacia delle azioni intraprese. Al fine di affrontare in maniera organica le problematiche esistenti, sarebbe opportuno quindi definire un piano mirato, con chiara indicazione delle priorità per gli edifici in zona sismica 1 e 2, che includa anche interventi integrati in modo da coniugare le esigenze di sicurezza con l'efficienza energetica e l'adeguamento degli spazi interni alle nuove esigenze didattiche, garantendo al tempo stesso un monitoraggio costante e aggiornato dei progressi compiuti.

Oltre alle possibili linee di ricerca da approfondire, i risultati della tesi suggeriscono, da un punto di vista operativo, di promuovere l'integrazione tra i software utilizzati per la progettazione edilizia e le soluzioni di orchestrazione disponibili, al fine di migliorare l'interoperabilità e l'efficienza complessiva del processo di ottimizzazione multidisciplinare. Un altro passo importante prevede di esplorare i benefici dell'utilizzo dei modelli di ordine ridotto lungo l'intero ciclo di vita dell'edificio, per esempio attraverso la realizzazione di un digital twin, che potrebbe rivelarsi estremamente utile per la gestione ottimizzata dello stesso. Inoltre, si ritiene fondamentale completare le banche dati dell'edilizia

scolastica con le informazioni attualmente mancanti, verificandone la qualità e definendo un processo di aggiornamento continuo. Inoltre, sarebbe opportuno realizzare un catalogo dei singoli edifici, corredato da schede informative dettagliate e creare un fascicolo elettronico per raccogliere e archiviare tutti i dati disponibili, facilitando così l'accesso e la consultazione delle informazioni in modo sistematico e strutturato.

APPENDICI

Appendice A – Design of Experiment

Il Design of Experiment (DoE) è un approccio sistematico e rigoroso, utilizzato per pianificare, eseguire ed analizzare esperimenti in modo efficiente. Lo scopo è quello di generare una matrice che permetta di ricavare la relazione tra un insieme di variabili, chiamate anche fattori, e gli output di un processo [259]. Il DoE può essere suddiviso:

- comparativo
- screening
- modellazione

Nel primo caso il DoE viene utilizzato come strumento per capire come la variazione di un singolo fattore produce una variazione dell'output di interesse. Per quanto riguarda lo screening, il DoE è utilizzato come strumento per valutare come ogni variabile possa influenzare la risposta del sistema. In questo senso, l'obiettivo potrebbe essere quello di ottenere una lista dei fattori che influenzano maggiormente il modello. Nell'ultima tipologia, invece, il DoE può essere utilizzato come strumento per valutare il comportamento del processo all'interno dell'intero spazio di design. Questo può anche essere utilizzato per generare un modello predittivo (tramite reti neurali, per esempio) che si basi su una funzione matematica ad alta accuratezza. Il modello richiede in input una lista di coppie di valori (variabili-output) che siano sparse nel dominio di progetto tale da fornire sufficienti informazioni sul comportamento del sistema stesso.

I valori che un fattore può assumere sono detti livelli e sono almeno due per ogni variabile. Se queste sono continue è necessario definire i valori estremi inferiori e superiori che ognuna può assumere, se invece sono discrete, l'utente deve assegnare esclusivamente i valori interi o reali che le variabili di input possono assumere.

In base allo scopo specifico del DoE esistono diversi algoritmi con cui poter generare una matrice input-output. Di seguito vengono forniti alcuni esempi con una breve spiegazione del loro funzionamento:

Full-Factorial (Screening)

Tale metodo ha l'intento di valutare tutte le possibili combinazioni dei livelli di tutti i fattori coinvolti. Viene utilizzato per capire gli effetti individuali di ciascuna variabile e delle loro interazioni sull'output del processo. Questo approccio risulta essere particolarmente impegnativo a livello computazionale, in quanto:

$$N_{run} = L^k \tag{31}$$

Dove N_{run} rappresenta il numero di valutazioni da eseguire, *L* il numero di livelli per ciascuna variabile e *k* il numero di variabili considerate. Tuttavia, sebbene sia oneroso, permette di valutare anche le interazioni tra variabili, ossia la dipendenza del singolo fattore al variare del livello, che altri algoritmi non consentono.

Fractional Factorial (Screening)

Questo metodo consente di ridurre drasticamente il numero di valutazioni rispetto al Full-Factorial, pur mantenendo lo scopo di fornire informazioni utili sulla relazione input-output e per questo viene utilizzato quando il problema presenta un numero elevato di fattori e livelli. A differenza del Full-Factorial, il Fractional Factorial riduce il numero di combinazioni, *confondendo*[52] il contributo individuale di una variabile con l'effetto legato all'interazione mista tra variabili: la riduzione implica cioè che alcuni effetti e/o interazioni non possono essere stimati in modo indipendente. Con effetto si intende l'impatto che un certo fattore o combinazione di fattori ha sulla variabile di risposta, mentre la misura che definisce quanto questi effetti vengono confusi viene detta risoluzione.
Esistono tre tipi di risoluzione:

- V: l'effetto di una variabile viene confuso con l'effetto dovuto all'interazione di 4 variabili
- IV: l'effetto di una variabile viene confuso con l'effetto dovuto all'interazione di 3 variabili

[52] Si utilizza il termine confondere per indicare quando effetti di diversi fattori o l'effetto dell'interazione di fattori non possono essere separati gli uni dagli altri.

- III: l'effetto di una variabile viene confuso con l'effetto dovuto all'interazione di 2 variabili

Al diminuire del numero di variabili coinvolte nell'interazione, si genera una matrice che potrebbe fornire informazioni sempre meno chiare sull'influenza che una singola variabile ha sull'output di interesse. Questo approccio è ideale per casi dove le singole variabili hanno un'influenza modesta sull'output poiché la loro interazione genererebbe un effetto ulteriormente più modesto sull'output. La misura in cui il numero di esecuzioni può essere ridotto a scapito della risoluzione è mostrato nella Tabella 23 che ha nelle colonne il numero di fattori (con 2 livelli) e nelle righe il numero di valutazioni da effettuare:

Valutazioni	**Fattori**													
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
4	Full	III											
8		Full	IV	III	III	III							
16			Full	V	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III
32				Full	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
64					Full	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV
128						Full	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV

Tabella 23 - Riduzione del numero di esecuzioni.

Una volta definito il numero di fattori (per esempio 3), si ottiene il massimo numero di valutazioni, fornito dal Full Factorial (8). Volendo ottenere una riduzione di valutazioni ammissibile, si può procedere con una risoluzione di tipo III, eseguendo solo 4 valutazioni: in questo caso, l'effetto della 3° variabile verrebbe confuso con l'effetto misto della 1° e la 2° variabile.

Taguchi (Screening)

L'algoritmo di Taguchi ha l'obiettivo di ridurre la varianza dell'output di un processo tramite l'uso di un DoE. In particolare, l'ingegnere e statistico Genichi Taguchi elaborò un metodo per investigare l'influenza dei fattori del sistema sulla media e la varianza di un determinato output attraverso l'uso di vettori ortogonali. Dunque, invece di valutare tutte le possibili combinazioni di livelli e variabili come nei casi precedenti, questo metodo permette di fornire informazioni su quali fattori influenzano maggiormente l'output di interesse

testando solo alcune combinazioni; l'esecuzione di un limitato numero di esperimenti permette di risparmiare tempo e risorse. L'utilizzo dell'algoritmo di Taguchi risulta utile quando il numero di variabili è compreso fra 3 e 50. Per inizializzare tale metodo, è necessario:

- definire l'obiettivo del processo;
- definire le variabili e relativi livelli;
- creare i vettori ortogonali.

Conoscendo il numero di parametri e il numero di livelli è possibile selezionare la matrice ortogonale appropriata attraverso la

		Numero di livelli			
		2	3	4	5
Numero di parametri	2	L_4	L_9	L'_{16}	L_{25}
	3	L_4	L_9	L'_{16}	L_{25}
	4	L_8	L_9	L'_{16}	L_{25}
	5	L_8	L_{18}	L'_{16}	L_{25}
	6	L_8	L_{18}	L'_{32}	L_{25}
	7	L_8	L_{18}	L'_{32}	L_{50}
	8	L_{12}	L_{18}	L'_{32}	L_{50}
	9	L_{12}	L_{27}	L'_{32}	L_{50}
	10	L_{12}	L_{27}	L'_{32}	L_{50}
	11	L_{12}	L_{27}		L_{50}
	12	L_{16}	L_{27}		L_{50}
	13	L_{16}	L_{27}		
	14	L_{16}	L_{36}		
	15	L_{16}	L_{36}		
	16	L_{32}	L_{36}		
	17	L_{32}	L_{36}		
	18	L_{32}	L_{36}		
	19	L_{32}	L_{36}		
	20	L_{32}	L_{36}		
	21	L_{32}	L_{36}		
	22	L_{32}	L_{36}		
	23	L_{32}	L_{36}		
	24	L_{32}			
	25	L_{32}			
	26	L_{32}			
	27	L_{32}			
	28	L_{32}			

	29	L_{32}			
	30	L_{32}			
	31	L_{32}			

Tabella 24 - Tabella di selezione delle matrici predefinite, rielaborazione dell'autrice da un libro di Woolf P. [260]

Una volta definita la coppia di valori, è possibile ottenere un particolare tipo di vettore che, tramite l'algoritmo di Taguchi, permette di ottenere la matrice da valutare. Dopo averne determinato il nome tramite la tabella (il pedice rappresenta il numero di esperimenti che devono essere completati) è possibile cercare la matrice predefinita [261].

Central Composite Design (Modellazione)

Il Central Composite Design (CCD) permette di ottenere una matrice di valutazioni attraverso la quale poter costruire un modello matematico input-output di tipo polinomiale quadratico. Il CCD è costituito da 3 set di punti:

- punti fattoriali: sono i punti che vengono dall'uso del Full-Factorial. Per *k* fattori con 2 livelli, otterremo 2^k punti da valutare;
- punti assiali: sono punti aggiunti per esplorare la curvatura nelle direzioni lungo ciascun asse del fattore, cioè oltre i livelli alti e bassi dei punti fattoriali, e solitamente si trovano ad una distanza α dal centro. Per *k* fattori, otterremmo *2k* valutazioni;
- punti centrali: sono punti aggiunti (n_c) nel centro dell'intervallo di ciascun fattore.

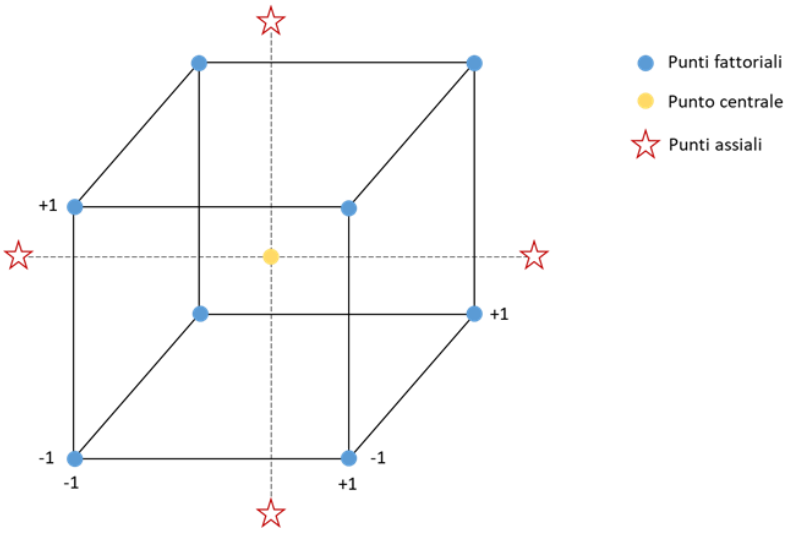


Figura 219 - Schema di un central Composite Design con tre fattori.

Dunque, la somma totale delle valutazioni sarà: $2^k + 2k + n_c$

Latin Hypercube Sampling (Modellazione)

Il *Latin Hypercube Sampling* (LHS) è una tecnica di campionamento utilizzata per esplorare in modo efficiente uno spazio multidimensionale, ossia un'ampia gamma di valori per diverse variabili d'interesse in modo strutturato, evitando la ridondanza. L'algoritmo suddivide l'intervallo di variazione di ogni singola variabile in strati o intervalli uguali, facendo una sola valutazione per singolo strato. Pertanto, si è sicuri che:

- l'intero range di variazione della singola variabile è uniformemente campionato;
- non esistono condizioni randomiche per cui la densità di valutazioni è concentrata in una regione del range e più povera in altre, evitando sovrapposizioni.

Il numero di strati è chiamato numero di campioni (*n*), che coincide con il numero di valutazioni che si è deciso di effettuare.

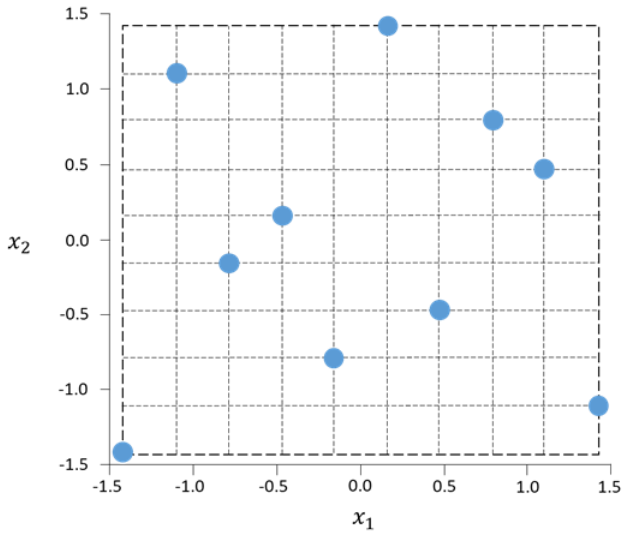


Figura 220 - Figura 2 - Latin Hypercube Sampling (10 punti posizionati casualmente).

Hammersley (Modellazione)

L'algoritmo di Hammersley è un metodo di campionamento usato per generare una distribuzione di punti in modo da coprire uniformemente uno spazio multidimensionale, basandosi su algoritmi a bassa discrepanza**:** i punti selezionati vengono distribuiti in modo da minimizzare le lacune nello spazio di campionamento rispetto ad uno randomico. La costruzione della matrice di valutazione avviene combinando sia sequenze regolari che speciali, come quelle di Van Der Corput: per un problema a N dimensioni (ossia N fattori), la prima viene discretizzata in M campioni, in modo che questa sia discretizzata uniformemente; le altre dimensioni, invece, seguono la sequenza di Van Der Corput, ricevendo in input gli M indici ($i = 0, \ldots\ldots, M - 1$).

Modified Extensible Lattice Sequence (Modellazione)

Le *Modifiend Extensibile Lattice Sequences* (MELS) sono una classe speciale di sequenze a bassa discrepanza usate per campionare in modo uniforme uno spazio multidimensionale. Si basano su *Lattice Sequences*, che sono metodi efficaci per distribuire punti su un reticolo (lattice) in uno spazio ad alta dimensione: l'algoritmo prevede che i punti siano ottenuti da combinazioni lineari di vettori di numeri razionali o interi che definiscono un reticolo regolare

all'interno dello spazio di campionamento. Le MELS aggiungono due capacità rispetto al *Lattice Sequences*:

- bassa discrepanza: modificano le *Lattice Sequences* per ottenere una distribuzione più equa dello spazio. Infatti, una delle limitazioni delle *Lattice Sequences* classiche è che potrebbero non coprire lo spazio in modo ottimale;
- estendibilità: permettono di aumentare il numero di valutazioni senza dover necessariamente ricostruire di nuovo il set di campioni. Possono dunque prendere una serie di dati esistenti in uno spazio e aggiungere punti in modo iterativo per fornire una copertura uguale, sfruttando una combinazione dei vettori base.

Il numero di valutazioni viene specificato dall'utente:

$$Numero\ minimo\ di\ valutazioni = 1{,}1 \times \frac{(N+1) \times (N+2)}{2} \qquad (32)$$

Con N numero di fattori.

Appendice B – Codice Matlab per applicazione MDO all'aula con modello 3D

Di seguito, viene riportato il codice scritto in Matlab che ha la funzione di leggere il file di testo *Input.txt* creato dal software Hyperstudy contenente i valori delle combinazioni delle variabili di progetto da valutare, e generare in output il modello *Config.inp*, ossia il modello input della simulazione con il programma Acusolve. Per assolvere le seguenti funzioni, il codice Matlab si compone di 4 parti, che verranno descritte più dettagliatamente in seguito:

- nella parte 1, viene letto il file *Input.txt*;
- nella parte 2, viene individuato il modello *Config.inp*, corrispondente alla configurazione suggerita dall'ottimizzazione, creato durante la fase di pre-processing;
- nella parte 3, viene aperto e letto il modello *Config.inp*. In virtù delle condizioni al contorno fornite dall'ottimizzatore e riportate nel file Input.txt, le linee del file *Config.inp* vengono aggiornate di conseguenza;
- nella parte 4, viene generato il nuovo modello *Config.inp* con le condizioni al contorno da valutare.

Parte 1

Nelle prime righe (da 5 a 6), il file *Input.txt* viene letto e salvato in memoria. Successivamente, dalla riga 10 alla 16, i valori individuati vengono assegnati a diverse variabili:

- la variabile "*Config*" individua la configurazione (cioè la posizione del condizionatore) da valutare;
- la variabile "*Vx*" individua la velocità dell'aria del condizionatore lungo l'asse x;
- la variabile "*Vy*" individua la velocità dell'aria del condizionatore lungo l'asse y;
- la variabile "*Vz*" individua la velocità dell'aria del condizionatore lungo l'asse z;
- la variabile "*T*" individua la temperatura dell'aria del condizionatore;

- la variabile "*Spessore*" individua lo spessore dal cappotto termico esterno;
- la variabile "*Potenza*" individua la potenza irradiata dai termosifoni.

Successivamente, da riga 18 a riga 24 (Figura 221), vengono assegnati i valori degli spessori e la relativa conducibilità degli strati che compongono la parete su cui viene applicato il cappotto termico (Tabella 25):

Nome variabile	Spessore [m]	Conducibilità [W/(m K)
s1 – lamda1	0.015	0.7
s2 – lamda2	0.47	2.4
s3 – lamda3	0.015	0.7
Spessore – lamda4	*Variable Hyperstudy*	0.04

Tabella 25 - Dati relativi agli strati del muro esterno.

Nella parte finale, viene calcolata la trasmittanza termica U

$$U = \frac{1}{\frac{s_1}{k_1} + \frac{s_2}{k_2} + \frac{s_3}{k_3} + \frac{Spessore}{k_4}} \quad (33)$$

tramite la quale è possibile calcolare la conducibilità termica equivalente da applicare al modello. Considerando lo spessore totale $s = s_1 + s_2 + s_3$, si ha:

$$k = U * (s_1 + s_2 + s_3) \quad [\frac{W}{m\,K}] \quad (34)$$

Parte 2

Da linea 30 a linea 72, viene individuato il modello Acusolve (*.inp*) corrispondente al valore della variabile "*Config"* (vedi parte 1). In questo modo, è possibile assegnare il percorso del modello *Config.inp* da selezionare e che verrà poi utilizzato nella fase successiva.

```
clear
clc
close all

fileID = fopen([Input.txt']);
inp = textscan(fileID,'%s %10.6f');
fclose all

%%
Config = inp{1,2}(1,1);
Vx = inp{1,2}(2,1);
Vy = inp{1,2}(3,1);
Vz = inp{1,2}(4,1);
T = inp{1,2}(5,1);
Spessore = inp{1,2}(6,1);
Potenza = inp{1,2}(7,1);
%%
s1 = 0.015;
lamda1 = 0.7;
s2 = 0.47;
lamda2 = 2.4;
s3 = 0.015;
lamda3 = 0.7;
lamda4 = 0.04;

U = 1/(s1/lamda1+s2/lamda2+s3/lamda3+Spessore/lamda4);
lamda = U*(s1+s2+s3);
```

Figura 221 - Schermata della prima parte del codice.

Parte 3

Nella parte 3, ogni riga del file *Config.inp* viene letta mediante un ciclo *While*, il cui scopo è salvarne il contenuto in una nuova variabile denominata Lines che avrà una lunghezza pari al numero di righe contenute nel modello originale. Il ciclo *While* permette di eseguire un'operazione ripetutamente, fintanto che una condizione specifica risulta soddisfatta: in questo caso, il ciclo permette di leggere sequenzialmente ogni riga del file attraverso la variabile *tline*, per poi salvarla nella variabile *Lines* (riga 100). L'esecuzione del ciclo termina nel momento in cui la variabile *tline* risulta vuota, ossia quando è stato raggiunto il numero massimo di righe del modello aperto (da riga 101 a 103). Durante la lettura di ciascuna riga, vengono eseguiti diversi *IF statement*, utilizzate in programmazione per consentire l'esecuzione di specifiche operazioni nel caso in cui determinate condizioni risultino soddisfatte. In particolare, vengono valutati tre criteri:

1) Nel primo *IF* (riga 104), viene controllato se la linea corrente corrisponde esattamente alla stringa uguale alla frase "*AUTO_SOLUTION_STRATEGY {*". Se questa condizione è soddisfatta, viene:
    a. salvata la linea;
    b. letta la linea successiva;
    c. estrapolato il valore dal campo 1 a 42 (che rappresentano una stringa);
    d. assegnata una variabile, che è data dalla concatenazione del valore individuato in c) (cioè il nome della variabile) e l'assegnazione del valore 600.

Il valore 600 è il numero di iterazioni, individuato tramite un'analisi di sensitività, che il solutore Acusolve deve effettuare per raggiungere la convergenza della soluzione. Come si può osservare dalla Figura 222, il valore del numero di iterazioni è situato una riga sotto la frase "*AUTO_SOLUTION_STRATEGY {*".

```
38  AUTO_SOLUTION_STRATEGY {
39      max_time_steps                  = 100
40      initial_time_increment          = 10000000000
41      convergence_tolerance           = 0.001
42      num_krylov_vectors              = 10
43      flow                            = on
44      temperature                     = on
45      temperature_flow                = on
46      relaxation_factor               = 0.4
47  }
```

Figura 222 - Parte del codice contenente il primo IF statement.

2) Nel secondo IF (riga 110), si controlla che la linea sia uguale alla stringa "*CONDUCTIVITY_MODEL ("MURO EPS") {*". Se questa condizione è soddisfatta viene:
    a. salvata la linea;
    b. letta la linea successiva;
    c. salvata la linea;
    d. letta la linea successiva;
    e. estrapolato il valore dal campo 1 a 42;

f. assegnata una variabile, che è data dalla concatenazione del valore individuato in e) e l'assegnazione del valore "*lamda*" (la conduciblità equivalente descritta nella parte 1).

In questo modo, la conducibilità termica equivalente del muro viene assegnata automaticamente, in base al valore dello spessore del cappotto termico determinato dall'algoritmo di ottimizzazione. A differenza del primo blocco *IF*, il valore della conducibilità viene applicato due righe sotto la frase "*CONDUCTIVITY_MODEL ("MURO EPS") {*" (Figura 223).

```
571  CONDUCTIVITY_MODEL( "Muro_EPS" ) {
572      type                                = constant
573      conductivity                        = 2.09
574      prandtl_number                      = 0.71
575      curve_fit_variable                  = x_coordinate
576      anisotropic_curve_fit_variable      = x_coordinate
577      turbulent_prandtl_number            = 0.91
578  }
579
```

Figura 223 - Parte del codice contenente il secondo IF statement.

3) Nel terzo "IF" (riga 110), viene controllato che la linea sia uguale alla frase "*SIMPLE_BOUNDARY_CONDITION ("CONDIZIONATORE") {*". Se questa condizione è soddisfatta viene:
   a. salvata la linea;
   b. eseguita l'operazione di lettura delle successive cinque righe e di salvataggui delle stesse nella variabile *Lines;*
   c. letta la successiva sesta riga;
   d. estrapolato il valore dal campo 1 a 42;
   e. assegnata una variabile, che è data dalla concatenazione del valore individuato in d) e l'assegnazione del valore "*Vx*";
   f. salvata la nuova variabile definita in e);
   g. L'operazione viene eseguita per le successive 3 righe, sostituendo i valori di *Vy*, *Vz* e *T* (da riga 134 a 145).

   In questo modo, vengono assegnate automaticamente le condizioni al contorno aggiornate, suggerite dall'ottimizzatore. La Figura 224 mostra la struttura del file dove è possibile assegnare i valori delle condizioni al contorno del condizionatore.

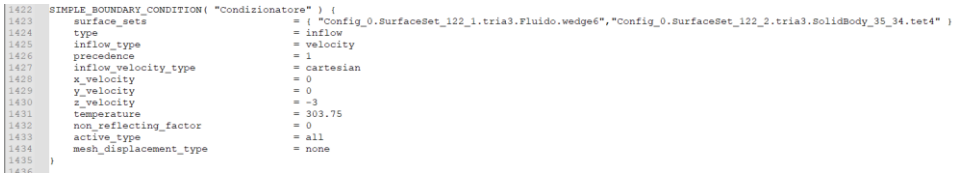


Figura 224 - Parte del codice contenente il terzo IF statement.

Parte 4

Nella parte finale, viene creato un nuovo file il cui nome è stato precedentemente definito nella parte 2 (variabile *new_file*). Successivamente, viene eseguito un ciclo for (da riga 157 a 160, mostrato in Figura 225) che permette di ripetere la medesima azione più volte: nello specifico, viene scritta una nuova riga all'interno del file appena creato. Il contenuto di ciascuna riga corrisponde al valore jj-mo della variabile *Lines*, dove jj varia da 1 alla dimensione della variabile *Lines*, ovvero la lunghezza complessiva del modello *Config.inp*.

```
157 for jj = 1:size(Lines,2)
158     fprintf(fileID,'%s\n',Lines{1,jj});
159 end
160 fclose all
161
```

Figura 225 - Schermata del ciclo for della quarta parte del codice.

Appendice C – Reti neurali

Le tabelle seguenti riassumono per ogni banco la configurazione della rete neurale (numero di neuroni e di strati) scelta e il livello di accuratezza raggiunto nei due scenari esaminati (estivo e invernale).

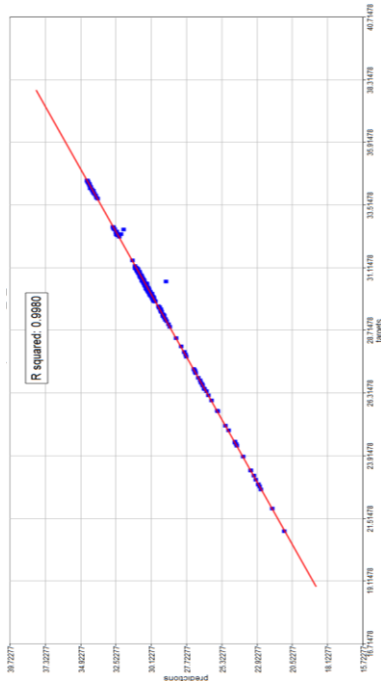
Scenario estivo			
Banco	Rete		Accur.
	Neuroni	Strati	
1	60	4	0,9980
2	30	4	0,9967
3	100	3	0,9987
4	80	4	0,9972
5	90	4	0,9994
6	50	4	0,9971
7	90	3	0,9985
8	100	3	0,9997
9	60	4	0,9994
10	100	4	0,9996
11	90	2	0,9973
12	60	4	0,9980
13	80	3	0,9986

Scenario invernale			
Banco	Rete		Accur.
	Neuroni	Strati	
1	80	3	0,9715
2	70	3	0,9855
3	90	3	0,9901
4	100	4	0,9805
5	90	4	0,9833
6	80	3	0,9891
7	70	4	0,9857
8	70	4	0,9789
9	100	4	0,9780
10	80	4	0,9995
11	60	3	0,9683
12	100	4	0,9968
13	90	4	0,9800

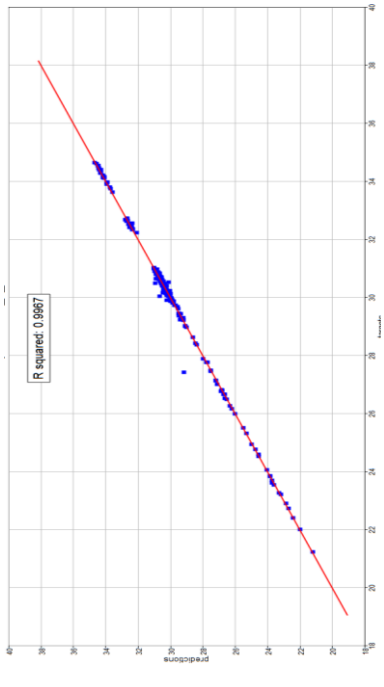
Di seguito vengono riportati i risultati dettagliati rappresentati graficamente.

