



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Scuola di Dottorato in Ingegneria Civile ed Architettura

Corso di Dottorato in Ingegneria dell'Architettura e dell'Urbanistica (16162)

Curriculum: Ingegneria Edile Architettura

Ciclo XXXI

A.A. 2017-2018

LA PIETRA MASSIVA NELLA PROGETTAZIONE

Dalle caratteristiche dei materiali alle valenze energetico-architettoniche di involucri lapidei massivi “innovativi”



Dottoranda: Silvia Mariani

Supervisore: Prof. Ing. Marco Ferrero

*“Non ci aspettiamo proprio niente dai materiali in sé, ma soltanto dal loro uso corretto. Persino i nuovi materiali non ci garantiscono alcuna superiorità. Ogni materiale ha solo il valore che da esso sappiamo trarre.”*¹

Mies van der Rohe, 1938

¹ La frase è tratta dal “Discorso inaugurale in qualità di direttore del dipartimento di Architettura presso l’Armour Institute of Technology (AIT)” tenuto da Mies van der Rohe il 20 novembre 1938 (In: Neumeyer F (1996) *Ludwig Mies van der Rohe. Le architetture, gli scritti*. Milano: Skira editore, p. 307) (Zerbi, 2009).

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il professor Marco Ferrero per aver condiviso con me la sua esperienza sugli aspetti tecnico-costruttivi delle architetture in pietra e per avermi guidato nell'attività di ricerca con la massima attenzione e disponibilità.

Ringrazio tutti i professori del collegio del Corso di Dottorato in Ingegneria dell'Architettura e dell'Urbanistica per le preziose indicazioni che hanno contribuito a migliorare il lavoro di tesi.

Ringrazio la dottoressa Federica Rosso che mi ha sostenuto da un punto di vista scientifico e umano e che con il suo lavoro è stata per me un esempio da seguire.

Ringrazio in modo speciale i miei genitori che hanno condiviso con me i momenti più belli e quelli più difficili del percorso di Dottorato e che mi hanno sempre incoraggiato e sostenuto.

INDICE RAGIONATO

INDICE DELLE FIGURE	13
INDICE DELLE TABELLE.....	19
ABSTRACT.....	23
INTRODUZIONE.....	25
<u>Premessa terminologica.....</u>	<u>25</u>
<u>Motivazioni della ricerca.....</u>	<u>25</u>
<u>Obiettivi.....</u>	<u>37</u>
<u>Metodologia e articolazione della ricerca</u>	<u>37</u>
1. ANALISI DELLE DIVERSE TIPOLOGIE DI MATERIALI LAPIDEI	43

Abstract La pietra è il più antico materiale da costruzione e per secoli ha avuto un ruolo centrale nel progetto di architettura. La conoscenza approfondita delle caratteristiche e delle proprietà delle pietre naturali è necessaria per operare scelte progettuali consapevoli. Attualmente, inoltre, possono essere impiegati nella progettazione anche materiali lapidei artificiali che possono consentire di riprodurre i caratteri dei litotipi naturali per favorire l'integrazione dell'opera di progetto nel contesto. Le ulteriori potenzialità connesse con questi materiali risiedono nella garanzia dell'omogeneità delle caratteristiche e delle proprietà e nella possibilità di ottenere prestazioni superiori rispetto ai litotipi di origine. I materiali artificiali qualora siano realizzati con scarti lapidei, presentano, inoltre, benefici ambientali.

Il capitolo sintetizza le conoscenze di base sui materiali lapidei naturali ed artificiali. Lo studio delle pietre naturali viene sviluppato a partire dalle classificazioni geologiche e merceologiche e prosegue con l'analisi delle proprietà tecniche dei diversi litotipi. Relativamente ai materiali lapidei artificiali, l'analisi ricomprende i lapidei agglomerati a matrice cementizia e resinosa ed i calcestruzzi ottenuti dagli scarti di estrazione o di lavorazione della pietra naturale impiegati come aggregati o in parziale sostituzione del legante cementizio.

1.1. LE PIETRE NATURALI	43
<u>1.1.1. Classificazioni.....</u>	<u>43</u>
<u>1.1.1.1. La classificazione geologica</u>	<u>43</u>
<u>1.1.1.2. Classificazione merceologica.....</u>	<u>45</u>
<u>1.1.2. Proprietà tecniche, prestazioni e caratteristiche delle pietre naturali</u>	<u>46</u>
<u>1.1.2.1. Colore.....</u>	<u>49</u>

1.1.2.2. Durabilità	49
1.1.2.3. Lavorabilità	53
1.1.2.4. Proprietà meccaniche	55
1.1.2.5. Peso specifico e peso di volume delle pietre.....	56
1.1.2.6. Porosità e permeabilità.....	57
1.1.2.7. Proprietà termiche	58
1.1.2.8. Resistenza all'usura o logorabilità	58
1.2. MATERIALI ARTIFICIALI DERIVATI DALLA PIETRA	60
1.2.1. Calcestruzzi ottenuti da scarti di estrazione o lavorazione della pietra.....	60
1.2.2. I lapidei agglomerati.....	61

2. ANALISI DELLE TECNICHE DI LAVORAZIONE PER LA PRODUZIONE DI PRODOTTI LAPIDEI..... 67

Abstract La conoscenza delle tecniche di lavorazione applicabili per realizzare prodotti lapidei è essenziale per la comprensione della varietà dei possibili esiti architettonici e dei limiti posti alla progettazione. Inoltre, consente di selezionare il tipo di attrezzatura o di trattamento più adatti al materiale impiegato.

Il capitolo descrive sinteticamente le tecniche di lavorazione tradizionali delle pietre naturali e approfondisce le fasi attuali di trasformazione dei lapidei (riquadratura, segagione, taglio e rifilatura, trattamento superficiale) evidenziando anche le caratteristiche dei macchinari impiegati. Esamina, inoltre, le fasi di produzione dei lapidei agglomerati.

2.1. LA LAVORAZIONE DELLE PIETRE NATURALI	67
2.1.1. Cenni storici.....	67
2.1.2. Le tecniche attuali di lavorazione	69
2.1.2.1 Riquadratura.....	69
2.1.2.2. Segagione	70
2.1.2.3. Taglio e rifilatura	72
2.1.2.4. Tagli e lavorazioni speciali	73
2.1.2.5. Trattamenti superficiali	73
2.2. LA LAVORAZIONE DEI LAPIDEI AGGLOMERATI	75
2.2.1. Le tecniche di fabbricazione.....	75
2.2.2. Le fasi di produzione in impianti basati su tecnologie di vibrocompressione.....	75
2.2.2.1. La preparazione dell'impasto.....	76
2.2.2.2. La formatura.....	76
2.2.2.3. L'indurimento	78
2.2.2.4. La finitura.....	78

3. ANALISI DEI METODI E DEGLI STRUMENTI INNOVATIVI PER LA PROGETTAZIONE E LA REALIZZAZIONE DI ARCHITETTURE IN PIETRA 83

Abstract Nella cultura architettonica contemporanea c'è stata una riscoperta della pietra massiva attraverso il recupero e l'attualizzazione di tecniche costruttive tradizionali o la diffusione di tecniche innovative. Questo rinnovamento del linguaggio architettonico è stato consentito dalle molteplici innovazioni che hanno interessato il settore lapideo. Le tecnologie digitali, infatti, hanno messo a disposizione dei progettisti nuovi metodi e strumenti per la modellazione computazionale e per il *form-finding* che sono stati applicati anche a strutture ad arco o a volta in pietra estendendo le potenzialità della tradizionale tecnica stereotomica che per secoli è stata il fondamento per disegnare e costruire spazi voltati: il passaggio dalla stereotomia alla stereotomia digitale legata anche a *software* di progettazione parametrica e a metodi di *form-finding* basati non più su modelli fisici ma su modelli digitali e la disponibilità di programmi di calcolo hanno ampliato le possibilità di ricerca formale dei progettisti e hanno reso possibile attualizzare strutture ad arco o a volta in conci di pietra. Inoltre, le tecniche tradizionali di lavorazione impiegate nel settore lapideo sono state profondamente innovate consentendo di realizzare prodotti lapidei di forma complessa con tempi e costi di fabbricazione ridotti, impiegando in modo efficiente il materiale o recuperando gli scarti. L'innovazione più importante per la realizzazione di prodotti lapidei è legata all'introduzione dei sistemi integrati CAD/CAM/CNC e alla stampa 3D: queste tecnologie, infatti, hanno consentito di rimuovere molte delle limitazioni al progetto di architetture in pietra e hanno reso possibili nuovi linguaggi basati sull'attualizzazione di elementi tecnici tradizionali in conci di pietra.

Il capitolo sistematizza i risultati di alcune ricerche innovative finalizzate al progetto e alla costruzione in pietra massiva. In particolare, vengono indagate le rinnovate valenze progettuali della stereotomia ed il suo legame con la topologia e con la modellazione informatica indiretta eseguita attraverso *software* parametrici, fornendo anche un quadro di riferimento storico per comprendere l'evoluzione della disciplina. Vengono, inoltre, analizzati alcuni metodi computazionali di analisi strutturale e di *form-finding* tra cui il *Particle-Spring System* e il *Thrust Network Analysis*. Vengono esposte, infine, le potenzialità dei sistemi CAD/CAM/CNC e della stampa 3D.

3.1. METODI E STRUMENTI INNOVATIVI DI PROGETTAZIONE 83

3.1.1. Stereotomia 83

3.1.1.1. Cenni storici 83

3.1.1.2. Le ricerche 85

3.1.2. Metodi computazionali di *form-finding* e di analisi strutturale 90

3.1.2.1 Cenni storici 90

3.1.2.1.1. Le prime teorie statiche per l'analisi di strutture in pietra tradizionali 90

3.1.2.1.2. I metodi di *form-finding* basati su modelli fisici 92

3.1.2.2. Le ricerche 93

3.2. SISTEMI INNOVATIVI DI REALIZZAZIONE DI PRODOTTI LAPIDEI 99

3.2.1. Sistemi integrati CAD/CAM/CNC lavoranti per asportazione di materiale 99

3.2.1.1. Tipologie di macchine CNC lavoranti per asportazione di materiale 100

3.2.1.2. Le ricerche 101

3.2.2. La stampa 3D.....	102
3.2.2.1. Cenni storici.....	102
3.2.2.2. Le ricerche.....	103

4. ANALISI DELLE TECNICHE COSTRUTTIVE CONTEMPORANEE ATTRAVERSO CASI DI STUDIO 109

Abstract Nella cultura architettonica contemporanea, accanto alle tendenze di assottigliamento della materia lapidea, c'è stata una riscoperta della pietra massiva attraverso il recupero e l'attualizzazione della tecnica costruttiva tradizionale della muratura e la diffusione di tecniche innovative come quelle della pietra armata e dei gabbioni, adottate per realizzare pareti perimetrali e strutture in elevazione. Il rinnovamento del linguaggio architettonico è legato al riconoscimento delle potenzialità della pietra massiva connesse a valori espressivi e di sostenibilità economica e ambientale. L'uso massivo della pietra naturale, infatti, è motivato non solo dall'esigenza di integrarsi con il paesaggio, reinterpretare la cultura costruttiva tradizionale ed esprimere l'identità locale ma anche dalla possibilità di realizzare con costi e tempi di costruzione contenuti elementi tecnici durevoli, dotati di elevata inerzia termica, facilmente riciclabili o ottenuti attraverso il recupero o il riciclo di materiale lapideo di scarto. Le potenzialità della pietra massiva sono state valorizzate anche attraverso lo sviluppo di soluzioni tecniche di involucro che, rispetto alla cultura costruttiva lapidea tradizionale, presentano dei caratteri innovativi dal punto di vista tecnico, prestazionale e/o linguistico.

Il capitolo traccia sinteticamente l'evoluzione storica delle tecniche costruttive della muratura, della pietra armata e dei gabbioni. Descrive, inoltre, le diverse soluzioni costruttive adottate nella cultura architettonica contemporanea evidenziandone le valenze espressive e prestazionali attraverso il riferimento a opere di rilievo nazionale ed internazionale. Il capitolo comprende, infatti, delle schede di analisi delle opere selezionate come casi di studio: le schede riportano la descrizione dell'edificio, il tipo di materiale lapideo impiegato, l'analisi della tecnica costruttiva prescelta e le motivazioni che hanno condotto i progettisti ad impiegare un determinato tipo di materiale o di soluzione costruttiva. Il capitolo sintetizza, infine, le potenzialità e i caratteri innovativi delle soluzioni di involucro adottate nei casi di studio rispetto ai sistemi murari tipici della cultura costruttiva lapidea tradizionale.

4.1. SISTEMI MURARI	109
4.1.1. Cenni storici.....	109
4.1.2. Muri portanti a conci di pietra	110
4.1.3. Muri portanti a tecnologia mista.....	112
4.1.4. Muri autoportanti di tamponatura o di paramento.....	113
4.1.5. Schede di analisi di casi di studio	115
4.2. LA PIETRA ARMATA	152
4.2.1. Cenni storici.....	152
4.2.2. Le ricerche contemporanee.....	154
4.2.3. Schede di analisi di casi di studio	157

<u>4.3. GABBIONI</u>	<u>171</u>
<u>4.3.1. Cenni storici.....</u>	<u>171</u>
<u>4.3.2. Le ricerche contemporanee e le potenzialità della tecnica costruttiva</u>	<u>173</u>
<u>4.3.3. Schede di analisi di casi di studio</u>	<u>175</u>
<u>4.4. ELEMENTI EMERSI DALL'ANALISI DEI CASI DI STUDIO.....</u>	<u>197</u>
<u>4.4.1. Riscoperta e potenzialità degli involucri in pietra massiva</u>	<u>197</u>
<u>4.4.2. Innovatività degli involucri lapidei massivi contemporanei rispetto alla cultura costruttiva lapidea tradizionale</u>	<u>198</u>

5. ANALISI DELLE PRESTAZIONI TERMICO-ENERGETICHE DI INVOLUCRI LAPIDEI MASSIVI INNOVATIVI..... 203

Abstract Gli involucri lapidei massivi presentano delle potenzialità connesse a valori di sostenibilità ambientale che hanno contribuito al rinnovamento linguistico della cultura architettonica contemporanea. In particolare, l'impiego del materiale lapideo in spessori rilevanti permette di realizzare elementi costruttivi dotati di elevata inerzia termica, proprietà essenziale per il miglioramento delle condizioni di comfort termico interno e per la riduzione della domanda energetica per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici. Nel capitolo viene verificato che, in termini di consumo energetico, involucri lapidei innovativi sviluppati dalla cultura architettonica contemporanea presentano dei vantaggi rispetto a involucri lapidei tradizionali a corpo unico, sia nella stagione estiva che in quella invernale. In termini di comfort termico interno, inoltre, la prestazione invernale delle soluzioni costruttive contemporanee è risultata migliore di quella tipica degli involucri tradizionali mentre nella stagione estiva gli svantaggi quantificati per le temperature operative, il tempo di ritardo e il valore di attenuazione sono contenuti. È stato mostrato, infine, che i vantaggi prestazionali degli involucri innovativi non sono relativi ad una specifica zona climatica del territorio nazionale ma possono essere ottenuti in differenti contesti geografici italiani.

Il capitolo riassume le prescrizioni e le indicazioni normative relative all'inerzia termica e sintetizza i risultati, gli approcci di calcolo e le metodologie di ricerche relative all'influenza di questa proprietà sulla prestazione termico-energetica degli edifici. Analizza, inoltre, il comportamento delle soluzioni costruttive innovative di involucro adottate nelle opere di Zumthor, Abril e Bernhard analizzate nel capitolo 4, in rapporto a quello di involucri tradizionali in muratura lapidea a corpo unico per valutarne i benefici in termini di comfort termico e di consumo energetico. Lo studio prestazionale viene condotto su un edificio residenziale di progetto attraverso simulazioni dinamiche annuali, variando il contesto geografico di riferimento. La validazione viene effettuata per il caso tradizionale di riferimento attraverso la comparazione dei risultati ottenuti con la simulazione dinamica e con un'analisi semplificata in regime stazionario.

<u>5.1. INERZIA TERMICA</u>	<u>203</u>
<u>5.1.1. Definizione e importanza nella storia dell'architettura</u>	<u>203</u>
<u>5.1.2. Riferimenti normativi</u>	<u>203</u>
<u>5.1.2.1. Legislazione italiana</u>	<u>203</u>

5.1.2.2. Norme tecniche	205
5.1.3. Ricerche su involucri edilizi ad elevata inerzia termica	206
5.1.3.1. L'inerzia termica in rapporto con la prestazione termico-energetica degli edifici ..	206
5.1.3.2. Approcci di calcolo	207
5.1.3.3. Metodologia adottata.....	209
5.2. EFFICIENZA PRESTAZIONALE DI INVOLUCRI INNOVATIVI IN PIETRA MASSIVA IN RAPPORTO ALLE TECNICHE TRADIZIONALI DELL'EDILIZIA STORICA.....	211
5.2.1. Introduzione.....	211
5.2.2. Metodologia.....	211
5.2.3. Risultati e discussione.....	215
5.2.3.1. Risultati dell'analisi in regime stazionario e dinamico sul caso di riferimento e validazione del modello	215
5.2.3.2. Risultati dell'analisi comparativa in regime dinamico	216
5.2.4. Conclusioni.....	221
5.3. STUDIO DELLE PRESTAZIONI DI INVOLUCRI INNOVATIVI E TRADIZIONALI IN PIETRA MASSIVA IN DIVERSE CONDIZIONI CLIMATICHE.....	222
5.3.1. Metodologia.....	222
5.3.2. Risultati e discussione.....	223
5.3.2.1. Prestazioni degli involucri studiati nelle condizioni climatiche di Bologna.....	223
5.3.2.2. Prestazioni degli involucri studiati nelle condizioni climatiche di Catania	229
5.3.3. Raffronto tra i risultati ottenuti nei diversi contesti di studio.....	235
5.3.4. Conclusioni.....	239
6. ANALISI DI INVOLUCRI EDILIZI A GABBIONI	243

Abstract La tecnica dei gabbioni introdotta in architettura dalla fine del XX secolo, presenta numerose potenzialità espressive e prestazionali per la realizzazione di involucri edilizi. Risulta applicabile, infatti, a diverse tipologie edilizie e consente di recuperare o riciclare scarti lapidei di estrazione o demolizione e di definire pareti perimetrali ad alta inerzia termica. Inoltre, la varietà della forma, della dimensione, dei colori e della disposizione degli elementi lapidei di riempimento e l'accostamento con altri materiali costituenti l'involucro edilizio consentono di ottenere molteplici esiti architettonici.

Il capitolo analizza la prestazione termico-energetica di involucri multistrato a gabbioni in diversi contesti geografici di riferimento attraverso simulazioni dinamiche annuali. L'analisi prestazionale viene condotta sul medesimo edificio residenziale di progetto modellato nel capitolo 5, variando lo spessore dei gabbioni, la tipologia di pietra impiegata per il riempimento dei moduli costruttivi, la percentuale dei vuoti e la stratigrafia di parete. La comparazione tra le diverse soluzioni studiate e la definizione di correlazioni tra le caratteristiche dell'elemento costruttivo e la prestazione termico-energetica dell'edificio, fornisce indicazioni per valutare l'appropriatezza delle scelte compiute in fase di progettazione dell'involucro al fine di minimizzare la domanda energetica per il riscaldamento

e il raffrescamento degli edifici e migliorare le condizioni di comfort termico interno nel clima mediterraneo.

Il capitolo descrive, inoltre, i caratteri architettonici di involucri edilizi a gabbioni legati alle possibili tipologie di *texture* del riempimento litico dei moduli costruttivi e alle specifiche soluzioni tecniche progettate per la risoluzione di problemi connessi con l'inserimento di aperture vetrate o di altri materiali di rivestimento e con lo smaltimento dell'acqua piovana. L'analisi viene sviluppata attraverso il riferimento ad architetture contemporanee e l'individuazione di analogie figurative con opere e manufatti realizzati con tecniche costruttive tradizionali.

<u>6.1. ANALISI PRESTAZIONALE DI INVOLUCRI MULTISTRATO A GABBIONI.....</u>	<u>243</u>
<u>6.1.1. Involucri multistrato a gabbioni.....</u>	<u>243</u>
<u>6.1.1.1. Motivazioni</u>	<u>243</u>
<u>6.1.1.2. Caratteristiche correlate alla prestazione termico-energetica</u>	<u>247</u>
<u>6.1.2. Indicazioni per la progettazione di involucri a gabbioni in clima mediterraneo</u>	<u>249</u>
<u>6.1.2.1. Metodologia e definizione dei casi di studio</u>	<u>249</u>
<u>6.1.2.2. Valutazione della prestazione energetica</u>	<u>254</u>
<u>6.1.2.3. Valutazione della prestazione termica</u>	<u>264</u>
<u>6.1.2.4. Conclusioni e indicazioni progettuali</u>	<u>278</u>
<u>6.2. CARATTERI ARCHITETTONICI DI INVOLUCRI EDILIZI A GABBIONI</u>	<u>282</u>
<u>6.2.1. Texture del riempimento litico</u>	<u>282</u>
<u>6.2.2. Aspetti applicativi e costruttivi</u>	<u>289</u>
7. CONCLUSIONI.....	299

Abstract La ricerca, oltre ad esaminare le tipologie e le caratteristiche dei materiali lapidei impiegabili nella progettazione e a sistematizzare le conoscenze relative alle diverse tecniche di lavorazione, ha evidenziato come nella cultura architettonica contemporanea ci sia stata una riscoperta della pietra massiva attraverso la diffusione delle tecniche costruttive della muratura, della pietra armata e dei gabbioni. È emerso che il rinnovamento del linguaggio architettonico è stato consentito dalle molteplici innovazioni che hanno interessato il settore lapideo, in particolare dalla diffusione dei sistemi integrati CAD/CAM/CNC, dal passaggio dalla stereotomia alla stereotomia digitale e dalla disponibilità di metodi di *form-finding* basati su modelli digitali. La ricerca ha evidenziato, inoltre, come questo rinnovamento linguistico sia legato anche al riconoscimento delle potenzialità della pietra massiva, connesse a valori espressivi e di sostenibilità economica ed ambientale. Lo studio delle tecniche costruttive contemporanee della muratura, della pietra armata e dei gabbioni, ha rilevato che le potenzialità della pietra massiva sono state valorizzate anche attraverso lo sviluppo di soluzioni tecniche di involucro che, rispetto alla cultura costruttiva lapidea tradizionale, presentano dei caratteri innovativi dal punto di vista tecnico, prestazionale e/o linguistico: la maggior parte degli involucri lapidei contemporanei, infatti, reinterpreta le valenze espressive della cultura costruttiva lapidea tradizionale senza adottare un approccio storicistico ed è stata progettata secondo il principio del corpo multiplo. La ricerca ha approfondito lo studio delle

potenzialità prestazionali connesse con l'elevata inerzia termica degli involucri contemporanei realizzati secondo la tecnica della muratura e dei gabbioni. Attraverso simulazioni dinamiche annuali, è stato dimostrato che le soluzioni tecniche attuali a corpo multiplo superano le carenze prestazionali delle murature storiche a corpo unico e mantengono le potenzialità connesse con gli attributi di massività ed elevata inerzia termica nonostante il cambiamento del principio costruttivo alla base della progettazione. È stato verificato in tre diversi contesti climatici che le soluzioni di involucro contemporanee consentono una riduzione significativa dei consumi energetici per il riscaldamento e il raffrescamento, garantiscono un miglioramento del comfort termico interno nella stagione invernale rispetto alle soluzioni tradizionali e permettono di mantenere le temperature superficiali interne delle pareti più stabili rispetto a quelle esterne nella stagione estiva. La ricerca è stata approfondita in relazione agli involucri multistrato a gabbioni dal punto di vista della prestazione termico-energetica e dei caratteri architettonici. Attraverso la comparazione dei risultati di simulazioni dinamiche annuali, è emerso che la tipologia di pietra di riempimento e il tipo di stratigrafia influiscono maggiormente sulla prestazione termico-energetica dell'involucro rispetto allo spessore e alla porosità dei moduli costruttivi e che, nei contesti caratterizzati dal clima mediterraneo, dovrebbero essere privilegiate soluzioni tecniche con isolante posto all'esterno e riempimento in materiali lapidei di colore scuro e ad alta densità. Dall'analisi dei caratteri architettonici, è emerso che gli involucri a gabbioni si prestano alla progettazione di edifici che, per la *texture* del riempimento litico dei moduli costruttivi, richiamano le costruzioni storiche in muratura lapidea irregolare e che al contempo, per la combinazione con altri materiali, fanno riferimento al linguaggio architettonico attuale. La definizione di un equilibrio tra il carattere espressivo tradizionale e contemporaneo appare possibile, però, solo a patto di definire soluzioni costruttive specifiche che risolvano i problemi connessi con l'inserimento di aperture vetrate o di altri materiali di rivestimento e con lo smaltimento dell'acqua piovana.

Il lavoro di ricerca presenta diverse possibilità di sviluppo e approfondimento futuri. L'analisi della prestazione termico-energetica di involucri a gabbioni, in particolare, può essere sviluppata attraverso una caratterizzazione sperimentale delle due tipologie di pietra considerate per il riempimento dei moduli costruttivi e attraverso la misurazione dell'assorbanza e dell'emissività su campi di prova ricoperti da frammenti lapidei a diversa granulometria. Un ulteriore approfondimento sperimentale potrebbe essere condotto su un modulo costruttivo a gabbioni al fine di valutare l'influenza dei fenomeni di imbibizione della pietra sui processi di scambio termico.