Scenario estivo

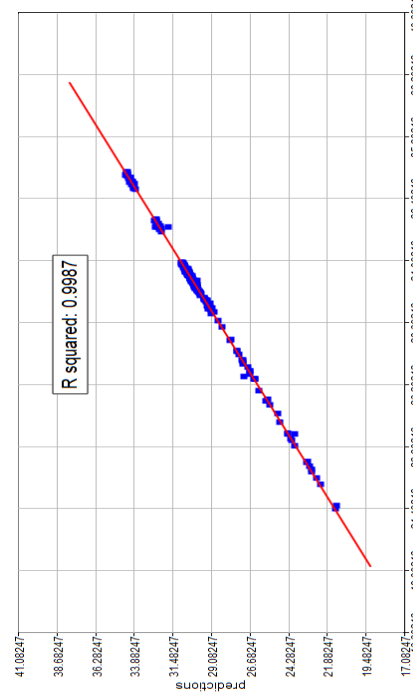
BANCO 1



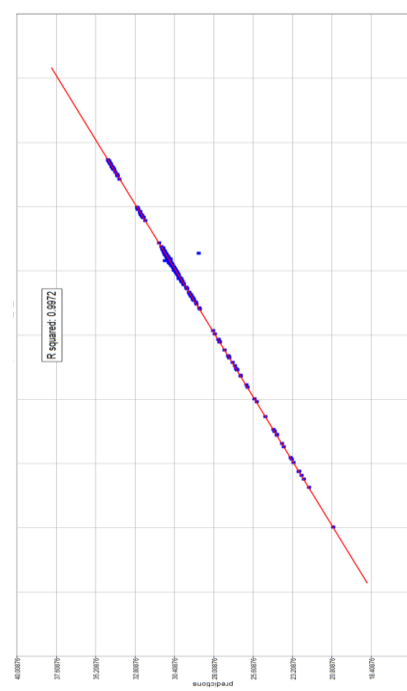
BANCO 2



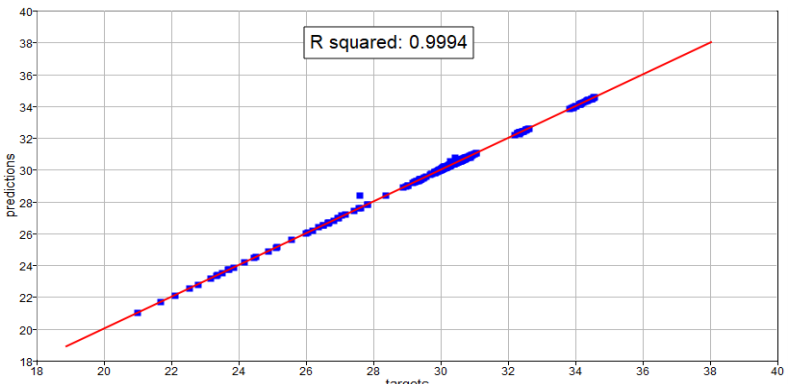
BANCO 3



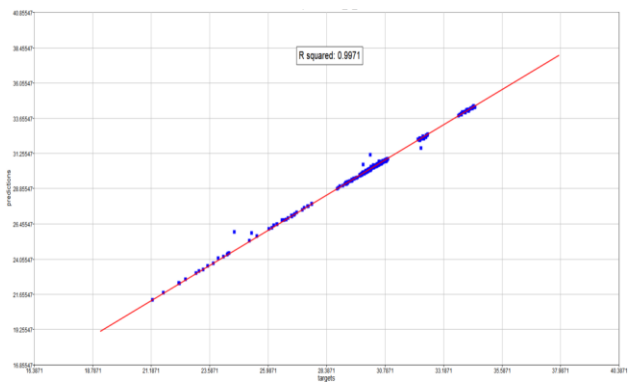
BANCO 4



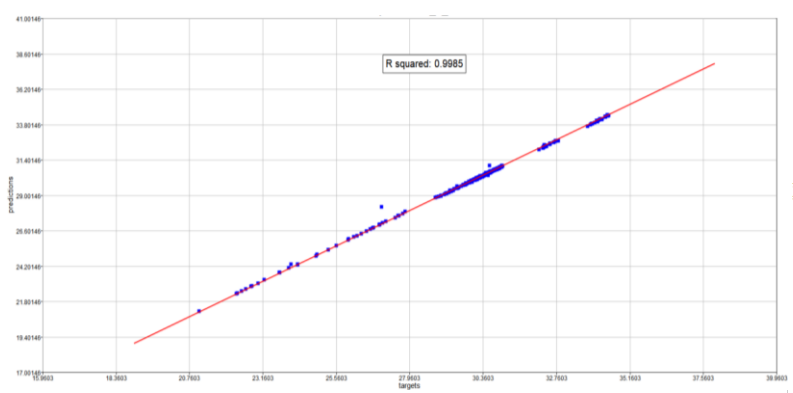
BANCO 5



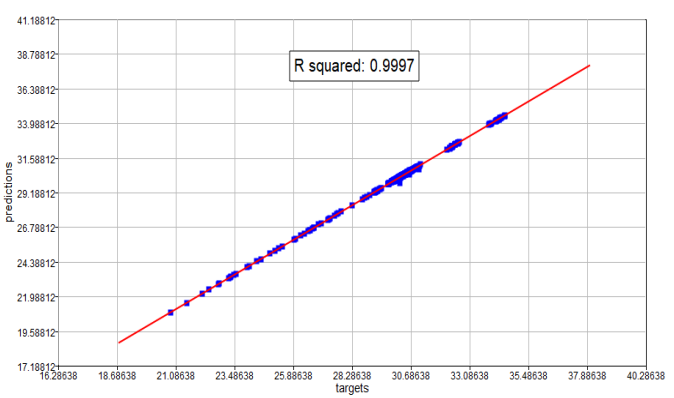
BANCO 6



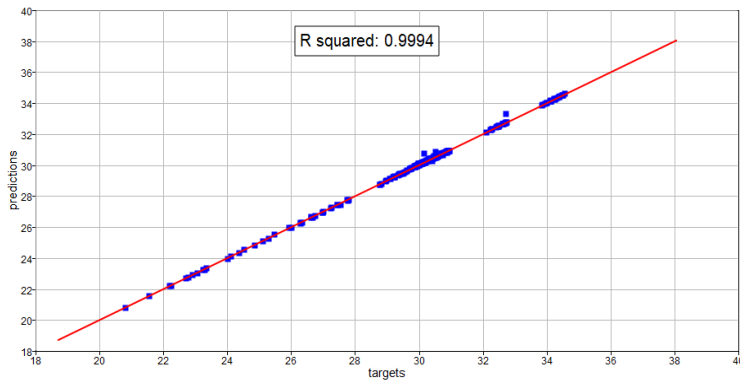
BANCO 7



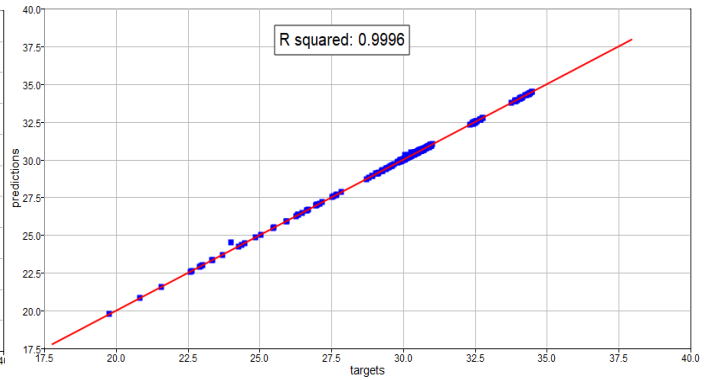
BANCO 8



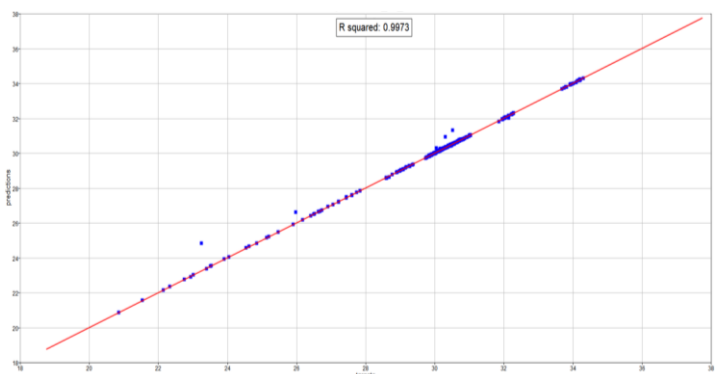
BANCO 9



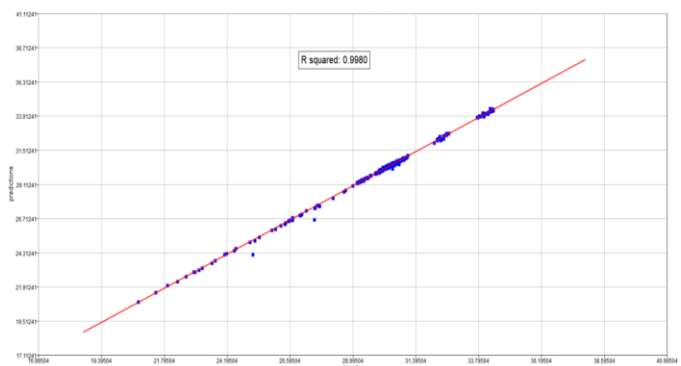
BANCO 10



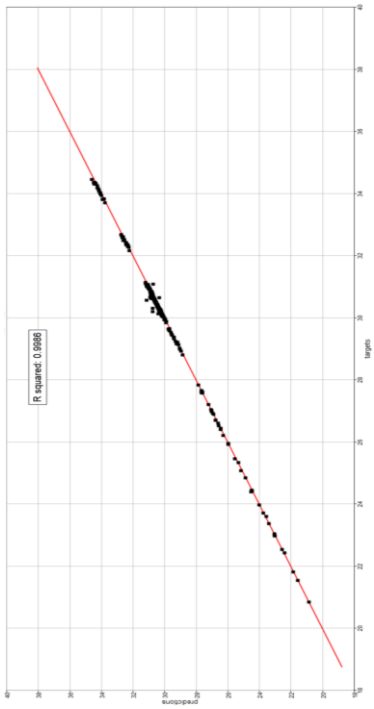
BANCO 11



BANCO 12

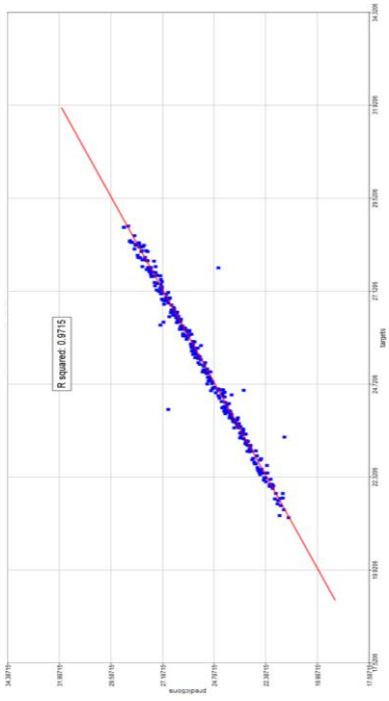


BANCO 13

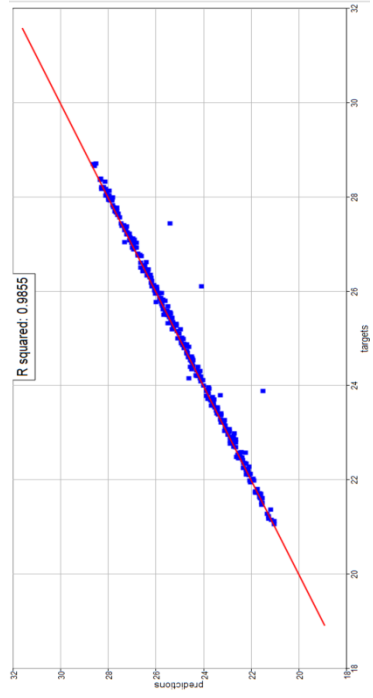


Scenario invernale

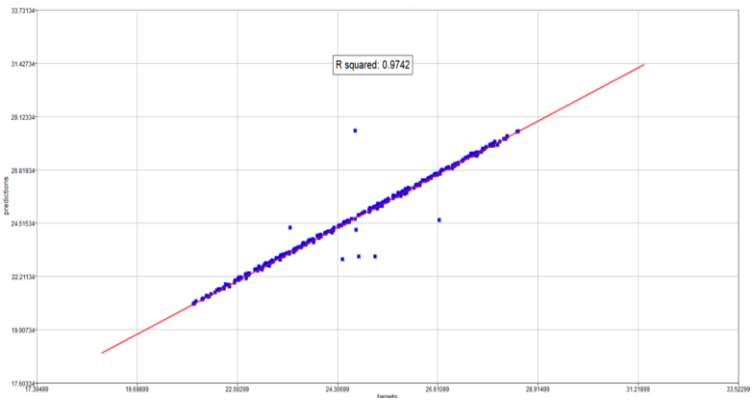
BANCO 1



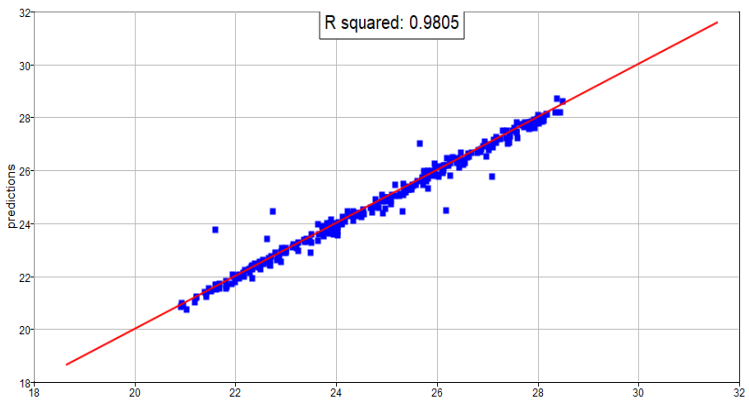
BANCO 2



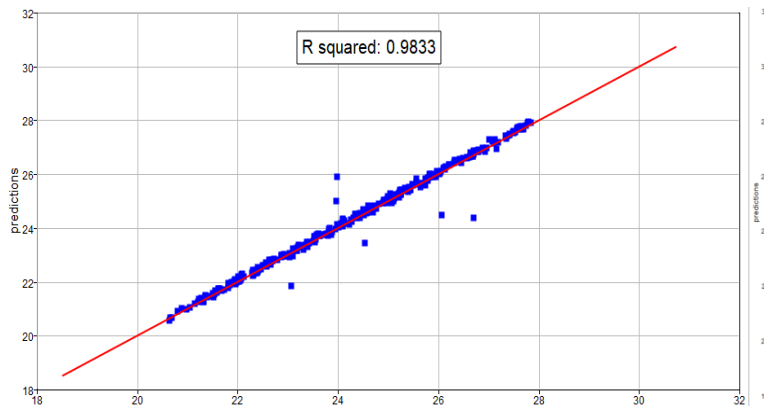
BANCO 3



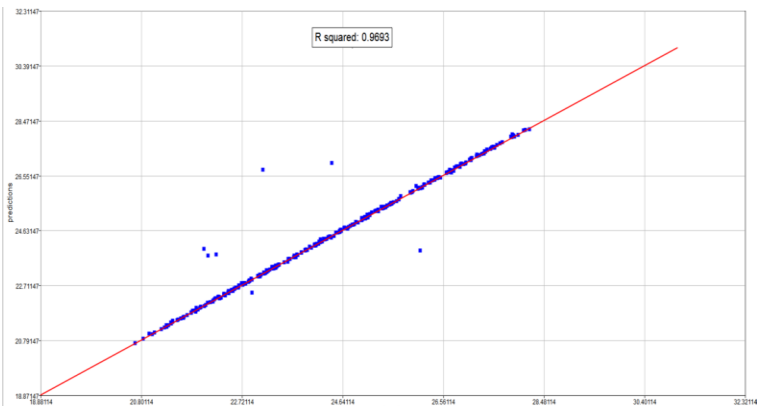
BANCO 4



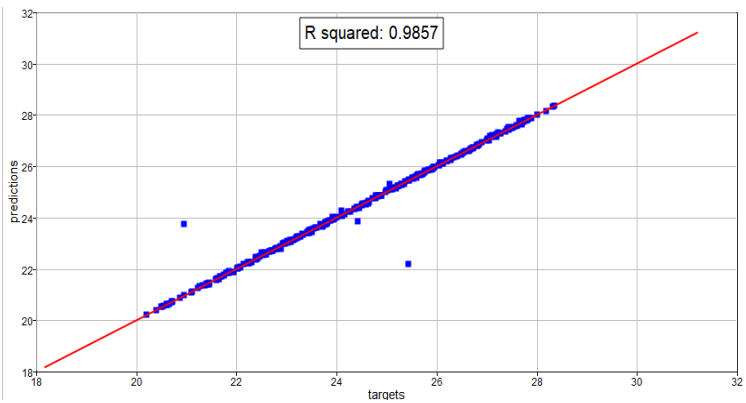
BANCO 5



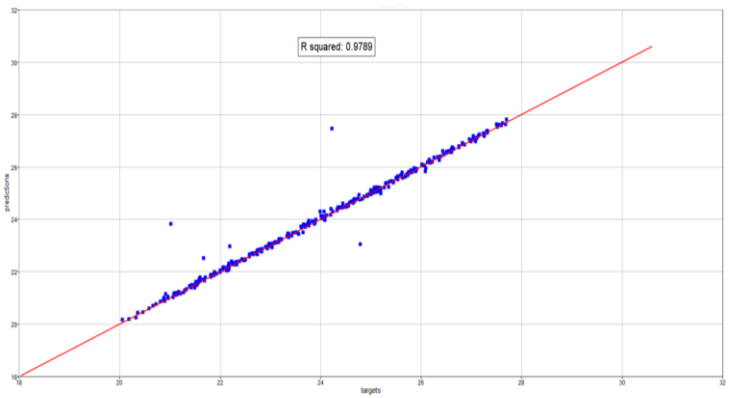
BANCO 6



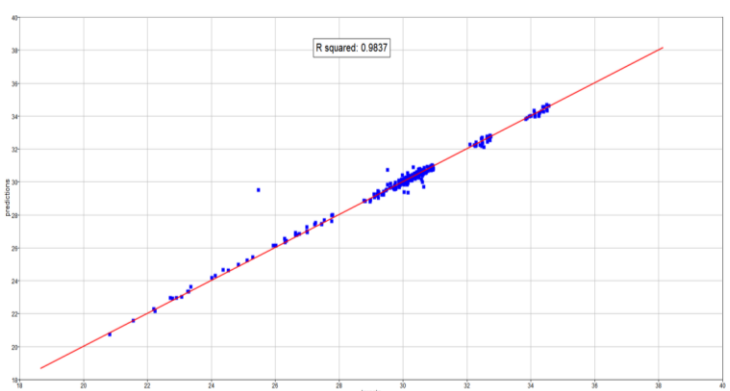
BANCO 7



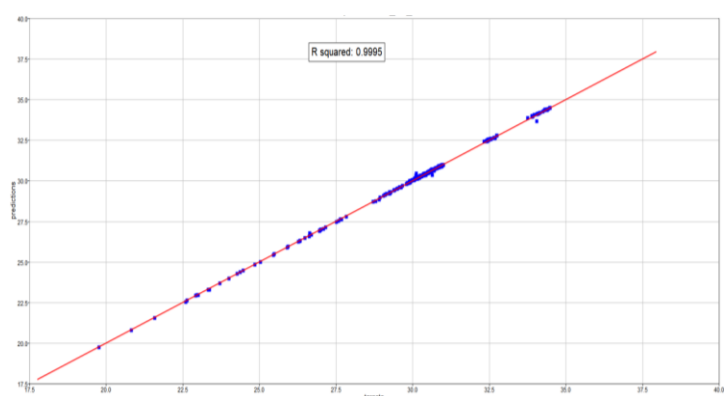
BANCO 8



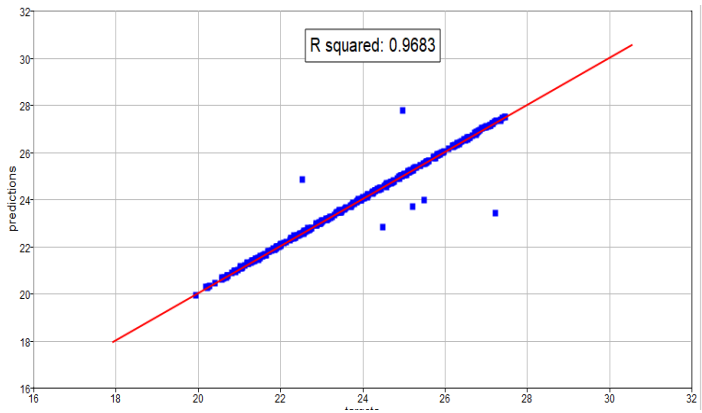
BANCO 9



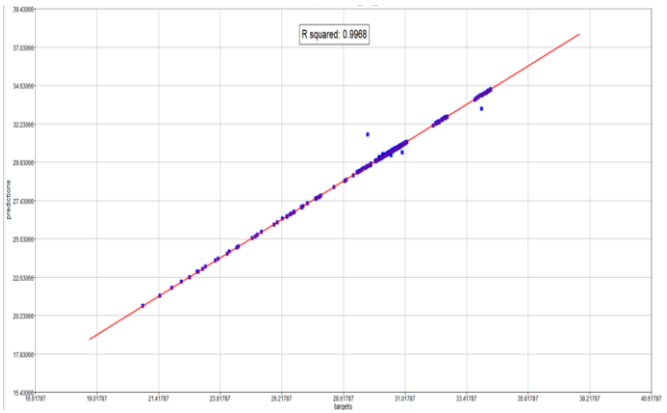
BANCO 10



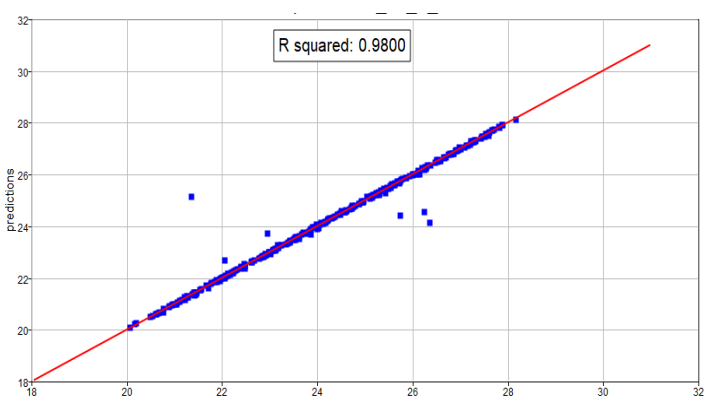
BANCO 11



BANCO 12



BANCO 13



Appendice D - Schede

Di seguito viene presentata la scheda per il censimento per la catalogazione degli edifici scolastici con la descrizione dettagliata delle voci e le indicazioni necessarie per permetterne l'applicazione anche ad altre realtà scolastiche.

Voci	Descrizione
Dati identificativi iniziali	
Codice identificativo dell'edificio	Indicare il codice univoco associato all'edificio composto dall'indicazione del grado scolastico, provincia, numero progressivo; es. SP_TR_01 (scuola primaria, provincia di Terni, edificio scolastico 01). Il numero progressivo si azzera per ogni tipologia scolastica e per ogni provincia.
Denominazione	Indicare la denominazione attuale dell'edificio.
Immagine	Inserire la fotografia o l'immagine aerea o che mostri l'edificio nel suo complesso.
Compilatore	Indicare il nome di chi ha compilato la scheda.
Data	Apporre la data di conclusione della compilazione.
Inquadramento	
Localizzazione geografica	Inserire la planimetria a scala 1:25000 del Piano Regolatore Generale con l'individuazione dell'edificio tramite un cerchio rosso (RGB 181-9-9).
Grado di istruzione	Specificare il grado di istruzione (scuola dell'infanzia; primaria; secondaria di primo grado; secondaria di secondo grado).
Istituto principale	Specificare l'istituto di riferimento.
Città, Provincia, Indirizzo	Inserire i dati necessari alla localizzazione dell'edificio.
Coordinate geografiche	Indicare la latitudine e la longitudine espresse in gradi decimali (DD), secondo il sistema di coordinate GPS WGS84.
Superficie del lotto	Indicare il valore in mq della superficie dell'intero lotto in cui è ubicato l'edificio comprensiva anche delle aree esterne di pertinenza.
Superficie verde	Indicare il valore in mq della superficie delle aree caratterizzate da vegetazione.

<table>
<tr><td>Superficie coperta</td><td>Indicare il valore in mq della superficie risultante dalla proiezione sul piano orizzontale delle parti dell’edificio edificate fuori terra.</td></tr>
<tr><td>Inserimento nel lotto</td><td>Scegliere una delle tre opzioni indicate.</td></tr>
<tr><td>K-map</td><td>Inserire la rappresentazione grafica schematica dell’inserimento dell’edificio nel lotto con la distinzione cromatica della superficie verde e di quella coperta indicata nella seguente legenda:

Funzione | RGB | Colore
Superficie verde | 226-240-217
Superficie coperta | 186-187-179</td></tr>
<tr><td colspan="2">Informazioni generali</td></tr>
<tr><td>Anno di costruzione</td><td>Indicare l’anno di inizio dei lavori o, in mancanza di questo dato, del periodo di costruzione.</td></tr>
<tr><td>Costruito per uso scolastico</td><td>Indicare l’iniziale destinazione d’uso dell’edificio (scelta tra le opzioni indicate).</td></tr>
<tr><td>Destinazione d’uso originaria</td><td>Indicare la destinazione d’uso per cui è stato costruito, qualora non sia quella scolastica.</td></tr>
<tr><td>Anno di adattamento</td><td>Indicare l’anno di adattamento all’uso scolastico, qualora l’edificio non sia stato costruito appositamente con questa destinazione.</td></tr>
<tr><td>Ampliamenti</td><td>Indicare l’anno in cui sono stati realizzati eventuali ampliamenti.</td></tr>
<tr><td>K-map</td><td>Inserire la rappresentazione grafica schematica degli eventuali ampliamenti.</td></tr>
<tr><td>Superficie totale</td><td>Indicare la somma delle superfici lorde di tutti i piani dell’edificio. Il valore deve essere espresso in mq.</td></tr>
<tr><td>Volume totale</td><td>Indicare il valore in mc del volume lordo dell’edificio.</td></tr>
<tr><td>Numero di piani</td><td>Indicare tutti i piani dell’edificio, compresi quelli interrati e seminterrati e non destinati ad uso scolastico. Qualora l’edificio abbia zone con numero di piani differenti, questi devono essere specificati.</td></tr>
</table>

Altezza interpiano media	Indicare il valore in m della media delle altezze interne nette misurate tra il pavimento e il soffitto; sono esclusi i sottotetti non praticabili.
Altezza totale dell'edificio	Indicare il valore in m dell'altezza massima misurata tra il piano di campagna e la linea di gronda.
Breve descrizione	Presentare in forma sintetica le caratteristiche principali (storiche e/o costruttive) dell'edificio. Lunghezza massima 2500 battute.
Interventi di ristrutturazione	Descrivere eventuali interventi di … effettuati sull'edificio successivamente alla sua costruzione o al suo adattamento all'uso scolastico. Indicare per ogni tipo di intervento l'anno in cui è stato effettuato.
Foto	Inserire le fotografie rappresentative dell'edificio sia all'esterno che all'interno.
Piante, sezioni e prospetti	Inserire i disegni di piante, sezioni e prospetti significative in scala 1:500/1:1000 o con scala metrica.
Analisi morfologica-dimensionale	
Modello morfo-tipologico	Individuare uno tra i modelli indicati.
Schema distributivo-spaziale	Individuare uno tra gli schemi indicati.
Dati dimensionali in dettaglio	Indicare per ogni ambiente riportato nella scheda il numero e la superficie complessiva.
Distribuzione degli spazi	Inserire le piante di tutti i piani dell'edificio o un esploso assonometrico con indicazione cromatica della destinazione d'uso secondo la seguente legenda:

Funzioni	RGB	Trasparenza	Colore
Aule	255-255-0	20	
Laboratori	242-184-030	20	
Biblioteca	155-055-255	20	
Mensa e relativi servizi	128-128-192	20	
Palestra e relativi servizi	255-170-213	20	
Servizi igienici	000-176-176	20	
Vani tecnici/Depositi/Archivi	100-100-100	20	
Uffici	113-255-113	20	
Scale	255-000-000	20	
Ascensori	128-000-000	10	

	Distributivo 128-128-128 20
Analisi dell'involucro e impianti	
Dotazioni	Indicare la presenza o assenza delle dotazione elencate. Qualora sia presente l'impianto di riscaldamento, specificarne la tipologia nell'ultima voce.
Analisi costruttiva	
Struttura portante	Individuare una delle tipologie strutturali indicate.
Progettato con normativa antisismica	Indicare l'utilizzo o l'assenza della normativa antisismica in fase di progettazione.
Tipologia di muratura	Qualora l'edificio sia in muratura, specificarne la tipologia.
Caratteristiche dei materiali	Indicare le caratteristiche dei materiali, solo in presenza di eventuali prove.
Note	Inserire ulteriori informazioni specifiche non indicate nelle altre voci.
Tipologia di solaio	Inserire la/le tipologie di solaio presenti nell'edificio.
Copertura	Scegliere tra le opzioni indicate.
Bibliografia essenziale	Riportare le fonti utilizzate per la compilazione della scheda.

XX_XX_XX **DENOMINAZIONE**

Immagine

Compilatore Data

Inquadramento

Localizzazione geografica	PRG – Scala 1:25000
Grado di istruzione	
Istituto principale	
Città	
Provincia	
Indirizzo	
Coordinate geografiche	
Superficie del lotto	
Superficie verde	
Superficie coperta	
Inserimento nel lotto	☐ adiacente a tre o quattro lati del lotto ☐ adiacente a uno o due lati del lotto ☐ al centro
K-map	

Informazioni generali

Anno di costruzione	
Costruito per uso scolastico	☐ sì ☐ no
Destinazione d'uso originaria	
Anno di adattamento	

Ampliamenti		
K-map		
Superficie totale	mq	
Volume totale	mc	
Numero di piani		
Altezza interpiano media	m	
Altezza totale dell'edificio	m	
Breve descrizione		
Interventi di ristrutturazione strutturale energetico funzionale	anno	tipologia
Foto		
Piante, sezioni e prospetti		

Analisi morfologica-dimensionale

Modello morfo-tipologico	☐ linea ☐ corte ☐ pettine ☐ piastra ☐ padiglione		
Schema distributivo-spaziale	☐ corridoio ☐ unità funzionale		
Dati dimensionali in dettaglio		Quantità	Mq
Attività didattiche	Aule		

	Laboratori
Attività collettive	Biblioteca Mensa e relativi servizi
Spazi per educazione fisica	Palestra e relativi servizi
Attività complementari	Servizi igienici
	Vani tecnici
	Depositi/archivi
Uffici	segreteria, presidenza, sala professori
Elementi di comunicazione	Orizzontale
	Verticale scale
	ascensori
Distribuzione degli spazi	

Analisi dell'involucro e impianti

L'edificio è dotato di:	Sì	No
doppi vetri	☐	☐
isolamento delle pareti esterne	☐	☐
isolamento della copertura	☐	☐
impianto fotovoltaico	☐	☐
impianto solare termico	☐	☐
impianto di condizionamento/ventilazione	☐	☐
impianto di riscaldamento	☐	☐
tipologia impianto di riscaldamento		

Analisi costruttiva

Struttura portante	☐ intelaiata in c.a. ☐ muratura

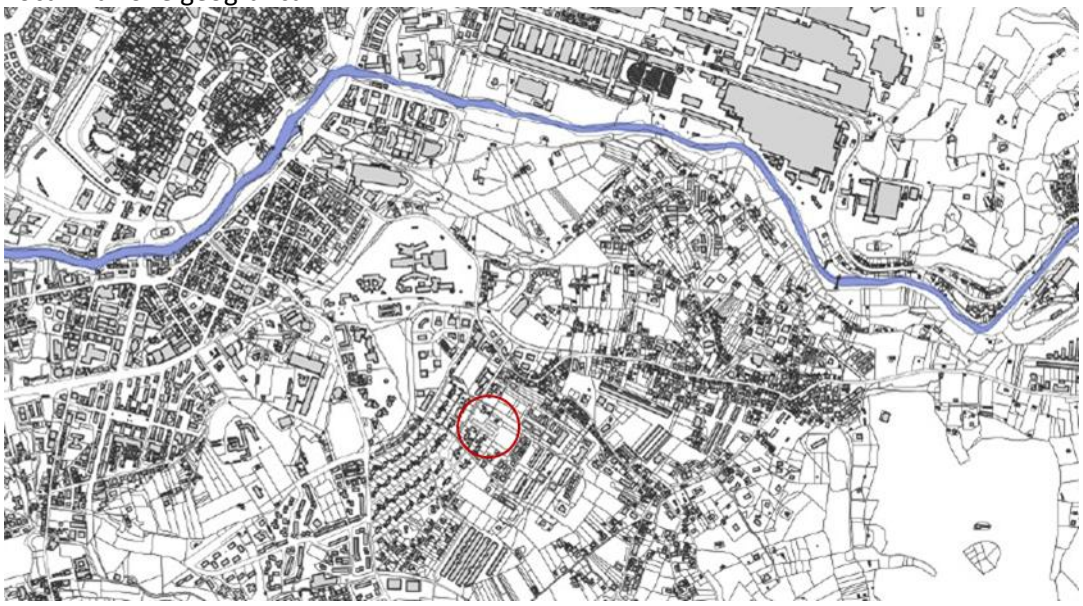
	☐ acciaio ☐ prefabbricata ☐ mista
Tipologia di muratura	
Caratteristiche dei materiali	
Note	
Tipologia di solaio	
Copertura	☐ a falde ☐ piana ☐ mista
Bibliografia essenziale	



Compilatore Caterina Mosca Data 11/03/2024

Inquadramento

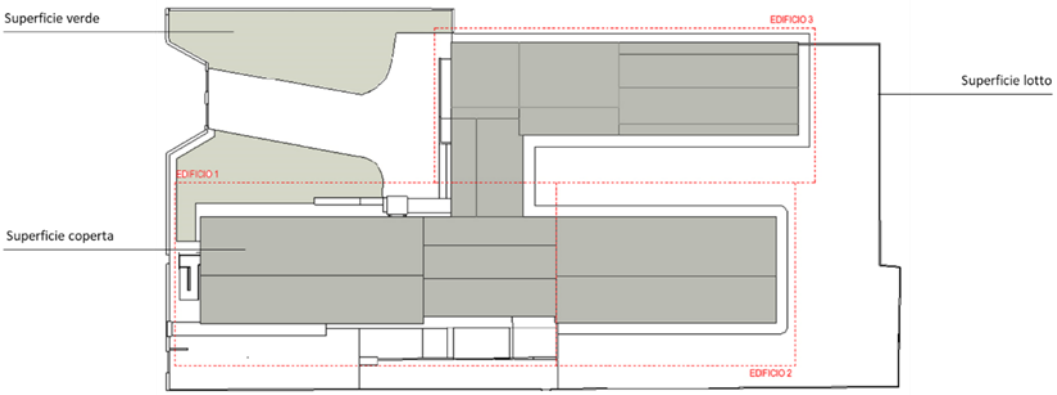
Localizzazione geografica



PRG – Scala 1:25000

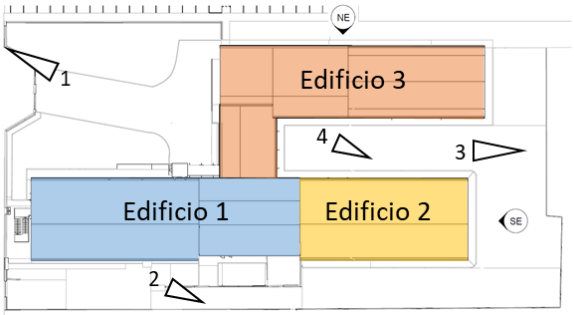
Grado di istruzione	Scuola primaria
Istituto principale	Istituto comprensivo Guglielmo Marconi
Città	Terni
Provincia	Terni (TR)
Indirizzo	Via Marie Curie, 4
Coordinate geografiche	Latitudine: 42° 39’ 59.158” N - Longitudine: 12° 39’ 30.275” E
Superficie del lotto	5280 mq
Superficie verde	920 mq
Superficie coperta	2820 mq

Inserimento nel lotto	☐ adiacente a tre o quattro lati del lotto ■ adiacente a uno o due lati del lotto ☐ al centro



Informazioni generali

Anno di costruzione	1966 (edificio 1)	
Costruito per uso scolastico	■ sì ☐ no	
Destinazione d'uso originaria		
Anno di adattamento	-	
Ampliamenti	1972 (edificio 2 e 3)	



Superficie totale	2820	mq
Volume totale	11700	mc
Numero di piani		
Edificio 1	3	
Edifici 2 e 3	1	
Altezza interpiano media	3,5	m
Altezza totale dell'edificio	10,5	m

Breve descrizione

La scuola si trova nei pressi del villaggio omonimo progettato da Giancarlo de Carlo agli inizi degli anni Settanta. Questo nasce come riqualificazione del villaggio semirurale Cesare Balbo, un quartiere operaio costituito da blocchi di case circondate da orti e giardini, mai completato per lo scoppio delle Seconda Guerra Mondiale.

L’edificio in oggetto è costituito schematicamente da tre corpi di fabbrica, uno di forma rettangolare disposto su tre livelli dove trova spazio la cucina e relativa mensa e due piani destinati ad aule (Edificio 1), il secondo adiacente al primo e anch’esso di forma rettangolare, disposto su un unico livello e destinato ad aule didattiche (Edificio 2) , ed il terzo a forma di “L” dove trova spazio la palestra e relativi servizi (Edificio 3). Dal punto di vista distributivo e compositivo i tre corpi di fabbrica sono collegati tra loro tramite un ampio locale destinato ad atrio e ingresso facente parte del corpo di fabbrica della palestra. Nel corso degli anni l'immobile non è mai stato interessato da importanti lavori di ristrutturazione o da adeguamenti normativi specifici, pertanto presenta importanti carenze impiantistiche, igienicosanitarie e strutturali. Per quanto riguarda quest’ultimo aspetto la progettazione fu eseguita non considerando le azioni sismiche, in conformità alla normativa vigente dell’epoca.

Interventi di ristrutturazione	Anno	tipologia
strutturale	2024	Adeguamento sismico tramite inserimento di pareti in c.a. di ringrosso ai pilastri
energetico	2024	Realizzazione dell’isolamento termico a cappotto, posa in opera di un materassino coibente sulla copertura, realizzazione di un tetto micro ventilato, sostituzione delle finestre con nuovi infissi in PVC e delle porte esterne con nuovi infissi in alluminio a taglio termico. Realizzazione di un nuovo impianto termico del tipo a pavimento alimento dalla centrale termica a biomasse esistente
funzionale	2024	Recupero funzionale di alcuni spazi interni in parte non utilizzati e separazione del blocco della palestra dal resto dell’edificio al fine di consentirne l’uso anche per attività extrascolastiche

Foto



vista 1



vista 2

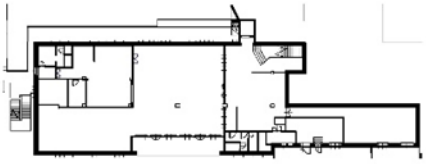


vista 3



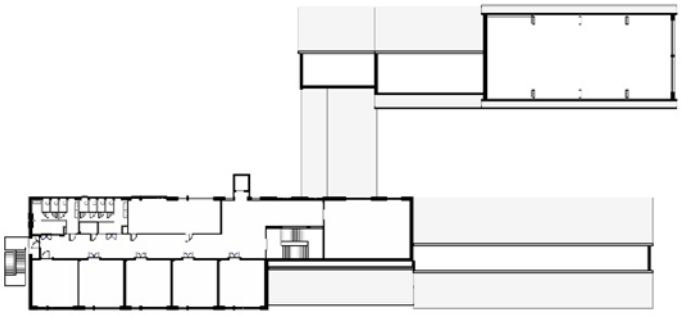
vista 4

Piante, sezioni e prospetti



Pianta piano seminterrato - Scala 1:1000

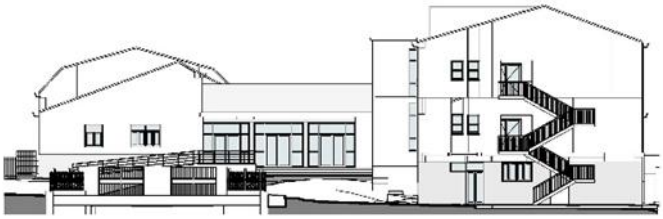
Pianta piano rialzato - Scala 1:1000



Pianta piano primo - Scala 1:1000



Prospetto sud - Scala 1:1000

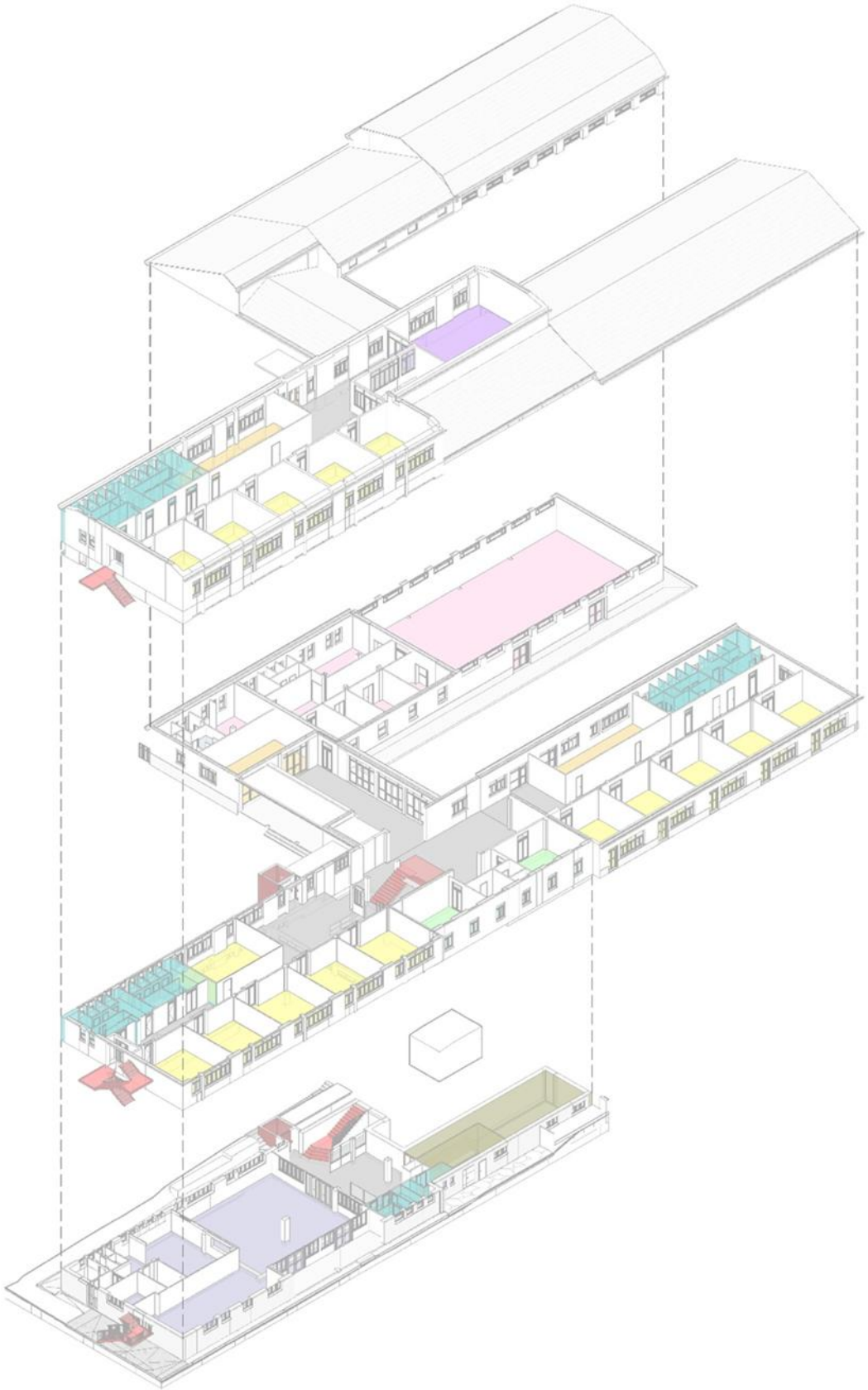


Prospetto ovest - Scala 1:1000

Analisi morfologica-dimensionale

Modello morfo-tipologico	☐ linea ☐ corte ☐ pettine ☐ piastra ☐ padiglione		
Schema distributivo-spaziale	■ corridoio ☐ unità funzionale		
Dati dimensionali in dettaglio		Quantità	Mq
Attività didattiche	Aule	15	595,95
	Laboratori	5	160,34
Attività collettive	Biblioteca	1	87,10
	Mensa e relativi servizi	-	310,89
Spazi per educazione fisica	Palestra e relativi servizi	-	452,22
Attività complementari	Servizi igienici		192,35
	Vani tecnici	1	29,80
	Depositi/archivi	1	75,77
Uffici	segreteria, presidenza, sala professori	4	95,64
Elementi di comunicazione	Orizzontale	-	819,95
	Verticale		
	scale	3	-
	ascensori	1	-

Distribuzione degli spazi



Analisi dell'involucro e impianti

L'edificio è dotato di:	Sì	No
doppi vetri	□	■
isolamento delle pareti esterne	□	■
isolamento della copertura	□	■
impianto fotovoltaico	□	■
impianto solare termico	□	■
impianto di condizionamento/ventilazione	□	■
impianto di riscaldamento	■	□
tipologia impianto di riscaldamento	Riscaldamento tradizionale a radiatori con centrale termica a biomasse posizionata all'esterno dell'edificio	

Analisi costruttiva

Struttura portante	□ intelaiata in c.a.		
	□ muratura		
	□ acciaio		
	□ prefabbricata		
	□ mista		
Progettato con normativa antisismica	□ sì		
	■ no		
Tipologia di muratura	-		
Caratteristiche dei materiali			
Calcestruzzo	f_{ck}	19,98	N/mm^2
	R_{ck}	24,07	N/mm^2
	f_{ctm}	2,21	N/mm^2
	E_{cm}	20.000	N/mm^2
	γ_s	1,50	
	f_{cd}	13,32	N/mm^2
Acciaio			
	f_{yk}	378,55	N/mm^2
	γ_s	1,15	
	f_{yd}	329,17	N/mm^2
Note			
Le caratteristiche delle strutture e dei materiali esistenti sono state ricavate tramite due campagne di indagine, rispettivamente nelle date del 16/03/2015 e 01/04/2021			
Tipologia di solaio	latero cementizio gettato in opera e SAP		
Copertura	□ a falde		
	□ piana		
	□ mista		

Bibliografia essenziale	Documenti forniti dal Comune di Terni: – Relazione strutturale – Relazione geotecnica Documenti forniti dallo studio ATI Project – Rilievo Anagrafe dell'edilizia scolastica nazionale Anagrafe dell'edilizia scolastica regionale



Compilatore Mattia Carpentieri (*) Data 11/03/2024
Caterina Mosca

(*)

Inquadramento

Localizzazione geografica



PRG – Scala 1:25000

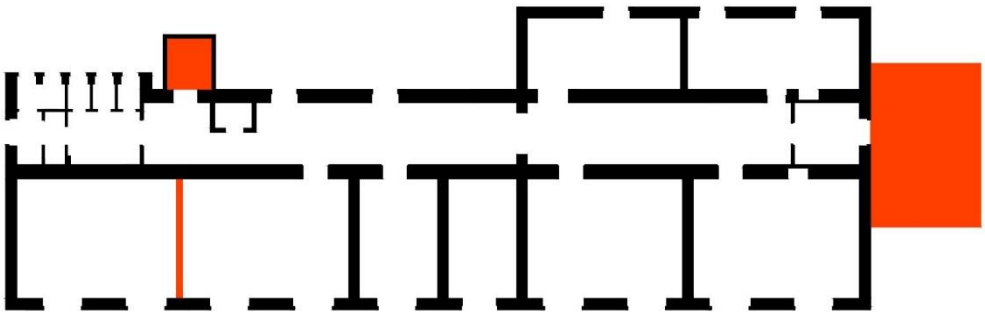
Grado di istruzione	Scuola primaria
Istituto principale	Istituto comprensivo Giovanni XXIII
Città	Terni
Provincia	Terni (TR)
Indirizzo	Via del pellicano n° 24
Coordinate geografiche	Latitudine: 42° 34’ 49.861” N Longitudine: 12° 39’ 42.589” E
Superficie del lotto	3220 mq
Superficie verde	2705 mq
Superficie coperta	515 mq

Inserimento nel lotto

- ☐ adiacente a tre o quattro lati del lotto
- ■ adiacente a uno o due lati del lotto
- ☐ al centro

Informazioni generali

Anno di costruzione	1954 - 1956
Costruito per uso scolastico	■ sì ☐ no
Destinazione d’uso originaria	
Anno di adattamento	-
Ampliamenti	1998 Ristrutturazione edilizia



Superficie totale	1545,6	mq
Volume totale	17000,0	mc
Numero di piani		
Edificio 1	3	
Altezza interpiano media	3,7	m
Altezza totale dell’edificio	11	m

Breve descrizione

Interventi di ristrutturazione	Anno	tipologia
strutturale energetico funzionale	1998	Si è intervenuti per superare le barriere architettoniche presenti nell'edificio aggiungendo un ascensore e delle scale antincendio, entrambi indipendenti strutturalmente. Inoltre, è stata anche modificata la distribuzione interna.

Foto

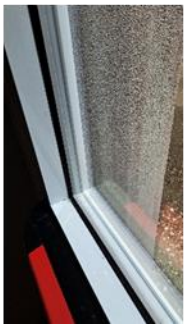


vista 1



vista 2







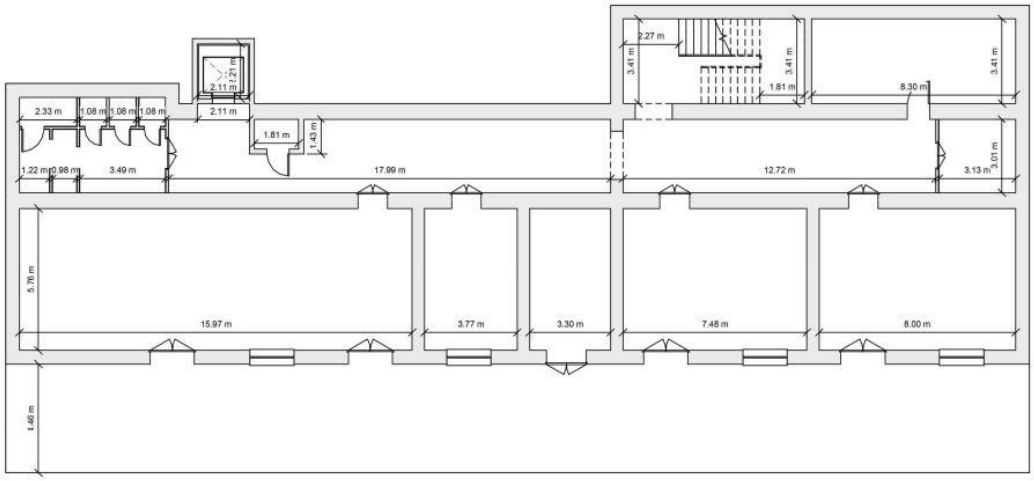
Particolari 1



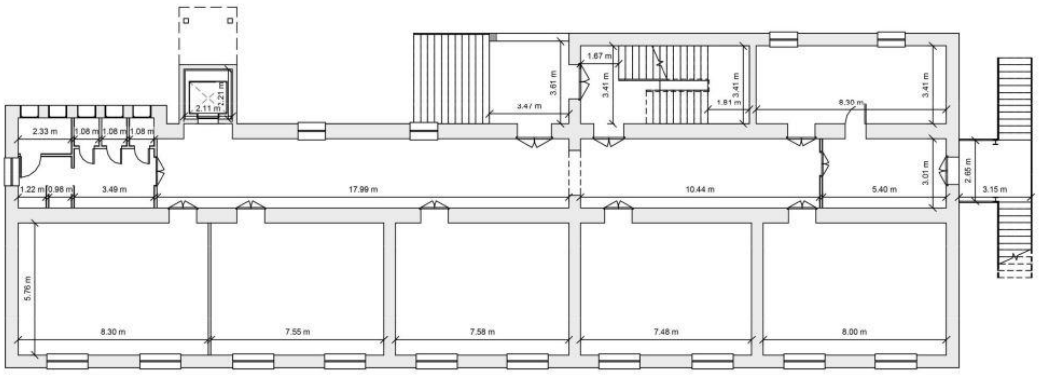
Particolari 2

Piante, sezioni e prospetti

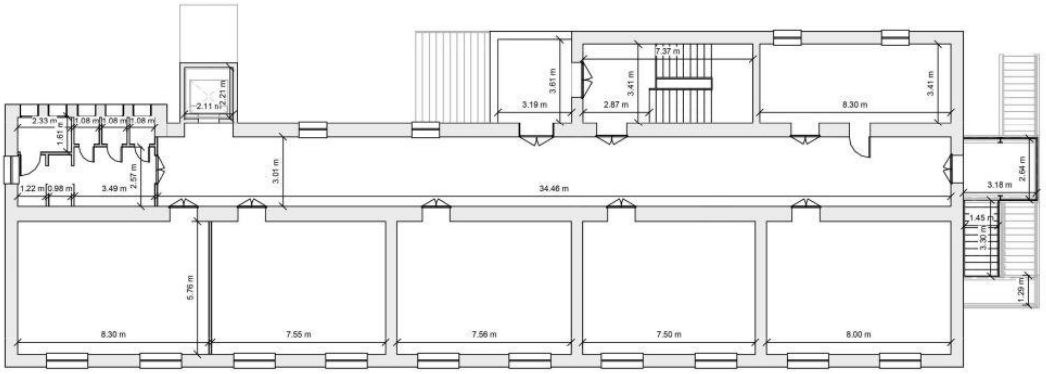
Piano seminterrato (fuori scala)



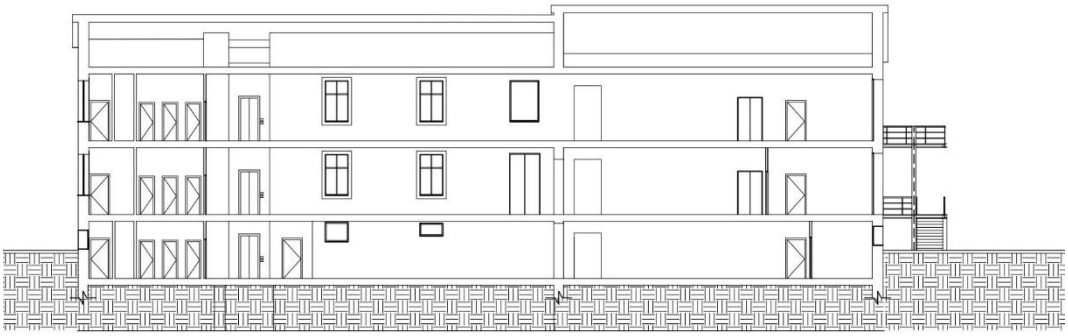
Piano Rialzato (fuori scala)



Piano Primo (fuori scala)



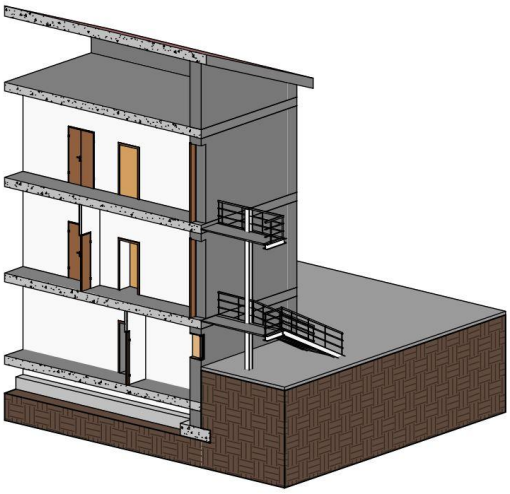
Sezione B – B’



Sezione A – A’



Spaccato assonometrico



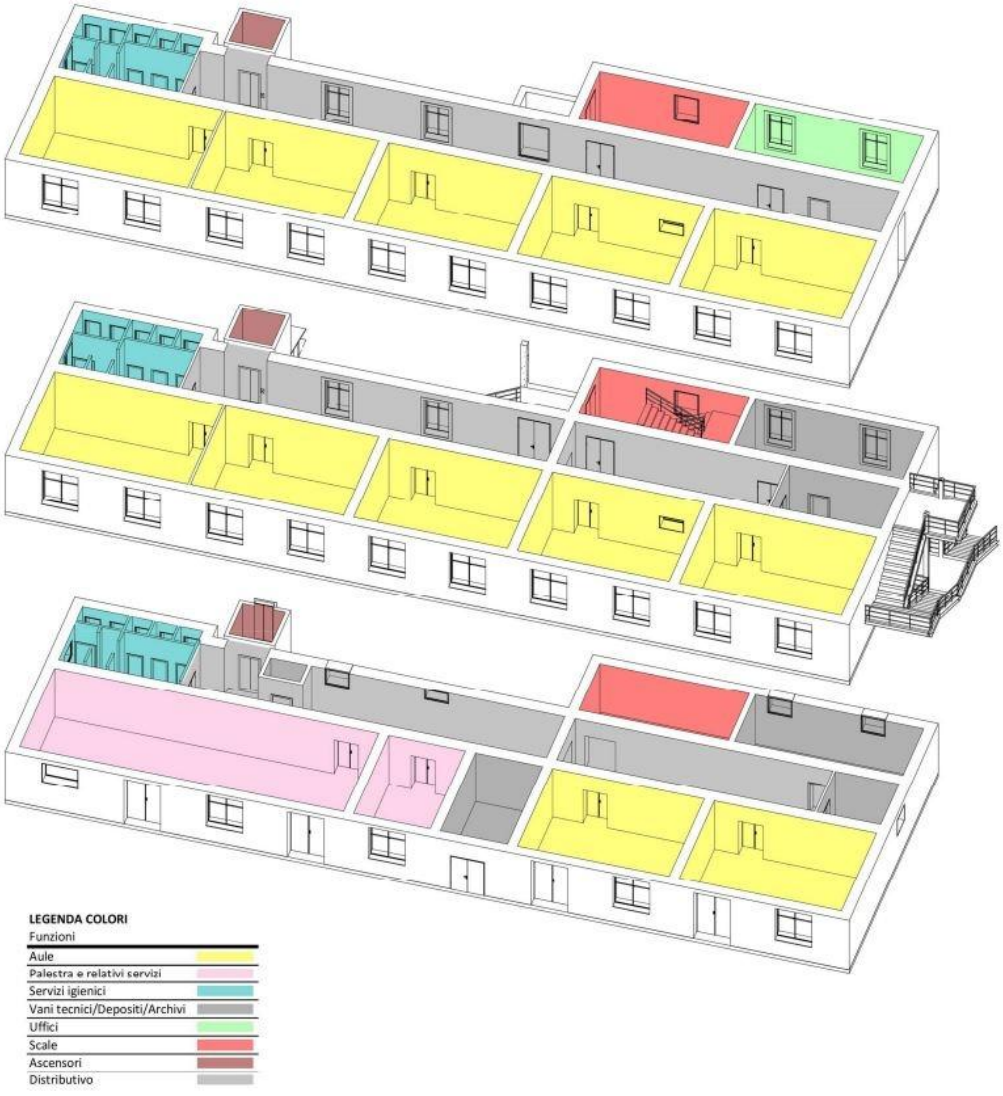
Sezione



Analisi morfologica-dimensionale

Modello morfo-tipologico	■ linea ☐ corte ☐ pettine ☐ piastra ☐ padiglione		
Schema distributivo-spaziale	■ corridoio ☐ unità funzionale		
Dati dimensionali in dettaglio		Quantità	Mq
Attività didattiche	Aule	10	4505
	Laboratori	5	168
Attività collettive	Biblioteca		
	Mensa e relativi servizi	-	
Spazi per educazione fisica	Palestra e relativi servizi	1	91
Attività complementari	Servizi igienici		75
	Vani tecnici	1	19
	Depositi/archivi	1	75
Uffici	segreteria, presidenza, sala professori		
Elementi di comunicazione	Orizzontale	-	276
	Verticale		
	scale	2	53
	ascensori	1	4

Distribuzione degli spazi



Analisi dell'involucro e impianti

L'edificio è dotato di:	Sì	No
doppi vetri	■	□
isolamento delle pareti esterne	□	■
isolamento della copertura	□	■
impianto fotovoltaico	□	■
impianto solare termico	■	□
impianto di condizionamento/ventilazione	□	■
impianto di riscaldamento	■	□
tipologia impianto di riscaldamento	Radiatori a parete	

Analisi costruttiva

Struttura portante	□ intelaiata in c.a. ■ muratura □ acciaio
	□ prefabbricata
	□ mista
Progettato con normativa antisismica	□ sì
	■ no
Tipologia di muratura	Muratura in pietrame Muratura in laterizio
Caratteristiche dei materiali	Pietre a spacco e mattoni pieni in laterizio
Note	
Tipologia di solaio	Solaio latero-cementizio
Copertura	□ a falde □ piana
	□ mista

Bibliografia essenziale	Documenti forniti dal Comune di Terni: – Relazione strutturale – Rilievo Anagrafe dell'edilizia scolastica nazionale Anagrafe dell'edilizia scolastica regionale

Note

(*) Scheda compilata dallo studente Mattia Carpentieri nell'ambito del corso di Riabilitazione Integrata dell'Edilizia tenuto dal prof. Edoardo Currà e dal prof. Michele Morganti nell'A.A. 2023-2024

Appendice E – Analisi dei carichi

Di seguito sono riportati in dettaglio i dati relativi all'analisi dei carichi delle diverse tipologie di solaio individuate nel blocco 1 dell'edificio, considerato come riferimento per questa analisi. In generale si distinguono due tipi principali di solai: quelli in laterocemento e quelli di tipo SAP. Le tabelle distinguono i valori dei carichi in permanenti strutturali (G_1), che includono il peso proprio delle strutture portanti, permanenti non strutturali (G_2), relativi agli elementi non portanti, e sovraccarichi (Q), legati alla destinazione d'uso.