<u>7.1. RISULTATI</u>	<u>299</u>
<u>7.2. POSSIBILI SVILUPPI E APPROFONDIMENTI DELLA RICERCA</u>	<u>304</u>
GLOSSARIO	305
BIBLIOGRAFIA	307
SITOGRAFIA	321

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1 Un edificio con involucro in muratura lapidea e ammorsature d'angolo realizzate con grandi elementi squadrate di pietra	25
Fig. 2 La Neue Staatgalerie progettata da Stirling e Wilford e il dettaglio della parete del garage ..	27
Fig. 3 Il centro culturale a Sines e il Rettorato della Universidade Nova di Lisbona progettati da Manuel e Francisco Aires Mateus; il Centro Galego de Arte Contemporanea progettato da Siza....	27
Fig. 4 Vista di un setto del Museo della Fondazione Beyeler Riehen progettato da Renzo Piano; la facciata della sede del Laboratorio Prove Materiali dello IUAV progettata da Francesco Venezia .	27
Fig. 5 L'edificio per appartamenti ed uffici Bewag progettato da Max Dudler e vista di dettaglio della facciata ventilata con rivestimento in lastre sottili di arenaria grigia e ancoraggi a vista; il centro culturale di Federation Square progettato da Lab architecture studio e vista di dettaglio della facciata con rivestimento in arenaria, vetro e acciaio zincato	28
Fig. 6 L'edificio sede dell'Unione delle Banche Svizzere progettato da Mario Botta	28
Fig. 7 Gli Uffici del Presidente, edificio progettato da Gruber + Kleine - Kraneburg; la Biblioteca Regionale progettata a Dresda dallo studio Ortner & Ortner.....	29
Fig. 8 La parete in alabastro della Caja De Ahorros progettata da Alberto Campo Baeza (a); le pareti in onice del municipio di San Fernando de Henares progettato da Sancho-Madrirdejos (b); la parete diaframma in marmo bianco dell'Istitut du Monde Arabe progettato da Jean Nouvel (c)	29
Fig. 9 Gli involucri traslucidi del Christ Pavilion progettato da Von Gerkan, Marg & Partners e della sede della Deutsche Bundesbank progettata a Chemnitz da Lluís Mateo con MAP Architects.....	30
Fig. 10 Vista dell'interno delle cantine progettate a Vauvert da Perraudin caratterizzate da muri portanti in pietra; la cappella progettata da Eduardo Souto de Moura per la XVI Biennale di Architettura di Venezia	30
Fig. 11 Particolare del prospetto laterale delle terme di Vals progettate da Zumthor; il prospetto principale della Casa a Bom Jesus progettata da Souto de Moura.....	31
Fig. 12 Il prospetto principale del municipio di Iragua progettato da Cavadini; il prospetto sud della casa privata progettata a Séniergues da Gouwy, Grima, Rames.....	31
Fig. 13 Dettaglio della muratura lapidea del Scuola di Alti Studi Musicali della Galizia progettata da Abril; vista dell'esterno della Stone House progettata da Herzog & de Meuron	31
Fig. 14 Vista dell'interno dell'Aula Liturgia Padre Pio durante la costruzione e dettaglio degli archi in pietra armata progettati da Renzo Piano	32
Fig. 15 L'edificio per uffici progettato a Finsbury Square da Eric Parry e il Queen's Building progettato da Michael Hopkins caratterizzati da pilastri in pietra armata	32
Fig. 16 Viste dell'esterno dell'House in the Landscape progettata dallo Studio Kropka e dell'edificio residenziale Sei Unità di Guarnieri e Mascazzini caratterizzati da un involucro a gabbioni.....	32
Fig. 17 Vista dell'esterno della Dominus Winery progettata da Herzog & de Meuron caratterizzata da una muratura in gabbioni; particolari dei prospetti della casa privata Haus 9x9 progettata da Titus Bernhard e dell'edificio residenziale Château-Le-Lez progettato da Edouard François and Associates caratterizzati da un involucro a gabbioni	33
Fig. 18 Quote di mercato all'export nel settore mondiale della pietra naturale di Italia e Cina	36
Fig. 19 Localizzazione delle cave di pietra naturale in Europa	36
Fig. 20 Granito bianco sardo, granito bianco Montorfano e granito rosa Nule	44
Fig. 21 Travertino classico, travertino romano noce, peperino rosa.....	44
Fig. 22 Marmo arabescato Cervaiolo, marmo calacatta macchia oro, marmo fior di pesco carnico .	45
Fig. 23 La macchina di Germain Soufflot (1775) e la macchina di Rondelet (1787).....	48

Fig. 24 Scarti di estrazione della pietra naturale	60
Fig. 25 Texture agglomerate in quarzo-resina, con inserti di diverso tipo per Stone Italiana Spa. ...	62
Fig. 26 Lastre di quarzo e resina traslucide e retroilluminate, Santamargherita con Pongratz Perbellini Architects, Vincenzo Pavan e Fabrizio Mirandola, Marmomacc 2006	63
Fig. 27 Lo sbizzo grossolano	67
Fig. 28 Lo sbizzo dettagliato	68
Fig. 29 Macchina di taglio dei blocchi: il telaio monolama.....	70
Fig. 30 Segagione di un blocco di marmo con telaio multilama: visione inferiore e superiore alle mute di taglio	71
Fig. 31 Macchina tagliablocchi in azione	72
Fig. 32 Macchina di taglio <i>water-jet</i> in azione su un elemento architettonico di granito.....	73
Fig. 33 Vista di una camera di vibrocompattazione.....	75
Fig. 34 Vista di un impianto di mescolazione; mescolatrice ad assi orizzontali sottovuoto.....	76
Fig. 35 Le casseforme per la formatura in blocchi	77
Fig. 36 Vista di una pressa per la formatura degli agglomerati in lastre	77
Fig. 37 Vista del forno a piani per l'indurimento a caldo delle lastre.....	78
Fig. 38 Telai per la segagione di blocchi in lastre	79
Fig. 39 Una macchina calibratrice a rulli e una linea di macchine per la finitura delle lastre	79
Fig. 40 Frontespizio de <i>Le Premiere Tome de l'Architecture</i> , Philibert De l'Orme, 1567.....	83
Fig. 41 Foto dei trattati di Jacques Curabelle e Girard Desargues.....	84
Fig. 42 Frontespizio del trattato di A. F. Frézier.....	84
Fig. 43 Volta stereotomica su pianta esagonale	85
Fig. 44 I brevetti della volta piana di Abeille (1699) e di Truchet (1704); trasformazioni delle volte piane di Abeille e Truchet in volte a botte	87
Fig. 45 Processo parametrico-variazionale applicato ad una semisfera per mezzo del <i>software</i> Grasshopper	88
Fig. 46 Disegni e realizzazione del Portale Abeille	88
Fig. 47 Arco catenario e colonna a conci osteomorfi	89
Fig. 48 I diagrammi reciproci e il guscio tridimensionale ottenuto come soluzione attraverso il metodo TNA	95
Fig. 49 Schermate del plug-in RhinoVAULT.....	96
Fig. 50 L'Armadio Vault esposta alla Biennale di Venezia 2016 e progettata con RhinoVAULT dal gruppo di ricerca del professor Block dell'ETH di Zurigo	97
Fig. 51 Macchina a controllo numerico (tagliatrice a filo diamantato) in azione; elementi curvi in massello dopo le operazioni di taglio.....	99
Fig. 52 Rappresentazione schematica di una tagliatrice a filo diamantato a 4 assi a controllo numerico	101
Fig. 53 I filamenti in PLA (B) e in materiale composito basato su PLA e polvere di pietra leccese (C) prodotti attraverso un estrusore (A) per essere utilizzati in processi di stampa per deposizione	104
Fig. 54 Il padiglione Radiolaria progettato da A. Morgante e la stampante D-Shape3D	105
Fig. 55 La CasaTuttaDiUnPezzo progettata da Ferreri per la Triennale di Milano del 2010.....	105
Fig. 56 Il cantiere del quartiere costruito a Sarcelles (Val-d'Oise) da Labourdette e Boileau fra 1955 e 1970.....	111
Fig. 57 Sezione e dettaglio assonometrico di una parete realizzata con la tecnica " <i>form-moulded stone</i> "	113

Fig. 58 Dettaglio di una parete dell'edificio per uffici realizzato a Niort da Hervé Beaudouin con la tecnica "form-moulded stone"; foto della parete in costruzione	113
Fig. 59 La passerella in marmo armato precompresso realizzata a Carrara nel 1965: vista e sezione	153
Fig. 60 La trave precompressa realizzata a Carrara nel 1965	153
Fig. 61 La scala di accesso agli uffici della Sovrintendenza ai monumenti di Verona	154
Fig. 62 Particolare degli archi in pietra armata del Padiglione del Futuro progettati da Rice	155
Fig. 63 Muro in gabbioni realizzato nella stazione ferroviaria di Perca-Plan de Coronas (Bz)	171
Fig. 64 Muro di contenimento a gabbioni (Royal Tunbridge Wells, Kent).....	173
Fig. 65 La sede del Centro Ricerche Agronomiche di Reims e l'edificio CESNAC all'aeroporto di Bordeaux, progettati da Bertrand Bonnier	174
Fig. 66 Indicatori dell'inerzia termica.....	208
Fig. 67 Planimetrie, prospetto e sezione dell'edificio di progetto	212
Fig. 68 I casi di simulazione: riferimenti, stratigrafie, spessore totale, trasmittanza.....	213
Fig. 69 Consumo energetico annuale per il riscaldamento	216
Fig. 70 Consumo energetico annuale per il raffrescamento.....	217
Fig. 71 Calore scambiato dalle pareti con l'ambiente esterno durante l'anno	217
Fig. 72 Le temperature operative registrate all'interno dell'edificio nelle diverse ore di un tipico giorno invernale (12 Gennaio) e di un tipico giorno estivo (31 Luglio).....	218
Fig. 73 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso T[60].....	219
Fig. 74 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Zum]	219
Fig. 75 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Abr]	220
Fig. 76 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Ber].....	220
Fig. 77 Le temperature annuali esterne a bulbo secco, input delle simulazioni eseguite nei contesti di studio di Grosseto, Bologna e Catania, valutate su base oraria	222
Fig. 78 Consumo energetico annuale per il riscaldamento	224
Fig. 79 Consumo energetico annuale per il raffrescamento.....	224
Fig. 80 Calore scambiato dalle pareti con l'ambiente esterno durante l'anno	225
Fig. 81 Le temperature operative registrate all'interno dell'edificio nelle diverse ore di un tipico giorno invernale (12 Gennaio) e di un tipico giorno estivo (31 Luglio).....	225
Fig. 82 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso T[60].....	226
Fig. 83 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Zum]	226
Fig. 84 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Abr]	227
Fig. 85 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Ber].....	227
Fig. 86 Consumo energetico annuale per il riscaldamento	229
Fig. 87 Consumo energetico annuale per il raffrescamento.....	230
Fig. 88 Calore scambiato dalle pareti con l'ambiente esterno durante l'anno	230

Fig. 89 Le temperature operative registrate all'interno dell'edificio nelle diverse ore di un tipico giorno invernale (12 Gennaio) e di un tipico giorno estivo (31 Luglio).....	231
Fig. 90 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso T[60].....	232
Fig. 91 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Zum]	232
Fig. 92 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Abr]	233
Fig. 93 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Ber].....	233
Fig. 94 Consumo energetico annuale per il riscaldamento calcolato per i tre contesti di studio	235
Fig. 95 Consumo energetico annuale per il raffrescamento calcolato per i tre contesti di studio ...	236
Fig. 96 Le temperature operative giornaliere medie dei diversi casi nei tre contesti di studio, valutate in un tipico giorno invernale (12 Gennaio).....	237
Fig. 98 I valori di attenuazione (f) dei diversi casi nei tre contesti di studio, valutati considerando le massime temperature superficiali esterne ed interne raggiunte in un tipico giorno estivo (31 Luglio)	238
Fig. 99 I valori del tempo di ritardo ϕ valutati per le pareti sud dei quattro casi di simulazione nei tre contesti di studio, considerando le massime temperature superficiali esterne ed interne raggiunte in un tipico giorno estivo (31 Luglio)	239
Fig. 100 House in the Landscape	244
Fig. 101 Gabions House.....	244
Fig. 102 Westcliff-Estate	244
Fig. 103 Vista dell'esterno della residenza Base Camp.....	245
Fig. 104 Villa a Garrigàs.....	245
Fig. 105 Gli alloggi Château-le-lez.....	245
Fig. 106 Sei Unità	246
Fig. 107 Blackrock Police Training Centre	246
Fig. 108 Il Conference Building dell'Earth Centre e la Prayer room di Kwait City	246
Fig. 109 Orfanotrofio Falatow Jigiyaso	247
Fig. 110 Nestlé Waters.....	247
Fig. 111 Energia annuale per il riscaldamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1	254
Fig. 112 Energia annuale per il riscaldamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2	255
Fig. 113 Energia annuale per il raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1	257
Fig. 114 Energia annuale per il raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2.....	258
Fig. 115 Energia annuale totale per riscaldamento e raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1	260
Fig. 116 Energia annuale totale per riscaldamento e raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2	261
Fig. 117 Energia annuale totale per riscaldamento e raffrescamento nel contesto di Grosseto.....	262
Fig. 118 Energia annuale totale per riscaldamento e raffrescamento nel contesto di Bologna	263
Fig. 119 Energia annuale totale per riscaldamento e raffrescamento nel contesto di Catania.....	264
Fig. 120 Temperature operative medie in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1	265
Fig. 121 Temperature operative medie in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2.....	266

Fig. 122 Temperature operative medie in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per il contesto di Grosseto	267
Fig. 123 Temperature operative medie in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per il contesto di Bologna	268
Fig. 124 Temperature operative medie in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per il contesto di Catania	268
Fig. 125 Temperature operative medie in un tipico giorno estivo (31 Luglio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1.....	269
Fig. 126 Temperature operative medie in un tipico giorno estivo (31 Luglio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2.....	270
Fig. 127 Temperature operative medie in un tipico giorno estivo (31 Luglio) per il contesto di Grosseto	271
Fig. 128 Temperature operative medie in un tipico giorno estivo (31 Luglio) per il contesto di Bologna	272
Fig. 129 Temperature operative medie in un tipico giorno estivo (31 Luglio) per il contesto di Catania	272
Fig. 130 Valori di attenuazione delle pareti sud dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1, calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio)	273
Fig. 131 Valori di attenuazione delle pareti sud dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 2, calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio)	275
Fig. 132 Valori di attenuazione delle pareti sud calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio) nel contesto di Grosseto	276
Fig. 133 Valori di attenuazione delle pareti sud calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio) nel contesto di Bologna.....	277
Fig. 134 Valori di attenuazione delle pareti sud calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio) nel contesto di Catania.....	277
Fig. 135 <i>Texture</i> ad elementi lapidei irregolari.....	282
Fig. 136 Murature del Foro di Alba Fucens e del Santuario della Fortuna Primigenia di Palestrina	283
Fig. 137 Viste delle murature delle sostruzioni del Tempio di Giove Anxur.....	283
Fig. 138 Apparecchiatura muraria irregolare in pietre grezze	283
Fig. 139 Dettaglio del prospetto della Haus 9x9.....	284
Fig. 140 Dettaglio del prospetto della House in the Landscape.....	284
Fig. 141 Il muro a gabbioni della sede del circolo del London Regatta Centre.....	284
Fig. 142 <i>Texture</i> ad elementi lapidei arrotondati	285
Fig. 143 Muro di ciottoli.....	285
Fig. 144 Dettaglio del prospetto della Shoreham Beach House	286
Fig. 145 <i>Texture</i> ad elementi lapidei sbozzati.....	286
Fig. 146 Apparecchiatura muraria ad elementi sbozzati.....	287
Fig. 147 Muro ad elementi stratificati.....	287
Fig. 148 Muro di terrazzamento a Brenzone sul Garda (VR, Italia).....	287
Fig. 149 Blackrock Police Training Centre	288
Fig. 150 Palladiane.....	288
Fig. 151 Vista dell'esterno della Shoreham Beach House e dettaglio del prospetto	289
Fig. 152 Vista dell'esterno dell'edificio Château-le-lez e vista dall'alto di una delle logge.....	290

Fig. 153 Dettaglio costruttivo della sezione verticale dell'edificio Haus 9x9, che illustra la soluzione adottata per realizzare un rivestimento continuo funzionale allo smaltimento delle acque meteoriche	291
Fig. 154 Dettaglio costruttivo della sezione verticale dell'edificio Haus 9x9, che illustra la soluzione adottata per l'inserimento di aperture opache zenitali rivestite in legno di quercia	291
Fig. 155 Dettaglio costruttivo della sezione verticale dell'edificio Haus 9x9, che illustra la soluzione adottata per l'inserimento di aperture vetrate zenitali collegate con le finestre presenti sulle pareti verticali.....	292
Fig. 156 a-b Dettagli costruttivi che illustrano la soluzione adottata nell'edificio Sei Unità per realizzare un rivestimento continuo funzionale anche allo smaltimento delle acque meteoriche ...	293
Fig. 157 Dettaglio costruttivo che illustra la soluzione adottata nell'edificio Sei Unità per alternare il rivestimento in frantumato lapideo-laterizio con il rivestimento in rame.....	293
Fig. 158 a-b Dettagli costruttivi delle sezioni verticali dell'edificio House in the Landscape, che illustrano la soluzione adottata per lo smaltimento delle acque meteoriche e l'accostamento dei rivestimenti in gabbioni ed in metallo.....	294
Fig. 159 Dettaglio costruttivo che illustra la soluzione adottata nell'House in the Landscape per l'inserimento di un'apertura vetrata nella parete con rivestimento a gabbioni.....	295
Fig. 160 Dettaglio costruttivo che illustra la soluzione adottata nell'edificio Logements Les Galets per l'inserimento di un'apertura vetrata nella parete con rivestimento litico	295

INDICE DELLE TABELLE

Tabella. 1 Quote di mercato all'export nel settore mondiale della pietra naturale di Italia e Cina ...	35
Tabella. 2 Applicabilità dei principali trattamenti superficiali alle diverse tipologie di pietre naturali	74
Tabella. 3 La classificazione definita dal DM 26/6/2009 in relazione alla qualità termica estiva dell'involucro edilizio	205
Tabella. 4 Caratteristiche degli elementi costruttivi	214
Tabella. 5 Validazione dei risultati delle simulazioni condotte con Design Builder e MC 11300 ..	215
Tabella. 6 Energia totale consumata in un anno per i diversi casi di simulazione.....	216
Tabella. 7 Il tempo di ritardo (ϕ) e i valori di attenuazione (f) valutati per le pareti sud dei quattro casi di simulazione, considerando le massime temperature superficiali esterne ed interne raggiunte in un tipico giorno estivo (31 Luglio)	221
Tabella. 8 I tre contesti di studio scelti per le simulazioni dinamiche	222
Tabella. 9 Energia totale consumata in un anno per i diversi casi di simulazione.....	223
Tabella. 10 Il tempo di ritardo (ϕ) e i valori di attenuazione (f) valutati per le pareti sud dei quattro casi di simulazione, considerando le massime temperature superficiali esterne ed interne raggiunte in un tipico giorno estivo (31 Luglio)	228
Tabella. 11 Energia totale consumata in un anno per i diversi casi di simulazione.....	229
Tabella. 12 Il tempo di ritardo (ϕ) e i valori di attenuazione (f) valutati per le pareti sud dei quattro casi di simulazione, considerando le massime temperature superficiali esterne ed interne raggiunte in un tipico giorno estivo (31 Luglio)	234
Tabella. 13 Consumi energetici annuali per il riscaldamento per i cinque casi di simulazione nei tre contesti di studio	235
Tabella. 14 Medie dei consumi energetici annuali per il riscaldamento relative agli involucri tradizionali (casi T[40], T[60]) e agli involucri innovativi analizzati (casi I[Zum], I[Abr], I[Ber]), calcolate nei tre contesti di studio	235
Tabella. 15 Consumi energetici annuali per il raffrescamento per i cinque casi di simulazione nei tre contesti di studio	236
Tabella. 16 Medie dei consumi energetici annuali per il raffrescamento relative agli involucri tradizionali (casi T[40], T[60]) e agli involucri innovativi analizzati (casi I[Zum], I[Abr], I[Ber]), calcolate nei tre contesti di studio	236
Tabella. 17 I valori di attenuazione (f) valutati per le pareti sud dei quattro casi di simulazione nei tre contesti di studio, considerando le massime temperature superficiali esterne ed interne raggiunte in un tipico giorno estivo (31 Luglio)	238
Tabella. 18 I valori del tempo di ritardo (ϕ) valutati per le pareti sud dei quattro casi di simulazione nei tre contesti di studio, considerando le massime temperature superficiali esterne ed interne raggiunte in un tipico giorno estivo (31 Luglio)	238
Tabella. 19 Casi di simulazione con indicazione della stratigrafia, dello spessore del gabbione, del tipo di pietra di riempimento e del rapporto tra il volume dei vuoti (V_v) e il volume totale del modulo costruttivo (V_t).....	249
Tabella. 20 Principali proprietà delle due tipologie di pietra selezionate per l'analisi	250
Tabella. 21 Proprietà calcolate nella seconda fase del metodo di modellazione e utilizzate per definire nella libreria di Design Builder otto materiali equivalenti termicamente omogenei	251
Tabella. 22 Valori della trasmittanza termica delle pareti esterne degli otto casi di simulazione caratterizzati dalla stratigrafia 1	252

Tabella. 23 Valori della trasmittanza termica delle pareti esterne degli otto casi di simulazione caratterizzati dalla stratigrafia 2.....	252
Tabella. 24 Energia annuale per il riscaldamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1	254
Tabella. 25 Medie dei consumi energetici annuali per il riscaldamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 con riempimento in basalto e in calcare	255
Tabella. 26 Energia annuale per il riscaldamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2.....	255
Tabella. 27 Medie dei consumi energetici annuali per il riscaldamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 con riempimento in basalto e in calcare	256
Tabella. 28 Medie dei consumi energetici annuali per il riscaldamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 e 2.....	256
Tabella. 29 Energia annuale per il raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1	257
Tabella. 30 Medie dei consumi energetici annuali per il raffrescamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 con riempimento in basalto e in calcare	257
Tabella. 31 Energia annuale per il raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2	258
Tabella. 32 Medie dei consumi energetici annuali per il raffrescamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 con riempimento in basalto e in calcare	258
Tabella. 33 Medie dei consumi energetici annuali per il riscaldamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 e 2.....	259
Tabella. 34 Energia annuale totale per riscaldamento e raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1	259
Tabella. 35 Medie dei consumi energetici annuali per riscaldamento e raffrescamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 con riempimento in basalto e in calcare	260
Tabella. 36 Energia annuale totale per riscaldamento e raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2	261
Tabella. 37 Medie dei consumi energetici annuali per riscaldamento e raffrescamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 con riempimento in basalto e in calcare	261
Tabella. 38 Medie dei consumi energetici annuali per riscaldamento e raffrescamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 e 2	262
Tabella. 39 Temperature operative medie in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1	264
Tabella. 40 Medie delle temperature operative di un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 con riempimento in basalto e in calcare	265
Tabella. 41 Temperature operative medie in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2	266
Tabella. 42 Medie delle temperature operative di un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 con riempimento in basalto e in calcare	266
Tabella. 43 Medie delle temperature operative di un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 e 2	267
Tabella. 44 Temperature operative medie in un tipico giorno estivo (31 Luglio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1.....	269
Tabella. 45 Medie delle temperature operative di un tipico giorno estivo (31 Luglio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 con riempimento in basalto e in calcare	269
Tabella. 46 Temperature operative medie in un tipico giorno estivo (31 Luglio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2.....	270
Tabella. 47 Medie delle temperature operative di un tipico giorno estivo (31 Luglio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 con riempimento in basalto e in calcare	270

Tabella. 48 Medie delle temperature operative di un tipico giorno estivo (31 Luglio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 e 2	271
Tabella. 49 Valori di attenuazione e tempo di ritardo delle pareti sud dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1, calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio)	273
Tabella. 50 Medie dei valori di attenuazione e del tempo di ritardo delle pareti sud dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 con riempimento in basalto e in calcare, calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio).....	274
Tabella. 51 Valori di attenuazione e tempo di ritardo delle pareti sud dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 2, calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio)	274
Tabella. 52 Medie dei valori di attenuazione e del tempo di ritardo delle pareti sud dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 con riempimento in basalto e in calcare, calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio).....	275
Tabella. 53 Medie dei valori di attenuazione e del tempo di ritardo delle pareti sud dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 e 2, calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio)	276
Tabella. 54 Indicazioni progettuali per il clima di Grosseto basate sulla correlazione tra valori delle variabili analizzate e prestazione energetica	279
Tabella. 55 Indicazioni progettuali per il clima di Grosseto basate sulla correlazione tra valori delle variabili analizzate e prestazione termica	279
Tabella. 56 Indicazioni progettuali per il clima di Bologna basate sulla correlazione tra valori delle variabili analizzate e prestazione energetica	280
Tabella. 57 Indicazioni progettuali per il clima di Bologna basate sulla correlazione tra valori delle variabili analizzate e prestazione termica	280
Tabella. 58 Indicazioni progettuali per il clima di Catania basate sulla correlazione tra valori delle variabili analizzate e prestazione energetica	280
Tabella. 59 Indicazioni progettuali per il clima di Catania basate sulla correlazione tra valori delle variabili analizzate e prestazione termica	281

ABSTRACT

La pietra naturale per secoli ha avuto un ruolo centrale nel progetto di architettura ma con la diffusione del calcestruzzo e dell'acciaio è stata impiegata prevalentemente in elementi sottili di rivestimento. Attualmente, però, c'è stata nella cultura architettonica contemporanea una riscoperta della pietra massiva attraverso il recupero e l'attualizzazione della tecnica costruttiva tradizionale della muratura e la diffusione delle tecniche innovative della pietra armata precompressa e dei gabbioni. Molti progettisti sono tornati, infatti, ad impiegare la pietra in spessori rilevanti, spesso in combinazione con altri materiali, per realizzare pareti perimetrali verticali, coperture e strutture in elevazione. Il rinnovamento del linguaggio architettonico è legato al riconoscimento delle potenzialità della pietra massiva connesse a valori espressivi e di sostenibilità economica ed ambientale: l'uso massivo della pietra naturale, infatti, è motivato non solo dall'esigenza di integrarsi con il paesaggio o esprimere l'identità locale ma anche dalla possibilità di realizzare con costi e tempi di costruzione contenuti elementi tecnici durevoli, dotati di elevata inerzia termica, facilmente riciclabili o ottenuti attraverso il recupero o il riciclo di materiale lapideo di scarto. Questo rinnovamento è stato consentito dalle molteplici innovazioni che hanno interessato il settore lapideo. In particolare, la diffusione dei sistemi CAD/CAM/CNC, il passaggio dalla stereotomia alla stereotomia digitale legata anche a *software* di progettazione parametrica e la disponibilità di programmi di calcolo e di metodi di *form-finding* basati su modelli digitali e non più su modelli fisici hanno permesso di realizzare prodotti lapidei di forma complessa con tempi e costi di fabbricazione ridotti e di ampliare le possibilità di ricerca formale dei progettisti.

La prima parte della ricerca esamina alcuni dei metodi e degli strumenti innovativi che hanno contribuito alla riscoperta della pietra massiva nella cultura architettonica contemporanea e analizza, attraverso il riferimento a casi di studio, i caratteri delle tecniche costruttive della muratura, della pietra armata e dei gabbioni per definire un quadro di riferimento tecnologico-scientifico sui materiali lapidei: vengono messe a sistema, infatti, le conoscenze relative ai materiali lapidei naturali e artificiali (lapidei agglomerati; calcestruzzi realizzati con gli scarti di estrazione o di lavorazione dei lapidei naturali), alle tecniche di lavorazione, ai metodi e agli strumenti di progettazione e ai linguaggi progettuali contemporanei.