S1_A1 (solaio laterocementizio H 24+6 cm)

Elementi	Larghezza	Altezza	Peso dell'unità di volume	Peso dell'unità di superficie
	m	m	kN/m3	kN/m2
Carichi permanenti strutturali				
travetti	0,1	0,24	25	1,2
soletta	1	0,06	25	1,5
laterizi	0,4	0,24	8	1,24
G1				4,24
Carichi elementi non strutturali				
massetto	1	0,08	21	1,68
pavimento	1	0,01	24	0,24
intonaco inferiore	1	0,01	15	0,15
tramezzi				1,2
G2				3,27
Carichi variabili				
Q				3

S2_A1/2 (solaio laterocementizio H 18+4 cm)

Elementi	Larghezza	Altezza	Peso dell'unità di volume	Peso dell'unità di superficie
	m	m	kN/m3	kN/m2
Carichi permanenti strutturali				
travetti	0,1	0,18	25	0,9
soletta	1	0,04	25	1
laterizi	0,4	0,18	8	1,15
G1				3,05
Carichi elementi non strutturali				
massetto	1	0,1	21	2,1
pavimento	1	0,02	24	0,48
intonaco inferiore	1	0,01	15	0,15
tramezzi				1,2
G2				3,93
Carichi variabili				
Q				3

S3_A1/2 (solaio SAP H 16 cm - scale)

Elementi	Larghezza	Altezza	Peso dell'unità di volume	Peso dell'unità di superficie
	m	m	kN/m3	kN/m2
Carichi permanenti strutturali				
solaio in opera	-	-	-	1,3
G1				1,3
Carichi elementi non strutturali				
gradini	1	0,1	24	2,4
G2				2,4
Carichi variabili				
Q				4

S4_A2 (solaio laterocementizio H 24+8 cm)

Elementi	Larghezza	Altezza	Peso dell'unità di volume	Peso dell'unità di superficie
	m	m	kN/m3	kN/m2
Carichi permanenti strutturali				
travetti	0,1	0,24	25	1,2
soletta	1	0,08	25	2
laterizi	0,4	0,24	8	1,54
G1				4,74
Carichi elementi non strutturali				
massetto	1	0,08	21	1,68
pavimento	1	0,01	24	0,24
intonaco inferiore	1	0,01	15	0,15
tramezzi				1,2
G2				3,27
Carichi variabili				
Q				3

S5_A2 (solaio laterocementizio H 37 cm - pianerottolo)

Elementi	Larghezza	Altezza	Peso dell'unità di volume	Peso dell'unità di superficie
	m	m	kN/m3	kN/m2
Carichi permanenti strutturali				
travetti	0,1	0,28	25	1,4
soletta	1	0,09	25	2,25
laterizi	0,4	0,28	8	1,79
G1				5,44
Carichi elementi non strutturali				
pavimento	1	0,02	24	0,48
intonaco inferiore	1	0,01	18	0,18
G2				0,66
Carichi variabili				
Q				4

S6_A2 (solaio laterocementizio H 16 cm)

	Elementi	Larghezza	Altezza	Peso dell'unità di volume	Peso dell'unità di superficie
		m	m	kN/m3	kN/m2
Carichi permanenti strutturali					
	travetti	0,1	0,16	25	0,8
	soletta	-	-	-	-
	laterizi	0,4	0,16	8	1,02
G1					1,82
Carichi elementi non strutturali					
	intonaco inferiore	1	0,01	18	0,18
G2					0,18
Carichi variabili					
Q					3

S7/ST (solaio laterocementizio H 20 cm)

	Elementi	Larghezza	Altezza	Peso dell'unità di volume	Peso dell'unità di superficie
		m	m	kN/m3	kN/m2
Carichi permanenti strutturali					
	travetti	0,1	0,2	25	1
	soletta	-	-	-	-
	laterizi	0,4	0,2	8	1,28
G1					2,28
Carichi elementi non strutturali					
	intonaco inferiore	1	0,01	18	0,18
G2					0,18
Carichi variabili					
Q					0,5

S8_ST (solaio laterocementizio H 16 cm)

Elementi	Larghezza	Altezza	Peso dell'unità di volume	Peso dell'unità di superficie
	m	m	kN/m3	kN/m2
Carichi permanenti strutturali				
travetti	0,1	0,16	25	0,8
soletta	-	-	-	-
laterizi	0,4	0,16	8	1,02
G1				1,82
Carichi elementi non strutturali				
intonaco inferiore	1	0,01	18	0,18
G2				0,18
Carichi variabili				
Q				0,5

S9_AC (solaio SAP H 18 cm)

Elementi	Larghezza	Altezza	Peso dell'unità di volume	Peso dell'unità di superficie
	m	m	kN/m3	kN/m2
Carichi permanenti strutturali				
solaio in opera	-	-	-	1,5
G1				1,5
Carichi elementi non strutturali				
tegole				1
guaina impermeabilizzante				0,2
G2				1,2
Carichi variabili				
Q				0,5

S10_AC (solaio SAP H 20 cm)

Elementi	Larghezza	Altezza	Peso dell'unità di volume	Peso dell'unità di superficie
	m	m	kN/m3	kN/m2
Carichi permanenti strutturali				
solaio in opera	-	-	-	1,75
G1				1,75
Carichi elementi non strutturali				
tegole				1
guaina impermeabilizzante				0,2
G2				1,2
Carichi variabili				
Q				0,5

S11_AC (solaio SAP H 16 cm - copertura)

Elementi	Larghezza	Altezza	Peso dell'unità di volume	Peso dell'unità di superficie
	m	m	kN/m3	kN/m2
Carichi permanenti strutturali				
solaio in opera	-	-	-	1,3
G1				1,3
Carichi elementi non strutturali				
tegole				1
guaina impermeabilizzante				0,2
G2				1,2
Carichi variabili				
Q				0,5

Appendice F – Calcolo delle azioni della neve e del vento

Azioni del vento

Di seguito si presenta in dettaglio la procedura adottata per il calcolo dell'azione del vento ai sensi del punto 3.3. delle NTC 2018 tramite il software PRO_SAP.
La velocità del vento è calcolata in relazione ai seguenti parametri:
Zona: macro area derivante dalla suddivisione del territorio nazionale (NTC - Tab. 3.3.I);
$v_{b,0}$: velocità base della zona (NTC - Tab. 3.3.I);
c_a: coefficiente di altitudine (NTC - Tab. 3.3.I);
a_0: altitudine base della zona (NTC - Tab. 3.3.I);
k_s: parametro in funzione della zona in cui sorge la costruzione (NTC - Tab. 3.3.I);
a_s: altitudine sul livello del mare del sito;
T_R: periodo di ritorno di progetto espresso in anni;
V_b: velocità di riferimento calcolata come segue:

$$V_b = v_{b,0}\ per\ \ a_s \leq a_0 \quad (35)$$

$$V_b = v_{b,0}\ (1 + k_s((a_s/a_0) - 1))\ per\ a_0 < a_s < 1500m \quad (36)$$

per $a_s > 1500\ m$ i valori vanno ricavati da opportuna documentazione o da indagini comprovate e non dovranno essere minori di quelli previsti per $a_s = 1500\ m$.
c_r: coefficiente di ritorno in funzione del periodo di ritorno T_R
v_r: velocità di riferimento riferita al periodo di ritorno T_R

I parametri $v_{b,0}$, a_0 e k_s vengono definiti tramite la Tab. 3.3.I della normativa, riportata in Figura 226:

Zona	Descrizione	$v_{b,0}$ [m/s]	a_0 [m]	k_s
1	Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia (con l'eccezione della provincia di Trieste)	25	1000	0,40
2	Emilia Romagna	25	750	0,45
3	Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Puglia, Campania, Basilicata, Calabria (esclusa la provincia di Reggio Calabria)	27	500	0,37
4	Sicilia e provincia di Reggio Calabria	28	500	0,36
5	Sardegna (zona a oriente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	750	0,40
6	Sardegna (zona a occidente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	500	0,36
7	Liguria	28	1000	0,54
8	Provincia di Trieste	30	1500	0,50
9	Isole (con l'eccezione di Sicilia e Sardegna) e mare aperto	31	500	0,32



Figura 226- Parametri relativi al caso di studio evidenziati nella Tab. 3.3.I (a sinistra) e nella Fig. 3.3.1. (a destra) delle NTC2018.

La velocità base di riferimento v_b è quindi calcolata come nella Tabella 26, secondo la formula (35) poiché essendo $a_s \leq a_0$, il valore di c_a è pari a 1.

Velocità base di riferimento		
$v_{b,0}$	*27*	*m/s*
a_0	*500*	*m*
a_s	*130*	*m*
c_a	*1*	-
$\boldsymbol{V_b = v_{b,0} c_a}$	***27,00***	***m/s***

Tabella 26 - Calcolo della velocità base di riferimento.

La *Tabella 27* riporta il calcolo della velocità di riferimento v_r:

Velocità di riferimento		
T_R	*50*	*anni*
c_r	*1*	-
V_b	*27,00*	*m/s*
$\boldsymbol{v_r = v_b C_r}$	***27,00***	***m/s***

Tabella 27 - Calcolo della velocità di riferimento.

La pressione del vento sulla struttura viene valutata tramite la seguente espressione:

$$p = q_r c_e c_p c_d \quad (37)$$

Devono quindi essere calcolate:

- la pressione cinetica di riferimento q_r (il cui valore è riportato nella Tabella 28):

$$q_r = \frac{1}{2}\rho v_r^2 \quad (38)$$

Dove ρ è la densità dell'aria assunta convenzionalmente costante e pari a 1,25 Kg/m^3.

Pressione cinetica di riferimento		
ρ	*1,25*	*Kg/m^3*
$\boldsymbol{q_r}$	***0,46***	***KN/m^2***

Tabella 28 - Valore della pressione cinetica di riferimento.

- il coefficiente di esposizione c_e, che è stato calcolato considerando la formula [3.3.7] della normativa per $z \geq z_{min}$ riportata di seguito:

$$c_e(z) = k_t^2 c_t \, ln(z/z_0) \, [7 + c_t \, ln(z/z_0)] \quad (39)$$

Coefficiente di esposizione		
Umbria, zona [Fig. 3.3.1 NTC 2018]	*3*	
Classe di rugosità del terreno [Tab. 3.3.III NTC 2018]	*B*	
Categoria di esposizione [Fig. 3.3.2 NTC 2018]	*IV*	
k_r	*0,22*	*-*
z_0	*0,3*	*m*
z_{min}	*8*	*m*
c_t	*1*	
z	*13,20*	*m*
$\boldsymbol{c_e}$	***1,96***	*-*

Tabella 29 - Calcolo del coefficiente di esposizione.

- il coefficiente di pressione c_p e il coefficiente dinamico c_d, definiti coefficienti aerodinamici riportati in *Tabella 30*:

Coefficienti aerodinamici	
$\boldsymbol{c_p}$	***1***
$\boldsymbol{c_d}$	***1***

Tabella 30 - Valori dei coefficienti aerodinamici.

La pressione del vento, in base alla formula (37), è dunque pari a:

$$p = q_r c_e c_p c_d = 0{,}90\ kN/m^2 \tag{40}$$

Azioni della neve

Ai sensi del punto 3.4.1. delle NTC 2018 il carico neve sulle coperture viene valutato tramite la seguente espressione:

$$q_s = \mu_i q_{sk} C_E C_t \tag{41}$$

dove μ_i è il coefficiente di forma della copertura, q_{sk} il valore di riferimento del carico della neve al suolo, C_E il coefficiente di espansione e C_t il coefficiente termico.

Il coefficiente di forma dipende dalla forma della copertura e dalla sua inclinazione sull'orizzontale delle sue parti componenti e dalle condizioni climatiche locali del sito. L'edificio in esame presenta due tipologie di copertura: una a una falda e l'altra a due falde i cui valori sono riportati rispettivamente nella Tabella 31 e Tabella 32.

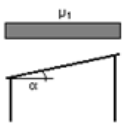
Copertura a una falda	
α	*16,2°*
$\boldsymbol{\mu_1}$	***0,8***
schema di carico *[Fig. 3.4.2 NTC 2018]*	

Tabella 31 - Valore del coefficiente di forma per la copertura a una falda.

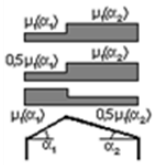
Copertura a due falde	
α_1	*16,0°*
$\boldsymbol{\mu_1\ (\alpha_1)}$	***0,8***
α_2	*18,0°*
$\boldsymbol{\mu_2\ (\alpha_2)}$	***0,8***
schema di carico *[Fig. 3.4.3 NTC 2018]*	

Tabella 32 - Valori del coefficiente di forma per la copertura a due falde.

I valori assegnati altri fattori della formula (41) sono indicati nella *Tabella 33*:

Valore di riferimento del carico della neve al suolo		
Zona di carico della neve *[Fig. 3.4.1 NTC 2018]*	*III*	
a_s	*130*	*m*
$\boldsymbol{q_{sk}}$	***0,60***	***kN/m²***
Coefficiente di espansione		
Topografia *[Tab. 3.4.I NTC 2018]*	*Normale*	
$\boldsymbol{C_E}$	***1***	
Coefficiente termico		
$\boldsymbol{C_t}$	***1***	

Tabella 33 - Calcolo del valore di riferimento del carico della neve al suolo e dei coefficienti di espansione e temico.

Pertanto, il valore del carico della neve sulle coperture risulta essere pari a:

$$q_s = 0{,}48\ kN/m^2 \qquad (42)$$

Appendice G – Combinazioni di carico

Le tabelle riportate di seguito illustrano in dettaglio le combinazioni di carico adottate nell'analisi del modello strutturale. Questi dati costituiscono la base per la valutazione delle sollecitazioni e lo studio del comportamento strutturale complessivo dell'edificio.

Legenda

ID	Significato
CDC Ggk	peso proprio della struttura
CDC G1s	permanente solai-coperture
CDC G2s	permanente solai-coperture n.c.d.
CDC Qsk	variabile solai
CDC Qnk	carico da neve
CDC G2k	permanente generico n.c.d., tamponature
CDC Ed1	dinamico SLU, alfa=0.0 (ecc. +)
CDC Ed2	dinamico SLU. alfa=0.0 (ecc. -)
CDC Ed3	dinamico SLU, alfa=90.00 (ecc. +)
CDC Ed4	dinamico SLU, alfa=90.00 (ecc. -)
CDC Ed5	dinamico SLD, alfa=0.0 (ecc. +)
CDC Ed6	dinamico SLD, alfa=0.0 (ecc. -)
CDC Ed7	dinamico SLD, alfa=90.00 (ecc. +)
CDC Ed8	dinamico SLD, alfa=90.00 (ecc. -)

Comb. SLU	CDC Ggk	CDC G1s	CDC G2s	CDC Qsk	CDC Qnk	CDC G2k	CDC Ed1	CDC Ed2	CDC Ed3	CDC Ed4	CDC Ed5	CDC Ed6	CDC Ed7	CDC Ed8
1	1,30	1,30	1,50	0,00	0,00	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	1,30	1,30	1,50	0,00	0,75	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	1,30	1,30	1,50	1,50	0,00	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	1,30	1,30	1,50	1,50	0,75	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1,00	1,00	0,80	0,00	0,00	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	1,00	1,00	0,80	0,00	0,75	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	1,00	1,00	0,80	1,50	0,00	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	1,00	1,00	0,80	1,50	0,75	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	1,30	1,30	1,50	0,00	1,50	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	1,30	1,30	1,50	1,05	0,00	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	1,30	1,30	1,50	1,05	1,50	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	1,00	1,00	0,80	0,00	1,50	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	1,00	1,00	0,80	1,05	0,00	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	1,00	1,00	0,80	1,05	1,50	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.15	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	-1,00	0,00	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.16	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	-1,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.17	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	1,00	0,00	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.18	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	1,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.19	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	-1,00	0,00	0,00	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.20	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	-1,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.21	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.22	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.23	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	-1,00	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.24	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	-1,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.25	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	1,00	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

SLV sism.26	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	1,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.27	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	-1,00	0,00	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.28	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	-1,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.29	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	-0,30	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.30	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.31	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	-0,30	0,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.32	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	-0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.33	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,30	0,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.34	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.35	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	-0,30	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.36	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	-0,30	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.37	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,30	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.38	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,30	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.39	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	-0,30	0,00	0,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.40	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	-0,30	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.41	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,30	0,00	0,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.42	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,30	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.43	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	-0,30	0,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.44	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	-0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00

SLV sism.45	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,30	0,00	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SLV sism.46	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Comb. SLE	CDC Ggk	CDC G1s	CDC G2s	CDC Qsk	CDC Qnk	CDC G2k	CDC Ed1	CDC Ed2	CDC Ed3	CDC Ed4	CDC Ed5	CDC Ed6	CDC Ed7	CDC Ed8
SLD sism.47	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	-0,30	0,00
SLD sism.48	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	0,30	0,00
SLD sism.49	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	-0,30	0,00
SLD Sism.50	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,30	0,00
SLD Sism.51	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	0,00	-0,30
SLD Sism.52	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	0,00	0,30
SLD Sism.53	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	-0,30
SLD Sism.54	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,30
SLD Sism.55	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	-0,30	0,00
SLD Sism.56	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,30	0,00
SLD Sism.57	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-0,30	0,00
SLD Sism.58	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,30	0,00
SLD Sism.59	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	-0,30
SLD Sism.60	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	0,30
SLD Sism.61	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	-0,30

SLD Sism.62	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,30
SLD Sism.63	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,30	0,00	-1,00	0,00
SLD Sism.64	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,30	0,00	1,00	0,00
SLD Sism.65	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	-1,00	0,00
SLD Sism.66	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	1,00	0,00
SLD Sism.67	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,30	-1,00	0,00
SLD Sism.68	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,30	1,00	0,00
SLD Sism.69	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	-1,00	0,00
SLD Sism.70	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	1,00	0,00
SLD Sism.71	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,30	0,00	0,00	-1,00
SLD Sism.72	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,30	0,00	0,00	1,00
SLD Sism.73	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	-1,00
SLD Sism.74	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	1,00
SLD Sism.75	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,30	0,00	-1,00
SLD Sism.76	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,30	0,00	1,00
SLD Sism.77	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	-1,00
SLD Sism.78	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	1,00

Comb. SLE	CDC Ggk	CDC G1s	CDC G2s	CDC Qsk	CDC Qnk	CDC G2k	CDC Ed1	CDC Ed2	CDC Ed3	CDC Ed4	CDC Ed5	CDC Ed6	CDC Ed7	CDC Ed8
SLD sism.47	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	-0,30	0,00
SLD sism.48	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	0,30	0,00
SLD sism.49	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	-0,30	0,00
SLD Sism.50	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,30	0,00
SLD Sism.51	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	0,00	-0,30
SLD Sism.52	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	0,00	0,30
SLD Sism.53	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	-0,30
SLD Sism.54	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,30
SLD Sism.55	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	-0,30	0,00
SLD Sism.56	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,30	0,00
SLD Sism.57	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-0,30	0,00
SLD Sism.58	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,30	0,00
SLD Sism.59	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	-0,30
SLD Sism.60	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,00	0,00	0,30
SLD Sism.61	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	-0,30
SLD Sism.62	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,30
SLD Sism.63	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,30	0,00	-1,00	0,00
SLD Sism.64	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,30	0,00	1,00	0,00

SLD Sism.65	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	-1,00	0,00
SLD Sism.66	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	1,00	0,00
SLD Sism.67	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,30	-1,00	0,00
SLD Sism.68	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,30	1,00	0,00
SLD Sism.69	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	-1,00	0,00
SLD Sism.70	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	1,00	0,00
SLD Sism.71	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,30	0,00	0,00	-1,00
SLD Sism.72	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,30	0,00	0,00	1,00
SLD Sism.73	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	-1,00
SLD Sism.74	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	1,00
SLD Sism.75	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,30	0,00	-1,00
SLD Sism.76	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,30	0,00	1,00
SLD Sism.77	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	-1,00
SLD Sism.78	1,00	1,00	1,00	0,30	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	1,00

Appendice H – Codice Matlab per applicazione MDO al caso di studio

Il codice si compone di diverse parti e funzioni personalizzate che vengono descritte dettagliatamente in seguito. Inizialmente viene:

1) salvato il contenuto del foglio excel *Aste_da_verificare.xlsx* (contente la lista di codici identificativi dei travi e dei pilastri della parte di edificio da verificare) all'interno della variabile *elem* (riga 5);
2) eseguito un primo ciclo for con lo scopo di definire la jj-ma cartella dove cercare il file word *prova.doc* e salvare il contenuto del file all'interno della variabile *data*, composta da 174 colonne: le prime 172 contengono i valori 1 o 0, che indicano se il requisito di un elemento viene verificato o meno, mentre le ultime due riportano i valori della massa rispettivamente di pilastri e travi. Inoltre, vengono salvati all'interno della variabile *index* gli identificativi degli elementi;
3) eseguito un secondo ciclo for, il cui scopo è identico a quello del punto precedente. Tuttavia, mentre il primo ciclo for viene realizzato con la variabile *jj* che può assumere valori da 1 a 9, il secondo ciclo for viene eseguito imponendo che la variabile *jj* assuma valori da 10 a 50.;
4) salvata la variabile *data* come file *output_requisiti.csv*.

Parte 1

Viene assegnata la variabile *elem* (*Figura 227*) che assume il valore del contenuto del file *Aste_da_verificare.xlsx*, ossia gli identificativi degli elementi di cui deve essere tracciato il risultato delle verifiche.

```
1   clear
2   clc
3   close all
4
5   elem = readmatrix('Aste_da_verificare.xlsx');
```

Figura 227 - Assegnazione della variabile elem.

Parte 2

Da riga 8 a riga 24 (Figura 230), viene eseguito il primo ciclo for. L'operazione contenuta nel ciclo viene ripetuta nove volte, in modo tale che la variabile *jj*

assuma valori da 1 a 9. Il valore diverso della variabile durante il ciclo permette di modificare il percorso (riga 19) in cui cercare il file *prova.doc*, che viene salvato nella variabile *path*. Quest'ultima viene trasferita a una funzione personalizzata (riga 11), nominata *reader_function*, il cui output rappresenta due matrici (Figura 228):

1) Pilastri: è una matrice di 169 righe e 2 colonne associata agli elementi pilastri in cui la prima colonna rappresenta gli identificativi degli elementi e la seconda colonna indica, con valori 1 o 0, se ciascun elemento verifica o meno i requisiti progettuali;
2) Travi: è una matrice di 287 righe e 2 colonne associata agli elementi travi in cui la prima colonna rappresenta gli identificativi degli elementi e la seconda indica, con valori 1 o 0, se ciascun elemento verifica o meno i requisiti progettuali.

Pilastri

169x2 double

	1	2
1	83	0
2	144	1
3	247	0
4	1	1
5	145	1
6	248	1
7	5	1
8	153	1
9	255	1
10	3	1
11	154	1
12	256	1
13	4	1

Travi

287x2 double

	1	2
1	513	0
2	6	1
3	315	1
4	320	1
5	316	1
6	139	1
7	25	1
8	312	0
9	340	1
10	420	1
11	493	1
12	446	1
13	505	1

Figura 228 - Matrici output della funzione reader_function.

Le righe 12 e 14 del codice permettono di identificare la posizione nelle matrici *Pilastri* e *Travi* degli elementi (prima colonna) il cui identificato è contenuto all'interno della variabile *elem*: queste posizioni permettono di isolare le righe delle due matrici e salvarle rispettivamente nelle variabili *a* (riga 13) e *b* (riga 14),

che vengono poi concatenate verticalmente in modo da generare un'unica matrice (riga 15) che abbia 172 righe e 2 colonne (Figura 229).

temp

172x2 double

	1	2
1	83	0
2	144	1
3	247	0
4	1	1
5	145	1
6	248	1
7	5	1
8	153	1
9	255	1
10	3	1
11	154	1
12	256	1
13	4	1
14	158	1

Figura 229 - Matrice derivante dalla concatenazione delle variabili a e b.

Infine, vengono assegnate rispettivamente le variabili *temp1* (riga 16) e *temp2* (riga 18), definite rispettivamente come la seconda e la prima colonna trasposta della variabile *temp*, in modo tale da assumere una dimensione di una riga e 172 colonne. Entrambe le variabili vengono poi concatenate verticalmente alle variabili *data* e *index* (riga 17 e 19, rispettivamente).

Le righe 20 e 21 del codice consentono l'estrazione del contenuto dei due valori di massa all'interno del file *prova.csv* da individuare nel percorso definito a riga 9. I due valori, estratti dalla seconda colonna della variabile *aa*, (righe 19 e 20), vengono concatenati orizzontalmente alla variabile *data*.

```
for jj=1:9
    path = ['run_000',num2str(jj),'\Scuola_riferimento_data'];
    [Pilastri,Travi] = reader_function(path);
    ind = ismember(Pilastri(:,1),elem,'rows');
    a = Pilastri(ind,:);
    ind = ismember(Travi(:,1),elem,'rows');
    b = Travi(ind,:);
    temp = [a; b];
    temp1 = temp(:,2)';
    data = [data; temp1];
    temp2 = temp(:,1)';
    index = [index; temp2];
    aa = readmatrix([path,'\prova.csv']);
    data = [data aa(19,2) aa(20,2)];
end
```

Figura 230 - Schermata della seconda parte del codice.

Parte 3

La terza parte del codice, mostrata in Figura 231, è identica a quella precedente, con l'unica eccezione che la variabile jj viene fatta variare all'interno dell'intervallo [10,50].

```
for jj=10:50
    path = ['run_00',num2str(jj),'\Scuola_riferimento_data'];
    [Pilastri,Travi] = reader_function(path);
    ind = ismember(Pilastri(:,1),elem,'rows');
    a = Pilastri(ind,:);
    ind = ismember(Travi(:,1),elem,'rows');
    b = Travi(ind,:);
    temp = [a; b];
    temp1 = temp(:,2)';
    data = [data; temp1];
    temp2 = temp(:,1)';
    index = [index; temp2];
    aa = readmatrix([path,'\prova.csv']);
    data = [data aa(19,2) aa(20,2)];
end
```

Figura 231 - Schermata della terza parte del codice.

Parte 4

Nell'ultima parte (Figura 232), viene salvata la variabile *data* come *output_requisiti.csv*.

```
35
36      writematrix(data,'output_requisiti.csv')
37
```

Figura 232 - Schermata della quarta parte del codice.

La funzione personalizzata *reader_function*, richiamata a riga 11 e 24, riceve in input il percorso della cartella dove cercare il file *prova.doc* e genera in output le due variabili *Pilastri* e *Travi*. La funzione è costituita da 8 sezioni:

1) il contenuto del documento word viene estratto e assegnato alla variabile *content*;
2) questo viene salvato all'interno del file testuale *contenuto_estratto.txt*. La ragione è dovuta al fatto che risulta essere più agevole applicare filtri (descritti nella parte 3) su file testuali rispetto a file word, la cui lettura è demandata a funzioni native di Matlab;
3) il file *contenuto_estratto.txt* viene letto in modo tale da salvare solo le righe che riportano gli output (la verifica dei requisiti progettuali) delle travi e pilasti. Queste righe vengono assegnate alla variabile *new_line*;
4) un nuovo file testuale (*new_file_Pilastri.txt)* in cui viene riportata ogni riga della variabile *new_line*, ossia il contenuto salvato nella parte 3), viene generato;
5) il file *contenuto_estratto.txt* viene letto nuovamente in modo tale da salvare solo le righe che riportano gli output (cioè la verifica dei requisiti progettuali) delle travi. Queste righe vengono salvate nuovamente nella variabile *new_line*;
6) un nuovo file testuale (*new_file_Travi.txt)* in cui viene riportato ogni riga della variabile *new_line,* ossia il contenuto salvato nella parte 5), viene generato;
7) la funzione personalizzata *reader_new_file* viene applicata in modo tale da salvare il contenuto del file *new_file_Pilastri.txt* sotto forma di tabella. Viene eseguito un ciclo for per 588 volte, che corrisponde al numero di righe all'interno delle quali è presente l'output dei pilastri a cui si è interessati: durante il ciclo, viene salvato il valore 1 solo se l'elemento presenta lo stato *ok,ok*;

8) la funzione personalizzata *reader_new_file* viene applicata in modo tale da salvare il contenuto del file *new_file_Travi.txt* sotto forma di tabella. Viene eseguito un ciclo for per 983 volte, che corrisponde al numero di righe all'interno delle quali è presente l'output delle travi a cui si è interessati: durante il ciclo, viene salvato il valore 1 solo se l'elemento presenta lo stato "*ok,ok*" o "*Nv,ok*".

Sezione 1

Nella prima sezione (Figura 233) viene lanciata la funzione nativa di Matlab per la lettura di un file Word. A riga 9, viene definito il nome del file word dato dalla concatenazione del percorso (input della funzione) e la stringa *prova.doc*. A riga 13, viene salvato il contenuto del file sotto forma di stringa, una volta che il file word è stato aperto in batch (riga 12).

```
1  function [Pilastri,Travi] = reader_function(path)
2  %UNTITLED Summary of this function goes here
3  %   Detailed explanation goes here
4  % Inizializza Word Application
5  wordApp = actxserver('Word.Application');
6  wordApp.Visible = 0;  % Nascondi Word per evitare che venga visualizzato
7
8  % Percorso del file di Word
9  name = fullfile(path, 'prova.doc')
10
11 % Apri il documento Word
12 wordDoc = wordApp.Documents.Open(name, [], true);
13 content = wordDoc.Content.Text;
14
```

Figura 233 - Schermata della prima sezione della funzione reader_function.

Sezione 2

Nella seconda sezione (Figura 234) viene generato un nuovo file testuale, *contenuto_estratto.txt* all'interno del percorso fornito come input della funzione (riga 16). All'interno del file, viene stampato il contenuto del file word (riga 18).

```
15   % Salva il contenuto in un file di testo
16   fileTxt = fullfile(path, 'contenuto_estratto.txt');
17   fid = fopen(fileTxt, 'w');
18   fprintf(fid, '%s', content);
19   fclose(fid);
20
```

Figura 234 - Schermata della seconda sezione della funzione reader_function.

Sezione 3 e 4

Nella terza sessione (Figura 235) viene aperto il file *contenuto_estratto.txt* (riga 27) e letta la prima riga (riga 28). Il ciclo *while* (riga 33) viene utilizzato per eseguire un'operazione fintanto che una condizione viene rispettata: in questo caso, è necessario che il contenuto della variabile *line_ex* sia non vuoto, ossia che la fine del file aperto non sia stata raggiunta. Il ciclo *while* consente di leggere una rig del file alla volta; se il contenuto della variabile *line_ex* non è uguale a *"< TABELLA VERIFICHE ELEMENTI – MATERIALI ESISTENTI >*" (riga 34), si potrà procedere con la lettura della linea successiva (riga 41); se la condizione è verificata, dopo aver letto la linea successiva (riga 35), viene eseguito un secondo ciclo *while* (riga 36). Come il primo ciclo *while*, anche il secondo viene eseguito finché la medesima condizione venga rispettata. All'interno del ciclo *while*, le righe del file vengono lette una alla volta (riga 38) e successivamente salvate nella variabile *new_line* (riga 37), come un'ulteriore riga aggiunta alla variabile.

Quando i criteri di stop sono soddisfatti, l'esecuzione esce da entrambi cicli *while*. Il contenuto della variabile *new_line* viene utilizzato per scrivere il nuovo file *new_file_Pilastri.txt*, che viene inizializzato a riga 47, all'interno del percorso fornito come input nella funzione. Nel ciclo for (riga 48-50), il valore della variabile *jj* cambia tra 1 e il numero di righe *new_line*, in modo tale da aggiungere il contenuto della jj-ma riga di *new_line* all'interno del nuovo file creato.

```
26    % Gestione del file di testo per l'estrazione dei dati
27    fid = fopen(fileTxt, 'r');
28    line_ex = fgetl(fid);
29    count = 0;
30    new_line = {};
31
32    % Primo ciclo per estrarre i dati
33    while ischar(line_ex)
34        if strcmp(line_ex, '< TABELLA VERIFICHE ELEMENTI - MATERIALI ESISTENTI >  ')
35            line_ex = fgetl(fid);
36            while ischar(line_ex)
37                new_line{end+1} = line_ex;
38                line_ex = fgetl(fid);
39            end
40        else
41            line_ex = fgetl(fid);
42        end
43    end
44    fclose(fid);
45
46    % Scrivi i dati estratti nel nuovo file
47    fileID = fopen(fullfile(path, 'new_file_Pilastri.txt'), 'w');
48    for jj = 1:length(new_line)
49        fprintf(fileID, '%s\n', new_line{jj});
50    end
51    fclose(fileID);
52
```

Figura 235 - Schermata della terza e quarte sezione della funzione reader_function.

Sezione 5 e 6

Nelle sezioni 5 e 6 (Figura 236), vengono eseguite le medesime operazioni della parte 3 e 4, con solo due differenze: la prima è che la condizione dell'*IF* controlla che la linea sia uguale a "*Trave Note Pos. %Af Af inf. Af. sup Af long. x/d V N/M V V/T cls V V/T acc Staffe Rif. Cmb*" (riga 62), la seconda è che il contenuto della variabile *new_line* viene salvato mediamente ciclo for (riga 76-78) nel nuovo file denominato *new_file_Travi.txt*.

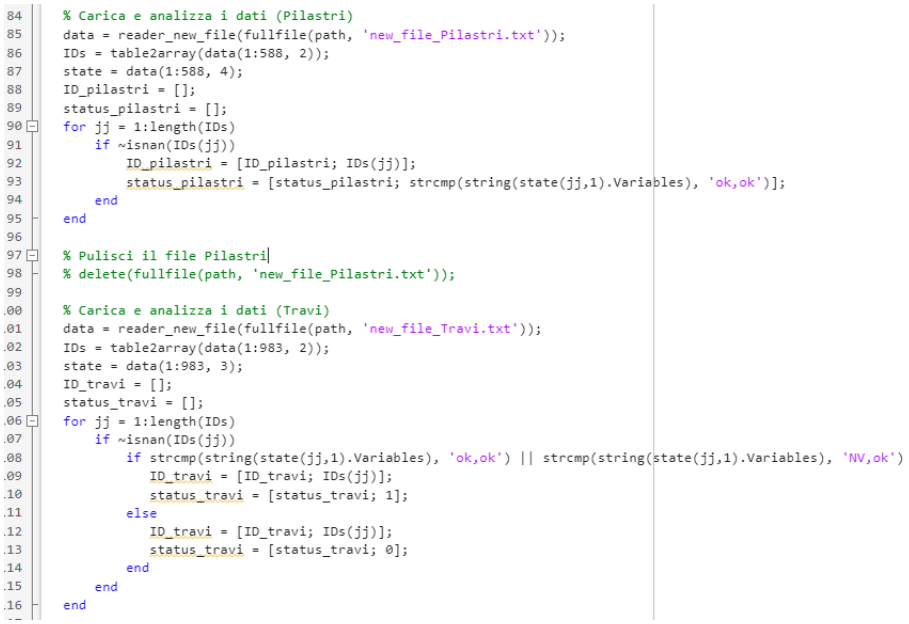
```
57    fid = fopen(fileTxt, 'r');
58    line_ex = fgetl(fid);
59    new_line = {};
60
61    while ischar(line_ex)
62        if strcmp(line_ex, '    Trave   Note    Pos.    %Af Af inf. Af. sup Af long.    x/d V N/M   V V/T cls   V V/T acc   Staffe  Rif. cmb    ')
63            line_ex = fgetl(fid);
64            while ischar(line_ex)
65                new_line{end+1} = line_ex;
66                line_ex = fgetl(fid);
67            end
68        else
69            line_ex = fgetl(fid);
70        end
71    end
72    fclose(fid);
73
74    % Scrivi i dati estratti nel nuovo file per Travi
75    fileID = fopen(fullfile(path, 'new_file_Travi.txt'), 'w');
76    for jj = 1:length(new_line)
77        fprintf(fileID, '%s\n', new_line{jj});
78    end
79    fclose(fileID);
80
```

Figura 236 - Schermata della quinta e sesta sezione della funzione reader_function.

Sezione 7 e 8

A riga 85 e 101 viene utilizzata la funzione personalizzata *reader_new_file* per leggere i file new_file_Pilastri.txt e *new_file_Travi.txt*: questa funzione permette di salvare il contenuto dei due file in formato tabellare, avendo usando lo spazio tra le parole come separatore. I due contenuti vengono salvati nella variabile *data*, da cui è possibile ottenere la variabile *IDs* isolando la seconda colonna di *data* e la variabile *state*, isolando la quarta colonna di *data*, nel caso del primo file (riga 87) e la terza colonna, nel caso del secondo file (riga 103). Mentre nel primo vengono prese in considerazione solo le prime 588 righe di *data*, nel secondo file, vengono considerate le prime 983: questi valori rappresentano il numero di righe all'interno del quale è possibile osservare lo stato degli elementi rispettivamente pilastri e travi. Tuttavia, essendo alcune righe di *IDs* e *state* uguali a *NaN* (Not Applicable), viene eseguito un ciclo for per:

- controllare se il valore salvato alla riga jj-ma non è vuoto;
- salvare all'interno della variabile *ID_pilastri* il jj-mo valore di *IDs* (riga 92) e nella variabile *ID_travi* il jj-mo valore di *IDs* (riga 109 e 112);
- salvare all'interno della variabile *state_travi* il valore 1, se il valore della riga è uguale alla stringa "*ok,ok*", 0 in caso contrario (riga 93); salvare all'interno della variabile *state_pilastri* il valore 1, se il valore della riga è uguale alla stringa "*ok,ok*" o "*Nv,ok*", 0 in caso contrario (riga 110 e 113).



```
% Carica e analizza i dati (Pilastri)
data = reader_new_file(fullfile(path, 'new_file_Pilastri.txt'));
IDs = table2array(data(1:588, 2));
state = data(1:588, 4);
ID_pilastri = [];
status_pilastri = [];
for jj = 1:length(IDs)
    if ~isnan(IDs(jj))
        ID_pilastri = [ID_pilastri; IDs(jj)];
        status_pilastri = [status_pilastri; strcmp(string(state(jj,1).Variables), 'ok,ok')];
    end
end

% Pulisci il file Pilastri
% delete(fullfile(path, 'new_file_Pilastri.txt'));

% Carica e analizza i dati (Travi)
data = reader_new_file(fullfile(path, 'new_file_Travi.txt'));
IDs = table2array(data(1:983, 2));
state = data(1:983, 3);
ID_travi = [];
status_travi = [];
for jj = 1:length(IDs)
    if ~isnan(IDs(jj))
        if strcmp(string(state(jj,1).Variables), 'ok,ok') || strcmp(string(state(jj,1).Variables), 'NV,ok')
           ID_travi = [ID_travi; IDs(jj)];
           status_travi = [status_travi; 1];
        else
           ID_travi = [ID_travi; IDs(jj)];
           status_travi = [status_travi; 0];
        end
    end
end
```

Figura 237 - Schermata della settima e ottava sezione della funzione reader_function.

La funzione *reader_new_file* è stata ottenuta utilizzando lo strumento nativo *Import Data* presente nella GUI di Matlab: una volta cliccato il bottone, è possibile selezionare un file di prova *new_file_Pilastri.txt*. Lo strumento applica automaticamente dei separatori in base al filtro scelto dell'utente. In questo caso, è stato scelto il Tab come separatore, ottenendo come output l'individuazione di 13 colonne. In giallo sono presenti gli elementi delle colonne che verranno lette come *NaN*, come mostrato in Figura 238. Una volta personalizzato il settaggio, è possibile esportare la funzione, cliccando su *Import Selection→Generate Function.*

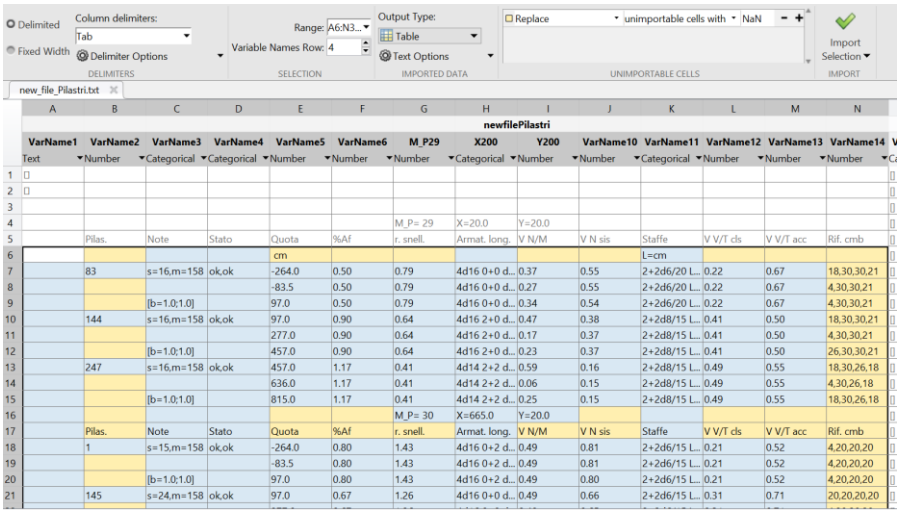


Figura 238 - Funzione reader_new_file.

Appendice I – Rete neurale output binari

Di seguito viene descritto il codice Python che permette la creazione della rete neurale per ogni colonna output. I requisiti affinché questo codice sia replicabile sono:

- Installazione della libreria Tensorflow 2.10.0
- Installazione della libreria numpy
- Installazione della libreria sklearn
- Installazione della libreria matpltlib
- Installazione della libreria pandas
- Installazione della libreria joblib

Il codice si compone di due parti: nella prima, viene effettuato il caricamento dei campioni attraverso il file *.csv* e creato un file all'interno del quale salvare l'accuratezza delle reti per ciascun output (172). Nella seconda parte, viene realizzato un ciclo for, permettendo di automatizzare il processo di addestramento delle reti sulle 172 colonne.

Parte 1

Nelle prime righe (da 8 a 17), le librerie Python vengono richiamate (Figura 239). A riga 20, viene importato il file .csv contente le 188 colonne (12 input e 174 output). Infine, viene creato un file *accuracy.txt*, dove verranno salvate le informazioni della rete, ossia:

- colonna dell'output su cui è stato fatto l'addestramento;
- l'accuratezza della rete sul dataset usato per il processo di addestramento;
- l'accuratezza della rete sul dataset di test che la rete non ha visto.

```
 8  import pandas as pd
 9  from sklearn.model_selection import train_test_split
10  from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
11  from keras.models import Sequential
12  from keras.layers import Dense
13  from keras.optimizers import Adam
14  from keras.callbacks import Callback
15  import matplotlib.pyplot as plt
16  from sklearn.metrics import accuracy_score
17  import joblib  # Per salvare il modello e lo scaler
18
19  # 1. Carica il CSV
20  df = pd.read_csv('DOE_Input_v0.csv',sep=";")
21
22  # 2. Inizializza il file di testo per l'accuratezza
23  with open('accuracy.txt', 'w') as accuracy_file:
24      accuracy_file.write("Colonna - Accuratezza Training - Accuratezza Test\n")
25
```

Figura 239 - Schermata della prima parte del codice.

Parte 2

Nella seconda parte, viene effettuato un ciclo for (riga 27) in cui la variabile *jj* cambia da 5 a 172. In tal modo, è possibile automatizzare il processo di apprendimento delle reti, considerando come target una colonna sempre differente. Le operazioni che vengono realizzate nel ciclo sono (Figura 240):

1) la definizione delle variabili di input (*X*) e output (*y*), a partire dalla variabile "*df*", definita nella parte 1;
2) la costruzione di un dataset di addestramento (*X_train* e *y_train*) e test (*X_test* e *y_test*), a riga 36. La suddivisione viene ottenuta scegliendo in modo random il 20% del dataset originale da destinare al dataset di test;
3) l'applicazione della normalizzazione su entrambi i dataset di input. In particolare, viene usata una normalizzazione Standard, che permette di centrare le caratteristiche di input in un'intervallo [-1,1] di media nulla e varianza unitaria. Come descritto nella seguente equazione

$$\hat{x} = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \tag{43}$$

i valori μ_x e σ_x vengono calcolati sul dataset di addestramento e la formula così ottenuta viene applicata, successivamente, su entrambi i dataset (riga 40 e 41);

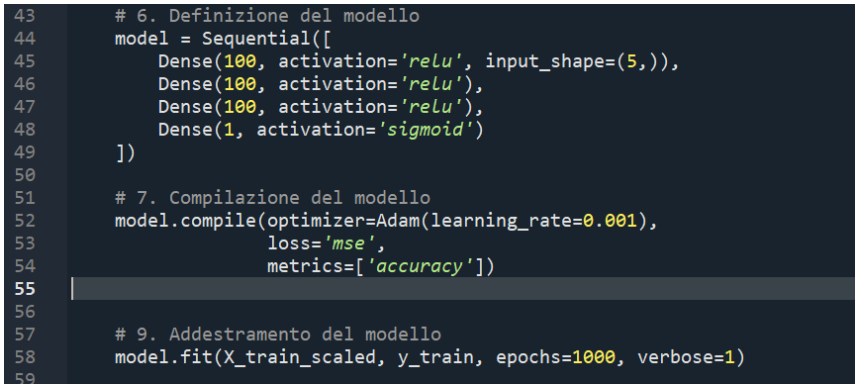
```
27  for jj in range(5, df.shape[1]):
28  # for jj in [46, 47, 80]:
29  #for jj in [46]:
30
31      # Seleziona gli input e l'output per la colonna corrente
32      X = df.iloc[:, :5].to_numpy()  # Le prime 5 colonne (input)
33      y = df.iloc[:, jj].to_numpy()  # La colonna corrente (output)
34
35      # 4. Dividi i dati in training set (80%) e test set (20%)
36      X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)
37
38      # 5. Normalizza gli input
39      scaler = MinMaxScaler()  # Usa MinMaxScaler o StandardScaler se preferisci
40      X_train_scaled  = scaler.fit_transform(X_train)
41      X_test_scaled = scaler.transform(X_test)
42
```

Figura 240 - Sezione iniziale della seconda parte del codice.

4) la struttura della rete e la metodologia di addestramento vengono definite da riga 44 a 54 (Figura 241):
    - sono stati considerati 3 strati interni, ciascuno con 100 neuroni e funzione di attivazione *ReLu*;
    - l'uscita, su cui viene applicata la funzione di attivazione *sigmoide,* è unitaria;
    - l'addestramento è stato realizzato mediante l'algoritmo di ottimizzazione *Adam*, con un tasso di apprendimento pari a 0.001;
    - l'errore che si cerca di minimizzare è lo scarto quadratico medio (MSE);
    - la metrica per valutare la bontà della rete durante il processo di apprendimento viene stampata. In questo caso, è stata scelta l'accuratezza, definita come:

$$Accuratezza = \frac{Numero\ previsioni\ corrette}{Numero\ previsioni\ totali} \qquad (44)$$

    - il processo di training della rete viene realizzato usando il dataset di addestramento, sia di input che output.



```
43      # 6. Definizione del modello
44      model = Sequential([
45          Dense(100, activation='relu', input_shape=(5,)),
46          Dense(100, activation='relu'),
47          Dense(100, activation='relu'),
48          Dense(1, activation='sigmoid')
49      ])
50
51      # 7. Compilazione del modello
52      model.compile(optimizer=Adam(learning_rate=0.001),
53                    loss='mse',
54                    metrics=['accuracy'])
55
56
57      # 9. Addestramento del modello
58      model.fit(X_train_scaled, y_train, epochs=1000, verbose=1)
59
```

Figura 241 - Sezione centrale della seconda parte del codice.

5) gli output, una volta terminato il training, vengono predetti a partire dal dataset usato nell'addestramento e quello di test, in modo da valutarne l'accuratezza (da riga 61 a 64 mostrate in Figura 242);
6) la rete viene salvata in formato *.pkl* in modo tale da poter essere utilizzata in futuro. Il suo nome dipende dal valore della colonna dell'output usato per il processo di addestramento. Anche i valori della normalizzazione vengono salvati in modo da trasformare coerentemente ogni futuro dataset (riga 67 e 68);
7) il valore della colonna e l'accuratezza mostrata dalla rete vengono salvati su entrambi i dataset del file *accuracy.txt*, creato inizialmente;
8) l'immagine mostrata in Figura 243 viene creata. Questa è composta dal grafico Target-Predizione sul dataset di addestramento, a sinistra, e dal grafico Target-Predizione sul dataset di test, a destra.

```
    y_train_pred = model.predict(X_train_scaled)
    y_test_pred = model.predict(X_test_scaled)
    accuracy_train = accuracy_score(y_train, y_train_pred.round())
    accuracy_test = accuracy_score(y_test, y_test_pred.round())

    # 11. Salva il modello e lo scaler
    joblib.dump(model, f'output_{jjj}.pkl')  # Salva il modello
    joblib.dump(scaler, f'scaler_{jjj}.pkl')  # Salva lo scaler

    # 12. Scrivi l'accuratezza nel file di testo
    with open('accuracy.txt', 'a') as accuracy_file:
        accuracy_file.write(f"{jjj} - {df.iloc[:, jjj].name} - {accuracy_train:.4f} - {accuracy_test:.4f}\n")

    # 13. Creazione del grafico comparativo (opzionale per ogni ciclo)
    plt.figure(figsize=(12, 6))

    # Training data
    plt.subplot(1, 2, 1)
    plt.scatter(y_train, y_train_pred, color='blue', alpha=0.6, label='Training Data')
    plt.plot([min(y_train), max(y_train)], [min(y_train), max(y_train)], color='red', lw=2, label='Perfect Predictio
    plt.title(f'Training Set: Real vs Predicted (Colonna {jjj})')
    plt.xlabel('Real Values')
    plt.ylabel('Predicted Values')
    plt.legend()

    # Test data
    plt.subplot(1, 2, 2)
    plt.scatter(y_test, y_test_pred, color='green', alpha=0.6, label='Test Data')
    plt.plot([min(y_test), max(y_test)], [min(y_test), max(y_test)], color='red', lw=2, label='Perfect Prediction')
    plt.title(f'Test Set: Real vs Predicted (Colonna {jjj})')
    plt.xlabel('Real Values')
    plt.ylabel('Predicted Values')
    plt.legend()
```

Figura 242 - Sezione finale della seconda parte del codice.

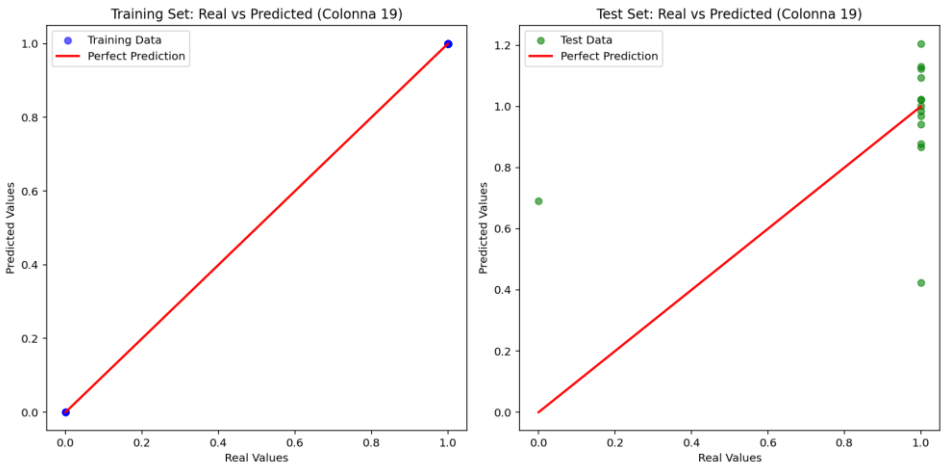


Figura 243 - Grafico dei valori reali e predetti sul dataset di addestramento (sinistra) e di test (destra). Esempio per l'output della colonna 19.

Appendice L – Rete neurale output scalari

Come nel caso degli output binari, si è scelto di generare due reti distinte, ciascuna addestrata per la predizione delle masse relative alle travi e ai pilastri da verificare. Rispetto al caso precedente, si è optato per il software romAI, lo strumento utilizzato e descritto nel paragrafo 6.2.2, particolarmente efficace per la predizione di valori scalari. Questo si distingue anche per la capacità di ottimizzare gli iper-parametri della rete, garantendo la selezione della configurazione ottimale in base al dataset di addestramento fornito.

Rete neurale M_1: massa delle travi

La prima rete è stata addestrata per la predizione della massa delle travi. Come nel caso degli output binari, sono stati forniti come input 12 colonne, ossia la traslazione in X, traslazione in Y, 3 colonne binarie (0-1) per identificare l'ID del materiale in Acciaio, 5 colonne binarie (0-1) per identificare l'ID della sezione HEB e 4 colonne binarie (0-1) per identificare l'ID della sezione UPN. L'output è costituito da una colonna denominata M_1.

La rete è stata ottimizzata utilizzando come spazio di progetto il numero degli strati, che potevano variare da 2 a 3, il numero di neuroni di ogni strato, che potevano variare da 20 a 100 e la funzione di attivazione da applicare a ciascun neurone, che poteva essere o ReLu o Tanh. Inoltre, si è assunto un passo di addestramento pari a 0.001 (valore di default) e 1000 epoche per il processo di training.

A valle dell'ottimizzazione, si è ottenuto che la migliore rete presenta 3 strati interni, 100 neuroni per ogni strato e la funzione di attivazione da applicare su ciascun neurone è Tanh.

In questo modo, si è ottenuto un $R^2 = 0.9958$ (Figura 244).

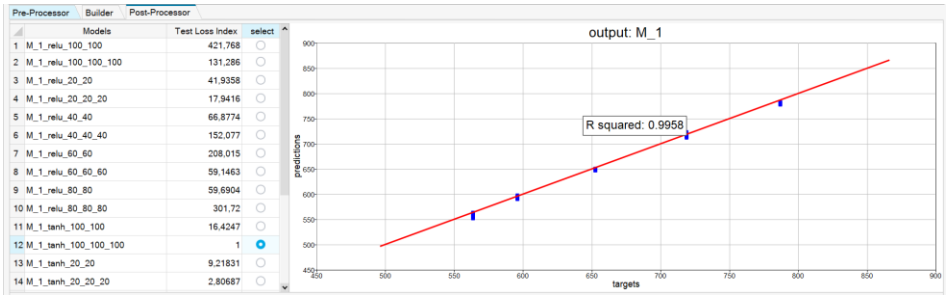


Figura 244 - Accuratezza della rete neurale M_1.

Rete neurale M_2: massa dei pilastri

La seconda rete è stata addestrata per la predizione della massa dei pilastri. Il processo di generazione della rete segue quello descritto per il caso M_1. L'ottimizzazione è stata eseguita considerando i medesimi parametri di progetto e range di oscillazioni, salvando la rete ogni 100 epoche: in questo modo, è possibile ottenere 10 fotografie diverse della rete, durante il processo di addestramento, che non sempre prevede l'epoca finale come la migliore in assoluto. A valle dell'ottimizzazione, si è riscontrato che gli iper-parametri della rete che forniscono la migliore predizione sono 3 strati interni, 80 neuroni per strato e la funzione di attivazione pari a tanh.

Viene considerato lo stato della rete all'epoca 1300, in quanto palesa il coefficiente $R^2 = 0.9652$ migliore (Figura 245).

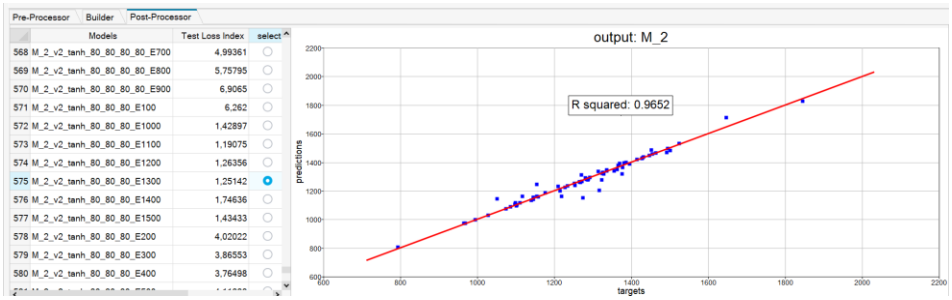


Figura 245 - Accuratezza della rete neurale M_2.

Appendice M – Codice Python

Di seguito viene descritto il codice Python utilizzato per predire i nuovi output binari relativi ai 172 elementi da verificare una volta fornita la nuova combinazione di variabili di progetto alle pre-addestrate reti neurali. I requisiti affinché questo codice sia replicabile sono:

- Installazione della libreria Tensorflow 2.10.0
- Installazione della libreria numpy
- Installazione della libreria joblib
- Installazione della libreria sklearn
- Installazione della libreria pandas

Il codice si compone di tre parti: nella prima, viene effettuato il caricamento del nuovo set di variabili di progetto da valutare: questi valori, tuttavia, non sono idonei ad essere forniti alle reti neurali (per come sono state costruite). Pertanto, è necessario effettuare una manipolazione dei dati affinchè gli ID del materiale Acciaio, della sezione HEB e UPN vengano convertiti mediante la tecnica *one-hot encoding* discussa precedentemente. Nella seconda parte, viene realizzato un ciclo for, che permette di automatizzare il processo di generazione delle predizioni. La reti e i valori di normalizzazione utilizzati durante l'addestramento vengono caricati, per normalizzare e processare i nuovi campioni da testare. Infine, nell'ultima parte gli output di ciascuna rete vengono salvati all'interno di una variabile in modo tale da ottenere un vettore di lunghezza 172. Il vettore viene salvato come nuovo *.csv*.

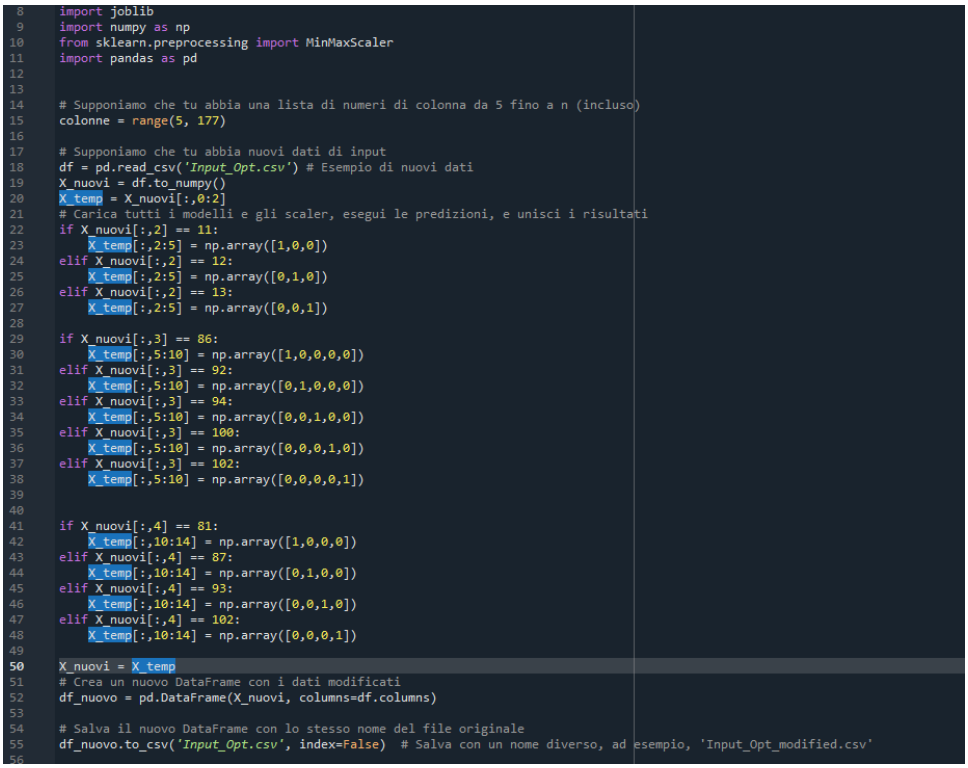
Parte 1

Nelle prime righe (da 8 a 11), vengono richiamate le librerie Python. A riga 18, viene importato il file *.csv* contente le 5 colonne (X, Y, Mat, Sez1 e Sez2). Infine, da riga 21 a 47, vengono aggiornati i valori di Mat, Sez1 e Sez2 (rispettivamente 3°, 4° e 5° colonna del vettore *X*) tramite la manipolazione *one-hot encoding* e assegnata la nuova variabile *X_temp*. Per cui (Figura 246):

- dalla 3° alle 5° colonna, avremo valori [0-1] in base all'ID del materiale in acciaio;

- dalla 6° alla 10° colonna, avremo valori [0-1] in base all'ID della sezione HEB;
- Dalla 11° alla 14° colonna, avremo valori [0-1] in base all'ID della sezione UPN.

Successivamente, viene assegnato il vettore *X_nuovi* uguale alla variabile *X_temp* (riga 50) ed esportato come nuovo *.csv* (riga 55).



```
8   import joblib
9   import numpy as np
10  from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
11  import pandas as pd
12
13
14  # Supponiamo che tu abbia una lista di numeri di colonna da 5 fino a n (incluso)
15  colonne = range(5, 177)
16
17  # Supponiamo che tu abbia nuovi dati di input
18  df = pd.read_csv('Input_Opt.csv') # Esempio di nuovi dati
19  X_nuovi = df.to_numpy()
20  X_temp = X_nuovi[:,0:2]
21  # Carica tutti i modelli e gli scaler, esegui le predizioni, e unisci i risultati
22  if X_nuovi[:,2] == 11:
23      X_temp[:,2:5] = np.array([1,0,0])
24  elif X_nuovi[:,2] == 12:
25      X_temp[:,2:5] = np.array([0,1,0])
26  elif X_nuovi[:,2] == 13:
27      X_temp[:,2:5] = np.array([0,0,1])
28
29  if X_nuovi[:,3] == 86:
30      X_temp[:,5:10] = np.array([1,0,0,0,0])
31  elif X_nuovi[:,3] == 92:
32      X_temp[:,5:10] = np.array([0,1,0,0,0])
33  elif X_nuovi[:,3] == 94:
34      X_temp[:,5:10] = np.array([0,0,1,0,0])
35  elif X_nuovi[:,3] == 100:
36      X_temp[:,5:10] = np.array([0,0,0,1,0])
37  elif X_nuovi[:,3] == 102:
38      X_temp[:,5:10] = np.array([0,0,0,0,1])
39
40
41  if X_nuovi[:,4] == 81:
42      X_temp[:,10:14] = np.array([1,0,0,0])
43  elif X_nuovi[:,4] == 87:
44      X_temp[:,10:14] = np.array([0,1,0,0])
45  elif X_nuovi[:,4] == 93:
46      X_temp[:,10:14] = np.array([0,0,1,0])
47  elif X_nuovi[:,4] == 102:
48      X_temp[:,10:14] = np.array([0,0,0,1])
49
50  X_nuovi = X_temp
51  # Crea un nuovo DataFrame con i dati modificati
52  df_nuovo = pd.DataFrame(X_nuovi, columns=df.columns)
53
54  # Salva il nuovo DataFrame con lo stesso nome del file originale
55  df_nuovo.to_csv('Input_Opt.csv', index=False)  # Salva con un nome diverso, ad esempio, 'Input_Opt_modified.csv'
56
```

Figura 246 - Schermata della prima parte del codice Python.

Parte 2

Nella seconda parte del codice (Figura 247), viene effettuato un ciclo *for* con la variabile *jj* che varia all'interno del range delle posizioni delle colonne dove risiedevano gli output binari nel dataset originale [5, 177]. Il processo automatizzato prevede:

- il caricamento della rete: viene scelta la rete neurale addestrata sull'output della colonna *jj* del dataset originale (riga 63);

- il caricamento dei parametri della normalizzazione: vengono caricati i parametri utilizzati nella fase di pre-processing dei dati di input, durante il processo di addestramento della colonna *jj* (riga 64);
- l'applicazione della trasformazione (normalizzazione) sul nuovo dataset (*X_nuovi*) sfruttando i parametri recuperati tramite 2) (riga 67);
- il calcolo della predizione sulla base del nuovo dataset (riga 70);
- il salvataggio della predizione concatenata alle precedenti nel vettore *predizioni_finali* (riga 73).

```
57  predizioni_finali = []
58
59  for jj in colonne:
60
61
62          # Carica il modello e lo scaler
63          model = joblib.load(f'C:/Desktop/NN/V3/output_{jj}.pkl')
64          scaler = joblib.load(f'C:/Desktop/NN/V3/scaler_{jj}.pkl')
65
66          # Scala i nuovi dati
67          X_nuovi_scaled = scaler.transform(X_nuovi)
68
69          # Fai la predizione
70          predizione = model.predict(X_nuovi_scaled)
71
72          # Aggiungi la predizione al vettore finale
73          predizioni_finali.append(predizione[0,0])
74
```

Figura 247 - Schermata della seconda parte del codice Python.

Parte 3

Nell'ultima parte del codice (Figura 248), viene generata la tabella usando i valori salvati nel vettore *predizioni_finali* trasposto, in modo tale da ottenere 172 colonne (riga 77). Infine, la tabella viene salvata come file *.csv.*

```
75  # Converti la lista delle predizioni in un dataframe pandas
76  # df_predizioni = pd.DataFrame([predizioni_finali], columns=[f'Predizione_{jj}' for jj in colonne])
77  df_predizioni = pd.DataFrame([predizioni_finali]).T
78
79  # Salva le predizioni in un file CSV
80  df_predizioni.to_csv('predizioni_finali.csv', index=False)
81
82  # Stampa il contenuto delle predizioni
83  # print(df_predizioni)
84
```

Figura 248 - Schermata della terza parte del codice Python.