La seconda e la terza parte della ricerca evidenziano alcune delle potenzialità di involucri lapidei massivi innovativi. La seconda parte della ricerca è dedicata allo studio scientifico-quantitativo dell'importanza dell'inerzia termica del materiale per il miglioramento delle condizioni di comfort termico interno e per la riduzione della domanda energetica degli edifici: attraverso simulazioni dinamiche annuali eseguite su un edificio residenziale di progetto sono stati valutati, infatti, i vantaggi prestazionali connessi con l'adozione, in diverse condizioni climatiche, di involucri massivi innovativi rispetto ad involucri lapidei tradizionali. La terza parte della ricerca, invece, indaga le valenze prestazionali e i caratteri architettonici di involucri edilizi a gabbioni. Attraverso simulazioni dinamiche annuali eseguite sullo stesso modello studiato nella seconda parte della tesi, vengono individuate delle correlazioni tra le principali caratteristiche di involucri multistrato a gabbioni e la prestazione termico-energetica dell'edificio: sulla base delle correlazioni individuate vengono definite delle indicazioni per valutare l'appropriatezza delle scelte compiute in fase di progettazione della soluzione costruttiva al fine di minimizzare la domanda energetica per il riscaldamento e il raffrescamento dell'edificio e migliorare le condizioni di comfort termico interno. Infine, attraverso il riferimento ad architetture contemporanee e l'individuazione di analogie figurative con opere e manufatti realizzati con tecniche costruttive tradizionali, vengono evidenziati i caratteri architettonici

di involucri edilizi a gabbioni legati alle possibili tipologie di *texture* del riempimento litico dei moduli costruttivi e alle specifiche soluzioni progettate per la risoluzione di problemi connessi con l'inserimento di aperture vetrate o di altri materiali di rivestimento e con lo smaltimento dell'acqua piovana.

INTRODUZIONE

Premessa terminologica

L'ambito tematico generale della ricerca è relativo ai materiali lapidei, principalmente alla pietra naturale e secondariamente ai materiali artificiali da essa derivati ovvero ai lapidei agglomerati e ai calcestruzzi derivati da scarti lapidei. Le applicazioni oggetto di studio sono elementi tecnici massivi ovvero pareti perimetrali verticali, coperture e strutture in elevazione realizzati impiegando i materiali lapidei in spessori rilevanti, singolarmente o in combinazione con altri materiali. L'interesse è rivolto in particolare agli involucri lapidei massivi sviluppati dalla cultura architettonica contemporanea che presentano dei caratteri innovativi rispetto alla cultura costruttiva tradizionale in pietra dal punto di vista tecnico, prestazionale e/o linguistico. Vengono indagate, pertanto, soluzioni tecniche di involucro che reinterpretano le valenze espressive degli involucri lapidei tradizionali senza adottare un approccio storicistico e che, essendo basate sul principio del corpo multiplo, ne superano le carenze prestazionali connesse con le istanze di fruizione. Dal punto di vista tecnico-prestazionale, quindi, le soluzioni analizzate risultano innovative rispetto alle pareti lapidee massive a corpo unico tipiche delle costruzioni storiche differenziandosi contestualmente anche dalle chiusure a corpo multiplo con rivestimenti sottili in pietra poiché sono costituite da più materiali con funzioni distinte e complementari e da uno strato esterno massivo che garantisce un'elevata inerzia termica e una buona durevolezza della chiusura verticale. Lo strato lapideo, inoltre, assume valenze percettive differenti dal passato, legate anche al tipo di *texture*, alle lavorazioni impiegate e all'accostamento con altri materiali.

Motivazioni della ricerca

La pietra è il più antico materiale da costruzione e “nella cultura occidentale per decine di secoli è stata sinonimo di architettura costruita” (Girasante, Potenza, 2006, p. 37)². Storicamente, infatti, è stata impiegata nelle costruzioni in spessori rilevanti per assolvere a compiti di resistenza statica: la funzione portante ha reso, pertanto, questo materiale sinonimo di solidità, massività, “permanenza nel tempo” (Acocella, 2004, p. 404). I cantonali angolari in elementi lapidei squadrati adottati nelle murature storiche sono una delle espressioni più iconiche dei valori semantici tradizionalmente associati alla pietra (Fig. 1)



Fig. 1 Un edificio con involucro in muratura lapidea e ammorsature d'angolo realizzate con grandi elementi squadrati di pietra
[Acocella, 2004, p. 105]

² Pavan V (2006) *I linguaggi dell'architettura contemporanea*. In: Girasante F, Potenza D, a cura di. Dalla pietra all'architettura. Foggia: Claudio Grenzi Editore, 37-39.

Con la diffusione del calcestruzzo e dell'acciaio il suo ruolo centrale nel progetto di architettura è venuto meno e la pietra è stata impiegata prevalentemente in elementi sottili di rivestimento. Nel XX secolo, infatti, con la liberazione della "facciata dalle strutture verticali" (Acocella, 2004, p. 405) e con il cambiamento delle modalità di costruire gli edifici, "pensati per stratificazioni successive ed indipendenti" secondo una logica di "specializzazione prestazionale" dei singoli strati" (Acocella, 2004, p. 404), i litotipi naturali sono stati adottati dai progettisti in forma di lastre sottili per definire lo strato di finitura esterna di involucri edilizi. È stato privilegiato il valore della leggerezza e, grazie anche allo sviluppo tecnologico del settore lapideo e all'introduzione di sistemi di ancoraggio innovativi, è stato possibile ridurre al minimo lo spessore delle lastre litiche che, nella tecnica contemporanea dei rivestimenti, è generalmente pari a 3 - 4 cm (Acocella, 2004, pp. 417, 458). A livello espressivo, quindi, i valori di solidità e massività storicamente propri del materiale sono stati spesso negati dalla cultura architettonica del Novecento che ha impiegato la pietra valorizzandone "la qualità estetica e rappresentativa" nelle superfici esterne degli edifici (Acocella, 2004, p. 404): le ricerche progettuali si sono concentrate, infatti, sulle valenze espressive connesse con le diverse "regole associative delle lastre" (Girasante Potenza, 2006, p. 75)³ e con la varietà dei colori e delle lavorazioni superficiali del materiale (Acocella, 2004, p. 416). Con riferimento al disegno tessiturale delle lastre, il tema del rivestimento sottile in pietra è stato declinato secondo diverse modalità. In molti casi le lastre di pietra vengono montate a giunti sfalsati per simulare l'aspetto della muratura in blocchi lapidei massivi che viene assunta come riferimento figurativo (Acocella, 2004, p. 415) ma vengono adottate contestualmente strategie che svelano "la natura fragile" e sottile del paramento litico (Acocella, 2004, p. 406): nella Neue Staatgalerie (Stoccarda, Germania, 1977-1984) progettata da James Stirling e Michael Wilford (Fig. 2) il "falso ruolo costruttivo" della pietra viene rivelato attraverso la scelta di enfatizzare le dimensioni e l'articolazione degli elementi litici che circondano le aperture e attraverso l'ironica definizione del dettaglio della parete del garage (Girasante, Potenza, 2006, p. 87)⁴; nel centro culturale a Sines (Sines, Portogallo, 2005) progettato da Manuel e Francisco Aires Mateus (Fig. 3) la *texture* del rivestimento litico che definisce la forma scultorea dei volumi degli edifici è una "stilizzazione contemporanea di una stereotomia muraria antica" come rivelato dalle grandi aperture che interrompono a livello basamentale le pareti verticali (Turrini, 2011); nel Rettorato della Universidade Nova di Lisbona (Lisbona, Portogallo, 1998-1999) progettato anch'esso da Manuel e Francisco Aires Mateus (Fig. 3) "lo strato litico perde ogni spessore diventando "grafica pura" per la presenza di un taglio continuo e di aperture a nastro impaginate in modo irregolare e per l'apparenza ambivalente del corpo architettonico che appare a seconda del punto di osservazione come un "solido tridimensionale" o come un "foglio ripiegato" (Acocella, 2004, p. 457); anche nel Centro Galego de Arte Contemporanea (Santiago de Compostela, Spagna, 1988-1993) progettato da Alvaro Siza (Fig. 3), nonostante il disegno tessiturale impostato a giunti sfalsati, il senso di massività viene negato dai grandi tagli continui praticati sulle facciate (Acocella, 2004, p. 411). In altri casi l'impiego della pietra in spessori sottili viene dichiarato in maniera ancora più esplicita attraverso il montaggio "a sorella" delle lastre come nel Museo della Fondazione Beyeler Riehen (Basilea, Svizzera, 1991-1997) progettato da Renzo Piano e nel Laboratorio Prove Materiali dello IUAV (Mestre, Italia, 1994-2002) progettato da Francesco Venezia (Acocella, 2004, pp. 413, 416, 430-435)

³ Di Sivo M (2006) *L'Architettura dei paramenti in pietra*. In: Girasante F, Potenza D, a cura di. Dalla pietra all'architettura. Foggia: Claudio Grenzi Editore, 71-75.

⁴ Marcotullio L, Marcucci P (2006) *Il linguaggio dell'architettura in superficie*. In: Girasante F, Potenza D, a cura di. Dalla pietra all'architettura. Foggia: Claudio Grenzi Editore, 79-89.

(Fig. 4). Nell'edificio per appartamenti ed uffici Bewag (Berlino, Germania, 1997) progettato da Max Dudler (Fig. 5), la sottigliezza del paramento in pietra è resa evidente oltre che dal montaggio delle lastre a giunti orizzontali e verticali allineati, anche dalla scelta di lasciare a vista i dispositivi di ancoraggio alla sottostruttura portante della facciata ventilata che appare, pertanto, caratterizzata da una "geometrica punteggiatura" (Girasante, Potenza, 2006, p. 89). Un'altra strategia progettuale che rivela esplicitamente l'assottigliamento della materia litica si basa sulla definizione di inedite tessiture superficiali dal "ritmo ritagliato" come quella adottata per caratterizzare la "facciata frattale" del centro culturale di Federation Square (Melbourne, Australia, 2002) progettato da Donald Bates e Peter Davidson di Lab architecture studio (Fig. 5) (Di Sivo, 2004, p. 66).



Fig. 2 La Neue Staatsgalerie progettata da Stirling e Wilford e il dettaglio della parete del garage [Kroll, 2011, su <https://www.archdaily.com>; Breun, 2012, su <https://www.e-architect.co.uk>, foto Rebecca Breun]



Fig. 3 Il centro culturale a Sines e il Rettorato della Universidade Nova di Lisbona progettati da Manuel e Francisco Aires Mateus; il Centro Galego de Arte Contemporanea progettato da Siza [Acocella, 2004, p. 456; Turrini, 2011, su <http://www.architetturadipeitra.it>, foto Daniel Malhao; Souza, 2017, <https://www.archdaily.com.br>, foto Fernando Guerra | FG + SG]



Fig. 4 Vista di un setto del Museo della Fondazione Beyeler Riehen progettato da Renzo Piano; la facciata della sede del Laboratorio Prove Materiali dello IUAV progettata da Francesco Venezia [Acocella, 2004, p. 434; <http://www.iuav.it>]



Fig. 5 L'edificio per appartamenti ed uffici Bewag progettato da Max Dudler e vista di dettaglio della facciata ventilata con rivestimento in lastre sottili di arenaria grigia e ancoraggi a vista; il centro culturale di Federation Square progettato da Lab architecture studio e vista di dettaglio della facciata con rivestimento in arenaria, vetro e acciaio zincato
 [https://www.maxdudler.de; https://en.wikipedia.org]

Con riferimento alle valenze cromatiche della pietra, il tema del rivestimento sottile è stato interpretato attraverso un “uso polimaterico e policromatico dei materiali litici” come nella sede dell'Unione delle Banche Svizzere (Basilea, Svizzera, 1986-1995) progettata da Mario Botta (Fig. 6) e caratterizzata da un'alternanza di “fasce orizzontali a colori alternati” (Acocella, 2004, p. 416).



Fig. 6 L'edificio sede dell'Unione delle Banche Svizzere progettato da Mario Botta
 [http://www.botta.ch]

Con riferimento alle lavorazioni di finitura della pietra, invece, il tema del rivestimento sottile è stato declinato attraverso la ricerca dell'omogeneità superficiale per dare forza all'immagine volumetrica dell'edificio: negli Uffici del Presidente (Berlino, Germania, 1995-1998) progettati da Gruber + Kleine – Kraneburg (Fig. 7) la lucidatura delle lastre in granito nero che avvolgono uniformemente il volume ellittico dell'edificio consente di valorizzarne la “purezza formale” (Acocella, 2004, pp. 449) e di uniformare il rivestimento alle aperture vetrate (Acocella, 2004, pp. 415, 449); nella Biblioteca Regionale di Dresda (Dresda, Germania, 2001) progettata dallo studio Ortner & Ortner (Fig. 7), invece, la presenza di incisioni e scanalature sulle lastre di travertino consente di realizzare un effetto di “continuità materica e di grafica plastica che modella le superfici” dei volumi puri dell'edificio (Acocella, 2004, p. 418).



Fig. 7 Gli Uffici del Presidente, edificio progettato da Gruber + Kleine - Kraneburg; la Biblioteca Regionale progettata a Dresda dallo studio Ortner & Ortner
 [https://www.ortner-ortner.com; Lelli, 2009, su http://www.architetturadi pietra.it]

La riduzione dello spessore delle lastre lapidee, infine, ha permesso anche di realizzare involucri traslucidi in cui la pietra perde il carattere di materiale opaco e diviene permeabile alla luce: marmi cristallini di colore chiaro, alabastri e onici ridotti in spessori sottili sono stati impiegati per realizzare involucri esterni o diaframmi interni di grande suggestione in molte opere contemporanee tra cui il Christ Pavilion (Hannover, Germania, 1999-2000) progettato da Von Gerkan, Marg & Partners (Fig. 9) (Acocella, Turrini, 2006; Rosso et al., 2016a), la sede della Deutsche Bundesbank (Chemnitz, Germania, 1997-2004) progettata da Lluís Mateo con MAP Architects (Fig. 9) (Acocella, Turrini, 2006), la Caja De Ahorros (Granada, Spagna, 1992-2001) progettata da Alberto Campo Baeza (Fig. 8 a) (Acocella, 2004, pp. 414, 420; Acocella, Turrini, 2006; Rosso et al., 2016a), il municipio di San Fernando de Henares (Madrid, Spagna, 1994-1999) progettato dagli architetti Sancho-Madrídejos (Fig. 8 b) (Acocella, 2004, p. 419-420; Acocella, Turrini, 2006; Girasante, Potenza, 2006, p. 45) e l'Istitut du Monde Arabe (Parigi, Francia, 1981-1987) progettato da Jean Nouvel (Fig. 8 c) (Acocella, 2004, pp. 414, 420; Acocella, Turrini, 2006).

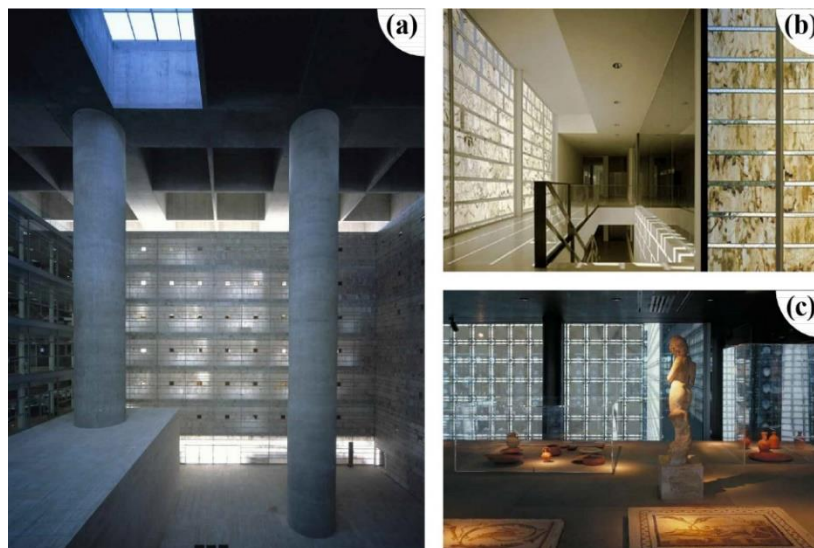


Fig. 8 La parete in alabastro della Caja De Ahorros progettata da Alberto Campo Baeza (a); le pareti in onice del municipio di San Fernando de Henares progettato da Sancho-Madrídejos (b); la parete diaframma in marmo bianco dell'Istitut du Monde Arabe progettato da Jean Nouvel (c)
 [https://www.campobaeza.com; http://www.sancho-madrídejos.com; http://www.jeannouvel.com]



Fig. 9 Gli involucri traslucidi del Christ Pavilion progettato da Von Gerkan, Marg & Partners e della sede della Deutsche Bundesbank progettata a Chemnitz da Lluís Mateo con MAP Architects [https://www.gmp-architekten.com; https://www.mateo-arquitectura.com, foto Jan Bitter]

Attualmente, però, la cultura architettonica contemporanea ha riscoperto gli attributi di “pesantezza” e “radicamento” dei materiali lapidei (Girasante, Potenza, 2006, p. 38)⁵: anche se le tendenze maggioritarie restano quelle “di assottigliamento della materia lapidea in *texture* atettoniche” sottili, la pietra è tornata ad essere impiegata in spessori rilevanti, spesso in modo collaborante insieme ad altri materiali quali l’acciaio o il calcestruzzo armato per definire la struttura o l’involucro degli edifici (Turrini, 2009). Molti architetti contemporanei hanno indagato le potenzialità espressive e tecniche di alcune tipologie di rivestimenti a spessore mentre altri hanno attualizzato la pietra come materiale strutturale (Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13). In ambito mediterraneo, soprattutto in Francia e nella penisola iberica, si riscontra un ritorno a sistemi strutturali murari o trilitici (Fig. 10), mentre in ambito anglosassone e italiano la ricerca sulla pietra armata avviata da Peter Rice ha portato ad “esiti costruttivi ripetibili e applicabili alla grande scala” grazie alle opere di Michael Hopkins, Eric Parry e Renzo Piano (Fig. 14, Fig. 15) (Turrini, 2009). Inoltre, è stata introdotta in architettura la tecnica costruttiva dei gabbioni, precedentemente impiegata solo nel campo dell’ingegneria naturalistica e della progettazione paesaggistica, che si è diffusa per la realizzazione di murature autoportanti o di rivestimenti a spessore (Fig. 16, Fig. 17).

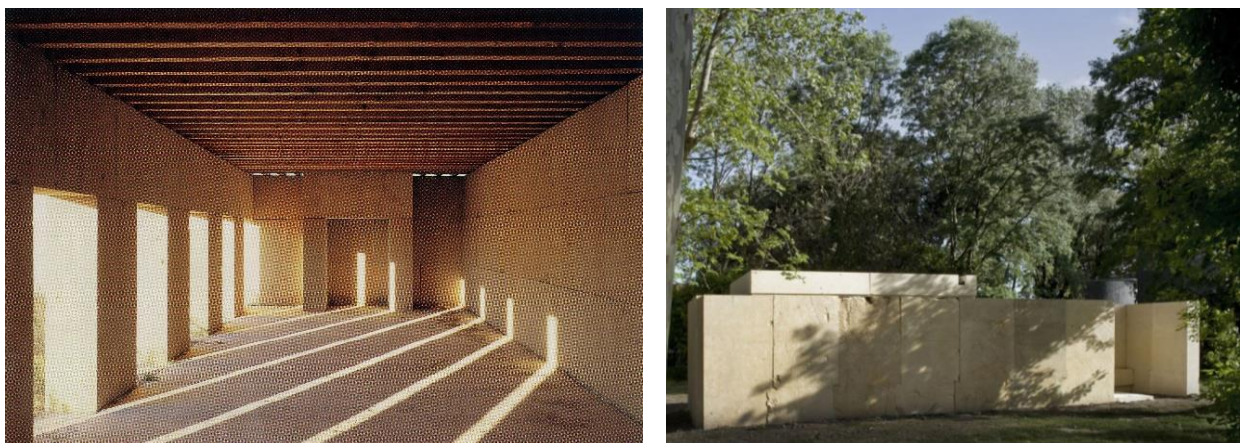


Fig. 10 Vista dell’interno delle cantine progettate a Vauvert da Perraudin caratterizzate da muri portanti in pietra; la cappella progettata da Eduardo Souto de Moura per la XVI Biennale di Architettura di Venezia

[Hegger et al., 2006, p. 209; Ricci, 2018, su https://www.domusweb.it, foto Alessandra Chemollo]

⁵ Pavan V (2006) *I linguaggi dell’architettura contemporanea*. In: Girasante F, Potenza D, a cura di. *Dalla pietra all’architettura*. Foggia: Claudio Grenzi Editore, 37-39.



Fig. 11 Particolare del prospetto laterale delle terme di Vals progettate da Zumthor; il prospetto principale della Casa a Bom Jesus progettata da Souto de Moura
 [Acocella, 2004, p. 166; Angelillo, 2017, su <http://www.architetturadi Pietra.it>]



Fig. 12 Il prospetto principale del municipio di Iragna progettato da Cavadini; il prospetto sud della casa privata progettata a Séniergues da Gouwy, Grima, Rames
 [Redazionale, 1999b, p. 975; Dernie, 2003, p. 144]



Fig. 13 Dettaglio della muratura lapidea del Scuola di Alti Studi Musicali della Galizia progettata da Abril; vista dell'esterno della Stone House progettata da Herzog & de Meuron
 [Pavan, 2013, p. 133; Mack, 1997, p. 65]



Fig. 14 Vista dell'interno dell'Aula Liturgia Padre Pio durante la costruzione e dettaglio degli archi in pietra armata progettati da Renzo Piano
[Dernie, 2003, pp. 159, 162]



Fig. 15 L'edificio per uffici progettato a Finsbury Square da Eric Parry e il Queen's Building progettato da Michael Hopkins caratterizzati da pilastri in pietra armata
[Dernie, 2003, p. 200; <https://www.hopkins.co.uk>]

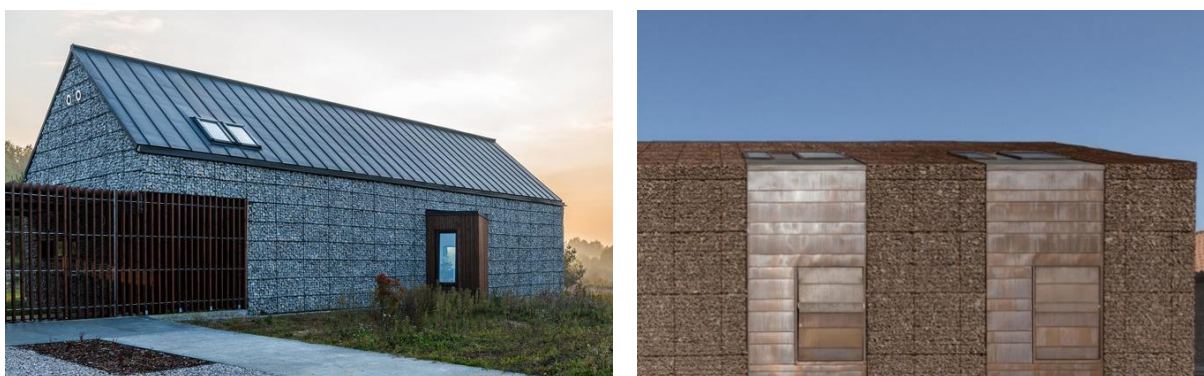


Fig. 16 Viste dell'esterno dell'House in the Landscape progettata dallo Studio Kropka e dell'edificio residenziale Sei Unità di Guarnieri e Mascazzini caratterizzati da un involucro a gabbioni
[Griffiths, 2014, su <https://www.dezeen.com>, foto Maciej Lulko; Guarnieri, Mascazzini, su <http://www.theplan.it>]



Fig. 17 Vista dell'esterno della Dominus Winery progettata da Herzog & de Meuron caratterizzata da una muratura in gabbioni; particolari dei prospetti della casa privata Haus 9x9 progettata da Titus Bernhard e dell'edificio residenziale Château-Le-Lez progettato da Edouard François and Associates caratterizzati da un involucro a gabbioni
 [Betsky, 1998, p. 12; Redazionale, 2003b, p. 1275; Pousse, 2000, p. 75]

Il rinnovamento del linguaggio architettonico è strettamente legato alle recenti innovazioni che hanno interessato il settore lapideo. Nuovi metodi e strumenti per la progettazione e la realizzazione di architetture in pietra, infatti, hanno reso accessibili lavorazioni “che fino a poco tempo fa erano di alto contenuto artigianale e risultavano estremamente lunghe e costose” (Acocella, 2004, p. 607): i sistemi integrati CAD/CAM/CNC, introdotti nel settore lapideo negli anni '90, hanno permesso, infatti, di realizzare in modo efficiente prodotti lapidei di forma libera anche in spessori notevoli garantendo una maggiore libertà di ricerca formale mentre i *software* di progettazione parametrica insieme ai programmi per il *form-finding* digitale e per l'analisi strutturale hanno consentito di tornare a progettare archi, coperture voltate e strutture di elevazione in conci di pietra, sfruttando al meglio le caratteristiche dei materiali.

Il rinnovamento del linguaggio architettonico è strettamente legato anche al riconoscimento delle potenzialità della pietra massiva connesse alle sue peculiari valenze espressive e a valori di sostenibilità ambientale ed economica.

Con riferimento alle valenze espressive, è riconosciuto che storicamente la pietra ha connotato l'identità e la specificità dei diversi contesti geografici. La natura e la qualità delle rocce disponibili in un territorio hanno influito, infatti, sui caratteri dell'architettura locale e sullo sviluppo delle tecniche costruttive. In Italia, in particolare, la pietra ha connotato l'aspetto di molti borghi e città contribuendo a renderli “compiute opere d'arte” e ha contribuito a differenziare città geograficamente vicine come San Remo, Genova e Savona o Siracusa, Catania e Messina (Rodolico, 1965, p. 29). La contemporanea attitudine a impiegare materiali lapidei locali, quindi, è motivata anche dall'esigenza espressiva di integrarsi con il paesaggio naturale o urbano e di interpretare l'identità locale.

Numerosi progetti hanno mostrato, inoltre, come sia possibile realizzare con la pietra massiva architetture sostenibili sul piano ambientale ed economico: l'impiego del materiale lapideo in spessori rilevanti permette di realizzare con costi e tempi di costruzione contenuti elementi tecnici durevoli, dotati di elevata inerzia termica e fonica, facilmente riciclabili o ottenuti attraverso il recupero o il riciclo di materiale lapideo. Possono essere impiegate, infatti, differenti strategie per limitare i costi e tempi di produzione e messa in opera di elementi tecnici in pietra massiva: queste comprendono

non solo il coordinamento del progetto con le tipiche dimensioni dei blocchi estratti e l'adozione di tecniche di montaggio semplice e veloce ma anche l'impiego di blocchi che presentano imperfezioni o difetti di taglio scartati dal processo di fabbricazione di lastre sottili (Acocella, 2004, p. 296). Quest'ultima strategia consente anche di limitare il volume degli scarti di estrazione e di mitigare il loro impatto ambientale. Elementi tecnici massivi possono essere ottenuti anche adottando la tecnica costruttiva dei gabbioni che consente di riciclare frammenti di pietra di varia pezzatura, ottenuti dalla demolizione di edifici o dal recupero di scarti di estrazione o di lavorazione.