Appendice N – Modello TwinActivate

Il modello TwinActivate fornisce la predizione dei nuovi output scalari (massa delle travi e pilastri) in base alla nuova combinazione di variabili di progetto. Come mostrato in *Figura 249*, sono presenti due modelli che, mediante l'uso di connessioni, ricevono i dati da 14 blocchi a valore costante. I valori sono assegnati mediante variabili che vengono fornite, a loro volta, da un codice *.oml* (*Figura 250*) che viene sottomesso prima della simulazione del modello TwinActivate. In questo codice viene:

- recuperato il percorso del modello TwinAcivate (riga 1);
- inizializzato il modello TwinActivate corrente (riga 2);
- letto dal file *Input_Opt_final.csv* il valore delle 14 variabili da assegnare ai blocchi del modello TwinActivate.

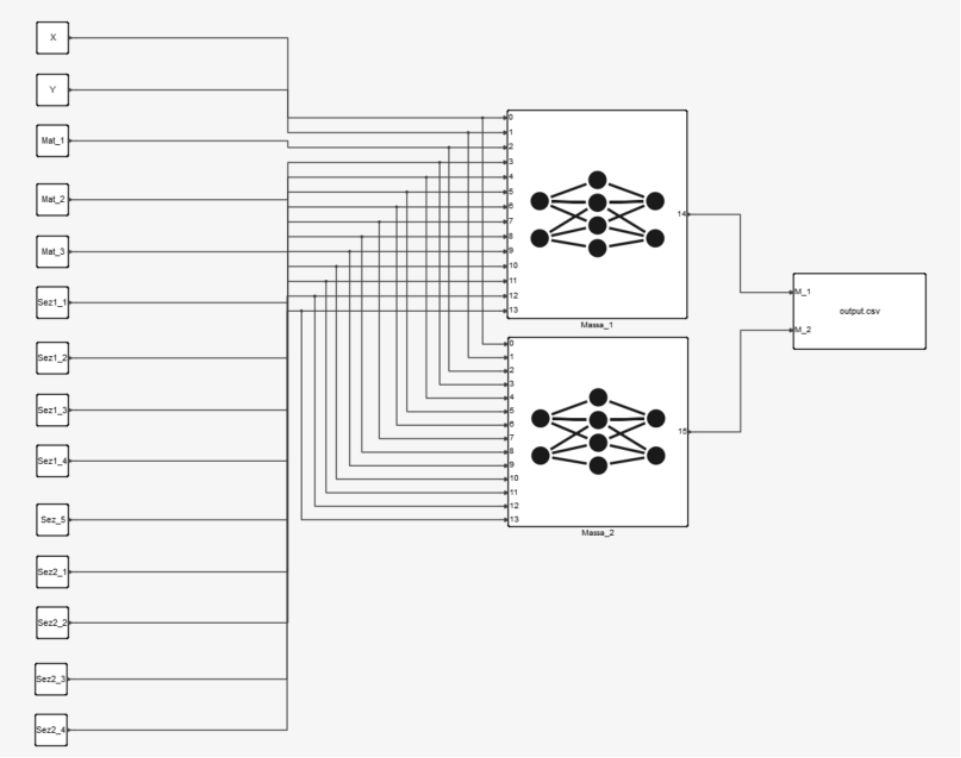


Figura 249 - Schermata del modello in TwinActivate.

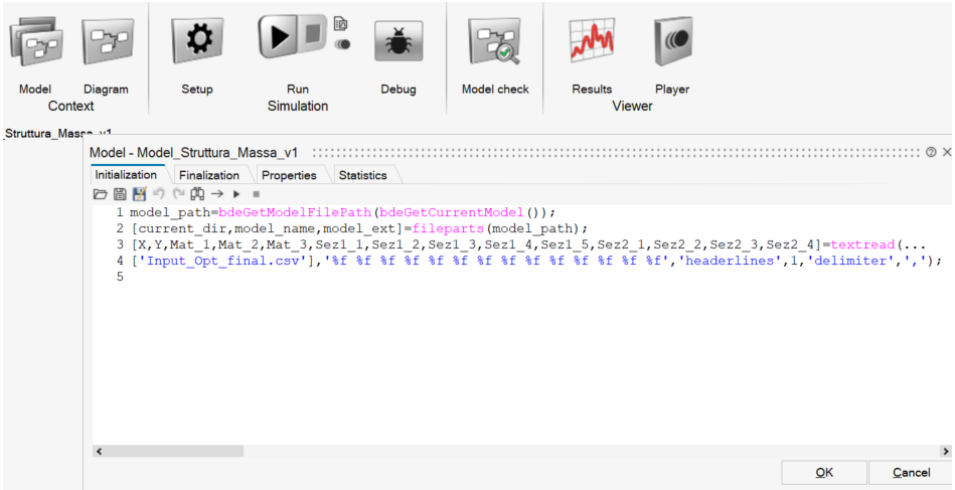


Figura 250 - Codice .oml.

Infine, l'output dei due modelli romAI viene salvato all'interno di un file *output.csv*.

BIBLIOGRAFIA

[1] Fondazione Giovanni Agnelli, *Rapporto sull'edilizia scolastica*, Editori Laterza. Editori Laterza, 2020.

[2] Commissione Europea, «Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo, al consiglio, al comitato economico e sociale europeo e al comitato delle regioni. Sviluppo scolastico ed eccellenza nell'insegnamento per iniziare la vita nel modo giusto.» 2017.

[3] Commissione Nazionale Italiana er l'UNESCO, «Il ruolo dell'educazione per il rilancio sociale ed economico italiano». giugno 2020.

[4] istituto Nazionale di Statistica, «Popolazione residente e dinamica demografica. Anno 2022». dicembre 2023.

[5] E. Granata, *Placemaker. Gli inventori dei luoghi che abiteremo*. Torino: Einaudi, 2021.

[6] Caterina Barioglio e Daniele Campobenedetto, «La scuola come modello. Due esperimenti di scuola-città a Torino, 1968-75», *FAMagazine. Ricerche e progetti sull'architettura e la città*, fasc. 56, p. 7, dic. 2021, doi: 10.12838/fam/issn2039-0491/n56-2021/693.

[7] Istituto nazionale di statistica, «I censimenti nell'Italia unita. Le fonti di stato della popolazione tre il XIX e il XXI secolo», presentato al I censimenti fra passato, presente e futuro, in XII, vol. 2. Roma: Istat, dic. 2010.

[8] N. D'Amico, *Storia e storie della scuola italiana. Dalle origini ai giorni nostri*. Bologna: Zanichelli, 2010.

[9] L. Cantatore, «La "casa della scuola" nei primi decenni di Roma capitale», *Historia y Memoria de la Educación*, pp. 113–147, 2021, doi: 10.5944/hme.13.2021.27131.

[10] *Gazzetta ufficiale del Regno d'Italia*, 282, Roma., 30 novembre 1888.

[11] S. Scarrocchia, A c. di, *Camillo Boito moderno*. Milano: Mimesis Edizioni, 2018.

[12] P. Vittanovich, «Le nuove scuole costruite in Padova alla Reggia Carrarese dall'architetto Camillo Boito», *Il Politecnico - il Giornale dell'Ingegnere e dell'architetto civile e industriale*, vol. XXXIII, feb. 1885.

[13] R. Fulvio, «Evoluzione e sviluppo dell'edilizia scolastica», *Annali dell'istruzione elementare. Rassegna bimestrale della direzione generale per l'istruzione elementare*, anno VI 1931.

[14] F. Dal Passo e A. Laurenti, *La scuola italiana: le riforme del sistema scolastico dal 1848 ad oggi*. in Diritto, no. 2. Aprilia: Novalogos, 2017.

[15] L. Cantatore, «La "casa della scuola" nei primi decenni di Roma Capitale», *HME*, fasc. 13, pp. 113–147, 2021, doi: 10.5944/hme.13.2021.27131.

[16] A. Scorcia, *Architettura pedagogica nel tempo: forma e anima dell'educazione*. in Temi & territori, no. 1. Martinsicuro (TE): Di Felice Edizioni, 2016.

[17] A. Guazzaroni, *Progetti di edifici scolastici*. Torino: C. Crudo & C., 1913.

[18] M. Montessori, *Il Metodo della Pedagogia Scientifica applicato all'educazione infantile nelle Case dei Bambini*, Edizioni OperaNazionale Montessori. Roma, 2000.

[19] G. Pizzigoni, *Linee fondamentali e programmi della scuola elementare rinnovata secondo il metodo sperimentale*. 1922.

[20] G. Arcamone, «Edilizia scolastica», *Annali dell'istruzione elementare*, fasc. 3, pp. 217–240, anno X 1935.

[21] R. Fulvio, «Edilizia scolastica in regime fascista», *Annali dell'istruzione elementare*, fasc. I, pp. 38–48, anno V 1930.

[22] F. Deambrosis e A. De Magistris, «Architetture di Formazione: Note sull'Edilizia Scolastica del Novecento», *Territorio*, fasc. 85, pp. 103–113, 2018, doi: 10.3280/TR2018-085013.

[23] G. Pagano, «L'asilo Infantile di Como», *Costruzioni-Casabella*, vol. XVIII, fasc. 150, giu. 1940.

[24] F. E. Leschiutta, *Linee evolutive dell'edilizia scolastica. Vicende – Norme – Tipi /1949- 1974*. Roma: Bulzoni Editore, 1975.

[25] C. Cicconcelli, «La scuola moderna è scuola all'aperto», *Rassegna Critica di Architettura*, fasc. 8, pp. 3–29, 1949.

[26] Ministero della Pubblica Istruzione, A c. di, «Scuole Elementari. Studi e schemi.», *Quaderni del Centro Studi per l'Edilizia Scolastica*, 1954.

[27] E. Giacopelli, «Scuola Elementare di Canton Vesco», *do.co.mo.mo. italia*, fasc. 29, 2011.

[28] C. Cicconcelli, «L'edilizia scolastica italiana prima del piano decennale», *Casabella Continuità*, fasc. 245, 1960.

[29] D. Campobenedetto, «L'aula in discussione. L'occasione mancata delle norme per l'edilizia scolastica del 1956», *ATTI E RASSEGNA TECNICA*, vol. LXXV–1, pp. 30–39, giu. 2021.

[30] F. De Vivo, *Linee di storia della scuola italiana*. Brescia: La Scuola, 1983.

[31] C. Cicconcelli, *La prefabbricazione dell'edilizia scolastica*. in numero monografico dei "Quaderni del Centro Studi per l'edilizia scolastica", no. 4–5. 1965.

[32] F. Deambrosis, «The great season of italian school architecture (1960-1980): reflections on a plural mosaic», in *Educational Architecture - Education, Heritage, Challenges. Conference Proceedings*, Lisbona: Instituto Superior Técnico - Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos, 2019.

[33] H. Ward, «Architecture of academic innovation: progressive pedagogy, modernist design, & Perkins & Will's heathcote elementary in post-war America», 2015.

[34] V. Vercelloni, «Due progetti per la fascia esterna dell'area metropolitana milanese», *Controspazio*, fasc. 2–3, ago. 1969.

[35] M. Salvetti, «Il COLLETTIVO DI ARCHITETTURA 1949-1973», 2010.

[36] P. Checchi, C. Marcetti, e P. Meringolo, A c. di, *La scuola e la città*. Polistampa, 2010.

[37] J. Dewey, *Scuola e società*. Firenze: La Nuova Italia, 2005.

[38] C. Edwards, L. Gandini, e G. Forman, *I cento linguaggi dei bambini. L'approccio di Reggio Emilia all'educazione dell'infanzia*. Bergamo: Edizioni Junior, 2010.

[39] G. Borri, A c. di, *Spazi educativi e architetture scolastiche: linee e indirizzi internazionali*. Firenze: Indire, 2016.

[40] D. Oblinger, *Learning spaces*. Educause, 2006.

[41] P. Nair, «The Classroom Is Obsolete: It's Time for Something New», 2011.

[42] C. Calderan, «Oltre l'aula, la dislocazione dell'apprendimento», *Turris Babel*, vol. 97, mar. 2015.

[43] Parque Escolar, EPE, «Parque Escolar 2007-2011. Intervenção em 106 escolas». 2011.

[44] OECD, *Innovative Learning Environments*. in Educational Research and Innovation. OECD, 2013. doi: 10.1787/9789264203488-en.

[45] P. Barrett, Y. Zhang, F. Davies, e L. Barrett, «Clever Classrooms. Summary report of the HEAD Project». 2015.

[46] European Commission. Joint Research Centre. Institute for Prospective Technological Studies., *Innovating learning: key elements for developing*

creative classrooms in Europe. LU: Publications Office, 2012. Consultato: 12 novembre 2024. [Online]. Disponibile su: https://data.europa.eu/doi/10.2791/90566

[47] D. Bannister, «Guidelines on Exploring and Adapting Learning Spaces in Schools». European Schoolnet, 2017.

[48] J. Attewell, «Building learning labs and innovative learning spaces. Practical guidelines for school learning and teachers». European Schoolnet, 2019.

[49] E. Mosa e L. Tosi, «Quando lo spazio insegna». 2015.

[50] A. Rigolon, «European Design Types for 21st Century Schools: An Overview», vol. 2010/03. in CELE Exchange, Centre for Effective Learning Environments, vol. 2010/03. OECD Publishing, 2010. doi: 10.1787/5kmh36gpvmbx-en.

[51] D. D. Thornburg, «Primordial Metaphors for Learning in the 21st Century», *International Journal of Instructional Technology and Distance Learning*, vol. 1, 2004.

[52] G. Michelucci, *La scuola e la città. Appunti di un architetto, in Prospettive storiche e problemi attuali dell'educazione. Studi in onore di Ernesto Codignola*. Firenze: La Nuova Italia, 1960.

[53] G. Michelucci, «Lo spazio e il luogo dove l'uomo costruisce la sua storia», in *Problemi della citta. Atti del convegno di Bologna*, Padova, 1967, pp. 95–105.

[54] F. Lorenzoni, «Cari architetti rifateci le scuole!», *Il Sole 24 Ore*, 16 marzo 2014.

[55] R. Piano, «Ecco la scuola che farei», *Il Sole 24 Ore*, 11 ottobre 2015.

[56] E. Dorato, A c. di, *Architettura dell'educazione*. Santangelo di Romagna: Maggioli Editore, 2021.

[57] Mario Cucinella Architects, «Spazio all'educazione: linee guida per le scuole della regione Emilia-Romagna», Mario Cucinella Architects, versione 01, lug. 2021.

[58] *D.P.P. 23 febbraio 2009, n. 10. Regolamento di cui all'articolo 10 della legge provinciale 21 luglio 1977, n. 21: «Direttive per l'edilizia scolastica»*, 15, 2009.

[59] B. Weyland, U. Stadler-Altmann, A. Galletti, e K. Prey, *Scuole in movimento. Progettare insieme tra pedagogia, architettura e design*. FrancoAngeli s.r.l., 2019.

[60] «Scuole», *turrisbabel*, vol. 56, nov. 2002.

[61] «Costruire Pedagogie», *Turris Babel*, vol. 93, 2013.

[62] «Ritorno a scuola», *Turris Babel*, vol. 119, 2020.

[63] *Decreto Ministeriale n.860 del 3 novembre 2015*, Decreto Ministeriale 860, 3 novembre 2015.

[64] «FUTURA. Progettare, costruire e abitare la scuola». 2022.

[65] T. Giovanazzi, «RiGenerazione Scuola: Un Piano per orientare l'educazione alla transizione ecologica», *Formazione & insegnamento*, vol. 20, fasc. 1 Tome I, pp. 127–135, apr. 2022, doi: 10.7346/-fei-XX-01-22_12.

[66] G. Biodi, S. Borri, e L. Tosi, *Dall'aula all'ambiente di apprendimento*. Indire, 2016.

[67] S. Borri, A c. di, *The Classroom has Broken. Changing School Architecture in Europe and Across the World*. Firenze: Indire, 2018.

[68] L. Tosi, A c. di, *Fare didattica in spazi flessibili*. Firenze: Giunti Scuola, 2019.

[69] G. Moscato e L. Tosi, *Architetture educative*. Altralinea Edizioni, 2022.

[70] R. Carro e L. Tosi, *Lo spazio della scuola. Architetture scolastiche e cicli pedagogici*. in Ricerche Indire. Carocci, 2023.

[71] L. Tosi e E. Mosa, «Edilizia scolastica e spazi di apprendimento: linee di tendenza e scenari». Fondazione Agnelli, 2019.

[72] R. Romano, C. Balocco, e S. Barbi, *Ri-Progettare l'architettura scolastica. Nuovi spazi educativi tra tecnologia, energia ed ambiente*. in Ricerche | architettura, design, territorio. Dipartimento di Architettura Università degli Studi di Firenze, 2022.

[73] V. Dessì e A. I. Piazza, *La scuola è in cortile. Strategie e buoni esempi per valorizzare il cortile scolastico*. UNA, Urban NarrAction, 2020.

[74] M. R. Gisotti e B. Masiani, «La scuola fa città. Il ruolo degli spazi aperti scolastici e di quartiere nelle pratiche di educazione alla democrazia», *IN_BO. Ricerche e progetti per il territorio*, vol. la città e l'architettura, pp. 198-217 Paginazione, 2023, doi: 10.6092/ISSN.2036-1602/14836.

[75] «Learning places/ Places to learn. Designing spaces for a mindful citizenship», *Contesti. Città territori progetti*, vol. 1, 2022.

[76] P. Crepet, «Pensare al futuro iniziando dalla scuola», in *Oltre la tempesta. Come torneremo a stare insieme*, Milano: Mondadori, 2021, pp. 98–180.

[77] Future Urban Legacy Lab e Fondazione Agnelli, «Fare spazio. Idee progettuali per riaprire le scuole in sicurezza». 2020.

[78] Future Urban Legacy Lab, *Re-school. Ripensare la scuola, a partire dagli spazi*. in Collezione Quaderni Future Urban Legacy Lab, no. 6. 2021.

[79] Legambiente, «Ecosistema scuola. XXII Rapporto nazionale sulla qualità degli edifici e dei servizi scolastici». 2023.

[80] Ministero dell'Istruzione, «Istruzioni per la compilazione della Scheda di rilevazione del patrimonio di edilizia scolastica», mar. 2021.

[81] N. Augenti, E. Cosenza, M. Dolce, G. Manfredi, A. Masi, e L. Samela, «Performance of School Buildings during the 2002 Molise, Italy, Earthquake», *Earthquake Spectra*, vol. 20, lug. 2004, doi: 10.1193/1.1769374.

[82] M. Dolce, «Seismic safety of schools in Italy», *Keeping schools safe in earthquakes*, 2004.

[83] Cittadinanza attiva, «XXI Rapporto Osservatorio civico sulla sicurezza a scuola». 2023.

[84] United Nations Environment Programme, «2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector», 2022.

[85] European Commission, «Communication from the Commission to the European Paliament, the European Council, the Council, the European economic and social Committee and the Committee of regions». 11 dicembre 2019.

[86] H. Amini Toosi, M. Lavagna, F. Leonforte, C. Del Pero, e N. Aste, «Life Cycle Sustainability Assessment in Building Energy Retrofitting; A Review», *Sustainable Cities and Society*, vol. 60, p. 102248, set. 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102248.

[87] Servizio studi - Camera dei deputati, «Le politiche di rigenerazione urbana. Prospettive e possibili impatti». giugno 2022.

[88] Legambiente, «Ecosistema scuola. XXIII Rapporto nazionale sulla qualità degli edifici e dei servizi scolastici». 2024.

[89] A. Belleri e A. Marini, «Does seismic risk affect the environmental impact of existing buildings?», *Energy and Buildings*, vol. 110, pp. 149–158, gen. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.10.048.

[90] N. Ademovic, A. Formisano, L. Penazzato, e D. V. Oliveira, «Seismic and energy integrated retrofit of buildings: A critical review», *Front. Built Environ.*, vol. 8, p. 963337, nov. 2022, doi: 10.3389/fbuil.2022.963337.

[91] A. Marini *et al.*, «Combining seismic retrofit with energy refurbishment for the sustainable renovation of RC buildings: a proof of concept», *European Journal of Environmental and Civil engineering*, pp. 2475–2495, 2017.

[92] T. D. Mora, «Functional, Energy and Seismic Retrofitting in Existing Building: An Innovative System Based on xlam Technology», *Energy Procedia*, 2015.

[93] G. Margani, G. Evola, C. Tardo, e E. M. Marino, «Energy, Seismic, and Architectural Renovation of RC Framed Buildings with Prefabricated Timber Panels», *Sustainability*, vol. 12, fasc. 12, p. 4845, giu. 2020, doi: 10.3390/su12124845.

[94] P. D. Gkournelos, T. C. Triantafillou, e D. A. Bournas, «Integrated structural and energy retrofitting ofmasonry walls: Effect of in-plane damage on the out-of-plane response», *Journal of Composites for Construction*, vol. 24, 2020.

[95] R. Illampas, I. Rigopoulos, e I. Ioannou, «Influence of microencapsulated Phase Change Materials (PCMs) on the properties of polymer modified cementitious repair mortar», *Journal of Building Engineering*, vol. 40, 2021.

[96] A. Wenzel, S. Vera, e P. Guindos, «Integration of energy and seismic-structural design variables through the optimization of a multi-story residential light-frame timber building with different seismic lateral connectors and building stories», *Journal of Building Engineering*, vol. 57, p. 104831, ott. 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2022.104831.

[97] D. A. Pohoryles, D. A. Bournas, F. Da Porto, A. Caprino, G. Santarsiero, e T. Triantafillou, «Integrated seismic and energy retrofitting of existing buildings: A state-of-the-art review», *Journal of Building Engineering*, vol. 61, p. 105274, dic. 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2022.105274.

[98] C. Menna, C. Del Vecchio, M. Di Ludovico, G. M. Mauro, F. Ascione, e A. Prota, «Conceptual design of integrated seismic and energy retrofit interventions», *Journal of Building Engineering*, vol. 38, p. 102190, giu. 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102190.

[99] D. D'Agostino, D. Faiella, E. Febbraro, E. Mele, F. Minichiello, e J. Trimarco, «Steel exoskeletons for integrated seismic/energy retrofit of existing buildings - General framework and case study», *Journal of*

Building Engineering, vol. 83, p. 108413, apr. 2024, doi: 10.1016/j.jobe.2023.108413.

[100] M. Franceschini, P. Semproli, A. Secci, M. Mundadori, B. Melli, e B. Bianconcini, «I Segni della ricostruzione post terremoto maggio 2012: l'adeguamento sismico della palazzinauffici nello stabilimento Magneti Marelli di Crevalcore».

[101] J. M. Benyus, *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. Harper Perennial, 2002.

[102] G. Di Lorenzo, E. Colacurcio, A. D. Filippo, A. Formisano, A. Massimilla, e R. Landolfo, «Steel exoskeletons for seismic retrofitting of existing reinforced concrete buildings : State-of-the art and a case study».

[103] R. Landolfo, A. Formisano, G. Di Lorenzo, E. Colacurcio, e A. Di FIlippo, «Esoscheletri in acciaio per il retrofit strutturale di edifici esistenti in c.a.: Parte III - Metodologia progettuale ed applicazione ad un edificio esistente». ingenio, 2021.

[104] A. Marini *et al.*, «Coupling energy refurbishment with structural strengthening in retrofit interventions», presentato al SAFESUST Workshop, Ispra, nov. 2015.

[105] B. Angi, *Eutopia urbana: la riqualificazione integrata dell'edilizia sociale*. LetteraVentidue, 2016.

[106] A. Caverzan, M. Lamperti Tornaghi, e P. Negro, «Taxonomy of the redevelopment methods for non-listed architecture: from façade refurbishment to the exoskeleton system», in *Conference and workshop Reports, Proceedings of Safesust Workshop*, Ispra, 2016.

[107] O. Bellini, A. Marini, e C. Passoni, «Adaptive exoskeleton systems for the resilience of the built environment», *TECHNE - Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 15, pp. 71–80, 2018.

[108] A. Ferrante *et al.*, «A European Project for Safer and Energy Efficient Buildings: Pro-GET-onE (Proactive Synergy of inteGrated Efficient Technologies on Buildings' Envelopes)», *Sustainability*, vol. 10, fasc. 3, p. 812, mar. 2018, doi: 10.3390/su10030812.

[109] A. Fotopoulou *et al.*, «An integrated system for façade additions combining safe, energy efficient and user-oriented solutions», *TEMA: Technologies Engineering Materials Architecture*, vol. 5, 2019.

[110] F. Rizzo, G. Di Lorenzo, A. Formisano, e R. Landolfo, «Time-Dependent Corrosion Wastage Model for Wrought Iron Structures», *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 31, 2019.

[111] J. Giesing e J.-F. Barthelemy, «A summary of industry MDO applications and needs», in *7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, St. Louis,MO,U.S.A.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, set. 1998. doi: 10.2514/6.1998-4737.

[112] H. Chen, «Multidisciplinary Design Optimization (MDO)», in *Encyclopedia of Ocean Engineering*, W. Cui, S. Fu, e Z. Hu, A c. di, Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 1–7. doi: 10.1007/978-981-10-6963-5_65-1.

[113] J. R. R. A. Martins e A. B. Lambe, «Multidisciplinary Design Optimization: A Survey of Architectures», *AIAA Journal*, vol. 51, fasc. 9, pp. 2049–2075, set. 2013, doi: 10.2514/1.J051895.

[114] S.- Sobieski, «Multidisciplinary aerospace design optimization: survey of recent developments».

[115] J. Sobieszczanski-Sobieski, «A linear decomposition method for large optimization problems». NASA Langley Research Center, 1982.

[116] J. Agte, O. De Weck, J. Sobieszczanski-Sobieski, P. Arendsen, A. Morris, e M. Spieck, «MDO: assessment and direction for advancement—an opinion of one international group», *Struct Multidisc Optim*, vol. 40, fasc. 1–6, pp. 17–33, gen. 2010, doi: 10.1007/s00158-009-0381-5.

[117] J. Sobieszczanski-Sobieski, «Multidisciplinary design optimization: an emerging new engineering discipline». NASA Langley Research Center, maggio 1993.

[118] F. Flager e J. Haymaker, «A comparison of multidisciplinary design, analysis and optimization processes in the building construction and aerospace industries», 2007.

[119] P. Geyer e K. Rueckert, «Conceptions for MDO in Structural Design of Buildings».

[120] R. R. Salagame, P. Ramu, I. Narayanaswamy, e D. K. Saxena, A c. di, *Advances in Multidisciplinary Analysis and Optimization: Proceedings of the 2nd National Conference on Multidisciplinary Analysis and Optimization*. in Lecture Notes in Mechanical Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2020. doi: 10.1007/978-981-15-5432-2.

[121] A.-B. Ryberg, R. D. Bäckryd, e L. Nilsson, «Metamodel-Based Multidisciplinary Design Optimization for Automotive Applications», 2012.

[122] P. D. Ciampa e B. Nagel, «AGILE Paradigm: The next generation collaborative MDO for the development of aeronautical systems»,

Progress in Aerospace Sciences, vol. 119, p. 100643, nov. 2020, doi: 10.1016/j.paerosci.2020.100643.

[123] D. J. Gerber e S.-H. E. Lin, «Designing in complexity: Simulation, integration, and multidisciplinary design optimization for architecture», *SIMULATION*, vol. 90, fasc. 8, pp. 936–959, ago. 2014, doi: 10.1177/0037549713482027.

[124] A. Papageorgiou e J. Ölvander, «The role of multidisciplinary design optiization (MDO) in the development process of complex engineering products», in *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design*, Vancouver, Canada, 2017.

[125] N. K. Muthumanickam, N. Brown, J. P. Duarte, e T. W. Simpson, «Multidisciplinary design optimization in Architecture, Engineering, and Construction: a detailed review and call for collaboration», *Struct Multidisc Optim*, vol. 66, fasc. 11, p. 239, nov. 2023, doi: 10.1007/s00158-023-03673-y.

[126] B. Welle e J. Haymaker, «A Knowledge-Based Approach to Problem Formulation for Product Model-Based Multidisciplinary Design Optimization in AEC», 2011.

[127] F. L. Flager, B. Welle, e J. Haymaker, «Multidisciplinary Process Integration and Design Optimization of a Classroom Building», *Electronic Journal of Information Technology in Construction*, pp. 595–612, 2009.

[128] B. Welle, J. Haymaker, e Z. Rogers, «ThermalOpt: A methodology for automated BIM-based multidisciplinary thermal simulation for use in optimization environments», *Build. Simul.*, vol. 4, fasc. 4, pp. 293–313, dic. 2011, doi: 10.1007/s12273-011-0052-5.

[129] H. Díaz, L. F. Alarcón, C. Mourgues, e S. García, «Multidisciplinary Design Optimization through process integration in the AEC industry: Strategies and challenges», *Automation in Construction*, vol. 73, pp. 102–119, gen. 2017, doi: 10.1016/j.autcon.2016.09.007.

[130] A. Benaouali e S. Kachel, «Multidisciplinary design optimization of aircraft wing using commercial software integration», *Aerospace Science and Technology*, vol. 92, pp. 766–776, set. 2019, doi: 10.1016/j.ast.2019.06.040.

[131] A. Nikkhoo, G. Taghinia, e A. Esmaeili, «Multidisciplinary design optimization of GIS UAV», 2022.

[132] P. Zakian e A. Kaveh, «Multi-objective Seismic Design Optimization of Structures: A Review», *Arch Computat Methods Eng*, vol. 31, fasc. 2, pp. 579–594, mar. 2024, doi: 10.1007/s11831-023-09992-z.

[133] M. Manni e A. Nicolini, «Multi-Objective Optimization Models to Design a Responsive Built Environment: A Synthetic Review», *Energies*, vol. 15, fasc. 2, p. 486, gen. 2022, doi: 10.3390/en15020486.

[134] M. Hakimazari *et al.*, «Multi-objective optimization of daylight illuminance indicators and energy usage intensity for office space in Tehran by genetic algorithm», *Energy Reports*, vol. 11, pp. 3283–3306, giu. 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2024.03.011.

[135] P. Geyer, «Multidisciplinary grammars supporting design optimization of buildings», *Res Eng Design*, vol. 18, fasc. 4, pp. 197–216, gen. 2008, doi: 10.1007/s00163-007-0038-6.

[136] P. Geyer, «Component-oriented decomposition for multidisciplinary design optimization in building design», *Advanced Engineering Informatics*, vol. 23, fasc. 1, pp. 12–31, gen. 2009, doi: 10.1016/j.aei.2008.06.008.

[137] F. Flager, A. Adya, e J. Haymaker, «AEC Multidisciplinary Design Optimization Impact of High Performance Computing». 2009.

[138] D. Yang, Y. Sun, e M. Turrin, «Multi-objective and multidisciplinary design optimization of large sports building envelopes: a case study.», 2015.

[139] J. M. Broyles *et al.*, «Shape optimization of a concrete floor systems for sustainability, acoustical, and thermal objectives», in *Structures and Architecture A Viable Urban Perspective?*, 1ª ed., London: CRC Press, 2022, pp. 1121–1128. doi: 10.1201/9781003023555-134.

[140] L. H. Tien e N. V. Tung, «Multidisciplinary design optimization for sustainable design using building information modeling», *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 1109, fasc. 1, p. 012013, mar. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1109/1/012013.

[141] Zaha Hadid Architects, «Achieving Architectural Expression to Complement the Iconic Neue Nationalgalerie Using HyperWorks». 2018.

[142] I. Hens, R. Solnosky, e N. C. Brown, «Design space exploration for comparing embodied carbon in tall timber structural systems», *Energy and Buildings*, vol. 244, p. 110983, ago. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110983.

[143] J. F. de Gaaij, «Multidisciplinary Design Optimization of Timber High-Rise».

[144] Altair Engineering, «No more Gone with the Wind Pedestrian Comfort Improvements on Quinta Torre with AcuSolve Computational Fluid Dynamics».

[145] N. K. Muthumanickam, J. P. Duarte, e T. W. Simpson, «Multidisciplinary concurrent optimization framework for multi-phase building design process», *AIEDAM*, vol. 37, p. e3, 2023, doi: 10.1017/S0890060422000191.

[146] N. K. Muthumanickam, «Multidisciplinary design optimization framework for multi-phase building design process. Technology demonstration using design of office building and robotically 3D printed habitat», Tesi di dottorato, The Pennsylvania State University, 2021.

[147] Leonardo Helicopters, C. Punzi, E. Giovanardi, F. D'Amico, A. Mancini, e M. Crooks, «A Multidisciplinary Mid-fidelity Approach for Tiltrotor Wing Aeroelastic Design Based on structural Mesh Morphing», in *Proceedings of the Vertical Flight Society 80th Annual Forum*, Montreal, Canada: The Vertical Flight Society, mag. 2024, pp. 1–17. doi: 10.4050/F-0080-2024-1149.

[148] A. Bertram, C. Othmer, e R. Zimmermann, «Towards Real-time Vehicle Aerodynamic Design via Multi-fidelity Data-driven Reduced Order Modeling», in *2018 AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Kissimmee, Florida: American Institute of Aeronautics and Astronautics, gen. 2018. doi: 10.2514/6.2018-0916.

[149] T. W. Simpson, J. Peplinski, P. N. Koch, e J. K. Allen, «Metamodels for computer-based engineering design: survey and recommendations». 2001.

[150] M. Giselle Fernández-Godino e Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California 94550, USA, «Review of multi-fidelity models», *ACSE*, vol. 1, fasc. 4, pp. 351–400, 2023, doi: 10.3934/acse.2023015.

[151] J. P. S. Chhabra e G. P. Warn, «Investigating the Use of Reinforcement Learning for Multi-Fidelity Model Selection in the Context of Design Decision Making», in *Volume 2B: 44th Design Automation Conference*, Quebec City, Quebec, Canada: American Society of Mechanical Engineers, ago. 2018, p. V02BT03A042. doi: 10.1115/DETC2018-85483.

[152] N. M. Alexandrov, R. M. Lewis, C. R. Gumbert, L. L. Green, e P. A. Newman, «Approximation and Model Management in Aerodynamic Optimization with Variable-Fidelity Models», *Journal of Aircraft*, vol. 38, fasc. 6, pp. 1093–1101, nov. 2001, doi: 10.2514/2.2877.

[153] T. Wortmann, «Efficient, Visual, and Interactive Architectural Design Optimization with Model-based Methods», 2018, doi: 10.13140/RG.2.2.15380.55685.

[154] M. Unal, S. W. Miller, J. P. S. Chhabra, G. P. Warn, M. A. Yukish, e T. W. Simpson, «A sequential decision process for the system-level design of structural frames», *Struct Multidisc Optim*, vol. 56, fasc. 5, pp. 991–1011, nov. 2017, doi: 10.1007/s00158-017-1697-1.

[155] E. Tresidder, Y. Zhang, e A. I. J. Forrester, «Acceleration of building design optimisation through the use of kriging surrogate models».

[156] N. Muthumanickam *et al.*, «Investigation of Energy Modelling Methods of Multiple Fidelities: A Case Study», in *Healthy, Intelligent and Resilient Buildings and Urban Environments*, International Association of Building Physics (IABP), 2018, pp. 983–988. doi: 10.14305/ibpc.2018.ms-1.03.

[157] T. Wortmann, A. Costa, G. Nannicini, e T. Schroepfer, «Advantages of surrogate models for architectural design optimization», *AIEDAM*, vol. 29, fasc. 4, pp. 471–481, nov. 2015, doi: 10.1017/S0890060415000451.

[158] N. K. Muthumanickam e J. Duarte, «Machine learning based surrogate model for faster daylighting estimation in building design», presentato al 6th Residential Building Design and Construction Conference, 2022.

[159] M. Ayoub, «A review on machine learning algorithms to predict daylighting inside buildings», *Solar Energy*, vol. 202, pp. 249–275, mag. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.03.104.

[160] T. Zhao, Y. Zheng, J. Gong, e Z. Wu, «Machine learning-based reduced-order modeling and predictive control of nonlinear processes», *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 179, pp. 435–451, mar. 2022, doi: 10.1016/j.cherd.2022.02.005.

[161] B. S. Blanchard e W. J. Fabrycky, *Systems engineering and analysis*, Second Edition. New Jersey: Prentice-Hall, 1990.

[162] D. Xue e Y. Chen, *System Simulation Techniques with MATLAB and Simulink*, 1ª ed. Wiley, 2013.

[163] P. Fritzson, *Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 3.3. A Cyber-Physical Approach*, 2ª ed. Wiley-IEEE Press, 2015.

[164] S. E. Mattsson e H. Elmqvist, «Modelica - An International Effort to Design the Next Generation Modeling Language», *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 30, fasc. 4, pp. 151–155, apr. 1997, doi: 10.1016/S1474-6670(17)43628-7.

[165] P. Fritzson, *Introduction to Modeling and Simulation of Technical and Physical Systems with Modelica*, 1ª ed. Wiley-IEEE Press, 2011.

[166] H. Elmqvist *et al.*, «Modelica - A Unified Object-Oriented Language for Physical Systems Modeling. Version 1», 1997.

[167] Modelica Association, «Modelica - A Unified Object-Oriented Language for Systems Modeling. Language Specification Version 3.6». 9 marzo 2023.

[168] L. Maier *et al.*, «AixLib: an open-source Modelica library for compound building energy systems from component to district level with automated quality management», *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 17, fasc. 2, pp. 196–219, mar. 2024, doi: 10.1080/19401493.2023.2250521.

[169] G. Plessis, A. Kaemmerlen, e A. Lindsay, «BuildSysPro: a Modelica library for modelling buildings and energy systems», presentato al the 10th International Modelica Conference, March 10-12, 2014, Lund, Sweden, mar. 2014, pp. 1161–1169. doi: 10.3384/ecp140961161.

[170] F. Jorissen, G. Reynders, R. Baetens, D. Picard, D. Saelens, e L. Helsen, «Implementation and verification of the IDEAS building energy simulation library», *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 11, fasc. 6, pp. 669–688, nov. 2018, doi: 10.1080/19401493.2018.1428361.

[171] F. Felgner, S. Agustina, R. Cladera Bohigas, R. Merz, e L. Litz, «Simulation of Thermal Building Behaviour in Modelica», presentato al 2nd International Modelica Conference, Oberpfaffenhofen, Germania, 2002.

[172] M. Wetter, «Modelica-based modelling and simulation to support research and development in building energy and control systems», *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 2, fasc. 2, pp. 143–161, giu. 2009, doi: 10.1080/19401490902818259.

[173] Z. Wang, T. Hong, e R. Jia, «Buildings.Occupants: a Modelica package for modelling occupant behaviour in buildings», *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 12, fasc. 4, pp. 433–444, lug. 2019, doi: 10.1080/19401493.2018.1543352.

[174] Q. Altes-Buch, S. Quoilin, e V. Lemort, «Greenhouses: A Modelica Library for the Simulation of Greenhouse Climate and Energy Systems», presentato al The 13th International Modelica Conference, Regensburg, Germany, March 4–6, 2019, feb. 2019, pp. 533–542. doi: 10.3384/ecp19157533.

[175] A. Gautier, M. Wetter, J. Hu, e H. Tummescheit, «HVAC and Control Templates for the Modelica Buildings Library», presentato al 15th International Modelica Conference 2023, Aachen, October 9-11, dic. 2023, pp. 217–228. doi: 10.3384/ecp204217.

[176] X. Lu, Y. Fu, e Z. O'Neill, «Benchmarking high performance HVAC Rule-Based controls with advanced intelligent Controllers: A case study in a

Multi-Zone system in Modelica», *Energy and Buildings*, vol. 284, p. 112854, apr. 2023, doi: 10.1016/j.enbuild.2023.112854.

[177] I. Cvok, I. Ratković, e J. Deur, «Multi-Objective Optimisation-Based Design of an Electric Vehicle Cabin Heating Control System for Improved Thermal Comfort and Driving Range», *Energies*, vol. 14, fasc. 4, p. 1203, feb. 2021, doi: 10.3390/en14041203.

[178] S. Ahn, W. Song, e S. Min, «Multiobjective Optimization of a Traction Motor in Driving Cycles Using a Coupled Electromagnetic–Thermal 1D Simulation», *International Journal of Energy Research*, vol. 2023, pp. 1–20, nov. 2023, doi: 10.1155/2023/8854778.

[179] O. Lindqvist, R. Hällqvist, e R. C. Munjulury, «Modelica Association Standards and Surrogate Modeling to Enable Multi-Fidelity Simulations», presentato al 15th International Modelica Conference 2023, Aachen, October 9-11, dic. 2023, pp. 73–84. doi: 10.3384/ecp20473.

[180] S. Singh e H. Abbassi, «1D/3D transient HVAC thermal modeling of an off-highway machinery cabin using CFD-ANN hybrid method», *Applied Thermal Engineering*, vol. 135, pp. 406–417, mag. 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.02.054.

[181] P. Lu, Q. Gao, e Y. Wang, «The simulation methods based on 1D/3D collaborative computing for the vehicle integrated thermal management», *Applied Thermal Engineering*, vol. 104, pp. 42–53, lug. 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.05.047.

[182] M. Stellato, L. Bergianti, e A. Picarelli, «Race Car Cooling System Model for Real Time use in a Driving Simulator», presentato al 15th International Modelica Conference 2023, Aachen, October 9-11, dic. 2023, pp. 675–682. doi: 10.3384/ecp204675.

[183] M. Ljubijankic, C. Nytsch-Geusen, A. Jänicke, e M. Schmidt, «Advanced analysis of coupled 1D/3D simulation models by the use of a solar thermal system», presentato al 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, nov. 2011.

[184] W. Zuo, M. Wetter, W. Tian, D. Li, M. Jin, e Q. Chen, «Coupling indoor airflow, HVAC, control and building envelope heat transfer in the Modelica Buildings library», *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 9, fasc. 4, pp. 366–381, lug. 2016, doi: 10.1080/19401493.2015.1062557.

[185] S. Huang e D. Wu, «Validation on aggregate flexibility from residential air conditioning systems for building-to-grid integration», *Energy and*

Buildings, vol. 200, pp. 58–67, ott. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.07.043.

[186] K. Qiu, J. Yang, Z. Gao, e F. Xu, «A review of Modelica language in building and energy: Development, applications, and future prospect», *Energy and Buildings*, vol. 308, p. 113998, apr. 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.113998.

[187] L. Vanfretti, C. R. Laughman, e A. Chakrabarty, «Integrating Generative Machine Learning Models and Physics-Based Models for Building Energy Simulation», in *Proceedings of the American Modelica Conference 2024*, 2024.

[188] N. Novelli, J. Shultz, e A. Dyson, «Development of a Modeling Strategy for Adaptive Multifunctional Solar Energy Building Envelope Systems».

[189] L. Danza *et al.*, «A Simplified Thermal Model to Control the Energy Fluxes and to Improve the Performance of Buildings», *Energy Procedia*, vol. 101, pp. 97–104, nov. 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.11.013.

[190] A. Tallet, E. Liberge, e C. Inard, «Fast POD method to evaluate infiltration heat recovery in building walls», *Build. Simul.*, vol. 10, fasc. 1, pp. 111–121, feb. 2017, doi: 10.1007/s12273-016-0306-3.

[191] P. Groesdonk, D. Jansen, J. E. Schmiedt, e B. Hoffschmidt, «Integration of Heat Flow through Borders between Adjacent Zones in AixLib's Reduced-Order Model», presentato al 15th International Modelica Conference 2023, Aachen, October 9-11, dic. 2023, pp. 577–588. doi: 10.3384/ecp204577.

[192] J. Guo, J. Liu, D. Tu, J. Zhang, J. Xu, e P. Xue, «Multizone modeling of pressure difference control analyses for an infectious disease hospital», *Building and Environment*, vol. 206, p. 108341, dic. 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108341.

[193] C. A. Faulkner, J. E. Castellini, W. Zuo, D. M. Lorenzetti, e M. D. Sohn, «Investigation of HVAC operation strategies for office buildings during COVID-19 pandemic», *Building and Environment*, vol. 207, p. 108519, gen. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108519.

[194] S. Wullens, M. Pons, E. Wurtz, e Y. Fraigneau, «Natural Ventilation In A Room, Transition From Natural To Adverse Forced Convection», presentato al 2017 Building Simulation Conference, ago. 2013. doi: 10.26868/25222708.2013.2435.

[195] L. Stephan, A. Bastide, E. Wurtz, e B. Souyri, «Ensuring desired natural ventilation rate by means of optimized openings», presentato al Eleventh International IBPSA Conference, 2009.

[196] L. Maier, C. Nytsch-Geusen, L. Westermann, K. Mathur, M. Wetter, e D. Müller, «Comparative Study and Validation of Photovoltaic Model Formulations for the IBPSA Modelica Library based on Rooftop Measurement Data», presentato al 15th International Modelica Conference 2023, Aachen, October 9-11, dic. 2023, pp. 131–140. doi: 10.3384/ecp204131.

[197] R. De Coninck e L. Helsen, «Practical implementation and evaluation of model predictive control for an office building in Brussels», *Energy and Buildings*, vol. 111, pp. 290–298, gen. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.11.014.

[198] A. Maccarini, E. Prataviera, A. Zarrella, e A. Afshari, «Development of a Modelica-based simplified building model for district energy simulations», *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2042, fasc. 1, p. 012078, nov. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2042/1/012078.

[199] E.-J. Kim, G. Plessis, J.-L. Hubert, e J.-J. Roux, «Urban energy simulation: Simplification and reduction of building envelope models», *Energy and Buildings*, vol. 84, pp. 193–202, dic. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.07.066.

[200] A. Malhotra, M. Shamovich, J. Frisch, e C. Van Treeck, «Urban energy simulations using open CityGML models: A comparative analysis», *Energy and Buildings*, vol. 255, p. 111658, gen. 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111658.

[201] T. Schwan, D. Feige, L. Wenzel, C. Voelckner, e M. Leuschke, «Automatic Optimization of Energy Supply Systems in Buildings and City Quarters based on Modelica Models», presentato al 15th International Modelica Conference 2023, Aachen, October 9-11, dic. 2023, pp. 789–798. doi: 10.3384/ecp204789.

[202] J. B. Kim, W. Jeong, M. J. Clayton, J. S. Haberl, e W. Yan, «Developing a physical BIM library for building thermal energy simulation», *Automation in Construction*, vol. 50, pp. 16–28, feb. 2015, doi: 10.1016/j.autcon.2014.10.011.

[203] W. Jeong, J. B. Kim, M. J. Clayton, J. S. Haberl, e W. Yan, «Translating Building Information Modeling to Building Energy Modeling Using Model View Definition», *The Scientific World Journal*, vol. 2014, pp. 1–21, 2014, doi: 10.1155/2014/638276.

[204] A. Andriamamonjy, D. Saelens, e R. Klein, «An automated IFC-based workflow for building energy performance simulation with Modelica», *Automation in Construction*, vol. 91, pp. 166–181, lug. 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.03.019.

[205] M. Seidenschnur, K. Smith, A. Kücükavci, e C. A. Hviid, «A Web-based Common Data Environment for Continuous Commissioning of buildings», ago. 2022.

[206] E. V. Fjerbæk, A. Kücükavci, M. Seidenschnur, e K. Smith, «From BIM databases to Modelica - Automated simulations of heating systems», presentato al Proceedings of CLIMA 2022 Conference, nov. 2022.

[207] AIAA and AIA, «Digital Twin: definition & value». dicembre 2020.

[208] T. Glabeke, C. Kehrer, e M. Bromberger, «Digital twin design process for efficient development and operation of a customized robot», 2020.

[209] O. Lindqvist, «A Method of CFD-based System Identification for Standardized Co-Simulation».

[210] M. Jiang, M. Speetjens, C. Rindt, e D. Smeulders, «A data-based reduced-order model for dynamic simulation and control of district-heating networks», *Applied Energy*, vol. 340, p. 121038, giu. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121038.

[211] V. Vijayarangan *et al.*, «A data-driven reduced-order model for stiff chemical kinetics using dynamics-informed training», *Energy and AI*, vol. 15, p. 100325, gen. 2024, doi: 10.1016/j.egyai.2023.100325.

[212] R. Han, Y. Wang, W. Qian, W. Wang, M. Zhang, e G. Chen, «Deep neural network based reduced-order model for fluid–structure interaction system», *Physics of Fluids*, vol. 34, fasc. 7, p. 073610, lug. 2022, doi: 10.1063/5.0096432.

[213] Z. Zhao, H. Li, e S. Wang, «Machine learning-based surrogate models for fast impact assessment of a new building on urban local microclimate at design stage», *Building and Environment*, vol. 266, p. 112142, dic. 2024, doi: 10.1016/j.buildenv.2024.112142.

[214] A. Moni, W. Yao, e H. Malekmohamadi, «Reduced-Order Modelling for Multi-disciplinary Design Optimisation».

[215] A. Amarnath, A. A. N, e M. K. V, «Empowering Digital Twin Development: A Profound Exploration with Altair Tools», in *2023 International Conference on Self Sustainable Artificial Intelligence Systems (ICSSAS)*, Erode, India: IEEE, ott. 2023, pp. 1146–1153. doi: 10.1109/ICSSAS57918.2023.10331675.

[216] Y. Xia, W. Lin, W. Gao, T. Liu, Q. Li, e A. Li, «Experimental and numerical studies on indoor thermal comfort in fluid flow: A case study on primary school classrooms», *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 19, p. 100619, giu. 2020, doi: 10.1016/j.csite.2020.100619.

[217] M. Turunen, O. Toyinbo, T. Putus, A. Nevalainen, R. Shaughnessy, e U. Haverinen-Shaughnessy, «Indoor environmental quality in school buildings, and the health and wellbeing of students», *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol. 217, fasc. 7, pp. 733–739, set. 2014, doi: 10.1016/j.ijheh.2014.03.002.

[218] American Society of Heating, Refrigerating and AirConditioning Engineers, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, ASHRAE, 2004.

[219] *Ergonomics of the Thermal Environment-Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria*, ISO, 2005.

[220] Technical Committee CEN/TC 156, *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildingsaddressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*, Brussels., 2007.

[221] S. L. Campbell e R. Nikoukhah, *Modeling and Simulation with Compose and Activate*. Springer, 2019.

[222] V. Nasteski, «An overview of the supervised machine learning methods», *HORIZONS*, vol. 4, pp. 51–62, dic. 2017, doi: 10.20544/HORIZONS.B.04.1.17.P05.

[223] J. Pajot, «Optimal Design Exploration Using Global Response Surface Method: Rail Crush», 2013.

[224] D. P. Kingma e J. Ba, «Adam: A Method for Stochastic Optimization», arXiv, gen. 2017. Consultato: 19 ottobre 2024. [Online]. Disponibile su: http://arxiv.org/abs/1412.6980

[225] E. Rossi Passavanti, *Terni nell'età moderna: Storia di Terni dal 1492 al 1860*, vol. III. Roma: Stabilimento F. Damasso, 1939.

[226] V. Pirro e O. Panfili, «Le scuole femminili a Terni», *Memoria Storica*, vol. 1, pp. 123–134, mar. 1992.

[227] AA.VV., *L'UMBRIA Manuali per il territorio - Terni*, vol. 1. Edindustria Roma, 1980.

[228] G. Pepoli, *Decreto portante la soppressione delle corporazioni religiose, dei capitoli delle chiese collegiate, dei benefici semplici, cappellanie, ecc, 11 dicembre 1860*, 205, 11 dicembre 1860.

[229] C. Sebastiano, «Relazione sull'andamento delle scuole elementari maschili e rurali della città di Terni durante l'anno 1875-76 per Cavallero Sebastiano». Ferdinando Alterocca, 1876.

[230] O. Panfili, *La scuola a Terni nell'800*. Terni: Ed. Thyrus - Terni, 1979.

[231] G. Pepoli, «Decreto che fonda un Istituto Tecnico per le Provincie amministrate dal R. Commissario Generale dell'Umbria», in *Atti ufficiali pubblicati dal marchese G. N. Pepoli, regio commissario generale straordinario per le province dell'Umbria 12 settembre 1860 - 02 gennaio 1861*, in 131, no. 156. , Firenze, 1861, pp. 695–696.

[232] AA. VV., «L'Istruzione Tecnico-Industriale a Terni dal 1860 ai giorni nostri», locali ex Officine Bosco, giu. 1985.

[233] L. Corradi, «Regio Istituto Tecnico "C.C. Tacito" in Terni Relazione generale». 1899.

[234] R. Covino e G. Papuli, A c. di, *Le acciaierie di Terni*. Electa, 1998.

[235] R. Covino e G. Bovini, *Le Officine Bosco di Terni*. Perugia: Electa, 1987.

[236] «Faccende di casa», *Unione Liberale*, vol. 5, gen. 1881.

[237] O. Panfili, *La scuola elementare a Terni nel 900*, I. Arrone (Terni): Ed. Thyrus, 1982.

[238] O. Panfili, «La scuola elementare», in *Storia illustrata delle città dell'Umbria - Terni*, 1ª ed., vol. V, Milano: Elio Sellino, 1994, p. 434.

[239] «Scuola rurale di S. Valentino».

[240] *Scuola professionale per la città di Terni : posa della prima pietra, 10 ottobre 1909*. Tipografia delle Acciaierie, 1909.

[241] AA. VV., *L'UMBRIA Manuali per il territorio - Terni*, vol. 2. Edindustria Roma, 1980.

[242] A. Ciuffetti, «L'edilizia operaia», in *Storia illustrata delle città dell'Umbria - Terni*, 1ª ed., vol. V, Milano: Elio Sellino, 1994, p. 475.

[243] V. Pirro, «Il Liceo-Ginnasio di Terni: 1915-1945», *Memoria Storica*, vol. 12, pp. 103–125, gen. 1998.

[244] T. Pulcini, «"Nuova Scuola", Scuola Rurale, Scuola Fascista. Primi risultati di una indagine nel circondario ternano negli anni 1919-1929», *Passaggi (i limiti della democrazia)*, vol. 1, pp. 75–81, 1987.

[245] R. Rago, «La scuola elementare a Terni durante il Fascismo, 1925-1934», *Memoria Storica Rivista del Centro Studi Storici Terni*, vol. 10, gen. 1997.

[246] AA.VV., «I nuovi edifici scolastici di Terni», *Costruzioni civili e industriali illustrate*, vol. 2, feb. 1935.

[247] Comune di Terni, «QUATTRO ANNI di gestione podestarile 1932 - X - 1936 - XIV. Opere pubbliche eseguite, in corso di esecuzione e progettate». 1937.

[248] M. Paolucci, A c. di, *Immagini e documenti del «F. Cesi»*, II. Edizioni Thyrus, 1997.

[249] P. Portoghesi, «Una città d'autore», in *La città di Mario Ridolfi. Architettura, urbanistica, storia, arte, cinema, fotografia*, De Luca editori d'arte, 2005.

[250] A. Tarquini, «La città contemporanea», in *Storia illustrata delle città dell'Umbria - Terni*, Milano: Elio Sellino, 1994.

[251] B. Giulianelli, *La Polymer a Terni : conoscere una fabbrica*. Visconti, 1996.

[252] P. Barsotti, F. Casotto, e A. De Angelis, *La pietra della citta : l'uso della pietra sponga nell'architettura ternana*. Ecipa-CNA, 1992.

[253] Ufficio studi e programmazione del Comune di Terni, A c. di, *Nota sul profilo statistico della situazione scolastica a Terni*. 1978.

[254] L. Martini, *L'Istituto Tecnico per Geometri di Vittorio De Feo a Terni" in Paolo Belardi (a cura di), "NAU Novecento Architettura Umbria*. Foligno: Il Formichiere, 2014.

[255] S. Rotondi, «L'Istituto tecnico per geometri a Terni», *Rassegna di architettura e urbanistica*, vol. 12, pp. 70–79, 2017.

[256] C. Conforti e F. Dal Co, *Vittorio De Feo, Opere e progetti*. Milano: Electa, 1986.

[257] E. Currà, M. Russo, L. Severi, C. D. L. Cui, e P. Leonardi, «Verso il censimento e la catalogazione dei bani industriali del comune di Roma: una mappatura georeferenziata online per l'esplorazione virtuale», presentato al 2° Stati Generali del Patrimonio Industriale, Venezia: Marsilio.

[258] A. Franchini, *Il Villaggio Matteotti a Terni. Giancarlo De Carlo e l'abitare collettivo*. L'ERMA, 2020.

[259] D. C. Montgomery, *Design of analysis of experiments*, 9th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2017.

[260] P. Woolf, «Chemical Process Dynamics and Controls».

[261] J. M. Cimbala, «Taguchi Orthogonal Arrays». 2014.

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - La scuola della società industriale (illustrazione di Jean-Marc Côté, À l'École, 1899 circa, cromolitografia Bibliothèque Nationale de France, Parigi).33
Figura 2 - Immagine del corridoio della scuola primaria del rione G. Taverna a Piacenza. Fonte: FOTOedu, archivio fotografico per la storia della scuola e dell'educazione dell'Istituto Nazionale di Documentazione, Innovazione e Ricerca Educativa (INDIRE).....33
Figura 3 - Pianta del primo e secondo piano della scuola primaria di via Galvani, Milano, 1888 progettata da Camillo Boito. Fonte: Riproduzione del disegno di Camillo Boito da Scarrocchia S. [11]. 34
Figura 4 - Esempio di edificio a "L". Pianta del piano terra della scuola primaria costruita da Camillo Boito a Padova nel 1888. Fonte: Vittanovich P. [12], tav. 9. 35
Figura 5 - Progetto di un edificio scolastico con 4 aule. Fonte: Guazzaroni, A. Tav. 29.....37
Figura 6 - Palestra del Regio Istituto Tecnico Commerciale e per Geometri "Antonio Bordoni", Pavia. Fonte: FOTOedu, archivio fotografico per la storia della scuola e dell'educazione dell'Istituto Nazionale di Documentazione, Innovazione e Ricerca Educativa (INDIRE). 40
Figura 7 - Aula della scuola elementare "U. Ferrandi" di Novara, 1930 circa. Fonte: FOTOedu, archivio fotografico per la storia della scuola e dell'educazione dell'Istituto Nazionale di Documentazione, Innovazione e Ricerca Educativa (INDIRE).....41
Figura 8 - Asilo infantile Sant'Elia a Como, 1934-1936, Giuseppe Terragni.....42
Figura 9 - Pianta del progetto Hans Scharoun per la scuola elementare di Darmstadt (1951).....44
Figura 10 - Scuola elementare allestita alla XII Triennale di Milano nel 1960. Planimetria (a sinistra) e fotografia dell'allestimento nel parco (a destra). Fonte: Casabella-continuità n. 245 del 1960 [28].....46
Figura 11 – Esempi di edifici scolastici. Fonte: Immagine tratta dall'articolo di Ciro Cicconcelli su Casabella n.245, 1960 [28].....47
Figura 12 - Planimetria di un padiglione della scuola elementare di Ponte Sesto (Rozzano). Fonte: Archivio di Vincenzo Montaldo.....49
Figura 13 - Vista dall'alto della Heathcote Scholl. Fonte: Educational Facilities Laboratory [33]. 50
Figura 14 - Pianta del piano terra della scuola media di Buccinasco (1965-68). Fonte: "Controspazio" n.2-3, luglio-agosto 1969 ([35]).....51
Figura 15 - Fotografia dello spazio aperto della scuola materna ed elementare di Rozzano (1963-66). Fonte: Archivio di Vincenzo Montaldo.....52

Figura 16 - Progetto per la scuola elementare di Fagnano Olona, 1972. Penna e pennarello su carta. © Eredi Aldo Rossi. Fonte: Fondazione Aldo Rossi. 53
Figura 17 - Schema delle sei zone di apprendimento previste dal progetto Future Classroom Lab. Fonte: Attewell J. [48]. 65
Figura 18 - Spazio per il lavoro di gruppo e sullo sfondo la caverna della Vittra School Telefonplan. Foto © Kim Wendt. 67
Figura 19 – Scuola Ivanhoe Grammar **A.** Entrata principale, **B.** Cortile interno, **C.** Pianta del primo piano. Foto © John Gollings, Disegno Planimetria © McBride Charles Ryan. 68
Figura 20 – Scuola Braemar College **A.** Vista esterna **B.** Spazio di connessione tra l'interno e l'esterno **C.** Spazio interno comune **D.** Laboratorio di scienze. Foto © Emily Bartlett. 69
Figura 21 - Indicatori di qualità degli spazi scolastici. Immagine tratta dal libro "Architettura dell'Educazione. Strumenti Progettuali" di Mario Cucinella Architects [56]. 72
Figura 22 - Interno dell'asilo nido Iride di Guastalla. Foto © Moreno Maggi. .. 73
Figura 23 - Il cortile centrale della scuola di Montebellaluna. Render © Mario Cucinella Architects. 74
Figura 24 - Campus di San Lazzaro di Savena, progetto di Mario Cucinella Architects. Foto © Walter Vecchio. 74
Figura 25 – Scuola Enrico Fermi prima dell'intervento A. atrio centrale B. cortile. Foto © Francesca Cirilli. 78
Figura 26 - Scuola Enrico Fermi dopo l'intervento A. atrio centrale B. cortile C. spazio esterno nei volumi esterni aggiunti. Foto © Francesca Cirilli; Render © BDR bureau. 79
Figura 27 - Gli spazi educativi e le loro relazioni secondo la ricerca dell'Indire. 81
Figura 28 - I nuovi tipi di spazi. Immagine tratta dal libro "Architettura dell'Educazione. Strumenti Progettuali" di Mario Cucinella Architects [56]. 83
Figura 29 – Tasso di copertura dell'Anagrafe dell'Edilizia Scolastica (settembre 2018). Fonte: Future Urban Legacy Lab [78]. 88
Figura 30 - Distribuzione degli edifici scolastici in base al loro anno di costruzione. 90
Figura 31 - Edifici scolastici per regione e periodo di costruzione. 91
Figura 32 - Età media degli edifici per Regione. Fonte: Fondazione Agnelli [1]. Rielaborazione dell'autore. 92
Figura 33 - Edifici per Regione e destinazione d'uso. 93
Figura 34 - Crollo della scuola primaria "F. Iovene" di San Giuliano di Puglia: cordolo in cemento armato visibile tra le macerie. Vista dall'asilo. Fonte: Augenti N. et al. [81]. 96