Relativamente alla durabilità, è stato sottolineato da ricerche recenti come questa proprietà, storicamente associata alla pietra, sia essenziale per la progettazione di edifici sostenibili (Gil-Martín et al., 2012): l'impiego di forme strutturali tradizionali e di materiali durevoli come la pietra aumenta la vita utile di un edificio riducendo non solo l'impatto ambientale annuale della sua costruzione ma anche quello connesso alla produzione di nuovi materiali costruttivi da impiegare nel recupero e nella sostituzione del patrimonio esistente.

La pietra massiva ha benefici ambientali anche in un'ottica di progettazione passiva: le sue elevate prestazioni di inerzia termica consentono, infatti, di attenuare l'escursione termica giornaliera e stagionale aumentando il comfort abitativo soprattutto in condizioni estive. L'importanza dell'inerzia termica delle chiusure ai fini del miglioramento delle condizioni di comfort termico interno e della riduzione della domanda energetica per il raffrescamento e il riscaldamento degli edifici è stata sottolineata in diverse ricerche ed è stata riconosciuta anche a livello normativo (Aste, Angelotti, Buzzetti, 2009; Aste et al. 2015; Di Perna et al., 2011; Stéphan et al., 2014): il decreto legislativo n. 311/2006, "Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico in edilizia", infatti, ha adottato come indicatore dell'inerzia termica la massa superficiale dei componenti edilizi specificandone il valore minimo per le pareti opache verticali, orizzontali e inclinate e il DPR n. 59 del 2/4/2009, il regolamento di attuazione dell'art.4, comma 1, lettere a) e b) del D.Lgs. 192/2005, ha introdotto come parametro di verifica dell'inerzia termica la trasmittanza termica periodica.

È stato rilevato, infine, come elementi tecnici massivi possano essere realizzati in modo sostenibile anche con materiali artificiali derivati dalla pietra naturale, in particolare dal recupero degli scarti di lavorazione ed estrazione, spesso attraverso processi di manifattura innovativi che comprendono anche la stampa 3D. Ricerche accademiche hanno mostrato, infatti, come gli scarti siano attualmente utilizzati per la fabbricazione di blocchi a matrice cementizia ma soprattutto per la produzione di calcestruzzi e come il loro recupero nel settore delle costruzioni riduca i problemi ambientali legati al loro smaltimento, limiti il consumo di materiali naturali grezzi e consenta la riduzione delle emissioni di CO₂ connesse con la produzione del cemento (Galetakis, Sultana, 2016).

Le realizzazioni e le sperimentazioni degli architetti contemporanei, i metodi e gli strumenti innovativi di progettazione e realizzazione attualmente disponibili, il riconoscimento delle potenzialità della pietra massiva legate alle sue valenze espressive, ai caratteri di durabilità, elevata inerzia termica e riciclabilità motivano l'interesse per i materiali lapidei e per le tecniche costruttive che ne prevedono l'impiego in spessori rilevanti.

Tra le potenzialità prestazionali della pietra massiva si è scelto di approfondire quelle connesse con l'elevata inerzia termica del materiale vista la necessità riconosciuta a livello internazionale di progettare edifici energeticamente efficienti. Dal momento che la prestazione energetica di un edificio è strettamente correlata alle caratteristiche dell'involucro, si è scelto di analizzare i vantaggi

prestazionali connessi con l'impiego di involucri lapidei massivi contemporanei in muratura lapidea e in gabbioni rispetto ad involucri lapidei tradizionali a corpo unico. L'analisi è stata approfondita per gli involucri multistrato a gabbioni con lo scopo di definire delle correlazioni tra le principali caratteristiche dell'elemento costruttivo e la prestazione termico-energetica dell'edificio, ed elaborare delle indicazioni progettuali. Si è scelto di approfondire l'analisi degli involucri a gabbioni poiché, essendo stati introdotti in architettura solo dalla fine del XX secolo, sono stati ancora poco studiati dal punto di vista termico-energetico nonostante il riconoscimento dei vantaggi connessi con la loro elevata inerzia termica. Inoltre, questa tipologia di involucri consente di valorizzare gli scarti lapidei e presenta notevoli potenzialità espressive legate alle possibili tipologie di *texture* del riempimento litico dei moduli costruttivi e agli accostamenti con altri materiali. Si è ritenuto essenziale, quindi, analizzare anche i caratteri architettonici degli involucri a gabbioni.

La ricerca, infine, è motivata anche dalla considerazione che i materiali lapidei in Italia rappresentano un'importante risorsa economica.

Secondo i dati ISTAT relativi al censimento del 2011, il settore lapideo italiano comprende, tra comparto estrattivo e di lavorazione, 10698 aziende ed impiega in totale 54201 persone (Gussoni, 2015a). Il numero medio di addetti per azienda è pari a 5. I comprensori con il maggior numero di imprese sono quello Pugliese (848 aziende), quello Veneto che comprende le province di Verona, Vicenza e Padova (817 aziende) e quello Apuo-Versiliese che include le province di Massa-Carrara, Lucca e La Spezia (755 aziende). Relativamente al numero di addetti, i comprensori che impiegano più personale sono quello Veneto (5634 addetti), quello Apuo-Versiliese (4511 addetti) e quello Pugliese (3822 addetti) (Gussoni, 2015a).

L'Italia storicamente, inoltre, ha sempre avuto un primato nell'offerta di prodotti e di servizi destinati alla progettazione e manutenzione dell'architettura in pietra. Rispetto ad altri paesi europei ha un alto numero di cave attive (Fig. 19) e, come evidenziato da "Stone Sector 2016", il rapporto statistico elaborato ogni anno dall'Ufficio Studi e Ricerche di Internazionale Marmi e Macchine Carrara per valutare il bilancio e le prospettive del commercio internazionale dei prodotti lapidei, è il secondo paese per quota di mercato all'export nel settore mondiale della pietra naturale (Gussoni, 2016). Nel 2015, infatti, la quota di mercato italiana è stata pari al 12,4 % ed è risultata inferiore solo a quella della Cina pari al 42,4% (Fig. 18, Tabella. 1). Rispetto al 2014 si è registrato un calo pari circa ad un punto percentuale che, però, non è dipeso da una riduzione dell'export del nostro paese, ma si è verificato perché l'aumento dell'export italiano registratosi nel 2015 è stato inferiore all'aumento delle esportazioni mondiali (Gussoni, 2016). La metà del valore delle esportazioni del settore lapideo italiano è costituito dall'export dei lavorati in marmo: nel 2015, infatti, l'Italia ha esportato verso gli altri paesi del mondo 915000 tonnellate di lavorati di marmo, del valore di oltre un miliardo di euro. Rispetto al 2014, si è verificata, quindi, una crescita pari al 2,6% in quantità e al 9,8% in valore (Gussoni, 2016).

QUOTE DI MERCATO (PRIMI DUE PAESI 2015)				
PAESE	2012	2013	2014	2015
Cina	32,5%	34,2%	35,7%	42,4%
Italia	13,7%	13,6%	13,5%	12,4%

Tabella. 1 Quote di mercato all'export nel settore mondiale della pietra naturale di Italia e Cina [Gussoni 2015b, 2016, rielaborazione dell'autore]

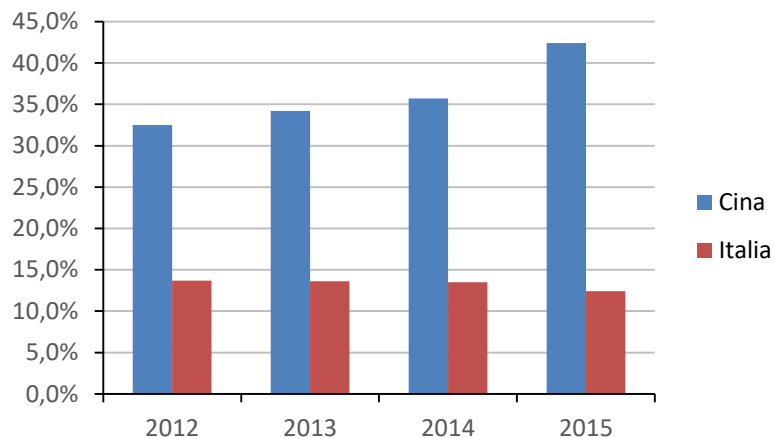


Fig. 18 Quote di mercato all'export nel settore mondiale della pietra naturale di Italia e Cina [Gussoni 2015b, 2016, rielaborazione dell'autore]



Fig. 19 Localizzazione delle cave di pietra naturale in Europa [Hugues, Steiger, Weber, 2007, p. 59]

Questi dati mostrano come il settore lapideo rappresenti una risorsa economica importante per il nostro paese che dovrebbe essere valorizzata nella progettazione architettonica italiana e come il settore lapideo internazionale sia caratterizzato da un alto tasso di competizione che proviene da paesi emergenti come la Cina. Il loro ingresso sul mercato ha comportato la “perdita della leadership qualitativa” dell’Italia che, però, rimane “un’eccellenza di tipo qualitativo” (Di Sivo, 2004)⁶. Come affermato da Danesi, la “traduzione di questo dato in termini di programmazione non solo delle attività produttive ma della ricerca e la sperimentazione nel campo delle tecnologie di lavorazione e uso dei materiali lapidei si esplicita nella necessità di costituirsi costantemente come riferimento per l’innovazione dei prodotti e dei processi e per l’impegno costante nella ricerca e nello sviluppo tecnologico” (Di Sivo, 2004)⁷.

Obiettivi

La ricerca ha come scopo indagare le potenzialità della pietra massiva nel progetto di architettura, in particolare le potenzialità di involucri lapidei massivi contemporanei che presentino dei caratteri innovativi dal punto di vista tecnico, prestazionale e/o linguistico rispetto alla cultura costruttiva lapidea tradizionale.

La ricerca si propone, in primo luogo, di esaminare le caratteristiche delle diverse tipologie di materiali lapidei, di comprendere quali siano le innovazioni relative ai metodi e agli strumenti di progettazione e realizzazione che hanno contribuito alla riscoperta della pietra massiva nella cultura architettonica contemporanea e di analizzare i caratteri delle tecniche costruttive attualmente impiegate per realizzare involucri edilizi ed elementi strutturali in pietra massiva.

In relazione agli involucri lapidei massivi contemporanei, la ricerca si propone di valutare le potenzialità prestazionali connesse con l’elevata inerzia termica della pietra. Si propone, quindi, di valutare la prestazione termico-energetica di involucri lapidei innovativi per quantificarne i benefici in termini di comfort termico e di consumo energetico rispetto a involucri lapidei tradizionali.

In relazione ad involucri lapidei massivi contemporanei realizzati con la tecnica dei gabbioni, la ricerca si propone di individuare delle correlazioni tra la prestazione termico-energetica dell’edificio e le principali caratteristiche di questa tipologia di involucri. Le correlazioni individuate sono funzionali alla definizione di indicazioni per valutare l’appropriatezza delle scelte compiute in fase di progettazione della soluzione costruttiva al fine di minimizzare la domanda energetica per il riscaldamento e il raffrescamento dell’edificio e migliorare le condizioni di comfort termico interno. La ricerca si propone, inoltre, di evidenziare i caratteri architettonici di questa tipologia di involucri lapidei massivi contemporanei.

Metodologia e articolazione della ricerca

La ricerca si articola in una prima fase di indagine conoscitiva, in una seconda fase di analisi della prestazione termico-energetica di involucri innovativi in pietra massiva e in una terza fase di analisi delle prestazioni termico-energetiche e dei caratteri architettonici di involucri edilizi a gabbioni.

⁶ Danesi L (2004) *Introduzione*. In: Di Sivo M. *Atlante della Pietra*. Torino: UTET.

⁷ *Ibidem*

La fase di indagine conoscitiva è articolata in quattro momenti di analisi dello stato dell'arte e si basa sulla ricerca bibliografica, sullo studio di articoli scientifici e sulla lettura critica e la schedatura di casi di studio di rilievo nazionale e internazionale. Vengono messe a sistema, infatti, le conoscenze relative ai materiali lapidei naturali e artificiali (lapidei agglomerati; calcestruzzi realizzati con gli scarti di estrazione o di lavorazione dei lapidei naturali), alle tecniche di lavorazione, ai metodi e agli strumenti di progettazione innovativi (stereotomia; metodi di *form-finding* digitale; sistemi CAD/CAM/CNC; stampa 3D) e ai linguaggi progettuali contemporanei relativi alle tecniche costruttive della muratura, della pietra armata e dei gabbioni.

La seconda fase della ricerca oltre a basarsi sull'analisi dello stato dell'arte, si fonda su simulazioni dinamiche annuali eseguite con il *software* Design Builder sul modello di un edificio residenziale di progetto variando la stratigrafia delle pareti perimetrali. I casi di studio sono caratterizzati da due involucri tradizionali in muratura lapidea di diverso spessore e dagli involucri innovativi impiegati nei Bagni Termali di Vals progettati da Peter Zumthor, nella Scuola di Alti Studi Musicali della Galizia progettata da Antón García-Abril Ruiz e nella Haus 9x9 progettata da Titus Bernhard. Le soluzioni di involucro impiegate in questi edifici sono state scelte come casi di studio poiché sono tutte basate sul principio del corpo multiplo e poiché sono tra le più interessanti tra quelle sviluppate dalla cultura architettonica contemporanea come dimostrano le numerose pubblicazioni che analizzano criticamente queste opere (Acocella, 2004, pp. 160-167; Acocella, 2006a; Hugues, Steiger, Weber, 2007, p. 115; Pavan, 2013; Pongratz, Perbellini, 2009, p. 72-76; Redazionale, 1997a, pp. 56-75; Redazionale, 2003b, pp. 1274-1277; Turrini, 2007b). Inoltre, appaiono generalizzabili a diverse tipologie edilizie.

I casi di studio caratterizzati da murature lapidee tradizionali a corpo unico rappresentano, invece, i casi di riferimento con cui sono state confrontate le prestazioni degli involucri contemporanei studiati: lo studio prestazionale, infatti, è condotto con finalità comparative e mira alla valutazione dei benefici degli involucri innovativi in termini di comfort termico e di consumo energetico rispetto a involucri tradizionali in muratura lapidea. Lo studio è stato ripetuto in tre diversi contesti geografici di riferimento per comprendere quanto i benefici degli involucri lapidei innovativi rispetto a quelli tradizionali varino in condizioni climatiche differenti. I contesti geografici considerati sono rappresentativi delle condizioni climatiche tipiche del territorio italiano.

La seconda fase della ricerca si basa anche su un secondo metodo di valutazione del fabbisogno energetico degli edifici: la valutazione del fabbisogno di energia termica per il riscaldamento del caso di studio di riferimento, caratterizzato dall'involucro lapideo tradizionale a minore spessore, viene effettuata, infatti, oltre che in regime dinamico anche attraverso un approccio semi-stazionario impiegando un *software* semplificato (MasterClima MC11300), certificato dal CTI (Comitato Termotecnico Italiano). L'adozione per il caso di riferimento dei due approcci di calcolo consente di validare i risultati ottenuti verificando che il relativo scostamento percentuale sia inferiore al 5%, ovvero al valore di soglia fissato dal CTI per il rilascio della certificazione dei *software* semplificati (Salata et al., 2017).

Lo studio prestazionale viene approfondito nella terza fase della ricerca relativa ad involucri a gabbioni per determinare delle correlazioni tra le caratteristiche dell'elemento costruttivo e la prestazione termico-energetica dell'edificio. L'analisi viene condotta attraverso simulazioni dinamiche annuali eseguite con il *software* Design Builder sul medesimo edificio residenziale di progetto modellato nella seconda fase della ricerca, modificando la stratigrafia delle pareti perimetrali

e il contesto geografico di riferimento. Per le due stratigrafie analizzate, derivate da quelle utilizzate nella Haus 9x9 progettata da Titus Bernhard e nei Logements Les Gallets progettati da Michel Guthmann e Bertrand Bonnier, sono stati definiti 8 casi di simulazione sulla base di 3 variabili di progetto rappresentate dallo spessore del gabbione, dal tipo di pietra di riempimento e dal rapporto tra volume dei vuoti e volume totale del modulo costruttivo. Lo studio mira all'identificazione delle soluzioni costruttive che consentono di minimizzare la domanda energetica per il riscaldamento e il raffrescamento dell'edificio e di migliorare le condizioni di comfort termico interno: i risultati ottenuti consentono di definire delle indicazioni per valutare l'appropriatezza delle scelte operate in fase di progettazione dell'involucro edilizio in vista del raggiungimento di questi obiettivi. La terza fase della ricerca evidenzia, inoltre, i caratteri architettonici di involucri edilizi a gabbioni legati alle possibili tipologie di *texture* del riempimento litico dei moduli costruttivi e alle specifiche soluzioni progettuali sviluppate per la risoluzione di problemi connessi con l'inserimento di aperture vetrate o di altri materiali di rivestimento e con lo smaltimento dell'acqua piovana: l'analisi viene condotta attraverso il riferimento ad architetture contemporanee e l'individuazione di analogie figurative con opere e manufatti realizzati con tecniche costruttive tradizionali.

CAPITOLO 1

ANALISI DELLE DIVERSE TIPOLOGIE DI MATERIALI LAPIDEI

1.1. LE PIETRE NATURALI

1.1.1. Classificazioni

1.1.1.1. La classificazione geologica

1.1.1.2. La classificazione merceologica

1.1.2. Proprietà tecniche, prestazioni e caratteristiche delle pietre naturali

1.1.2.1. Colore

1.1.2.2. Durabilità

1.1.2.3. Lavorabilità

1.1.2.4. Proprietà meccaniche

1.1.2.5. Peso specifico e peso di volume delle pietre

1.1.2.6. Porosità e permeabilità

1.1.2.7. Proprietà termiche

1.1.2.8. Resistenza all'usura o logorabilità

1.2. MATERIALI ARTIFICIALI DERIVATI DALLA PIETRA

1.2.1. Calcestruzzi ottenuti da scarti di estrazione o lavorazione della pietra

1.2.2. I lapidei agglomerati

1. ANALISI DELLE DIVERSE TIPOLOGIE DI MATERIALI LAPIDEI

1.1. LE PIETRE NATURALI

1.1.1. Classificazioni

Le pietre naturali impiegate nelle costruzioni vengono ottenute dai vari tipi di rocce esistenti attraverso processi di estrazione e trasformazione. Le diverse specie lapidee sono caratterizzate da “analogie genetiche e prestazionali” (Boeri, 1996, p. 3). Storicamente, sulla base di queste analogie, sono state elaborate diverse classificazioni delle pietre naturali.

Nell’antichità le pietre da costruzione venivano distinte in base alla loro attitudine ad essere lucidate. Le pietre non lucidabili, impiegabili nella fabbricazione del corpo degli edifici, erano indicate con il termine *lapides* mentre quelle lucidabili e levigabili, da impiegare principalmente nelle decorazioni edilizie e nelle opere scultoree e ornamentali, erano definite *marmora* (Menicali, 1992, p. 11).

Nel Medioevo, invece, i marmi venivano suddivisi in marmi antichi e moderni: la prima denominazione comprendeva i materiali provenienti da cave esaurite o da località di ubicazione ignota, mentre la seconda indicava quelli provenienti da cave attive o conosciute (Menicali, 1992, p. 11).

Attualmente le pietre naturali sono classificate in base alla classificazione geologica e alla classificazione merceologica.

1.1.1.1. La classificazione geologica

La classificazione scientifica delle rocce universalmente adottata si basa sull’origine geologica dei materiali lapidei e fornisce indicazioni essenziali per comprenderne le caratteristiche principali (Boeri, 1996, p. 12). In base a questa classificazione, si distinguono rocce magmatiche o endogene, rocce sedimentarie o esogene e rocce metamorfiche.

Le rocce magmatiche si sono formate a seguito del raffreddamento e del consolidamento di materiali fusi o magmi originatesi in profondità. Dal punto di vista chimico e mineralogico, sono caratterizzate dalla presenza di silice (SiO_2), da ossidi e componenti mineralogici (Blanco, 1999, p. 195). In base al contenuto di silice questo tipo di rocce sono definite ipersiliciche o acide, metasiliciche o neutre, iposiliciche o basiche o ultrabasiche.

Le rocce magmatiche si distinguono in rocce intrusive ed effusive.

Le prime si sono originate in profondità, mediante il lento raffreddamento del magma e presentano, per la lunga durata del processo di solidificazione, una struttura granulare estremamente compatta con cristalli di grandi dimensioni di natura diversa (Blanco, 1999, p. 195; Boeri, 1996, p. 12). La struttura cristallina granulare conferisce ai materiali elevati valori di durezza e di resistenza meccanica (Menicali, 1992, p. 12). Nella categoria delle rocce intrusive rientrano i graniti (Fig. 20), le sieniti, i serpentini, le dioriti e i gabbri.

Le rocce magmatiche effusive o vulcaniche sono prodotte dalla solidificazione del magma pervenuto sulla superficie terrestre o negli oceani. La velocità elevata del processo di raffreddamento ha come conseguenza la formazione di rocce a struttura prevalentemente amorfa di tipo vetroso (Boeri, 1996, p. 13). Le rocce che appartengono a questa categoria e che hanno maggiore rilievo in relazione all’impiego nelle costruzioni, sono i porfidi, i basalti, le trachiti e le lipariti. I porfidi sono l’unico tipo

di roccia effusiva lucidabile e sono caratterizzati da elevati valori di resistenza a compressione (Menicali, 1992, p. 13).

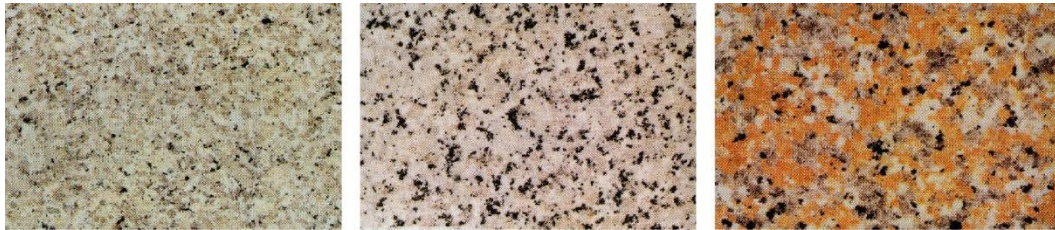


Fig. 20 Granito bianco sardo, granito bianco Montorfano e granito rosa Nule
[Di Sivo, 2004, p. 76]

Le rocce sedimentarie derivano dal processo di sedimentazione e di ricomposizione dei prodotti della disgregazione meccanica e dell'alterazione chimica di rocce preesistenti e da depositi di origine organica (Blanco, 1999, p. 195). Le cause principali delle disgregazione e dell'alterazione delle rocce preesistenti sono costituite da fenomeni esogeni ovvero da processi chimico-fisici che avvengono sulla superficie terrestre: diversi agenti quali le acque, i venti e i ghiacciai, sono responsabili di questi fenomeni e del successivo accumulo dei detriti rocciosi in bacini marini o lacustri e nelle pianure alluvionali. Alla deposizione segue il processo di ricomposizione dei materiali sciolti che è detto diagenesi e che può essere di natura fisica, chimica o mista (Boeri, 1996, p. 13). Tutti i tipi di roccia sedimentaria, comunque, sono caratterizzati da una struttura stratificata (Winkler, 1994, p. 9).

In base alla loro origine le rocce sedimentarie sono distinte in rocce di deposito chimico, rocce organogene, rocce clastiche e rocce piroclastiche. Le prime sono costituite da minerali derivanti dalla degradazione di rocce preesistenti, che vengono depositati in soluzione acquosa in particolari ambienti sedimentari e si separano per precipitazione o per evaporazione (Menicali, 1992, p. 14). Comprendono i gessi, i travertini (Fig. 21), gli alabastrini calcarei e i tufi calcarei. Le rocce organogene, invece, si formano a seguito dell'accumulo di resti organici minerali, principalmente scheletri esterni o interni di organismi animali o vegetali (Menicali, 1992, p. 15). Comprendono i calcari compatti e le dolomie. Le rocce clastiche derivano dalla ricomposizione di frammenti di rocce preesistenti trasportati in ambienti di deposito marini o continentali: il peso dei sedimenti progressivamente accumulati determina la compattazione dei materiali mentre i sali minerali disciolti nell'acqua ne consentono la cementazione (Menicali, 1992, p. 13). Le rocce clastiche comprendono i conglomerati, le breccie, le puddinghe, le arenarie che si differenziano per le dimensioni degli elementi costituenti (Boeri, 1996, p. 14; Winkler, 1994, pp. 11, 17-18). Le rocce piroclastiche, infine, sono costituite da componenti generalmente di natura silicea derivanti dall'attività vulcanica di tipo esplosivo e successivamente cementati (Menicali, 1992, p. 13). Comprendono i tufi e i peperini (Fig. 21).



Fig. 21 Travertino classico, travertino romano noce, peperino rosa
[Di Sivo, 2004, p. 77]

Le rocce metamorfiche derivano dalla trasformazione di rocce eruttive o sedimentarie in condizioni di elevata temperatura e pressione: solitamente, il processo di trasformazione è indotto da agenti concomitanti di natura fisica, chimica e meccanica che modificano la composizione chimica delle rocce originarie e determinano processi mineralogici e di riordinamento strutturale (Boeri, 1996, p. 15). L'entità delle modificazioni subite rende spesso impossibile distinguere la natura della roccia originaria detta edotto (Blanco, 1999, p. 196). Le rocce soggette a metamorfismo, infatti, possono essere interessate dalla formazione di nuovi minerali e dall'aumento del grado di cristallinità e possono assumere nuovi tipi di tessitura più o meno scistosa. Il grado di metamorfismo più o meno elevato influenza la dimensione dei singoli grani minerali formati a seguito del processo di ricristallizzazione (Winkler, 1994, p. 25). La tessitura scistosa, invece, viene assunta dalle rocce che hanno subito una pressione di carico orientata in una direzione e consiste nella disposizione dei minerali secondo giaciture pressoché parallele (Menicali, 1992, p. 16). Tra le molte rocce metamorfiche caratterizzate da una struttura scistosa si annoverano gli gneiss, le ardesie e le lavagne che risultano facilmente lavorabili lungo i piani di sfaldatura. Nella categoria delle rocce metamorfiche rientrano anche i serpentini, i cipollini, le filladi e i marmi. Questi ultimi che derivano dal metamorfismo di rocce calcaree e presentano una struttura cristallina, sono tra i materiali lapidei più pregiati e vengono impiegati in architettura soprattutto con funzione di rivestimento (Fig. 22).



Fig. 22 Marmo arabescato Cervaiolo, marmo calacatta macchia oro, marmo fior di pesco carnico
[Di Sivo, 2004, p. 75]

1.1.1.2. Classificazione merceologica

In base alla classificazione commerciale in uso nel settore edile, codificata dalla norma UNI 8458:1983 (“Prodotti lapidei-Terminologia e classificazione”) oggi sostituita dalla norma UNI 12670:2003 (“Pietre naturali-Terminologia”), i materiali lapidei sono distinti in graniti, marmi, pietre e travertini. Tali raggruppamenti considerati “come famiglie di materiali simili per aspetto e prestazioni” ricomprendono “numeroso tipologie di pietre naturali (..) piuttosto differenziate dal punto di vista geologico” (Boeri, 1996, p. 16-17). Questa classificazione si basa, infatti, sulla durezza, sulla struttura e sulla lucidabilità dei minerali componenti le pietre.