Figura 35 - Distribuzione degli edifici scolastici per periodo di costruzione rispetto all'introduzione delle norme antisismiche. 97
Figura 36 - Classificazione sismica del territorio italiano (1984). Decreto MLP del 14/07/1984 e decreti successivi. 98
Figura 37 - Proposta di riclassificazione sismica del territorio italiano (1998) a cura del Gruppo di Lavoro ING-GNDT-SSN costituito dalla Commissione Nazionale di Previsione e Prevenzione dei Grandi Rischi. 99
Figura 38 - Zone sismiche del territorio italiano (2003). Ordinanza PCM 3274 del 20/03/2003. 100
Figura 39 - Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale. Ordinanza PCM del 28 aprile 2006 n. 3519. 101
Figura 40 - Distribuzione edifici scolastici rispetto alla normativa antisismica. 103
Figura 41 - Distribuzione edifici per zona sismica. Rielaborazione dell'autrice dai dati dell'Anagrafe dell'Edilizia Scolastica. 104
Figura 42 - Distribuzione degli edifici scolastici per zona sismica in base alla progettazione, adeguamento o miglioramento antisismico. Rielaborazione dell'autrice dai dati dell'Anagrafe dell'Edilizia Scolastica. 104
Figura 43 - Distribuzione degli edifici scolastici per periodo di costruzione rispetto all'introduzione delle normative energetiche. 107
Figura 44 - Classificazione degli edifici scolastici con certificazione energetica. Fonte: Legambiente [88]. 108
Figura 45 - Adozione di accorgimenti per la riduzione dei consumi energetici. 109
Figura 46 - Interventi di riduzione dei consumi eneergetici adottati. 109
Figura 47 - Interventi di riduzione energetica più adottati. 110
Figura 48 - Destinazione delle superfici complessive degli edifici scolastici in Piemonte. Fonte: Fare spazio [77]. 113
Figura 49 - Rapporto tra la superficie delle aule e quella degli spazi interni accessori, suddiviso per periodo di costruzione. Fonte: Fare Spazio [77]. 113
Figura 50 - Finanziamenti previsti per l'edilizia scolastica. Fonte: Portale GiES (Gestione interventi Edilizia Scolastica). 119
Figura 51 - Quadro sinottico delle tipologie di intervento finanziate attraverso i fondi Mutui Bei e Scuole Sicure. Fonte: Portale GiES (Gestione interventi Edilizia Scolastica), 2017. 120
Figura 52 - Distribuzione dei finanziamenti suddivisa per regione. Fonte: Portale GiES (Gestione interventi Edilizia Scolastica). 121
Figura 53 - Mappa concettuale dei possibili scenari di retrofit: (1) demolizione e ricostruzione; (2) solo riqualificazione energetica; (3) riqualificazione combinata energetica e strutturale. Fonte: Belleri et al. [89]. 125

Figura 54 – Classificazione delle tipologie di interventi integrati. Fonte: Pohoryles D.A. et al. [97]. 127
Figura 55 - Schema concettuale dei criteri di selezione delle soluzioni di retrofit integrato. Fonte: Menna et al. [98]. 129
Figura 56 - Esoscheletro ortogonale alla facciata del Telegraph – Channing Garage in California. 131
Figura 57 - Palazzina per uffici dello stabilimento Magneti Marelli di Crevalcore prima (a sinistra) e dopo (a destra) dell'intervento di adeguamento sismico. Foto © Paolo Lambertini [100]. 131
Figura 58 - Adeguamento sismico della scuola primaria "La Tina" di Città di Castello mediante esoscheletro: fotografia dell'edificio dopo l'intervento (in alto) e vista assonometrica di un singolo telaio (in basso). © EXUP s.r.l. 132
Figura 59 - Concetto di esoscheletro. Fonte: Di Lorenzo et al. [102]. 133
Figura 60 - Scelta tipologica di livello I: pareti di taglio perpendicolari (2D⊥), parallele (2D//) alla facciata e strutture 3D. Fonte: Di Lorenzo et al. [102]. .. 134
Figura 61 - Scelta tipologica dal Livello II al Livello V. Fonte: Landolfo et al. [103]. 135
Figura 62 - Rappresentazione di punti di Pareto e punti fattibili in un problema con due funzioni obiettivo. 141
Figura 63 - Classificazione delle tipologie di ottimizzazione. 142
Figura 64 - Processo di ottimizzazione multidisciplinare. 143
Figura 65 – Schematizzazione dei cicli del flusso di lavoro. Rielaborazione dell'autrice da Geyer et al. [119]. 147
Figura 66 - Confronto tra la scomposizione in sottosistemi di un aereo e di un edificio. Fonte: Muthumanickam et al. [125]. 149
Figura 67 - Risultati delle interviste condotte da Flager et al. [118]. Rielaborazione dell'autrice. 151
Figura 68 - Render della proposta di progetto dello studio Zaha Hadid Architects per la Neue National Gallery di Berlino. Fonte: Zaha Hadid Architects [141]. 156
Figura 69 - Processo di progettazione delle nervature. Fonte: Zaha Hadid Architects [141]. 156
Figura 70 - Simulazioni fluidodinamiche a scala di edificio e di quartiere. Fonte: Altair Engineering [144]. 158
Figura 71 - Flusso di lavoro operativo della costruzione di un modello 1D. 163
Figura 72 - Modellazione 1D dalla progettazione alla fase operativa. 171
Figura 73 - Workflow della costruzione di un modello di ordine ridotto basato sui dati provenienti da simulazioni. 173
Figura 74 – Schematizzazione di una rete neurale. 174
Figura 75 – Schematizzazione del comportamento di un neurone. 175

Figura 76 – Esempio di architettura di una rete neurale. Rielaborazione da una pubblicazione di Ayoub M. [159]. 177
Figura 77 - Primo piano della scuola primaria Anita Garibaldi con individuazione dell'aula di riferimento. Scala 1:500. 184
Figura 78 - Processo di ottimizzazione multidisciplinare con modello ad alta fedeltà. 186
Figura 79 - Modello 3D e pianta dell'aula analizzata. 187
Figura 80 - Mesh del modello (sezione longitudinale) 189
Figura 81 - Workflow specifico per il caso di studio. Dettaglio della prima parte del processo (in alto) e della seconda parte (in basso).....190
Figura 82 – Possibili configurazioni del condizionatore. Scala 1:100.....191
Figura 83 - Schermata del software HyperStudy con la definizione dei modelli. 193
Figura 84 - Risultati delle iterazioni in termini di velocità e spessore nel DoE. 196
Figura 85 - Effetto delle variabili di input sulle risposte di output nel caso invernale......196
Figura 86 - Diagramma di flusso dell'algoritmo GRSM......198
Figura 87 - Grafico a coordinate parallele delle simulazioni di ottimizzazione. 199
Figura 88 - Risultati delle iterazioni in termini di velocità e spessore nell'ottimizzazione (a sinistra) e andamento della funzione obiettivo al progredire delle iterazioni (a destra). 200
Figura 89 - Distribuzione della temperatura interna nella configurazione di ottimo......201
Figura 90 - Verifica grafica del rispetto dei vincoli imposti nel caso estivo (sinistra) e nel caso invernale (destra). 201
Figura 91 - Worflow operativo del caso applicativo con un modello di ordine ridotto basato sulla fisica. 204
Figura 92 - Modello 1D del sistema implementato con il software Altair Activate. 205
Figura 93 - Workflow operativo del modello di ordine ridotto basato sui dati. 209
Figura 94 - Diagramma di verifica dell'accuratezza della rete neurale relativa alla temperatura del banco 5 nel caso estivo. 212
Figura 95 - Diagramma di verifica dell'accuratezza della rete neurale relativa alla temperatura del banco 6 nel caso invernale.....212
Figura 96 – Rappresentazione del modello di ordine ridotto sviluppato nel software Altair Twin Activate.....213
Figura 97 - Dettaglio della fase di acquisizione dei dati di input. 214

Figura 98 - Dettaglio della fase di calcolo predittivo per il banco 1 nella condizione invernale. 215
Figura 99 - Dettaglio della fase di esportazione dei risultati. 215
Figura 100 - Confronto tra le temperature ottenute dal modello ad alta fedeltà e quelle del modello di ordine ridotto 217
Figura 101 - Rappresentazione grafica della verifica dei vincoli per le condizioni estive e invernali. 218
Figura 102 – Schermata della prima parte del codice Python. 221
Figura 103 - Schermata della seconda parte del codice Python. 222
Figura 104 - Schermata della terza parte del codice Python. 223
Figura 105 - Schermata della quarta parte del codice Python. 224
Figura 106 - Errore (Loss function) prodotta dal dataset di training (linea blu) e dal dataset di test (linea arancione). 224
Figura 107 - Rappresentazione target-predictions ottenuto considerando l'intero dataset a) del quinto output (Banco_5_T) b) del dodicesimo output (Banco_12_T) c) del quattordicesimo output (Banco_1_T_Inv) d) del ventunesimo output (Banco_21_T_Inv). 226
Figura 108 - Schermata dell'ultima sezione del codice Python. 226
Figura 109 – Rappresentazione grafica con scala cromatica della distribuzione della temperatura dell'aula. 228
Figura 110 - Processo di modellazione multidisciplicare con a) modello tridimensionale, b) modello monodimensionale basato sui dati con software commerciale e c) modello monodimensionale basato sui dati con codice Python. 229
Figura 111 - Catasto Gregoriano 1854. 236
Figura 112 - Manifesto per l'apertura delle Scuole Serali, 1877. 238
Figura 113 - Manifesto di presentazione dell'Istituto Tecnico. 241
Figura 114 - Piante della prima sede dell'Istituto Tecnico nell'ex collegio di S. Lucia. 243
Figura 115 - Prospetto principale (in alto) e pianta (in basso) della Scuola Professionale. Fonte: Scuola professionale per la città di Terni [240]. 246
Figura 116 – Prospetto su viale Brin del corpo principale della Scuola Industriale. 247
Figura 117 - Padiglioni della Scuola Industriale. 247
Figura 118 - Prospetto principale della scuola Vittorio Veneto. Fonte: FOTOedu, archivio fotografico per la storia della scuola e dell'educazione dell'Istituto Nazionale di Documentazione, Innovazione e Ricerca Educativa (INDIRE). ... 253
Figura 119 - Prospetto principale (in alto) e interno di un'aula (in basso) della scuola XXVIII Ottobre: Fonte: Rivista tecnica Costruzioni civili e industriali illustrate febbraio 1935 [246]. 254

Figura 120 - Prospetto principale della scuola Guglielmo Oberdan. Fonte: Rassegna delle opere pubbliche 1932-1936 [247].....255
Figura 121 - Particolari costruttivi dell'edificio scolastico G. Oberdan: scavi di fondazione con le teste dei pali compressi (in alto), armatura della pensilina (al centro), solaio di copertura (in basso). Fonte: Rassegna delle opere pubbliche 1932-1936 [247].....256
Figura 122 - Pianta del piano terra della sede dell'Istituto Tecnico su progetto dell'ingegnere Angelo Guazzaroni. Fonte: Paolucci M. [248]. 258
Figura 123 - Edificio del Regio Liceo Ginnasio. Fonte: Rassegna delle opere pubbliche 1932-1936 [247].....259
Figura 124 - Corridoio del secondo piano del Regio Liceo Ginnasio. Fonte: Rassegna delle opere pubbliche 1932-1936 [247].....260
Figura 125 - Inizio della ricostruzione della sede dell'Istituto Tecnico. Fonte: Paolucci M. [248]. 261
Figura 126 - Pianta delle coperture della scuola Aldo Moro. Scala 1:500 Fonte: Comune di Terni.....264
Figura 127 - Sezione trasversale della seconda versione progettuale della scuola Leonardo da Vinci. Disegno dell'arch. Mario Ridolfi del dicembre 1953. Fonte: Archivio di Stato di Terni. 267
Figura 128 - Veduta aerea dell'area di progetto. Disegno dell'arch. Mario Ridolfi del dicembre 1955. Fonte: Accademia di San Luca. 269
Figura 129 - Particolare della facciata principale dell'edificio che si confronta con il campanile della chiesa adiacente. Fotografia dell'autrice. 270
Figura 130 - Sezioni trasversali. Disegni di progetto dell'arch. Vittorio De Feo. Fonte: Conforti C, Dal Co F. [256]. 273
Figura 131 – Popolazione scolastica nel Comune di Terni a.s 2023-2024. Fonte: Ufficio scolastico del Comune. 274
Figura 132 - Distribuzione degli edifici scolastici a Terni in base al periodo di costruzione. 275
Figura 133 - Destinazioni d'uso originarie degli edifici scolastici a Terni......275
Figura 134 - Distribuzione degli edifici scolastici del Comune di Terni rispetto alla normativa antisismica. 276
Figura 135 – Adozione di accorgimenti per la riduzione dei consumi energetici a Terni. 277
Figura 136 - Interventi di riduzione dei consumi energetici adottati a Terni. ..277
Figura 137 - Interventi di riduzione energetica più adottati a Terni. 278
Figura 138 - Villaggio semirurale Matteotti I. Fonte: Valter Ballarini [241].....282
Figura 139 - Villaggio Matteotti II progettato dall'architetto Giancarlo De Carlo. Foto © Alessandro Lanzetta. 283
Figura 140 – Complesso di edifici della scuola primaria Matteotti. 284

Figura 141 – Modello BIM dell'edificio scolastico Matteotti. Fonte: studio ATIproject. 286
Figura 142 - Pianta del piano seminterrato. Fonte: modello Revit elaborato dallo studio ATIproject. 287
Figura 143 - Pianta del piano terra. Fonte: modello Revit elaborato dallo studio ATIproject. 287
Figura 144 - Pianta del primo piano. Fonte: modello Revit elaborato dallo studio ATIproject. 288
Figura 145 - Analisi delle quantità degli spazi della scuola primaria Matteotti. 289
Figura 146 - Modello Revit della struttura dell'edificio scolastico con suddivisione nei tre blocchi principali. Fonte: Studio ATI Project. 291
Figura 147 - Vista tridimensionale del modello strutturale realizzato con il programma PRO_SAP. 292
Figura 148 - Disegno originale della carpenteria del primo piano del blocco 1. Fonte: Comune di Terni. 293
Figura 149 - Rappresentazione grafica del modello strutturale creato con il software agli elementi finiti PRO_SAP. 295
Figura 150 - Individuazione delle tipologie dei solai del primo piano dell'edificio 1. 296
Figura 151 - Individuazione delle tipologie dei solai del sottotetto dell'edificio 1. 296
Figura 152 - Individuazione delle tipologie dei solai della copertura dell'edificio 1. 297
Figura 153 - Modello strutturale dell'edificio in PRO_SAP con rappresentazione dell'applicazione dei carichi delle tamponature. 297
Figura 154 - Schermata del software Pro_Sap relativa alla valutazione della pericolosità sismica. 299
Figura 155 - Spettro di progetto orizzontale allo Stato Limite di salvaguardia della Vita. 303
Figura 156 - Primi tre modi di vibrare della struttura. 304
Figura 157 – Distribuzione dello sforzo normale [kN] per la combinazione 49. 305
Figura 158 - Distribuzione del momento 2-2 [kN m] per la combinazione 75. 305
Figura 159 - Distribuzione del momento 3-3 [kN m] per la combinazione 78. 306
Figura 160 - Distribuzione del taglio 2 [kN] per la combinazione 3. 306
Figura 161 - Distribuzione del taglio 3 [kN] per la combinazione 75. 307
Figura 162 - Verifica N/M pilastri con $TR = 30$. 307
Figura 163 - Verifica V/T cls pilastri con $TR = 30$. 308
Figura 164 - Verifica V/T acciaio pilastri con $TR = 30$. 308

Figura 165 - Verifica N/M travi con $TR = 30$. 309
Figura 166 - Verifica V/T cls travi con $TR = 30$. 309
Figura 167 - verifica V/T acciaio travi con $TR = 30$. 310
Figura 168 – Caratteristiche termiche della tamponatura esterna. 311
Figura 169 – Caratteristiche termiche relative a una tipologia di finestra. 312
Figura 170 - Modello energetico dell'edificio scolastico realizzato con il software Termus BIM.....313
Figura 171 - Prestazione energetica globale e del fabbricato. 314
Figura 172 - Pianta della copertura dell'Edificio 1 con posizionamento dell'esoscheletro......315
Figura 173 - Workflow del processo progettuale......316
Figura 174 - Rappresentazione tridimensionale dell'esoscheletro progettato, elaborata tramite il software PRO_SAP. 318
Figura 175 - Accoppiamento tra la struttura esistente e l'esoscheletro. Fonte: Landolfo et al. [103]. 319
Figura 176 - Porzione di edificio isolata per la verifica dell'efficacia dell'esoscheletro, visualizzata da due angolazioni differenti. 320
Figura 177 - Verifica N/M delle travi: in alto la configurazione nello stato attuale, in basso quella con l'esoscheletro. 321
Figura 178 - Verifica V/T cls delle travi: in alto la configurazione nello stato attuale, in basso quella con l'esoscheletro. 322
Figura 179 - Verifica V/T acciaio delle travi: in alto la configurazione nello stato attuale, in basso quella con l'esoscheletro. 323
Figura 180 - Verifica N/M dei pilastri: in alto la configurazione nello stato attuale, in basso quella con l'esoscheletro. 324
Figura 181 - Verifica V/T cls dei pilastri: in alto la configurazione nello stato attuale, in basso quella con l'esoscheletro. 325
Figura 182 - Verifica V/T acciaio dei pilastri: in alto la configurazione nello stato attuale, in basso quella con l'esoscheletro. 326
Figura 183 - Schermata del software Pro_Sap relativa alla valutazione della pericolosità sismica con i valori calcolati all'80% del livello di sicurezza. 327
Figura 184 - Distribuzione dello sforzo normale [kN] per la combinazione SLV sismica 20. 328
Figura 185 - Distribuzione dello sforzo normale [kN] per la combinazione SLV sismica 33. 328
Figura 186 - Verifica N/M degli elementi in acciaio. 329
Figura 187 - Vista frontale del telaio resistente dell'esoscheletro. Scala 1:100. 330
Figura 188 -Piastre di base e fondazioni. Scala 1:100. 331

Figura 189 - Particolare del solaio in acciaio con lamiera grecata tipo Solac 55 e pioli tipo Tecnaria CTF 12/80. Scala 1:100. 331
Figura 190 - Pianta del piano seminterrato. 333
Figura 191 - Pianta del piano terra. 334
Figura 192 - Pianta del primo piano. 334
Figura 193 - Analisi delle quantità degli spazi dopo l'intervento. 335
Figura 194 - Prestazione energetica del fabbricato dopo l'intervento. 338
Figura 195 - Workflow del processo adottato per l'ottimizzazione dell'esoscheletro. 340
Figura 196 - Variabili di progetto. 341
Figura 197 - Pianta della copertura dell'Edificio 1 con posizionamento dell'esoscheletro. 341
Figura 198 - Schermata del software Hyperstudy che mostra una parte della test matrix contenente i valori delle combinazioni di variabili generate dal Design of Experiment (DoE). 343
Figura 199 - Struttura delle cartelle contenenti le configurazioni salvate. 343
Figura 200 - Distribuzione della massa nelle configurazioni di variabili del DoE. 345
Figura 201 - Andamento della funzione sigmoide. 348
Figura 202 - Accuratezza delle reti generate con il codice Python. 349
Figura 203 - Definizione dei modelli (sotto-processi) in Hyperstudy. 350
Figura 204 - File che consente la selezione dei valori da manipolare durante il processo di ottimizzazione. 351
Figura 205 - Sottomissione del codice Python in batch per l'automatizzazione del processo. 351
Figura 206 - Sottomissione del modello TwinActivate in batch per l'automatizzazione del processo. 351
Figura 207 - Variabili di progetto. 352
Figura 208 - intervalli di oscillazione delle variabili di progetto. 352
Figura 209 - Verifica dell'automatizzazione del processo baseline. 352
Figura 210 - Caricamento in DataSource dei dati generati. 353
Figura 211 - Rappresentazione dei valori dei 172 elementi. 353
Figura 212 - Definizione degli output da estrarre. 354
Figura 213 - Definizione dell'algoritmo di ottimizzazione. 354
Figura 214 - Andamento della traslazione lungo l'asse x e y nelle configurazioni analizzate nell'ottimizzazione. 355
Figura 215 - Valutazione dell'andamento della massa nelle configurazioni. 356
Figura 216 - Verifica N/M delle travi in cemento armato. 357
Figura 217 - Verifica V/T acciaio dei pilastri in cemento armato. 357

Figura 218 - Processo di ottimizzazione multidisciplinare con integrazione degli aspetti strutturali ed energetici. 359
Figura 219 - Schema di un central Composite Design con tre fattori. 376
Figura 220 - Figura 2 - Latin Hypercube Sampling (10 punti posizionati casualmente)......377
Figura 221 - Schermata della prima parte del codice. 381
Figura 222 - Parte del codice contenente il primo IF statement. 382
Figura 223 - Parte del codice contenente il secondo IF statement. 383
Figura 224 - Parte del codice contenente il terzo IF statement.....384
Figura 225 - Schermata del ciclo for della quarta parte del codice. 384
Figura 226- Parametri relativi al caso di studio evidenziati nella Tab. 3.3.I (a sinistra) e nella Fig. 3.3.1. (a destra) delle NTC2018......424
Figura 227 - Assegnazione della variabile elem. 435
Figura 228 - Matrici output della funzione reader_function. 436
Figura 229 - Matrice derivante dalla concatenazione delle variabili a e b. 437
Figura 230 - Schermata della seconda parte del codice. 438
Figura 231 - Schermata della terza parte del codice. 438
Figura 232 - Schermata della quarta parte del codice. 439
Figura 233 - Schermata della prima sezione della funzione reader_function. 440
Figura 234 - Schermata della seconda sezione della funzione reader_function. 440
Figura 235 - Schermata della terza e quarte sezione della funzione reader_function. 442
Figura 236 - Schermata della quinta e sesta sezione della funzione reader_function. 442
Figura 237 - Schermata della settima e ottava sezione della funzione reader_function. 444
Figura 238 - Funzione reader_new_file. 445
Figura 239 - Schermata della prima parte del codice. 447
Figura 240 - Sezione iniziale della seconda parte del codice. 448
Figura 241 - Sezione centrale della seconda parte del codice. 449
Figura 242 - Sezione finale della seconda parte del codice. 450
Figura 243 - Grafico dei valori reali e predetti sul dataset di addestramento (sinistra) e di test (destra). Esempio per l'output della colonna 19.....450
Figura 244 - Accuratezza della rete neurale M_1. 452
Figura 245 - Accuratezza della rete neurale M_2. 452
Figura 246 - Schermata della prima parte del codice Python. 454
Figura 247 - Schermata della seconda parte del codice Python. 455
Figura 248 - Schermata della terza parte del codice Python. 455
Figura 249 - Schermata del modello in TwinActivate. 456

Figura 250 - Codice .oml. 457

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 – Epoca di costruzione degli edifici scolastici. Fonte: Ministero dell'Istruzione – Anagrafe dell'Edilizia Scolastica, 2021-2022. 89
Tabella 2 - Certificazioni in possesso degli edifici scolastici statali. Fonte: Ministero dell'Istruzione – Anagrafe dell'Edilizia Scolastica, 2021-2022. 94
Tabella 3 – Superficie destinata a strutture per lo sport e aree verdi. 115
Tabella 4 - Formulazione di un problema di ottimizzazione. 144
Tabella 5 - Stratigrafie e proprietà dei materiali. 187
Tabella 6 - Variabili di progetto. 191
Tabella 7 - Valori dell'analisi di sensitività. 194
Tabella 8 - Valori del punto di ottimo. 200
Tabella 9 - Valori della variabili nel punto di ottimo. 216
Tabella 10 - Confronto tra tempi di esecuzione e capacità computazionale delle simulazioni in relazione all'approccio di modellazione adottato. 230
Tabella 11 - Dati relativi alla frequenza scolastica degli alunni nel 1931. Fonte: Panfili O. [238]. 251
Tabella 12 - Quadro delle opere realizzate dal Comune di Terni nell'ambito dell'edilizia scolastica nel periodo 1975 – 1978. Fonte: Nota sul profilo statistico della situazione scolastica a Terni [253]. 272
Tabella 13 - Tipologia delle scuole di Terni. 274
Tabella 14 - Elenco scuole primarie con anno di costruzione e tipologia strutturale. 279
Tabella 15 - Caratteristiche meccaniche dei materiali esistenti. 294
Tabella 16 - Tipologie dei solai dell'edificio 1. 295
Tabella 17 - Parametri di verifica della regolarità della struttura in pianta e in altezza. 302
Tabella 18 - Opzioni delle configurazioni dell'esoscheletro analizzate. 319
Tabella 19 - Confronto degli disponibili spazi pre e post-intervento. 336
Tabella 20 - Confronto degli indici energetici dell'edificio prima e dopo l'intervento. 338
Tabella 21 - Valori assunti dalla terza, quarta e quinta variabile. 342
Tabella 22 - Valori delle variabili nella configurazione ottimale. 355
Tabella 23 - Riduzione del numero di esecuzioni. 373
Tabella 24 - Tabella di selezione delle matrici predefinite, rielaborazione dell'autrice da un libro di Woolf P. [260] 375

Tabella 25 - Dati relativi agli strati del muro esterno. 380
Tabella 26 - Calcolo della velocità base di riferimento. 424
Tabella 27 - Calcolo della velocità di riferimento. 424
Tabella 28 - Valore della pressione cinetica di riferimento. 425
Tabella 29 - Calcolo del coefficiente di esposizione. 425
Tabella 30 - Valori dei coefficienti aerodinamici. 426
Tabella 31 - Valore del coefficiente di forma per la copertura a una falda. 426
Tabella 32 - Valori del coefficiente di forma per la copertura a due falde. 427
Tabella 33 - Calcolo del valore di riferimento del carico della neve al suolo e dei coefficienti di espansione e temico. 427

PUBBLICAZIONI E ATTIVITÀ SVOLTE DURANTE IL DOTTORATO

Pubblicazioni

Paolini, C.; Pugnaletto M.; Mosca C. (2025). “Mario Ridolfi in Terni The Leonardo da Vinci middle school”. In: Envisioning the Futures - Designing and Building for People and the Environment, Colloqui.AT.e 2025.

Mosca, C.; D’Amico F. (2024). “Data-driven Reduced-Order Models for Multidisciplinary Design Optimization Process”. In: Proceedings of the 42nd Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe. Vol. 1, eCAADe 2024

Mosca, C. (2024). “Physical-based reduced-order model for buildings energy efficiency”. In: Architectural Engineering in Italy and Worldwide. Comparing Experiences, Colloqui.AT.e 2024

Mosca, C. (2023). “Intervento di miglioramento energetico di un’aula attraverso la metodologia Multidisciplinary Design Optimization”. In: In Transizione: sfide e opportunità per l’ambiente costruito, Colloqui.AT.e 2023

Partecipazione ad attività di ricerca

Partecipazione al Progetto di ricerca di Ateneo Sapienza, 2023 - Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale, DICEA Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale – “Future proofed school buildings: updating the Italian regulation” - Responsabile scientifico: Prof. Michele Morganti

Partecipazione al Progetto di Ricerca di Rilevante Interesse Nazionale PRIN, 2023 – “RE3WORK – REsilient REtrofitting and REuse of Water heritage and built environments: multi-objective Optimization for RisK mitigation and cultural enhancement” - Coordinatore: Prof. Fabio Fatiguso, Responsabile scientifico unità Sapienza: Prof. Edoardo Currà

Responsabile della ricerca e vincitrice di un bando di finanziamento Avvio alla ricerca Tipo 1, 2023 - Sapienza Università di Roma – “Model Based Design per il miglioramento energetico degli edifici scolastici esistenti”

Partecipazione al Progetto di ricerca di Ateneo Sapienza, 2022 - Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale, DICEA Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale – “Lost in traslation: tradurre in conoscenza le indagini archeo-

industriali su beni tangibili e immateriali. I palinsesti delle industrie dell'acqua nel Lazio" - Responsabile scientifico: Prof. Edoardo Currà

Partecipazione a conferenze

eCAADe 2024 – Data-driven intelligence - Università di Cipro, Nicosia - Titolo del contributo presentato: "Data-driven Reduced-Order Models for Multidisciplinary Design Optimization Process"

Colloqui.AT.e 2024 – Architettura tecnica in Italia e nel mondo. Esperienze a confronto - Università degli Studi di Palermo - Titolo del contributo presentato: "Physical-based reduced-order model for buildings energy efficiency"

Colloqui.AT.e 2023 – IN TRANSIZIONE Opportunità e Sfide per l'Ambiente Costruito - Politecnico di Bari - Titolo del contributo presentato: "Intervento di miglioramento energetico di un'aula attraverso la metodologia Multidisciplinary Design Optimization"

2° Stati Generali del Patrimonio Industriale - Facoltà di Ingegneria, Sapienza Università di Roma e Tivoli - Parte del comitato organizzativo e supporto alla redazione

Partecipazione ad attività didattica

A.A. 2022-23 - Tutor alle esercitazioni e al laboratorio progettuale nell'ambito del corso di "Architettura tecnica I" tenuto dalla prof.ssa Marina Pugnaletto, al terzo anno del corso di laurea in Ingegneria Civile, Sapienza Università di Roma

AA.AA. 2021-22 e 2022-23 - Tutor alle esercitazioni e al laboratorio progettuale nell'ambito del corso di "Architettura tecnica I" tenuto dalla prof.ssa Cesira Paolini, al secondo anno del corso di laurea in Ingegneria Edile - Architettura, Sapienza Università di Roma. Nel 2024 vincitrice del bando "BR-B2 2/2024. Borse del TIPO B2 (Dottorandi) - Tutorato in ingresso ed in itinere - Area Civile"

Premi e riconoscimenti

Primo premio al concorso bandito dall'associazione Ar.tec. 2022 - F. Carlucci, C. Cui, E. La Placa, A. Massafra, C. Mosca, F. Sommese. "A systematic review of

energy retrofitting by means of innovative envelope technologies: current state and future trends". In: ARTEC INNOVATI AWARD 2022

Corsi di perfezionamento

2023 – Corso "Architectural Engineering methods and research tools", Università Politecnica delle Marche nell'ambito del corso di dottorato in Ingegneria Civile, Ambientale, Edile e Architettura. Responsabile del corso: Prof. Marco D'Orazio

2023 – Corso di ottimizzazione strutturale, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Sapienza Università di Roma. Docenti: Prof. Franco Bontempi, Prof. Francesco Petrini, Prof.ssa Patrizia Trovalusci, Prof.ssa Elena Mele, Dr. Valentina Tomei

RINGRAZIAMENTI

Questa ricerca è il frutto di paziente studio e impegno, ma anche il risultato dei contributi fondamentali di alcune figure a cui desidero esprimere la mia gratitudine.

Grazie

alle professoresse Marina Pugnaletto e Cesira Paolini per avermi indirizzata e supportata nel corso di tutta la ricerca;

al professore Edoardo Currà per avermi offerto la possibilità di far parte del suo gruppo di ricerca;

alla collega di dottorato Cassia De Lian Cui per essere stata una compagna di viaggio sempre disponibile al confronto con le sue spiccate doti professionali e umane;

all' ing. Federico D'Amico per avermi fornito il suo validissimo contributo tecnico nell'ambito delle simulazioni di ottimizzazione e per avermi introdotta con pazienza in questo ambito per me del tutto nuovo;

alla società Altair per aver creduto in questo progetto e avermi messo a disposizione i suoi prodotti software;

agli ingegneri Marco Castellani, Pier Luca Bruschetti Sciarra e Pasquale Leonardi per avermi sostenuta in alcune fasi della ricerca con professionalità e competenza;

all' ing. Jason Sabatini, compagno di studi e stimato professionista, per avermi fornito la sua consulenza nell'elaborazione del modello energetico;

ai carissimi Martina e Stefano per essermi stati sempre accanto con amore, anche nei momenti in cui il lavoro intenso ha monopolizzato le mie giornate.

E infine grazie ai miei genitori per avermi, ognuno a suo modo, sostenuta e consigliata amorevolmente in ogni fase del percorso di dottorato.