Commercialmente sono definiti graniti i materiali lapidei lucidabili caratterizzati da una struttura cristallina ben visibile, da una superficie estremamente compatta e da valori di durezza elevata pari a 6-7 nella scala di Mohs. A questa categoria appartengono sia rocce magmatiche intrusive ed effusive che rocce metamorfiche come lo gneiss (Menicali, 1992, p. 11).

Sono definiti marmi i materiali lucidabili compatti più teneri, a struttura cristallina o ricomposta per sedimentazione, composti da minerali di durezza Mohs pari a 3-4 (Boeri, 1996, p. 17). In questa categoria rientrano sia i marmi cristallini metamorfici che i calcari compatti e le brecce calcaree.

Si indicano col termine travertini le pietre di origine sedimentaria caratterizzate da un legante calcareo che presentano un'elevata porosità, una colorazione chiara ed una consistenza tenera (Boeri, 1996, p. 17). Dato il basso valore di durezza, pari a 3 nella scala di Mohs, queste pietre risultano facilmente lavorabili. Alcune varietà possono anche essere lucidate (Menicali, 1992, p. 11).

Nella categoria delle pietre rientrano, infine, materiali lapidei generalmente non lucidabili che, essendo di natura geologica diversa, presentano notevoli differenze in termini di aspetto e di caratteristiche comportamentali (Boeri, 1996, p. 17). Le pietre si suddividono in due sottocategorie sulla base della loro diversa compattezza: le pietre poco compatte, con durezza di Mohs compresa tra 2 e 3, sono dette tenere; le pietre con durezza di Mohs compresa tra 3 e 4, invece, sono dette dure. Della prima sottocategoria fanno parte i calcari, le arenarie, i peperini e i tufi mentre nella seconda rientrano le ardesie e i basalti (Menicali, 1992, p. 11).

1.1.2. Proprietà tecniche, prestazioni e caratteristiche delle pietre naturali

I materiali lapidei, per essere utilizzati nelle costruzioni, devono soddisfare molteplici requisiti relativi alle caratteristiche estetiche, di solidità e di resistenza nel tempo (Blanco, 1999, p. 191). La rilevanza dei diversi requisiti varia a seconda della destinazione d'uso prevista per il materiale: in base alla natura e all'entità delle sollecitazioni e delle aggressioni che potrebbero interessare l'elemento lapideo posto in opera, infatti, alcune caratteristiche risultano maggiormente significative di altre. Si deve, pertanto, valutare se il litotipo prescelto possiede ad un livello adeguato le caratteristiche maggiormente significative in rapporto all'uso specifico previsto. Quindi, per effettuare scelte progettuali consapevoli ed evitare il manifestarsi di fenomeni di degrado più o meno gravi, risulta necessaria un'accurata conoscenza delle proprietà tecniche dei diversi litotipi. Poiché le proprietà del materiale derivano dalle caratteristiche chimico-fisiche dei minerali che lo compongono e dal relativo assetto strutturale, lo studio petrografico e chimico è indispensabile per usare in modo appropriato le diverse varietà di roccia (Blanco, 1999, p. 191).

Le proprietà tecniche delle pietre comprendono:

- Colore;
- Durabilità;
- Lavorabilità;
- Proprietà meccaniche;
- Peso specifico e peso di volume;
- Porosità e permeabilità;
- Proprietà termiche;
- Resistenza all'usura o logorabilità.

Attualmente tutte le proprietà tecniche delle pietre naturali sono determinate con prove di laboratorio standardizzate e normate. Le prove di laboratorio sono necessarie soprattutto quando si prevedono "impieghi lapidei a larga scala" (Blanco, 1999, p. 191). In questi casi è opportuno prelevare un numero significativo di campioni da diverse zone del giacimento poiché la pietra, essendo un materiale naturale, presenta una notevole variabilità delle proprietà caratteristiche anche all'interno della stessa cava. L'analisi sperimentale di un numero significativo di campioni consente di definire il range di variazione delle proprietà esaminate e di valutare se alcune di esse risultano, invece, pressoché costanti.

Storicamente, tuttavia, le proprietà tecniche venivano determinate tramite la semplice osservazione o attraverso sistemi empirici (Menicali, 1992, p. 19). Lo studio dei materiali è stato affrontato in modo scientifico solo a partire dal XVIII secolo: in questo periodo, in Francia e in Germania, si è cominciato, infatti, a studiare in modo sistematico le tecniche costruttive associando ai materiali utilizzati valori quantificati di resistenza. Gli autori che hanno contribuito maggiormente a questo processo sono stati l'abbé Charles Bossut che suggerì la possibilità di procedere alla prove dei materiali, É. M. Gauthey e Jean-Rodolphe Perronet che realizzarono un primo dispositivo per testare la resistenza dei materiali, migliorato e reso operativo da Soufflot. Quest'ultimo, infatti, supportato dagli studi di Gauthey e dalle numerose esperienze sulla "forza" delle pietre, inventò nel 1775 una nuova macchina di prova e progettò la chiesa di Saint Geneviève riducendo al minimo le sezioni utili degli elementi strutturali. Tuttavia, fu Rondelet, che aveva registrato i risultati di queste esperienze, a sancire, con la sua opera *Traité théorique et pratique de l'Art de Bâtir*, il passaggio dalla costruzione empiricamente consapevole alla costruzione scientificamente oggettivata. Questo trattato, pubblicato a Parigi nel 1802, è, infatti, il primo manuale della storia poiché fonda l'"arte di edificare" sulla "felice applicazione delle scienze esatte alle proprietà della materia" (Rondelet, 2004a)⁸. Il Libro I, "Conoscenza dei materiali", comprende, difatti, dati scientifici sui diversi materiali da impiegare nelle costruzioni degli edifici, tra cui le pietre naturali, il legname e il ferro, derivati anche dalle esperienze condotte dall'autore per determinarne la "forza". Ai materiali lapidei Rondelet dedica il primo capo delle sezioni prima e seconda del Libro I.

Nella prima sezione fornisce nozioni mineralogiche relative alla composizione e all'origine delle "diverse specie di pietre" distinte "dai minéralogi (..) in quattro classi: 1°. Argillose, 2°. Calcaree, 3°. Gipsee, 4°. Scintillanti" (Rondelet, 2004a, p. 1): l'autore indica i caratteri distintivi di ciascuna classe, descrive le caratteristiche e l'ubicazione delle principali cave di estrazione e elenca alcuni tipi di pietre ad esse appartenenti indicandone l'uso più diffuso nell'"Arte di Edificare" e gli attrezzi necessari alla lavorazione. Negli articoli successivi descrive le caratteristiche del basalto, del porfido, del granito, di diversi tipi di marmo e delle diverse specie di pietra da taglio (Rondelet, 2004a, pp. 4-45).

Nella seconda sezione Rondelet riporta i risultati delle esperienze da lui condotte per determinare "la forza" delle pietre: le proprietà esaminate sono il peso specifico, la durezza e la resistenza a compressione, trattate rispettivamente nell'articolo I, II e III.

Nell'articolo I Rondelet definisce il peso proprio e descrive il modo per determinarlo. Riporta, inoltre, un esempio relativo alla pesatura di un pezzo di granito e presenta, in due tabelle, i pesi specifici di diversi tipi di granito, di porfido, di marmo e di alabastro (Rondelet, 2004a, pp. 108-110).

Nell'articolo II Rondelet riporta i risultati di due esperimenti mirati a stabilire i diversi gradi di durezza dei materiali lapidei: il primo esperimento condotto per stabilire con quale materiale realizzare il pavimento del peristilio della chiesa di Santa Genoveffa, consiste in una prova di usura per attrito radente ed è stato condotto strofinando "scaglie di una stessa grandezza di (..) due specie di marmi e di tre specie di granito (..) caricate da un peso eguale e mosse colla stessa forza ed uguale velocità per tre ore" (Rondelet, 2004a, p. 110); la seconda prova si basava, invece, sulla valutazione della profondità di taglio di una sega impiegata per incidere "pezzi di eguale lunghezza di pietra, di marmo e di granito" (Rondelet, 2004a, p. 110). Le esperienze consentono a Rondelet di affermare

⁸ Felici M (2004) *Prefazione*. In: Rondelet G. Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare. Roma: Editrice Librerie Dedalo.

che le pietre più dure sono anche le più durevoli e che l'elevata durezza di una pietra non è indice di una resistenza "al peso" altrettanto alta (Rondelet, 2004a, p. 111).

Nell'articolo III Rondelet riporta due tavole in cui raccoglie dati relativi al peso specifico di molti tipi di pietre e al peso necessario per "schiacciare" e "infrangere" cubi di prova di 25 centimetri di lato (Rondelet, 2004a, pp. 111-115). Lo scopo di queste tabelle è far comprendere "il rapporto che ha il peso colle altre qualità delle pietre, come sono la durezza e la forza" (Rondelet, 2004a, p. 111). Dai dati raccolti in "molte esperienze accurate e ripetute onde ottenere maggiore esattezza" Rondelet deduce che "le pietre più pesanti non sono sempre le più forti, e che spesso, a peso specifico eguale o minore, quelle che hanno la grana più fina, la tessitura più compatta, i colori più scuri sono quelle che sostengono il più gran peso" (Rondelet, 2004a, pp. 111, 115). L'autore, inoltre, mette in relazione le caratteristiche meccaniche di porfidi, graniti, marmi e pietre ordinarie con alcune altre proprietà caratteristiche: in relazione al porfido afferma che la sua "forza (..) è tanto più grande quanto è più scuro il suo colore e più piccoli i punti dai quali è segnato" (Rondelet, 2004a, p. 115); relativamente ai graniti sottolinea come "sono più forti quanto più le loro parti sono intimamente unite, e la loro cristallizzazione è più perfetta" e come, per queste rocce e per i "marmi di vari colori, e le pietre composte di parti eterogenee" "il colore, il peso e la durezza non sono sempre indizi certi della loro forza" (Rondelet, 2004a, p. 116); in relazione alle "pietre ordinarie della stessa specie e dello stesso colore, la grana delle quali è omogenea" evidenzia come "la forza delle pietre della stessa qualità aumenta quando il loro peso specifico è più grande" (Rondelet, 2004a, p. 116). A conclusione dell'articolo Rondelet presenta una tabella in cui riporta, aggregati, i dati relativi a pietre dello stesso tipo ma di peso specifico diverso indicando "il peso che hanno sopportato" (Rondelet, 2004a, p. 116). Le prove meccaniche sui diversi tipi di materiali lapidei sono state condotte con una nuova macchina di prova, collocata in uno dei vestiboli della chiesa di Santa Genoveffa, messa a punto nel 1787 da Rondelet migliorando quella di Soufflot. Quest'ultima, infatti, in alcune condizioni non consentiva di ottenere risultati corretti. Entrambe le macchine vengono rappresentate nella Tavola VII del Libro I ("Macchine per provare la resistenza comparativa delle pietre sotto lo sforzo della pressione") e descritte nelle note relative (Fig. 23) (Rondelet, 2004a, pp. 198-199).

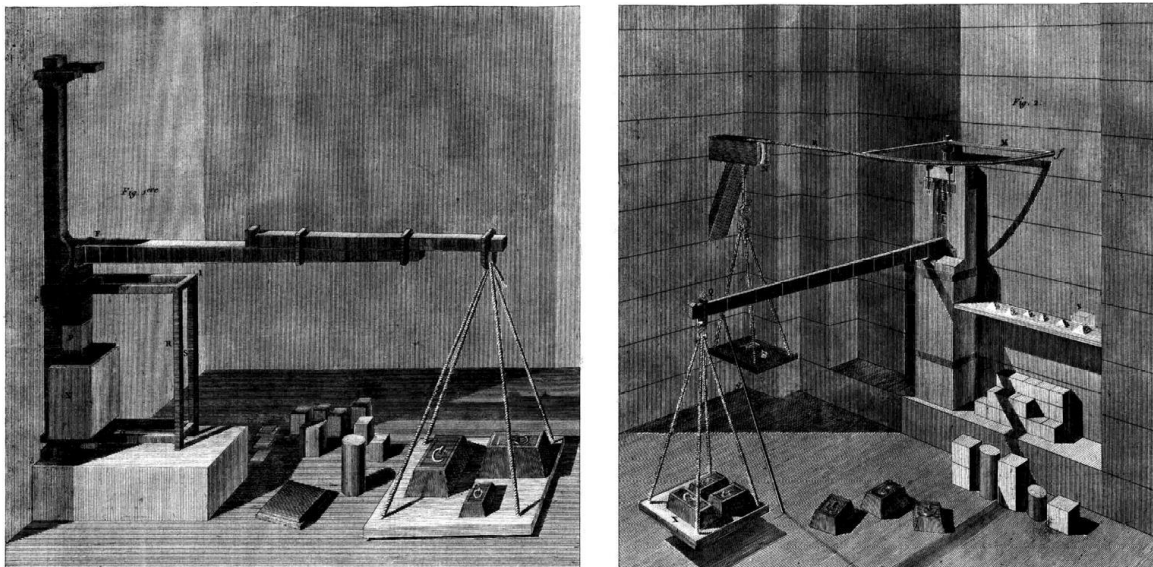


Fig. 23 La macchina di Germain Soufflot (1775) e la macchina di Rondelet (1787)
[Rondelet, 2004a, tavola VII]

1.1.2.1. Colore

I materiali lapidei caratterizzati da un unico colore o da più colori si definiscono rispettivamente monocromi e policromi. Relativamente alla colorazione, inoltre, si distinguono rocce idiocromatiche e allocromatiche: nelle prime il colore è conferito dai soli componenti mineralogici, mentre nelle seconde è conferito dalla presenza di componenti pigmentanti, quali ossidi di ferro, diffusi o disposti in “pellicole avvolgenti gli individui cristallini” (Tassone, 2000, p. 36). La maggior parte delle rocce impiegate in architettura è allocromatica (Boeri, 1996, p. 19). A seconda del tipo di pigmento, si distinguono rocce a pigmentazione carboniosa, rocce a pigmentazione ocraceo-limonitica e limonitica-ematitica, rocce a pigmentazione ematitica e rocce a pigmentazione ferroso-cloritica-serpentinosa (Tassone, 2000, p. 37). La prima categoria comprende calcari di colore nero o paglierino mentre la seconda rocce di tonalità variabile dal giallo al rosa al bruno. Le rocce della terza categoria, invece, presentano colori rossastri a causa della presenza di idrossido ferrico mentre le rocce della quarta categoria hanno un colore verde per la presenza di ossido di ferro, di clorite e serpentino. La colorazione dei materiali lapidei può variare nel tempo, soprattutto nelle rocce allocromatiche che risultano meno stabili delle idiocromatiche per la natura alterabile delle sostanze pigmentanti (Boeri, 1996, p. 19). Le variazioni cromatiche più rilevanti si riscontrano in elementi esposti all'esterno. Come specificato nelle Raccomandazioni NorMaL - 1/88, l'alterazione cromatica “si manifesta attraverso la variazione di uno o più parametri che definiscono il colore” ovvero “tinta (..), chiarezza (..), saturazione (..) e può riferirsi a zone ampie o localizzate” del materiale (Di Sivo, 2004, p. 216). Può essere determinata da fattori chimici o fisico-meccanici legati all'esfoliazione, alla disgregazione e all'alveolizzazione della pietra stessa. Si manifesta in qualsiasi clima e interessa quasi tutti i tipi di rocce (Di Sivo, 2004, p. 216; Tassone, 2000, pp. 37-38):

- i litotipi bianchi tendono ad assumere toni più scuri o ad ingiallire soprattutto in presenza di carbonati di ferro che a contatto con un ambiente umido ossidante producono idrossido di ferro;
- i litotipi neri, ad eccezione di quelli contenenti grafite o ossidi del manganese, sono interessati dalle maggiori variazioni cromatiche poiché i relativi pigmenti organici (carbonio amorfo, sostanze carboniose e bituminose) sono sensibili all'azione combinata dell'acqua e dell'ossigeno e alla radiazione solare;
- i litotipi verdi come il serpentino e le oficalci sono sensibili in particolare all'azione delle acque carbonatate e alla radiazione solare e tendono a schiarire;
- i litotipi rossi, rosa o violacei pigmentati da ematite tendono a scolorire a causa della progressiva idratazione dell'ossido di ferro;
- i litotipi gialli, rossastri o bruni che derivano il loro colore dalla limonite, tendono a scolorire per l'azione degli agenti atmosferici e manifestano spesso macchie abbinatae, nel caso di superfici verticali, a percolazioni di ossido di ferro idrato.

1.1.2.2. Durabilità

La durabilità o durezza è “la resistenza che una roccia, posta in opera nelle costruzioni, oppone al complesso delle azioni meccaniche, fisiche e chimiche dell'atmosfera e all'azione biologica” (Blanco, 1999, p. 72). Gli effetti negativi che interessano i manufatti lapidei esposti ai diversi agenti del degrado riguardano non solo il colore ma anche le altre proprietà tecniche. Per prevenire i

fenomeni di degrado, quindi, è necessario conoscere la natura delle azioni aggressive dei diversi agenti patogeni.

La durabilità dipende sia da fattori intrinseci legati al tipo della roccia che da fattori estrinseci connessi alle condizioni ambientali in cui la roccia è posta in opera.

I primi sono determinati dalla composizione mineralogica, ovvero “dalla qualità, quantità e quindi dal tipo, distribuzione e percentuale dei componenti essenziali e accessori costituenti la roccia” (Blanco, 1999, p. 72). Ad eccezione del quarzo, tutti i componenti delle rocce risultano alterabili. I silicati hanno resistenza variabile mentre alcuni componenti accessori come gli ossidi di ferro, i minerali solforati o i minerali argillosi, possono essere molto attivi in processi deturpanti. L’ossido ferrico, in particolare, a contatto con l’acqua produce idrossido di ferro che innesca il processo di limonizzazione: la formazione di macchie e l’alterazione cromatica che ne conseguono sono correlate alla distribuzione e alla quantità di ferro presente nel materiale (Di Sivo, 2004, p. 200).

Un altro fattore intrinseco a cui è legata la durabilità è rappresentato dallo stato di freschezza o di alterazione della roccia: prodotti lapidei ottenuti da rocce nelle quali è in atto uno stato di alterazione, infatti, sono interessati da processi di degrado più rapidi (Blanco, 1999, p. 73). La durabilità può diminuire, inoltre, qualora il materiale presenti dei difetti strutturali generatisi per cause meccaniche: diaclasi o piani di frattura, spesso otticamente impercettibili, si possono creare nei blocchi di materiale lapideo sia per cause naturali che per cause artificiali legate, ad esempio, all’impiego di esplosivi durante il procedimento di estrazione. Altri difetti sono legati ad inclusioni di vario tipo che possono causare problemi anche in fase di lavorazione.

I fattori estrinseci sono costituiti dagli agenti atmosferici e dalle sostanze inquinanti che determinano l’alterazione delle caratteristiche dei prodotti lapidei impiegati in esterno. Il clima del luogo di installazione ha un ruolo essenziale per la durabilità del materiale: uno stesso litotipo, infatti, può avere comportamenti diversi in contesti caratterizzati da condizioni climatiche differenti. Il clima più favorevole è il clima secco, privo di escursioni termiche diurne e/o stagionali notevoli (Blanco, 1999, p. 73). I forti sbalzi termici, l’elevata umidità e il raggiungimento di temperature particolarmente rigide, invece, risultano molto nocivi. Gli sbalzi termici che interessano il sito di costruzione di un edificio, infatti, generano nei materiali lapidei cicli di espansione e di contrazione, di entità più o meno rilevante a seconda dei rispettivi coefficienti di dilatazione: il conseguente stato di tensioni interne che insorge nel materiale causa fenomeni di rottura e/o di sfaldamento (Di Sivo, 2004, p. 201). In un clima freddo e umido, la severità del danneggiamento dei materiali lapidei è legata non alla temperatura minima raggiunta ma all’elevata frequenza con cui viene oltrepassata la temperatura di congelamento dell’acqua (0 °C), con ripetuti cicli gelo/disgelo e conseguenti fenomeni di espansione/contrazione. Il degrado connesso ai cicli gelo/disgelo è legato al cambiamento di stato dell’acqua piovana o di condensa penetrata per capillarità all’interno dei pori del materiale lapideo: la solidificazione dell’acqua, infatti, determina un aumento di volume del 9% e lo sviluppo di forti pressioni sulle pareti interne dei pori che ne causano la rottura. Questo fenomeno mette in comunicazione i pori dello strato superficiale del materiale con i pori interni chiusi, causando un progressivo aumento della porosità globale della pietra dalla superficie verso l’interno. Inoltre, la resistenza a trazione e a flessione, possono ridursi notevolmente, soprattutto se la capacità di imbibizione è elevata (Di Sivo, 2004, p. 202).

In relazione alle sostanze inquinanti, gli acidi più dannosi per i materiali lapidei sono l’acido carbonico, l’acido nitrico e l’acido solforico contenuti nelle cosiddette piogge acide, piogge

meteoriche caratterizzate da valori di PH inferiore a 7. L'acido carbonico (H_2CO_3), pur essendo un acido debole, risulta molto dannoso poiché reagendo con il carbonato di calcio ($CaCO_3$), componente essenziale delle rocce carbonatiche, dà luogo alla formazione di bicarbonato di calcio ($Ca(HCO_3)_2$), solubile in acqua, con la conseguente dissoluzione del materiale lapideo. L'acido nitrico (HNO_3) e l'acido solforico (H_2SO_4), molto più aggressivi dell'acido carbonico, determinano, invece, la formazione di nitrati e solfati di calcio, sali solubili in acqua, con conseguente lenta disgregazione del materiale lapideo. L'acido solforico oltre ad essere presente nelle piogge acide può derivare anche dall'anidride solforosa (SO_2), un inquinante atmosferico oggi molto diffuso. Oltre ad accelerare la dissoluzione delle pietre carbonatiche causata dall'anidride carbonica, questo acido innesca il processo di solfatazione del carbonato di calcio, che porta alla formazione di solfato di calcio biidrato o gesso. Quest'ultimo col tempo tende a formare delle incrostazioni note come "croste nere" che, presentano un comportamento meccanico e termico diverso da quello del materiale sottostante e che, a causa delle maggiori dilatazioni, possono causare fenomeni di disgregazione o di dissoluzione degli strati superficiali della pietra (Di Sivo, 2004, p. 204).

Un altro inquinante atmosferico dannoso per i materiali lapidei è il materiale particolato (PM, *particulate matter*), una miscela di componenti con composizione chimica e caratteristiche fisiche diverse, classificato in base al diametro aerodinamico delle particelle (Alaimo, Enea, 2014, p. 61). Le polveri e gli incombusti determinano, infatti, il degrado delle superfici in pietra attraverso la formazione di depositi di colore variabile dal grigio al nero (Di Sivo, 2004, p. 204).

L'azione aggressiva di agenti meccanici come le precipitazioni meteoriche, di agenti fisici come l'insolazione, o di agenti chimici veicolati dall'acqua può essere limitata attraverso diversi accorgimenti progettuali. L'adozione di protezioni architettoniche come cornicioni, gronde e porticati, ad esempio, può consentire di impiegare all'esterno anche materiali lapidei più adatti per applicazioni interne (Blanco, 1999, p. 73). Anche il tipo di finitura può limitare il degrado delle pietre naturali impiegate nelle costruzioni. Generalmente gli elementi lapidei con superfici lisce sono più resistenti di quelli a superficie ruvida. Gli elementi più resistenti sono quelli con superfici lucidate che non trattengono polveri e depositi di acqua ed evitano, quindi, l'attecchimento di specie vegetali, frequente soprattutto su superfici esposte a nord o con scarso irraggiamento solare.

Il degrado e la durabilità dei materiali lapidei sono oggetto di numerose ricerche.

Alcune hanno studiato sperimentalmente la durabilità di differenti litotipi per valutare l'efficacia di prodotti consolidanti o protettivi (Di Benedetto et al., 2015), l'affidabilità di modelli matematici sviluppati per prevedere il decadimento delle proprietà meccaniche (Jamshidi et al., 2013) e la relazione tra le proprietà petrografiche, fisiche e meccaniche nei processi di degrado tipici di condizioni ambientali differenti (Cantisani et al., 2013; Martínez-Martínez et al., 2013), o per definire una classificazione basata su criteri di qualità (Vázquez et al., 2013).

Altre ricerche hanno studiato i fenomeni di degrado connessi con l'esposizione di pietre naturali ad alte temperature (Ozguven, Ozcelikb, 2014), alle piogge acide (Rosso et al., 2016a) o alla cristallizzazione salina (Urosevic et al., 2010) per valutare rispettivamente il cambiamento di alcune proprietà fisico-meccaniche, la variazione delle proprietà ottiche di luminosità, brillantezza e riflessione speculare e l'influenza del tipo di trattamento di finitura o delle caratteristiche dei pori sulla severità del deterioramento.

Infine, alcune ricerche hanno proposto degli indicatori definiti a partire dalla porosità e dalla resistenza meccanica delle pietre per valutare in modo speditivo la durabilità dei litotipi soggetti a fenomeni di cristallizzazione salina o per predire i risultati di test di laboratorio (Benavente et al., 2004; Yu, Oguchi, 2010) mentre altre hanno determinato una correlazione tra le caratteristiche microstrutturali e il degrado di alcuni litotipi sottoposti a test di invecchiamento accelerato in soluzioni acide, utile per prevedere quantitativamente il deterioramento di tipi di pietre non testate causato da piogge acide (Franzoni, Sassoni, 2011).

La maggior parte degli studi relativi al degrado dei materiali lapidei sono stati condotti attraverso tre tipi di test di invecchiamento accelerato eseguiti in laboratorio ovvero attraverso test gelo/disgelo (Cantisani et al., 2013; Di Benedetto et al., 2015; Jamshidi et al., 2013; Martínez-Martínez et al., 2013; Vázquez et al., 2013), test di cristallizzazione salina (Benavente et al., 2004; Cantisani et al., 2013; Di Benedetto et al., 2015; Vázquez et al., 2013; Yu, Oguchi, 2010), e test “*acid rain*” (Cantisani et al., 2013; Franzoni, Sassoni, 2011; Rosso et al., 2016a; Urosevic et al., 2010). I tre tipi di test consentono di simulare diverse condizioni ambientali (ambiente marino, ambiente montano, ambiente urbano) e di valutare il cambiamento delle proprietà meccaniche e fisiche dei materiali lapidei causato dai fenomeni di degrado in modo da poter comparare la durabilità di differenti litotipi, stabilire la loro qualità in termini relativi e valutare il modo migliore di impiegarli nelle costruzioni (Vázquez et al., 2013). I tre tipi di prova sono standardizzati da norme tecniche nazionali che fissano la durata e il numero dei cicli da eseguire e i valori delle grandezze fisiche da adottare: alcune di queste norme sono la UNE-EN 12371 (“Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad” AENOR, Madrid, 2002), la UNE-EN 12370 (“Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de sales” AENOR, Madrid, 1999), la UNI EN 12371 (“Metodi di prova per pietre naturali: determinazione della resistenza al gelo”, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2010) e la UNI EN 12370 (“Metodi di prova per pietre naturali: determinazione della resistenza alla cristallizzazione dei Sali”, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2010).

I test gelo/disgelo consistono nel sottoporre campioni, saturati con acqua distillata, a variazioni cicliche di temperatura all’interno di una camera climatica. Ogni ciclo prevede tre fasi (Martínez-Martínez et al., 2013): nella prima la temperatura viene abbassata al di sotto degli 0 °C senza aggiungere acqua nella camera climatica; nella seconda si induce un ulteriore abbassamento della temperatura; nella terza fase la temperatura viene innalzata e la camera climatica viene riempita di acqua distillata. Al termine dell’ultimo ciclo, i campioni vengono sottoposti ad asciugatura per poi valutare la perdita di peso dovuta alla formazione di ghiaccio e alla conseguente disgregazione di materiale. Possono essere eseguite anche prove ultrasoniche e porosimetriche.

Il test di cristallizzazione salina consiste nell’immersione in soluzioni saline di campioni lapidei preventivamente caratterizzati con prove meccaniche e porosimetriche. Le soluzioni comunemente impiegate sono a base di Na_2SO_4 (Benavente et al., 2004; Vázquez et al., 2013). Vengono eseguiti più cicli di immersione, tutti con la stessa durata: ogni ciclo si compone di due fasi, una ad elevata temperatura e umidità relativa ed una caratterizzata da bassi valori di queste due grandezze tali da far precipitare i sali. Al termine di ogni ciclo, i campioni vengono lavati con acqua distillata per eliminare i sali e asciugati in forno fino a raggiungere un peso costante in modo da poter calcolare la perdita di peso rispetto al ciclo precedente. Esistono anche altre tipologie di test di cristallizzazione salina sviluppati per simulare condizioni ambientali specifiche come quelle tipiche delle aree marine: in

questi test vengono impiegate camere climatiche dette “*saline spray chambers*” e soluzioni a base di NaCl. In queste camere, per rendere le condizioni di prova il più possibile simili a quelle reali, può essere impiegata anche acqua di mare (Urosevic et al., 2010).

Le prove che simulano l’effetto delle piogge acide (“*acid rain*”) sono effettuate immergendo in soluzioni acide campioni di materiali lapidei di cui sono state preventivamente valutate le principali caratteristiche (composizione mineralogica, densità, porosità...). Le soluzioni più impiegate sono a base di acido solforico o di acido nitrico ed hanno un PH generalmente pari a 4 o 5 che corrisponde al PH tipico delle piogge che si verificano nelle città europee negli ultimi anni. Il degrado viene valutato misurando periodicamente la perdita di peso dei campioni poiché questo metodo consente di considerare non solo il degrado di natura chimica legato alla dissoluzione dei componenti carbonatici ma anche la perdita di materiale connessa con la dissoluzione del legante carbonatico (Franzoni, Sassoni, 2011).

Altri studi sono basati, invece, su dati ottenuti con prove in campo (Delalieux et al., 2002; Kucera, 2007; Lan et al., 2005): in questi test campioni di materiali lapidei vengono esposti in ambiente esterno per lunghi periodi, sia in presenza che in assenza di protezioni. Spesso le prove sono eseguite contemporaneamente in più siti caratterizzati da differenti livelli di inquinamento atmosferico e da diverse condizioni climatiche (aree urbane, aree urbano-industriali, aree urbano-marittime, aree rurali). Al termine della prova vengono valutate le variazioni nello spessore dei campioni e vengono studiati i prodotti della corrosione del materiale.

1.1.2.3. Lavorabilità

La lavorabilità è l’attitudine che i diversi materiali lapidei presentano ad essere lavorati assumendo delle forme e dei trattamenti superficiali specifici (Boeri, 1996, p. 18). È strettamente dipendente dalle caratteristiche petrografiche del litotipo: le principali caratteristiche che determinano la lavorabilità della pietra sono la durezza, la segabilità, la spaccabilità, la scolpibilità e la lucidabilità (Blanco, 1999, p. 109).

La durezza in mineralogia è “la resistenza alla scalfitura da parte di una punta o di uno spigolo di un altro corpo” (Blanco, 1999, p. 109). In petrografia questa definizione è applicabile solo alle rocce monominerali: la durezza di queste rocce, infatti, dipende da quella del loro costituente mineralogico essenziale. Per le altre tipologie di rocce, invece, si considera la durezza apparente. In base alla scala di Mohs si distinguono rocce molto dure, dure, mediamente dure, tenere e molto tenere: queste definizioni si collegano al valore della resistenza allo schiacciamento della roccia, spesso espressa in kg/cm^2 , e alla quantità di minerale a elevata durezza (superiore a 5,5 secondo la scala di Mohs) in essa presente (Blanco, 1999, p. 109).

Sulla durezza può influire anche la presenza di acqua di cava: le rocce che in posto presentavano un certo grado di umidità subiscono, infatti, un processo di indurimento a causa dell’evaporazione della stessa. Per questo motivo Andrea Palladio consigliava di lavorare le rocce appena cavate.

La capacità di resistenza alla scalfitura può essere misurata anche come microdurezza di Knoop (Boeri, 1996, p. 18): la prova definita dalla norma UNI EN 14205: 2004⁹ (“Metodi di prova per pietre

⁹ La UNI EN 14205: 2004 ha sostituito la norma UNI 9724-6: 1990 (“Materiali lapidei. Determinazione della microdurezza Knoop”). Nel 2015 è stata ritirata ma non è stata sostituita.

naturali - Determinazione della durezza Knoop”) consiste nella misura di una serie di impronte prodotte da un penetratore premuto con un determinato carico sulla superficie lucidata a specchio di un provino di roccia. La microdurezza di Knoop è espressa dal rapporto tra il carico agente sul penetratore e il quadrato della lunghezza della diagonale maggiore dell’impronta lasciata sul provino.

La segabilità è la propensione che le diverse rocce hanno ad essere tagliate per mezzo di utensili come seghe a denti, seghe lisce e sabbia silicea o seghe diamantate (Blanco, 1999, p. 110). In relazione a questa proprietà, che è quella maggiormente collegata alla durezza, le rocce vengono classificate in quattro categorie:

- Rocce tenere, segabili con seghe dentate;
- Rocce semidure, segabili con seghe lisce, con il filo elicoidale e la sabbia silicea oppure con seghe dentate;
- Rocce dure, segabili con seghe lisce e sabbia quarzosa;
- Rocce durissime, segabili con seghe lisce con abrasivo a smeriglio, polvere di diamante o carborundum.

La segabilità influisce molto sul valore economico della pietra poiché condiziona fortemente i costi di lavorazione relativi sia alla fase di estrazione dei blocchi nella cava sia alla successiva fase di trasformazione in azienda finalizzata alla loro riduzione in semilavorati.

La spaccabilità o divisibilità è la “proprietà che alcune rocce presentano a rompersi, secondo superfici più o meno piane, sotto l’azione di utensili a percussione” (Blanco, 1999, p. 119). È strettamente correlata alla struttura scistosa o orientata delle rocce.

Si distinguono tre piani di spaccabilità tra loro ortogonali che risultano particolarmente evidenti nelle rocce magmatiche (Boeri, 1996, p. 18). Questi piani sono detti verso o pioda, secondo verso o trincante e controverso o mozzatura: il primo è caratterizzato da una spaccabilità facile, il secondo da una normale, il terzo da una difficile.

La spaccabilità è importante ai fini dell’utilizzo dei materiali lapidei per pavimentazioni, rivestimenti e opere di paramento (Blanco, 1999, p. 109).

La scolpibilità è “l’attitudine che le diverse rocce presentano a lasciarsi scolpire, con le diverse tecniche scultoree, mediante appositi utensili a percussione (..) e con propulsori manuali o pneumatici” (Blanco, 1999, p. 110). Generalmente tutte le rocce dure, semidure e tenere omogenee a grana uniforme e medio-piccola, non particolarmente tenaci sono caratterizzate da una buona scolpibilità.

La lucidabilità, infine, è “l’attitudine che le diverse rocce presentano a lasciarsi polimentare, assumendo una superficie lucida e brillante” (Blanco, 1999, p. 110). Le operazioni di lucidatura sono basate sull’impiego di varie sostanze abrasive tra cui il carborundum, lo smeriglio a grana decrescente, la pomice e il piombo: queste sostanze vengono sfregate manualmente o per mezzo di appositi macchinari sulla superficie del materiale lapideo. La lucidatura può essere eseguita sia su superfici piane che su superfici curve, migliorandone le caratteristiche estetiche e la resistenza agli agenti aggressivi.

Le rocce dure e semidure hanno una maggiore propensione ad essere lucidate rispetto alle rocce tenere. Su queste ultime, infatti, il risultato della lucidatura è buono solo se il materiale risulta abbastanza omogeneo e coerente. Il trattamento di polimentazione può essere eseguito con buoni risultati anche sulle rocce durissime ma l'operazione risulta molto costosa. In generale, la lucidatura è migliore in rocce monominerali o poliminerali costituite da componenti di durezza simile.

1.1.2.4. Proprietà meccaniche

Le proprietà meccaniche comprendono la resistenza a compressione, la resistenza a trazione, la resistenza a flessione e la resistenza agli urti.

La resistenza a compressione è la resistenza che il materiale lapideo oppone alle sollecitazioni che tendono a frantumarlo per schiacciamento. È uno dei requisiti più importanti richiesti alle pietre ornamentali e da costruzione (Blanco, 1999, p. 145). Si esprime mediante il rapporto tra il carico necessario a provocare la rottura di un provino cubico o cilindrico di materiale e l'area della relativa sezione trasversale. Il metodo per determinare sperimentalmente questa proprietà è descritto nella norma tecnica UNI EN 1926: 2007 ("Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della resistenza a compressione uniassiale").

Le pietre sono caratterizzate da resistenze alla compressione molto diverse. Nelle rocce omogenee la resistenza a compressione aumenta con la diminuzione della dimensione dei grani mentre nelle rocce stratificate i valori di resistenza sono diversi a seconda dell'angolo di stratificazione (Winkler, 1994, p. 45). Generalmente, nella progettazione, si considera un carico di sicurezza ammissibile pari a 1/5 del carico di rottura del materiale (Boeri, 1996, p. 17).

I fattori rilevanti che possono influenzare i risultati delle prove sono la presenza di acqua nel materiale e l'esposizione a condizioni di gelività (Boeri, 1996, p. 18).

La resistenza a trazione è la resistenza che il materiale lapideo oppone alle sollecitazioni che tendono a romperlo per stiramento. Dipende sia dalla resistenza dei grani minerali che da quella del cemento che lega grani minerali adiacenti (Winkler, 1994, p. 45). I valori di resistenza a trazione delle pietre sono molto modesti, mediamente pari a circa 1/30 della resistenza a compressione (Blanco, 1999, p. 145). Pertanto, nella progettazione si evita di impiegare elementi lapidei in applicazioni in cui sarebbero interessati da sollecitazioni di trazione. Gli elementi di progetto, tuttavia, devono essere in grado di sopportare la componente di trazione presente nella sollecitazione di flessione.

I valori più elevati di resistenza a trazione si riscontrano nelle rocce a struttura compatta e omogenea, con cristalli lamellari, con struttura reticolare e con limitata porosità (Blanco, 1999, p. 145; Boeri, 1996, p. 17). Per rocce con struttura scistosa si determinano valori di resistenza a trazione diversi esercitando le sollecitazioni in modo parallelo o perpendicolare ai piani di scistosità: la resistenza, infatti, risulta più alta se il carico viene applicato perpendicolarmente alla direzione di stratificazione del materiale (Cardani, Meda, 1999).

La resistenza a flessione è la resistenza che il materiale lapideo oppone alle sollecitazioni tendenti ad incurvarlo (R.D. 2232/1939, art.14; R.D. 2234/1939, art. 4). Il metodo per determinare sperimentalmente questa proprietà è descritto nella norma tecnica UNI EN 12372: 2007 ("Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della resistenza a flessione sotto carico concentrato"). La

resistenza a flessione di una roccia è correlata ai caratteri generali del materiale che risultano importanti anche ai fini di una sua buona resistenza alla trazione: pertanto, le pietre che presentano una buona resistenza a trazione sono generalmente caratterizzate da valori più elevati di resistenza a flessione (Boeri, 1996, p. 18). I valori possono variare tra 1/5 e 1/25 della resistenza alla compressione. Il rapporto più frequente è pari a 1/7 (Blanco, 1999, p. 146).

Ai fini di una corretta progettazione, questa proprietà risulta particolarmente importante qualora si preveda l'applicazione del materiale in coperture, in architravi portanti, in pavimenti sopraelevati o in lastre per sedili e balconi (Blanco, 1999, p. 146).

La determinazione sperimentale della resistenza a compressione, a trazione e flessione delle pietre naturali pone delle problematiche connesse con la differenza dimensionale tra i campioni testati e gli elementi strutturali di progetto in cui il materiale deve essere impiegato: è stato dimostrato sperimentalmente, infatti, che le proprietà meccaniche delle pietre da costruzione dipendono dalla forma e dalla dimensione dei provini e che, in alcuni casi, la dipendenza non risulta uniforme ma irregolare (Cardani, Meda, 1999; Kourkoulis, Ganniari-Papageorgiou, 2010). Lo studio di questo fenomeno risulta essenziale soprattutto nei lavori di restauro nei quali è necessario selezionare un materiale lapideo con caratteristiche simili a quello originario per effettuare le operazioni di sostituzione: in questi casi, infatti, la scelta del materiale da impiegare nell'intervento viene effettuata sulla base dei risultati di prove sperimentali condotte su campioni del materiale originario che, per ragioni conservative, devono essere di piccole dimensioni (Kourkoulis, Ganniari-Papageorgiou, 2010).

La resistenza all'urto, infine, è la resistenza che il materiale lapideo oppone alla rottura mediante il colpo di un corpo contundente. La conoscenza di questa proprietà è essenziale qualora si preveda di impiegare il materiale lapideo in pavimentazioni industriali, in pavimentazioni civili e in lastre di copertura (Blanco, 1999, p. 147). Secondo quanto stabilito da R.D. 2232/1939, art.15 e R.D. 2234/1939, art. 3 la resistenza all'urto viene determinata studiando il comportamento di una lastra parallelepipedica a base quadrata con lato di 20 cm e spessore di 3 cm, posta su un letto di sabbia di 10 cm e sollecitata da un peso sferico di 1 kg lasciato cadere da altezze crescenti sino a provocare la rottura della lastra stessa (Blanco, 1999, p. 147; Boeri, 1996, p. 17). Il coefficiente di resistenza o di rottura all'urto è espresso dal prodotto tra l'altezza di caduta che ha determinato la rottura del provino, e il peso della sfera.

In relazione alla resistenza all'urto le rocce vengono classificate in due categorie, rocce tenaci e rocce fragili. Le rocce con struttura compatta e omogenea, con elementi cristallini allungati e con tessitura feltrata risultano più tenaci (Blanco, 1999, p. 147).

1.1.2.5. Peso specifico e peso di volume delle pietre

Il peso specifico di una roccia, secondo quanto stabilito dal R.D. 2232/1939, art. 6, viene espresso dal rapporto tra il peso di un determinato volume di materiale lapideo ridotto in polvere e il peso di un uguale volume di acqua distillata alla temperatura di 4 °C (Blanco, 1999, p. 165).

Il peso di volume, invece, è espresso dal rapporto tra il peso di un certo volume di roccia allo stato naturale e il volume stesso (Boeri, 1996, p. 17). Veniva definito dalla norma tecnica UNI 9724-2:

1990 (“Materiali lapidei. Determinazione della massa volumica apparente e del coefficiente di imbibizione”)¹⁰ come massa volumica apparente.

La conoscenza del peso di volume consente di valutare la compattezza della roccia e, quindi, la sua minore o maggiore resistenza e durabilità (Blanco, 1999, p. 165). In base al peso di volume, le rocce possono essere classificate in rocce molto leggere, leggere, medio-pesanti, pesanti e molto pesanti. Il peso di volume e il peso specifico di una roccia caratterizzata da un’elevata porosità risultano molto diversi. Invece, per le rocce compatte il primo si approssima molto per entità al secondo (Blanco, 1999, p. 165).

1.1.2.6. Porosità e permeabilità

La porosità dei materiali lapidei viene espressa con il coefficiente di porosità. Questo coefficiente è ottenuto come il rapporto tra il volume dei pori o dei vuoti interclusi nel materiale e il volume totale della roccia (Winkler, 1994, p. 32). Essendo direttamente proporzionale alla presenza di vuoti all’interno della roccia, consente di valutarne la compattezza (Boeri, 1996, p. 17). Le rocce magmatiche, presentando una tessitura serrata dei minerali componenti, sono caratterizzate generalmente da valori di porosità molto bassi. I valori risultano più elevati, tuttavia, per i litotipi magmatici che contengono grani di quarzo. Anche nelle rocce metamorfiche lo spazio occupato dai pori è solitamente minimo mentre nelle rocce sedimentarie la porosità e la distribuzione spaziale dei vuoti è soggetta a grandi variazioni (Winkler, 1994, p. 33).

La porosità è la caratteristica microstrutturale che più influenza il comportamento della pietra come materiale da costruzione (Di Benedetto et al., 2015): la resistenza al degrado e le caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali lapidei, infatti, sono strettamente dipendenti dal tipo di pori e dal loro volume. La porosità ha un ruolo chiave nei processi di degrado perché la rete dei pori consente la penetrazione dell’acqua che veicola i sali o gli inquinanti responsabili dei processi di deterioramento fisici e chimici. Inoltre, la porosità è correlata alla resistenza a compressione: in genere, infatti, le rocce caratterizzate da un’elevata porosità presentano una minore resistenza a compressione (Winkler, 1994, pp. 34-35).

La permeabilità o penetrabilità rappresenta l’attitudine della roccia ad essere attraversata dall’acqua. È proporzionale alla porosità del materiale: le rocce porose, infatti, presentano generalmente un alto grado di permeabilità. Tuttavia, neppure le rocce più compatte si possono considerare impermeabili (Boeri, 1996, p. 18).

Nella progettazione, il grado di permeabilità all’acqua dei materiali lapidei deve essere accuratamente considerato per evitare fenomeni di degrado, soprattutto nei casi in cui si prevede l’applicazione di elementi di pietra in coperture o in rivestimenti esterni di parete esposti all’azione dilavante delle precipitazioni meteoriche (Blanco, 1999, p. 189).

¹⁰ La UNI 9724-2: 1990 è stata sostituita dalla norma UNI EN 13755: 2002 (“Metodi di prova per pietre naturali determinazione dell’assorbimento d’acqua a pressione atmosferica”) che a sua volta è stata sostituita dalla UNI EN 13755: 2008 (“Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione dell’assorbimento d’acqua a pressione atmosferica”).

1.1.2.7. Proprietà termiche

Le proprietà termiche delle pietre sono relative alla dilatazione termica, alla conducibilità termica, alla refrattarietà e alla resistenza agli sbalzi termici.

La dilatazione termica viene quantificata con il coefficiente di dilatazione lineare che si definisce come l'incremento che subisce una sbarretta di un certo materiale lunga 1 cm riscaldata di 1°C. Il coefficiente di dilatazione delle rocce assume valori che risultano intermedi tra quello dei metalli e quello del legno, e inferiori a quello del calcestruzzo di cemento: può variare, infatti, da 0,000004 a 0,000012 (Blanco, 1999, p. 216).

Anche se la dilatazione termica delle pietre non è molto rilevante e dà luogo ad allungamenti modesti, le rocce sono caratterizzate valori molto elevati del modulo di elasticità (E) e risultano, quindi, rigide. Pertanto, gli elementi lapidei in opera cui è impedita la dilatazione, vengono interessati da sollecitazioni interne molto forti che ne determinano il danneggiamento (Boeri, 1996, p. 19). I danni più rilevanti si riscontrano nei rivestimenti esterni esposti a irraggiamento solare o nei pavimenti lapidei con pannelli radianti: in assenza di opportuni accorgimenti, infatti, possono verificarsi distacchi di lastre, deformazioni e fessurazioni (Blanco, 1999, p. 216). Nel progetto di rivestimenti orizzontali e verticali esterni, pertanto, deve essere previsto un sistema di giunti di dilatazione capace di assorbire gli allungamenti determinati dalla dilatazione termica: per evitare l'insorgere di sollecitazioni interne agli elementi lapidei, la larghezza dei giunti deve essere proporzionata alle dimensioni degli elementi adottati (Blanco, 1999, p. 216).

La conducibilità termica interna è la maggiore o minore propensione che i materiali presentano a lasciar propagare il calore al loro interno. Nelle rocce la conducibilità termica è molto bassa ed è correlata più con la loro struttura e tessitura che con la loro composizione mineralogica (Blanco, 1999, p. 216). Infatti, rocce caratterizzate da strutture a porosità elevata, formate da piccoli vacuoli indipendenti, ostacolano la trasmissione del calore più delle rocce a struttura compatta (Boeri, 1996, p. 19).

Alla conducibilità termica è legata la maggiore o minore inerzia termica delle murature realizzate in pietra (Blanco, 1999, p. 216).

La refrattarietà ovvero la resistenza al fuoco dei materiali lapidei, è generalmente buona (Boeri, 1996, p. 19). Le rocce contenenti allumina e quarzo, in particolare, risultano molto resistenti al calore (Blanco, 1999, p. 217). La refrattarietà deve essere considerata oltre che nei casi in cui si prevede l'impiego di materiali lapidei in focolari e camini, anche ai fini della prevenzione incendi.

1.1.2.8. Resistenza all'usura o logorabilità

La resistenza all'usura è la resistenza che una roccia oppone all'attrito. Per stabilire la resistenza all'usura dei diversi litotipi si impiegano prove di usura per attrito radente e prove di usura al getto di sabbia, al termine delle quali si misura lo spessore dello strato abraso (Blanco, 1999, p. 225; Boeri, 1996, p. 18).

La prima prova, normata dal R.D. 2232/1939, art. 11 e dal R.D. 2234/1939, art.5, viene effettuata attraverso un tribometro. Questo apparecchio è costituito da un disco di ghisa con sabbia abrasiva, che ruota intorno al proprio asse verticale con velocità uniforme di 1 m/s. I provini di pietra vengono

posti a contatto con il disco mediante dispositivi collocati superiormente allo stesso. Valutando lo strato abraso dopo una percorrenza di 1000 m, si calcola il coefficiente assoluto di abrasione. È possibile determinare anche il coefficiente relativo di abrasione ponendo contemporaneamente sul tribometro due provini realizzati uno con il materiale da esaminare e l'altro con un materiale tipo (Blanco, 1999, pp. 225-226).

La prova di usura al getto di sabbia, normata dal R.D. 2232/1939, art. 12 e dal R.D. 2234/1939, art. 6, consiste, invece, nel proiettare in una zona dei campioni delimitata da un diaframma circolare di 6 cm, un getto di sabbia ad una certa pressione: dopo aver esercitato un'azione abrasiva di 2 minuti, vengono valutati gli effetti prodotti sui campioni in termini di cambiamento d'aspetto e di perdita di peso (Blanco, 1999, p. 226).

I valori minori di resistenza all'usura si riscontrano in rocce con componenti teneri e legami deboli (Boeri, 1996, p. 18). In base alla loro logorabilità, le rocce si distinguono in rocce poco logorabili, rappresentate dalle rocce eruttive, abbastanza logorabili, rappresentate dalle rocce scistose, e logorabili, rappresentate dalle rocce sedimentarie (Blanco, 1999, p. 226).

Nella progettazione, la valutazione della resistenza all'usura risulta essenziale quando i materiali lapidei devono essere impiegati in condizioni di traffico intenso: l'utilizzo in queste applicazioni di litotipi poco resistenti all'usura, infatti, comporterebbe l'insorgenza di diversi tipi di alterazione tra cui la perdita della lucidatura, la creazione di scabrosità e il distacco di parti (Boeri, 1996, p. 18).

1.2. MATERIALI ARTIFICIALI DERIVATI DALLA PIETRA

1.2.1. Calcestruzzi ottenuti da scarti di estrazione o lavorazione della pietra

Gli scarti prodotti dall'estrazione della pietra naturale e dalla sua trasformazione costituiscono un serio problema ambientale (Fig. 24). Il quantitativo generato in rapporto al materiale effettivamente utilizzato, infatti, è molto elevato: nell'industria del marmo, ad esempio, gli scarti rappresentano l'80-90% della pietra estratta (Sardinha, de Brito, Rodrigues, 2016).

Si distinguono scarti solidi, polveri di cava e fanghi di lavorazione. Gli scarti solidi derivano dalle operazioni di cava o di trasformazione e consistono in frammenti di grandezza variabile che presentano fratture, dimensioni inadeguate o basso valore commerciale (Karaca, Pekin, Deliormanli, 2012). Le polveri di cava, invece, sono prodotte dai processi di estrazione, trascinamento e frantumazione eseguiti per produrre aggregati per calcestruzzi (Galetakis, Soultana, 2016). I fanghi di lavorazione, infine, sono una sostanza semiliquida composta da particelle lapidee originate dai processi di estrazione, segazione e lucidatura, e da acqua impiegata per raffreddare e lubrificare le attrezzature (Galetakis, Soultana, 2016). Il trattamento e lo smaltimento di queste ultime due tipologie di scarto pone i problemi ambientali più gravi dal momento che la loro dispersione nell'atmosfera, nell'acqua o nel suolo risulta molto dannosa (Galetakis, Soultana, 2016).



Fig. 24 Scarti di estrazione della pietra naturale
[Galetakis, Soultana, 2016, p. 770]

Attualmente si cerca di dare risposta al problema rappresentato dagli scarti anche attraverso il loro recupero nel settore delle costruzioni: in questo settore, infatti, gli scarti possono essere valorizzati nella produzione di materiali innovativi e in particolare di calcestruzzi.

Nella produzione di conglomerati gli scarti possono essere impiegati come aggregati o in sostituzione di parte del legante cementizio, riducendo i problemi legati al loro smaltimento e limitando il consumo di materiali lapidei naturali grezzi (Rana et al., 2016). L'uso degli scarti in sostituzione parziale del legante, inoltre, può consentire la riduzione delle emissioni di CO₂ connesse con la produzione del cemento, responsabile del 5-7% delle emissioni globali di anidride carbonica (Galetakis, Soultana, 2016).

Gli scarti possono essere usati per produrre vari tipi di calcestruzzi tra cui anche calcestruzzi auto-compattanti, calcestruzzi ad alte prestazioni, calcestruzzi rinforzati con fibre sintetiche o calcestruzzi leggeri (Galetakis, Soultana, 2016).

In ambito accademico e industriale si rileva interesse crescente per i calcestruzzi ottenuti con scarti lapidei: la maggior parte degli studi relativi a questa tematica, infatti, è stata pubblicata dopo il 2009 (Galetakis, Soultana, 2016). Molte ricerche si sono concentrate sul recupero dei fanghi di lavorazione e delle polveri di cava come aggregati fini o sostituti del cemento valutando le proprietà meccaniche e di durabilità dei conglomerati ottenuti e determinando la percentuale ottimale di impiego di queste tipologie di scarti (Almeida, Branco, Santos, 2007; Galetakis, Soultana, 2016; Rodrigues, de Brito, Sardinha, 2015; Sardinha, de Brito, Rodrigues, 2016). È stato valutato sperimentalmente che la sostituzione dell'aggregato fine con scarti sino ad una percentuale massima del 20% non pregiudica le proprietà meccaniche del conglomerato (Almeida, Branco, Santos, 2007). Invece, una sostituzione del cemento con scarti lapidei secondo una percentuale pari al 5-10% determina una riduzione delle proprietà meccaniche e di durabilità accettabile (Rodrigues, de Brito, Sardinha, 2015; Sardinha, de Brito, Rodrigues, 2016). L'impiego di additivi superplasticizzanti nell'impasto dei calcestruzzi ottenuti con scarti è risultato benefico sia in termini di resistenza meccanica che in termini di durabilità (Rodrigues, de Brito, Sardinha, 2015; Sardinha, de Brito, Rodrigues, 2016). Inoltre, è emerso che l'adozione dei superplasticizzanti può compensare efficacemente la riduzione della lavorabilità dei calcestruzzi ottenuti sostituendo gli aggregati o il cemento con scarti lapidei (Rana et al., 2016).

1.2.2. I lapidei agglomerati

I lapidei agglomerati sono semilavorati interamente realizzati in officina (Dal Buono, 2007), tecnicamente definibili come “materiali compositi” (Tassone, 2000, pp. 17, 150): si ottengono, infatti, dall'unione di frammenti lapidei, di polveri di origine silicea o calcarea e di sostanze leganti.

I frammenti lapidei utilizzati nel processo di fabbricazione presentano forme e dimensioni diverse e costituiscono lo “scheletro strutturale del materiale” (Tassone, 2000, p. 26). Possono essere ottenuti da differenti litotipi scelti a seconda delle caratteristiche estetiche desiderate: l'aspetto del prodotto finito, infatti, è fortemente influenzato dalla natura delle rocce di origine dei granulati poiché essi rappresentano i due terzi del volume totale della formulazione e, quindi, la parte predominante del materiale composito. Il tipo di pietra naturale impiegato condiziona alcune caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche del prodotto finito, come il grado di assorbimento d'acqua e la resistenza chimica agli acidi. La granulometria dei frammenti impiegati determina, inoltre, il contenuto di legante e deve essere, quindi, accuratamente determinata attraverso il metodo della setacciatura: la quantità del legante nel prodotto finito è tanto minore quanto maggiore è il diametro dei componenti aggregati (Dal Buono, 2007; Tassone, 2000, p. 151).

Le polveri sono generalmente ottenute dalla macinazione di carbonato di calcio o di quarzo che vengono preferiti per ragioni economiche e di facile reperibilità. Il carbonato di calcio è adottato in lapidei agglomerati fabbricati con granulati di origine calcarea come frammenti di marmi e di pietre calcaree mentre il quarzo è impiegato per i materiali prodotti con granulati di origine silicea come frammenti di graniti e sabbie quarzose (Tassone, 2000, p. 38). La granulometria delle polveri deve consentire la chiusura della porosità intergranulare e il mantenimento di un'adequata lavorabilità dell'impasto senza un aumento eccessivo della quantità di legante: le dimensioni massime, pertanto, sono generalmente inferiori a 0,045 mm (Tassone, 2000, pp. 26, 39). Le polveri svolgono la funzione di riempitivo tra granulato e legante e sono dette, quindi, *filler*. Inoltre, contribuiscono a migliorare

le proprietà meccaniche del materiale e ne condizionano le caratteristiche estetiche e fisiche tra cui il colore e la resistenza agli agenti chimici (Tassone, 2000, p. 38).

I leganti impiegati nella realizzazione dei lapidei agglomerati sono di tipo inorganico tradizionale o di tipo organico sintetico: in base alla natura del legante si distinguono, infatti, prodotti agglomerati a matrice cementizia e prodotti agglomerati a matrice resinosa che presentano caratteristiche tecniche e prestazionali differenti (Tassone, 2000, p. 150). Il legante inorganico maggiormente utilizzato è il cemento Portland, bianco o grigio, mentre il legante organico più comunemente adottato, sia per ragioni tecniche che per motivi economici, è la resina poliestere insatura, spesso modificata con l'aggiunta di additivi. Vengono usate, però, anche resine di tipo epossidico e metacrilico. Il contenuto di legante influenza i valori di resistenza a flessione e a taglio ed il coefficiente di dilatazione termica lineare del prodotto finito (Dal Buono, 2007). Attualmente, lo sviluppo delle tecnologie di fabbricazione consente di limitare al minimo il volume di legante rispetto a quello dei granulati e di ottenere prodotti agglomerati esteticamente molto validi e tecnicamente versatili (Tassone, 2000, p. 11).

Oltre a granulati, polveri e legante, i lapidei agglomerati possono essere fabbricati con l'aggiunta di pigmenti ovvero composti di natura metallorganica o inorganica: i pigmenti sono aggiunti in forma di polvere e in quantità molto contenute sia ai leganti organici che ai leganti inorganici per modificarne la colorazione. Tra i pigmenti di origine inorganica sono molto usati gli ossidi metallici. Da alcuni anni, però, si sono diffusi anche coloranti in pasta ottenuti disperdendo in un veicolo fluido i pigmenti comunemente utilizzati in polvere (Tassone, 2000, pp. 40-42).

Come le pietre naturali, i lapidei agglomerati sono contraddistinti da peso e durezza ma, essendo prodotti industrialmente, sono caratterizzati da proprietà fisico-meccaniche e da caratteristiche d'aspetto omogenee e costanti nel tempo (Dal Buono, 2007) e per questo risultano concorrenziali rispetto ai prodotti lapidei naturali contraddistinti, invece, da un'elevata variabilità delle caratteristiche intrinseche anche all'interno della stessa cava e dalla presenza di difettosità. Inoltre, i lapidei agglomerati risultano infinitamente riproducibili.

La loro progettazione può mirare a riprodurre, secondo un approccio mimetico, caratteri riconoscibili o tipici dei materiali naturali tra cui l'aspetto, la struttura o le possibilità di lavorazione. Tuttavia, può anche mirare ad ottenere esiti innovativi riproducendo esclusivamente le modalità di genesi dei litotipi naturali "entro una sorta di "mimesi di processo"" (Dal Buono, 2012) (Fig. 25, Fig. 26).

Un altro vantaggio dei lapidei agglomerati è connesso con la possibilità di utilizzare nel processo di produzione gli scarti di escavazione della pietra naturale in modo da contribuire a ridurre l'impatto ambientale del comparto lapideo (Tassone, 2000, p. 12).

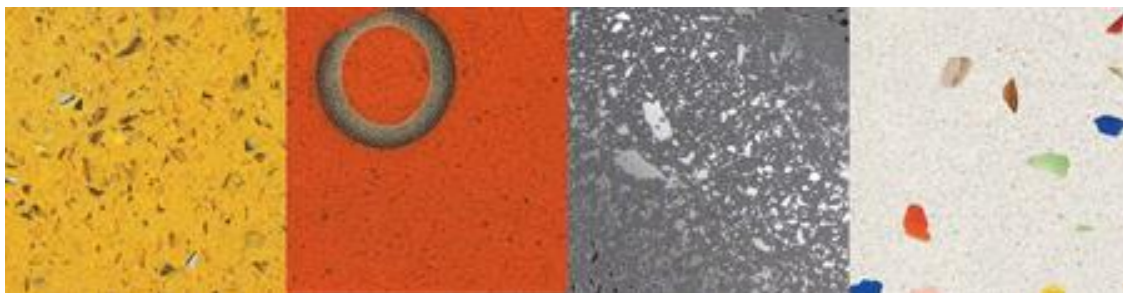


Fig. 25 Texture agglomerate in quarzo-resina, con inserti di diverso tipo per Stone Italiana Spa.
[Dal Buono, 2007, su <http://www.architetturadi Pietra.it>]



Fig. 26 Lastre di quarzo e resina traslucide e retroilluminate, Santamargherita con Pongratz Perbellini Architects, Vincenzo Pavan e Fabrizio Mirandola, Marmomacc 2006
[Dal Buono, 2007, su <http://www.architetturadi Pietra.it>]

I lapidei agglomerati sono ottenuti sotto forma di lastre fino a oltre 4 m² o in blocchi fino a 3 m³ di volume, che vengono successivamente tagliati in lastre. Nel mercato italiano sono impiegati in particolare per rivestimenti e pavimenti, sia interni che esterni, in ambito civile ed industriale (Tassone, 2000, p. 1). La loro analogia con la pietra naturale “non esclude la vocazione dei compositi ricostruiti per agglomerazione ad essere interpretati e trasformati secondo linguaggi innovativi e autonomi, non solo per quanto attiene al mix design dei componenti ma in particolare nella possibilità di sottoporli a lavorazioni e trattamenti supplementari, o, per esempio, nell’utilizzo come rivestimento in spessore delle superfici esterne dell’architettura oppure nelle forme di componenti specializzati per il progetto” (Dal Buono, 2007).

Nella scelta del tipo di materiale lapideo più adeguato alle diverse applicazioni, devono essere considerati soprattutto il peso specifico, l’assorbimento d’acqua, il carico di rottura a flessione, la resistenza all’abrasione, la durezza superficiale, il coefficiente di dilatazione termica lineare, la resistenza chimica e la resistenza ai raggi ultravioletti della radiazione solare (Tassone, 2000, p. 143). Nelle applicazioni in esterno devono essere privilegiati i prodotti a base di quarzo o granito che rispetto a quelli a base di marmo, risultano meno sensibili all’azione delle piogge acide e agli sbalzi termici. Inoltre, si deve considerare che i prodotti a matrice resinosa, pur avendo una vita di servizio di almeno 20 anni in condizioni di esposizione all’esterno moderatamente aggressive, sono soggetti ad alterazioni cromatiche rilevanti causate principalmente dall’azione della luce solare (Tassone, 2000, pp. 172-173). Pertanto, non risultano adatti ad essere applicati in interventi di restauro (Stefanidou, Pacht, Papayianni, 2015): nel progetto delle pietre artificiali da impiegare in questo tipo di lavori è preferibile utilizzare un legante inorganico. Relativamente, invece, agli effetti della temperatura sulla resistenza a flessione e sul modulo di Young, è stato dimostrato da uno studio sperimentale che i prodotti lapidei a matrice resinosa presentano un comportamento adeguato in un campo di temperature compreso tra 20 e 200 °C e risultano, quindi, concorrenziali rispetto ai materiali lapidei naturali (dos Santos, Rosa, Amaral, 2010).

CAPITOLO 2

ANALISI DELLE TECNICHE DI LAVORAZIONE PER LA PRODUZIONE DI PRODOTTI LAPIDEI

2.1. LA LAVORAZIONE DELLE PIETRE NATURALI

2.1.1. Cenni storici

2.1.2. Le tecniche attuali di lavorazione

2.1.2.1 Riquadratura

2.1.2.2. Segagione

2.1.2.3. Taglio e rifilatura

2.1.2.4. Tagli e lavorazioni speciali

2.1.2.5. Trattamenti superficiali

2.2. LA LAVORAZIONE DEI LAPIDEI AGGLOMERATI

2.2.1. Le tecniche di fabbricazione

2.2.2. Le fasi di produzione in impianti basati su tecnologie di vibrocompressione

2.2.2.1. La preparazione dell'impasto

2.2.2.2. La formatura

2.2.2.3. L'indurimento

2.2.2.4. La finitura

2. ANALISI DELLE TECNICHE DI LAVORAZIONE PER LA PRODUZIONE DI PRODOTTI LAPIDEI

2.1. LA LAVORAZIONE DELLE PIETRE NATURALI

2.1.1. Cenni storici

Storicamente la pietra dopo l'estrazione in cava veniva lavorata con sistemi manuali. Le fasi di lavorazione comprendevano lo sbizzo grossolano o preparatorio, lo sbizzo dettagliato o definitivo e il compimento.

La fase di sbizzo preparatorio consentiva di conferire ai blocchi lapidei estratti la forma e le dimensioni volute (Boeri, 1996, p. 28; Menicali, 1992, p. 28). Lo sbizzo poteva essere condotto per spaccatura, per schiappatura e per segazione (Fig. 27): l'adozione di uno dei tre sistemi era legata alla qualità della roccia e alla destinazione d'uso prevista per i prodotti lapidei.

Lo sbizzo per spaccatura si eseguiva praticando forature di piccolo diametro o incisioni lungo la linea di divisione del blocco. Questo sistema era impiegato per vari tipi di rocce. Per quelle caratterizzate da piani di scistosità o di fratturazione, la tecnica a cunei forzati nei fori veniva usata solo per il taglio lungo i lati perimetrali. La separazione in lastre era effettuata, invece, con il bac, un cuneo di forma allungata dotato di manico: il tagliente di questo strumento veniva appoggiato in corrispondenza delle fenditure e, successivamente, il bac veniva percosso con una mazza (Menicali, 1992, p. 28).

Lo spacco per schiappatura era impiegato per ricavare da blocchi di ardesia lastre di spessore contenuto (Menicali, 1992, pp. 28-29). Il sistema si basava sull'utilizzo di scalpelli sottili che venivano battuti con un bastone metallico.

Lo spacco per segazione, invece, veniva praticato soprattutto per rocce tenere e semidure. Per i materiali lapidei teneri si usava una sega con lama a denti inserita in un telaio mentre per i materiali più compatti si usava una sega a lama liscia e una miscela di acqua e sabbia silicea: questa miscela aveva funzione abrasiva ed era trascinata dal movimento alternativo della lama. La sabbia era sostituita dallo smeriglio per la segazione di rocce più dure. Per ridurre in lastre blocchi di grandi dimensioni, invece, veniva usata la sega a braccia costituita da lame di oltre 4 m alloggiata in un telaio (Menicali, 1992, p. 29).

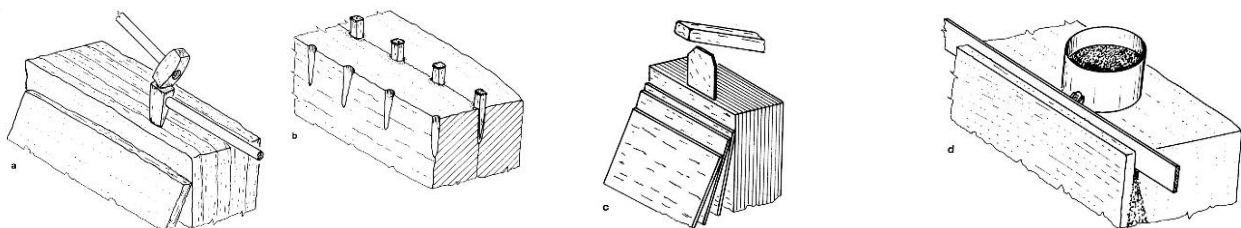


Fig. 27 Lo sbizzo grossolano
[Menicali, 1992, p. 28]

Lo sbizzo dettagliato consentiva di ottenere blocchi di forma regolare, con dimensioni precise e dotati di spigoli retti (Fig. 28). Poteva prevedere diverse sottofasi dette accapezzatura, smusso, intaccatura, incavatura e straforo. La sottofase principale era l'accapezzatura che consentiva di rendere piane le

superfici del concio di pietra e di conformare ad angolo retto gli spigoli dello stesso (Boeri, 1996, p. 29; Menicali, 1992, p. 30). Le altre sottofasi consentivano, invece, di ottenere elementi sagomati. Per realizzare blocchi con facce ortogonali, si tracciava con uno scalpello e un regolo di legno un primo spigolo rettilineo e poi si procedeva sullo spigolo opposto: il materiale compreso tra i due spigoli lavorati veniva quindi asportato realizzando una faccia piana. La tracciatura degli altri lati veniva eseguita con il quartobono: questo strumento era costituito da una squadra con un lato a risalto che veniva appoggiato alla prima faccia realizzata. Asportando dai lati tutto il “sovrapietra” si otteneva la “spianatura delle diverse parti del blocco” (Menicali, 1992, p. 30).

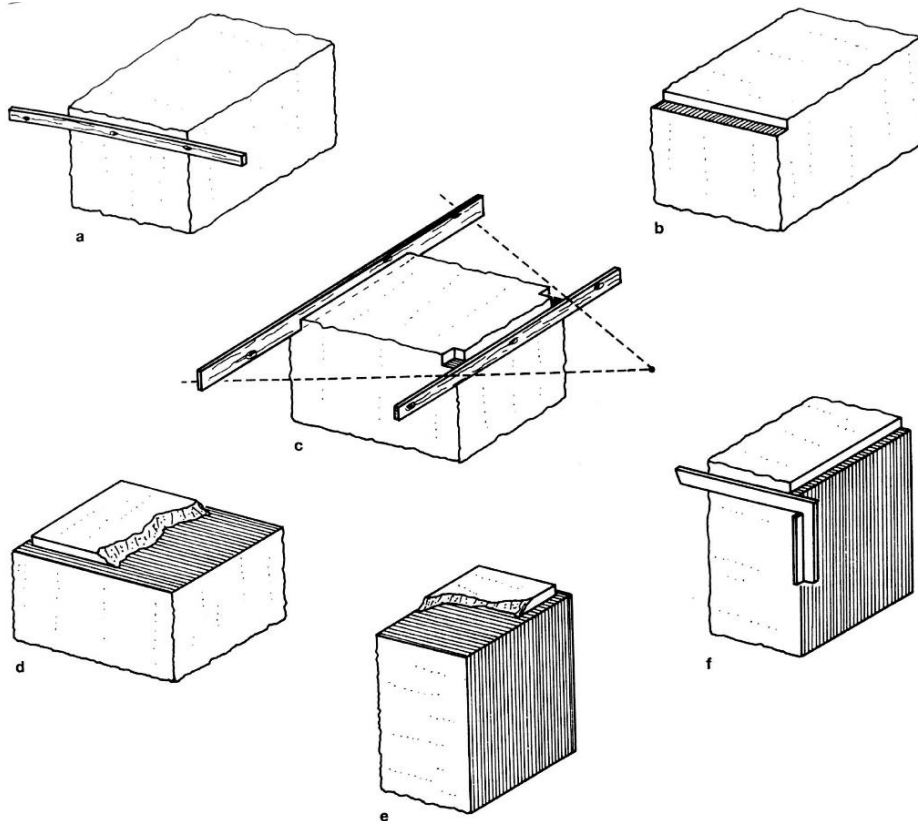


Fig. 28 Lo sbizzo dettagliato
[Menicali, 1992, p. 31]

Il compimento prevedeva, come lo sbizzo dettagliato, diverse sottofasi e consentiva di rifinire progressivamente le parti dell’opera che dovevano rimanere a vista (Menicali, 1992, p. 32): era realizzato, infatti, utilizzando in successione attrezzi di diverso tipo. Potevano essere usati scalpelli di conformazione differente come la subbia, il calacagnolo e la gradina, oppure la martellina o il martello a bocciarda (Boeri, 1996, p. 29; Menicali, 1992, p. 32).

Altre operazioni di finitura erano la levigatura e la lucidatura. La levigatura era eseguita su opere scultoree e sui materiali lapidei lucidabili da impiegare per rivestimenti, pavimentazioni e colonne, per renderne liscia la superficie (Menicali, 1992, p. 33). Le operazioni di levigatura si basavano sull’impiego di sostanze abrasive a grana inizialmente grossa e poi progressivamente più fine: queste sostanze venivano strofinate in successione sulle superfici lapidee per rimuovere le irregolarità presenti. La prima sottofase del lavoro era detta orsatura e consisteva nello strofinare a secco i piani degli elementi lapidei con pezzi di arenaria detti orsi. Al posto dell’orsatura si poteva praticare la

rotatura in cui erano impiegati frammenti di pietra, sabbia e acqua. La sottofase intermedia della levigatura era la stuccatura delle fessure e dei vacuoli creatisi durante l'orsatura o la rotatura e si basava sull'impiego di mastici. L'ultima sottofase della levigatura era la pomiciatura che veniva effettuata sfregando i piani con pietra pomice bagnata.

La lucidatura era eseguita per conferire alle superfici opache degli elementi levigati "il massimo grado di lucentezza" (Menicali, 1992, p. 33). Si basava sull'impiego di un blocco di piombo e di sostanze abrasive: il blocco veniva strofinato sui piani degli elementi lapidei in modo da trascinare granuli di smeriglio impastato con acqua o una miscela detta spoltriglio, ottenuta a seguito delle operazioni di taglio. La sottofase finale della lucidatura era la brunitura: veniva effettuata sfregando le superfici con un cuscinetto compatto in stoffa detto struffolo, bagnato e cosparso di ossidi di piombo e stagno (Menicali, 1992, p. 33).

2.1.2. Le tecniche attuali di lavorazione

La lavorazione delle pietre naturali ha inizio con l'estrazione di blocchi di cava e con il loro trasferimento nelle aziende di trasformazione. Con il termine trasformazione "s'intende l'insieme delle operazioni eseguite sui blocchi per pervenire a semilavorati o componenti da impiegare all'interno dei diversi campi architettonici" (Acocella, 2004, p. 604). I campi di impiego prevalenti attengono alla "produzione degli elementi "in solido" (colonne, conci, cornici ecc.)" (Acocella, 2004, p. 604) e alla realizzazione di semilavorati o elementi finiti sotto forma di lastre o di masselli.

Il primo campo risulta quantitativamente meno importante e può prevedere l'impiego di macchinari appositamente realizzati per la specifica opera di progetto. La foratura dei miniconci costituenti le arcate strutturali dell'Aula Liturgica di Padre Pio progettata da Renzo Piano a San Giovanni Rotondo, ad esempio, ha richiesto la costruzione di perforatrici computerizzate.

Il secondo campo applicativo che negli ultimi decenni ha mantenuto alti livelli di produzione, impiega blocchi di cava sia regolari che informi.

Generalmente, il ciclo di trasformazione dei blocchi si articola in cinque fasi indicate con i termini di riquadratura, segazione, trattamento superficiale, taglio e rifilatura, finitura (Acocella, 2004, p. 604).

2.1.2.1 Riquadratura

La riquadratura consente di ridurre i blocchi di cava informi in volumi regolari parallelepipedi che presentino dimensioni adeguate per le successive operazioni di taglio (Acocella, 2004, p. 605). Può essere effettuata mediante il telaio monolama o la tagliatrice fissa a filo diamantato.

Il primo tipo di attrezzatura meccanica viene utilizzato oltre che per la riquadratura di blocchi di marmo, travertino e di rocce assimilabili, anche per la segazione di lastre a grosso spessore (Fig. 29). È costituita da una o due lame diamantate che presentano un movimento rettilineo. Il ciclo di lavorazione prevede l'impiego di acqua per irrorare la macchina (Acocella, 2004, p. 605).

La tagliatrice fissa a filo diamantato impiega, invece, un cavo in acciaio ricoperto di perline in diamante sintetico che, scorrendo tra due pulegge, incide progressivamente blocchi di marmo, travertino o granito. Nel processo viene impiegata dell'acqua per il raffreddamento del macchinario e per l'allontanamento degli scarti prodotti dal taglio. L'attrezzatura può essere dotata di apparati di comando computerizzati per effettuare il taglio di elementi litici "secondo sagome particolari, anche curvilineari" (Acocella, 2004, p. 605).



Fig. 29 Macchina di taglio dei blocchi: il telaio monolama
[Acocella, 2004, p. 605]

2.1.2.2. Segagione

Attraverso la segagione i blocchi vengono ridotti in una serie di lastre di spessori diversi che costituiscono “il primo e più importante prodotto standard da cui - attraverso successive fasi di lavorazione - è possibile ottenere variegata e più specializzate produzioni di serie” (Acocella, 2004, p. 606). Gli spessori tipici delle lastre sono pari a 2-3 cm mentre le dimensioni in pianta sono generalmente inferiori a 3,50 x 2,00 m. Il grado di produttività dipende dalla durezza relativa della pietra: la profondità di taglio orario diminuisce, infatti, all’aumentare della durezza (Dernie, 2003, p. 46).

La segagione può avvenire con attrezzature diverse a seconda delle caratteristiche dei blocchi e del tipo di taglio richiesto: per i blocchi regolari vengono impiegati telai multilama; i blocchi informi, sottomisura o caratterizzati da difetti strutturali visibili che avrebbero una cattiva resa economica se lavorati con telai multilama, sono segati con le cosiddette macchine tagliablocchi; per “tagli più specializzati quali quelli a grosso spessore” sono utilizzate, invece, segatrici a disco gigante o a cinghia diamantata (Acocella, 2004, p. 605).

Negli impianti a telaio multilama i blocchi sono posizionati all’interno di grosse strutture metalliche dette telai (Fig. 30). La segagione è effettuata con lame d’acciaio parallele dette mute dalla cui spaziatura reciproca dipende lo spessore delle lastre ottenibili. Esistono due tipi di telaio multilama distinguibili per la diversa modalità di movimento delle mute.

Nel primo tipo, impiegato per il taglio dei blocchi di granito e di rocce affini, le lame hanno una cinematica pendolare e la segagione “si realizza come conseguenza dell’azione combinata di lame e

della cosiddetta torbida abrasiva” costituita da acqua, calce e graniglia di ghisa o acciaio (Primavori, 1997, p. 88).

Nel secondo tipo di telai, utilizzato per il taglio dei marmi e di rocce affini, la cinematica delle lame è rettilinea e la segazione “si realizza mediante l’azione di segmenti diamantati i quali, saldati sul bordo inferiore delle lame, abradono il blocco durante lo scorrimento delle stesse” (Primavori, 1997, p. 88). In alcuni modelli il blocco è mantenuto fermo e le lame si muovono verso il basso mentre in altri il blocco viene sospinto verso l’alto. In tutti i modelli viene impiegata dell’acqua per refrigerare l’utensile e allontanare gli scarti prodotti dall’operazione di taglio. Il numero di lame varia generalmente tra 40 e 80 (Rana et al., 2016).

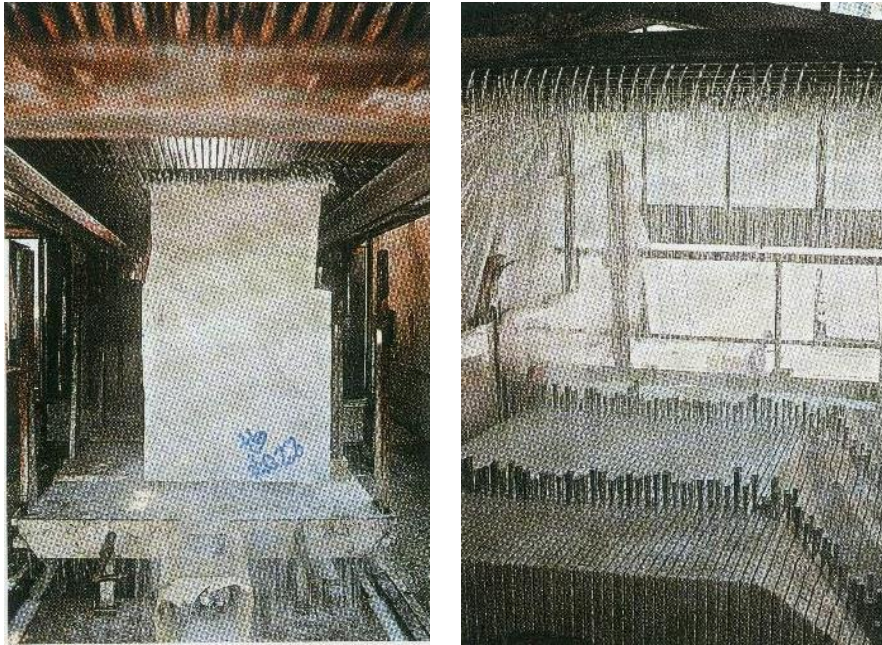


Fig. 30 Segazione di un blocco di marmo con telaio multilama: visione inferiore e superiore alle mute di taglio

[Acocella, 2004, p. 605]

Le macchine definite tagliablocchi impiegate per “valorizzare economicamente anche il taglio di blocchi difettosi” (Acocella, 2004, p. 606), consentono di effettuare la prima operazione necessaria a produrre lastre standard di piccole e medie dimensioni di marmo o granito, indicate rispettivamente con i nomi di modularmarmo e modulargranito (Fig. 31). Possono essere impiegate anche per altri litotipi assimilabili, ma sempre per realizzare elementi con dimensioni unificate e di serie, impiegabili in pavimentazioni o rivestimenti (Acocella, 2004, p. 606).

Le macchine tagliablocchi sono dotate di uno o più dischi diamantati disposti verticalmente detti muta e di un disco posto orizzontalmente ad un livello inferiore. Alla rotazione in senso verticale della muta si associa l’azione complementare del disco orizzontale. Il blocco viene tagliato dalla muta fino ad una profondità pari al raggio dei dischi verticali in modo da ottenere delle strisce o liste dette filagne: il raggio massimo è di 60 cm. Il disco orizzontale taglia contestualmente alla base ogni filagna. Si ottengono dei semilavorati che vengono poi ulteriormente suddivisi da unità di taglio a misure fisse dette attestatrici (Acocella, 2004, p. 606).



Fig. 31 Macchina tagliablocchi in azione
[Acocella, 2004, p. 606]

2.1.2.3. Taglio e rifilatura

L'operazione di taglio e rifilatura permette di ridurre le lastre alle misure imposte dalle esigenze di serie o dalle specifiche di progetto e si basa sull'impiego di dischi metallici provvisti di placchette diamantate, "predisposti singolarmente, o in linea, all'interno di macchine tagliatrici chiamate frese" (Acocella, 2004, p. 606). Si distinguono frese a ponte o a banco, frese multidisco continue e frese a braccio o a bandiera.

Le frese a ponte rappresentano insieme agli impianti a telaio multilama "le attrezzature principali di ogni importante azienda di trasformazione dei lapidei" per la loro elevata flessibilità e capacità produttiva (Acocella, 2004, p. 606). Queste macchine sono costituite da due strutture metalliche parallele fissate al suolo e dotate di guide superiori: su queste ultime scorre una trave-ponte a cui è collegato un gruppo motore e un mandrino con un disco diamantato di taglio. Al di sotto della struttura a ponte è ubicato un bancale di appoggio girevole e movimentabile in direzione verticale, su cui vengono posizionate le lastre da tagliare per produrre elementi da pavimentazione e da rivestimento. Nelle macchine più recenti i movimenti del bancale e della trave-ponte portadisco sono comandati elettronicamente.

Nelle frese continue multidisco, i dischi diamantati sono fissati ad una trave d'acciaio e le lastre vengono movimentate una per volta secondo una velocità predeterminata. Vengono impiegati nastri trasportatori, banchi rotabili e stazioni fisse per assicurare lo svolgimento sequenziale delle fasi di produzione (Acocella, 2004, p. 607).

Le frese a braccio o a bandiera sono "le attrezzature più antiche e convenzionali per il taglio della pietra" e vengono utilizzate per produzioni limitate di lastre sottili, di semilavorati in massello e di lastre a forte spessore (Acocella, 2004, p. 607). Il materiale litico viene disposto orizzontalmente su un bancale che scorre su guide d'acciaio e viene tagliato impiegando un gruppo motore con mandrino portadisco.

Per eseguire il taglio e la rifilatura possono essere impiegate oltre che le frese anche le cosiddette macchine di taglio *water-jet* (Fig. 32): queste impiegano un getto d'acqua ad altissima pressione, fino a 3000 atmosfere (Dernie, 2003, p. 47), per incidere e tagliare lastre e masselli di diversa dimensione. Gli spessori di taglio sono inferiori ai 2 mm e la profondità può arrivare fino ai 150 mm a seconda

del tipo di pietra (Acocella, 2004, p. 607). Per aumentare la capacità di taglio della macchina, possono essere aggiunte all'acqua anche sostanze abrasive. Le macchine *water-jet* più diffuse sono costituite da “un'unità di pressurizzazione dell'acqua e da un'unità di trattamento mobile lungo un'unica direzione che agisce sui semilavorati posizionati in orizzontale” (Acocella, 2004, p. 612).

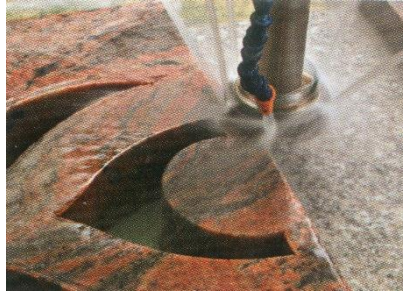


Fig. 32 Macchina di taglio *water-jet* in azione su un elemento architettonico di granito
[Acocella, 2004, p. 607]

2.1.2.4. Tagli e lavorazioni speciali

Le superfici delle lastre destinate a rimanere a vista e quelle che specializzano le teste e le coste possono essere caratterizzate con finiture speciali. Per le lavorazioni delle teste e delle coste si utilizzano macchine lucidacoste e macchine foratrici e slottatrici. Con le prime si esegue la sagomatura e la lucidatura delle coste delle lastre. Con le macchine foratrici, slottatrici e kerfatrici, invece, si possono realizzare nei pannelli litici diversi tipi di alloggiamenti, detti rispettivamente fori, slot e kerf, in cui inserire successivamente gli ancoraggi metallici necessari per eseguire il montaggio a secco dei rivestimenti sottili (Acocella, 2004, p. 607).

2.1.2.5. Trattamenti superficiali

Le superfici principali dei prodotti lapidei possono essere sottoposte ad una o più lavorazioni denominate trattamenti o finiture superficiali che consentono di valorizzarne le potenzialità espressive e prestazionali e di conferire loro peculiari caratteristiche estetiche o funzionali (Acocella, 2004, p. 608). Questi trattamenti possono essere eseguiti con varie tecniche: le principali sono la stuccatura, la resinatura, la levigatura, la lucidatura, la spuntatura, la bocciardatura, la rigatura, la sabbatura, la fiammatura, lo spacco, il trattamento con il *water-jet* o con il laser, l'anticatura e la spazzolatura.

La stuccatura e la resinatura sono definibili come trattamenti di preparazione. La prima consiste nella sigillatura di cavità o fratture presenti nel materiale attraverso stucchi con caratteristiche cromatiche simili a quelle del litotipo trattato, e viene effettuata soprattutto sui travertini, manualmente o attraverso macchine stuccatrici (Acocella, 2004, p. 608; Boeri, 1996, p. 33). La seconda, invece, si basa sull'impiego di resine poliestere o epossidiche sulla superficie di lastre di materiali lapidei poco compatti e permette di migliorarne le caratteristiche tecniche (Acocella, 2004, p. 608).

La levigatura consente di ottenere prodotti lapidei caratterizzati da superfici opache perfettamente planari e viene effettuata su tutti i tipi di pietra attraverso utensili abrasivi a grana diversa. Viene solitamente eseguita in combinazione con la lucidatura, che permette di conferire alle superfici litiche un maggiore grado di lucentezza e di valorizzarne l'intensità cromatica. Questo trattamento di finitura

viene effettuato con lucidatrici continue a nastro, lucidatrici a ponte o lucidatrici manuali (Acocella, 2004, pp. 609-610; Boeri, 1996, p. 32).

La spuntatura, la bocciardatura, la rigatura e la sabbiatura, invece, sono definibili come trattamenti ad urto: sono effettuate attraverso utensili metallici a percussione o attraverso il getto di una miscela a base di acqua e sostanze abrasive, e lasciano incisioni di tipo puntiforme o lineare sulla superficie dei prodotti lapidei. Questi trattamenti sono applicati soprattutto su materiali a grana fine, in particolare a marmi, calcari, arenarie e ardesie (Acocella, 2004, p. 610).

La fiammatura è eseguita attraverso una fiamma ossiacetilenica ad elevata temperatura e determina la disintegrazione superficiale dello strato più esterno del materiale con conseguente modifica delle caratteristiche cromatiche e aumento della scabrezza (Acocella, 2004, p. 611).

Lo spacco può essere effettuato manualmente o con macchine spaccatrici, tranciatrici, scapezzatrici o cubettatrici, e consente di conferire ai materiali lapidei un aspetto simile a quello naturalmente assunto della roccia estratta in cava (Acocella, 2004, pp. 611-612).

La tecnica del laser è da poco stata introdotta nel settore della trasformazione della pietra e le sue applicazioni sono ancora di tipo sperimentale (Acocella, 2004, p. 612): attraverso unità di emissione di raggi controllate da sistemi informatizzati, una grande quantità di energia viene proiettata, “ad alta velocità ed in forma concentrata di fascio”, sull’elemento lapideo da lavorare in modo da caratterizzarne la superficie con un particolare tipo di incisione (Acocella, 2004, p. 613). La tecnica del laser come quella del *water-jet* può essere usata anche per effettuare tagli.

L’anticatura si basa su processi di attrito meccanico eseguiti con macchine con cilindro orizzontale rotante o con cilindro verticale vibrante, oppure su processi chimici di acidatura. Rende le superfici geometricamente irregolari e modifica la tonalità cromatica del materiale (Acocella, 2004, p. 613).

La spazzolatura, infine, viene effettuata con spazzole metalliche montate sulle stesse macchine usate per effettuare i trattamenti di levigatura-lucidatura: le spazzole esercitano un’azione abrasiva di tipo meccanico che conferisce alla superficie lapidea un aspetto rugoso (Acocella, 2004, p. 613).

Non tutte le tipologie di trattamento superficiale possono essere applicate ad ogni tipo di pietra: va valutata, infatti, la “compatibilità” del trattamento prescelto con il litoide impiegato (Tabella. 2) (Boeri, 1996, p. 32). In particolare, i trattamenti di finitura a percussione come la bocciardatura possono indurre nei materiali delle patologie: indebolendo, infatti, la compattezza superficiale del materiale permettono una maggiore penetrazione di acqua e composti aggressivi con effetti di accelerazione del degrado (Boeri, 1996, p. 8).

	Levigatura	Lucidatura	Bocciardatura	Fiammatura	Sabbiatura	Stuccatura	Resinatura
Pietra	●●		●●		●	●	
Granito	●●	●●	●	●●	●		
Marmo	●●	●●			●	●	●
Travertino	●●	●	●		●	●●	

- trattamenti di finitura generalmente compatibili
- trattamenti di finitura di frequente utilizzazione

Tabella. 2 Applicabilità dei principali trattamenti superficiali alle diverse tipologie di pietre naturali [Boeri, 1996, p. 32, rielaborazione dell’autore]

2.2. LA LAVORAZIONE DEI LAPIDEI AGGLOMERATI

2.2.1. Le tecniche di fabbricazione

La produzione industriale dei lapidei agglomerati avviene in differenti tipi di impianto che si basano su diverse tecnologie di compattazione: queste ultime, consentendo di ridurre la porosità dell'impasto fresco, risultano determinanti ai fini dell'ottenimento di manufatti con proprietà tecniche ed estetiche ottimali.

La prima tecnologia ad essere stata impiegata in questo settore industriale è quella di compattazione per vibrazione all'aria che consente di ottenere prodotti sia in forma di lastre che in forma di blocchi (Tassone, 2000, p. 107). Le successive evoluzioni di questa tecnologia sono la vibrocompattazione sottovuoto e la vibrocompressione sottovuoto (Dal Buono, 2007; Tassone, 2000, pp. 107, 110).

La vibrocompattazione prevede che l'impasto a matrice cementizia o resinosa sia caricato in casseforme, trasferito in camere da vuoto e sottoposto a vibrazione: grazie a questo processo che può avere una durata compresa tra 1 minuto e 20 minuti circa, l'aria presente negli interstizi tra i granulati viene eliminata e la porosità totale del materiale viene ridotta. Le caratteristiche fisiche e meccaniche dei prodotti finali, quindi, risultano isotrope e costanti (Tassone, 2000, p. 110). Gli impianti basati su questa tecnologia sono definiti "impianti a botte" data la forma cilindrica della camera di vibrocompattazione sottovuoto (Fig. 33).

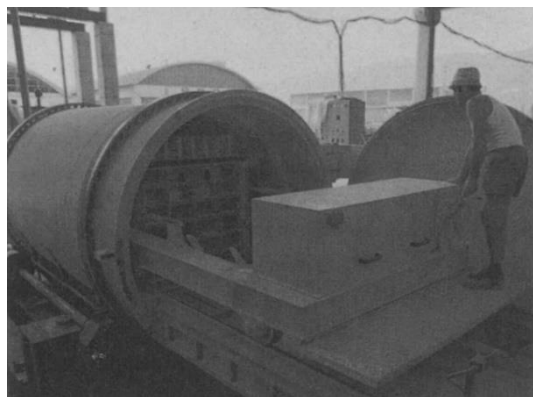


Fig. 33 Vista di una camera di vibrocompattazione
[Tassone, 2000, p. 110]

La vibrocompressione, invece, prevede che, in assenza d'aria, l'impasto a matrice cementizia o resinosa sia costipato e sottoposto a vibrazione: grazie a questo processo che viene eseguito con modalità e attrezzature diverse a seconda che la formatura avvenga in lastre o in blocchi, si garantiscono la diminuzione dei vuoti presenti e l'aumento della densità del materiale (Tassone, 2000, pp. 118-119).

L'evoluzione tecnologica ha consentito di ridurre la quantità di legante nella miscela migliorando le caratteristiche tecniche ed estetiche dei prodotti finiti e rendendoli più estensivamente applicabili nei settori dell'edilizia e dell'arredamento (Tassone, 2000, pp. 11, 98).

2.2.2. Le fasi di produzione in impianti basati su tecnologie di vibrocompressione

La produzione di prodotti lapidei agglomerati negli impianti basati su tecnologie di vibrocompressione si articola in quattro fasi principali che sono eseguite con modalità e macchinari

diversi a seconda del tipo di legante impiegato e del tipo di prodotto da realizzare. La prima fase consiste nella preparazione dell'impasto. Ad essa seguono la formatura, l'indurimento e la finitura.

2.2.2.1. La preparazione dell'impasto

L'impasto viene preparato miscelando gli aggregati, le polveri fini, il legante cementizio o resinoso, gli additivi ed eventualmente gli ossidi coloranti secondo criteri prefissati. Gli aggregati devono essere opportunamente selezionati in fusi granulometrici ben assortiti o continui per consentire l'ottimale compattazione dell'impasto (Tassone, 2000, p. 121). Come gli altri componenti, inoltre, devono essere pesati e trasferiti nell'impianto di mescolazione, costituito generalmente da vasche in acciaio e da un planetario azionato da un motoriduttore (Fig. 34). Invece, nella fabbricazione di agglomerati con graniglie di grosse dimensioni, con diametro massimo di circa 100 mm, la mescolazione viene eseguita sottovuoto (Tassone, 2000, p. 111) (Fig. 34).



Fig. 34 Vista di un impianto di mescolazione; mescolatrice ad assi orizzontali sottovuoto
[Tassone, 2000, pp. 118, 109]

Per produrre lapidei agglomerati a matrice resinosa, devono essere caricati nelle mescolatrici prima i granulati ed i coloranti e successivamente la resina additivata ed i catalizzatori. Infine, vanno aggiunte le polveri fini. Invece, per fabbricare lapidei agglomerati a matrice cementizia, devono essere caricati nelle mescolatrici prima i granulati, i coloranti e le polveri fini e successivamente l'acqua di impasto con gli additivi fluidificanti. Alla fine, si aggiunge il cemento (Tassone, 2000, p. 116). Al termine del processo di mescolazione, l'impasto viene omogeneizzato da un frantumatore, costituito da due coppie di rulli controrotanti, e poi trasferito all'impianto di formatura.

2.2.2.2. La formatura

Il ciclo di formatura può essere finalizzato a produrre blocchi o lastre.

Nel primo caso l'impasto viene caricato in casseforme trattate con disarmanti e coperto in superficie con un foglio di carta distaccante (Fig. 35). Dopo avere creato il vuoto nella camera di vibrocompressione, si effettuano le operazioni di costipazione e di vibrazione: a seguito di questo

processo si verifica una diminuzione del volume dell'impasto pari a circa il 15% del volume iniziale (Tassone, 2000, p. 122). Dopo aver ripristinato la pressione atmosferica, le casseforme vengono trasferite alla stazione di indurimento.



Fig. 35 Le casseforme per la formatura in blocchi
[Tassone, 2000, p. 111]

Nel caso la formatura avvenga in lastre, invece, l'impasto viene caricato su un foglio di carta distaccante, all'interno di una cornice di contenimento posta su un nastro trasportatore e viene livellato grazie al movimento di un'attrezzatura detta stasatore. Attraverso una vibropressa e delle pompe volumetriche, viene poi eseguito il processo di vibrocompressione in assenza d'aria (Tassone, 2000, p. 124) (Fig. 36).

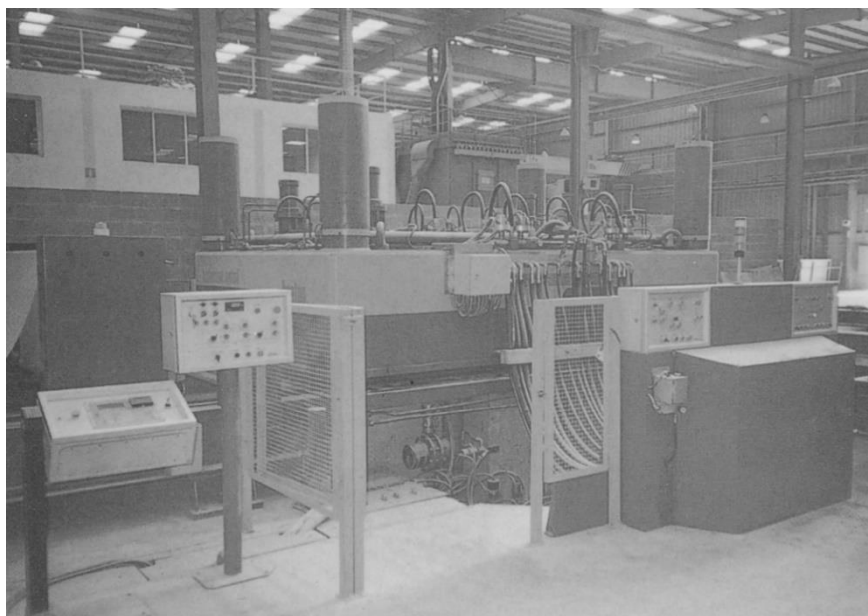


Fig. 36 Vista di una pressa per la formatura degli agglomerati in lastre
[Tassone, 2000, p. 124]

Generalmente, i blocchi hanno dimensioni di 125 x 308 x 87 cm. Le lastre, invece, possono essere prodotte in spessori variabili dai 13 ai 33 mm e possono avere dimensioni fino a 140 x 308 cm (Tassone, 2000, p. 112).

2.2.2.3. L'indurimento

Il processo di indurimento avviene per i lapidei agglomerati a matrice cementizia e resinosa secondo modalità differenti.

Nel primo caso, esso dipende dalla reazione di idratazione del cemento con l'acqua di impasto ed inizia, quindi, al momento della miscelazione. I semilavorati devono essere mantenuti in condizioni di umidità e temperatura controllate per un tempo minimo di 7 giorni (Tassone, 2000, p. 125).

Nel caso di lapidei agglomerati a matrice resinosa, invece, l'indurimento è connesso con la reticolazione delle resine che può avvenire a temperature e pressioni diverse: poiché le temperature variano da quella ambiente fino ad oltre 170 °C, si distinguono processi di reticolazione a freddo e a caldo. I primi sono impiegati per l'indurimento degli agglomerati prodotti in blocchi; i secondi, invece, sono adottati per l'indurimento degli agglomerati fabbricati in lastre e sono realizzati in apposite camere di riscaldamento (Fig. 37). Il tempo necessario ad una lastra per raggiungere una consistenza lapidea all'interno di queste camere è pari circa a 30 minuti (Tassone, 2000, p. 128).

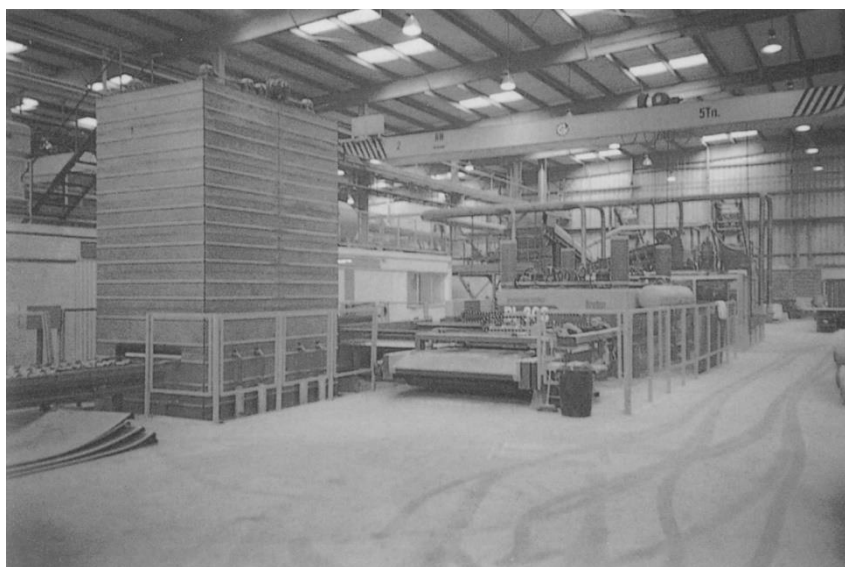


Fig. 37 Vista del forno a piani per l'indurimento a caldo delle lastre
[Tassone, 2000, p. 129]

2.2.2.4. La finitura

La fase di finitura viene eseguita al termine della formatura e dell'indurimento e comprende lavorazioni diverse eseguite con macchine utensili poste in serie. Le diverse operazioni eseguite in questa fase sono finalizzate a far assumere ai prodotti le dimensioni e le caratteristiche estetiche e funzionali richieste (Tassone, 2000, p. 130).

La prima operazione eseguita nel caso dei lapidei agglomerati fabbricati in blocchi è la segazione in lastre, con spessori variabili da 9 mm a 43 mm e oltre. Come per i lapidei naturali, le attrezzature impiegate sono macchine tagliablocchi o telai multilama a lame diamantate orizzontali o verticali (Fig. 38). Il raffreddamento delle lame e l'eliminazione degli scarti del processo di lavorazione sono consentite dalla fornitura continua di acqua. La rettilineità e la precisione del taglio, invece, sono garantite dalla messa in trazione delle lame e dalla loro lunghezza contenuta (Tassone, 2000, p. 131). Un altro tipo di attrezzature utilizzabili per la segazione sono gli impianti a dischi rotanti diamantati.

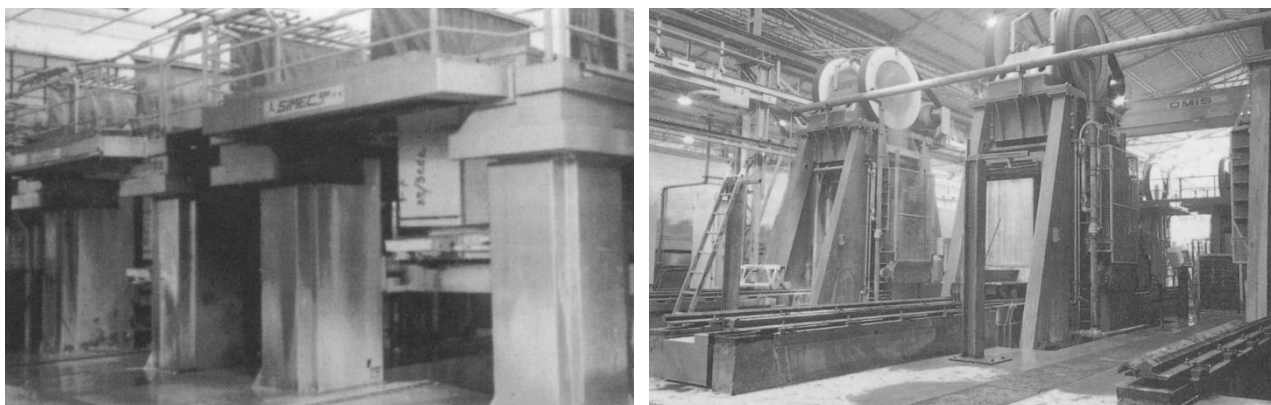


Fig. 38 Telai per la segazione di blocchi in lastre
[Tassone, 2000, pp. 131-132]

Le operazioni successivamente eseguite sulle lastre comprendo, generalmente, la calibratura, la levigatura e la lucidatura (Fig. 39). La prima è eseguita solitamente con calibratrici a rullo o a piatti ed è finalizzata a far assumere alle lastre lo spessore richiesto e a garantirne la planarità. La levigatura, invece, è effettuata con batterie di teste ad asse verticale a cui sono fissate superfici ad azione abrasiva: attraverso due fasi successive, note come sgrossatura e finitura, la superficie della lastra assume caratteristiche omogenee. La lucidatura, infine, è eseguita con utensili abrasivi che a seconda della rispettiva granulometria possono rendere la superficie del materiale satinata o lucidata a specchio. Sui lapidei agglomerati possono essere eseguite anche lavorazioni superficiali ad urto come la sabbiatura, la bocciardatura e la martellinatura, anche se non sono molto comuni (Tassone, 2000, p. 137).

Il taglio delle lastre nei formati poi commercializzati avviene con due macchine tagliatrici, una longitudinale e una trasversale, lavoranti in successione (Tassone, 2000, p. 137).

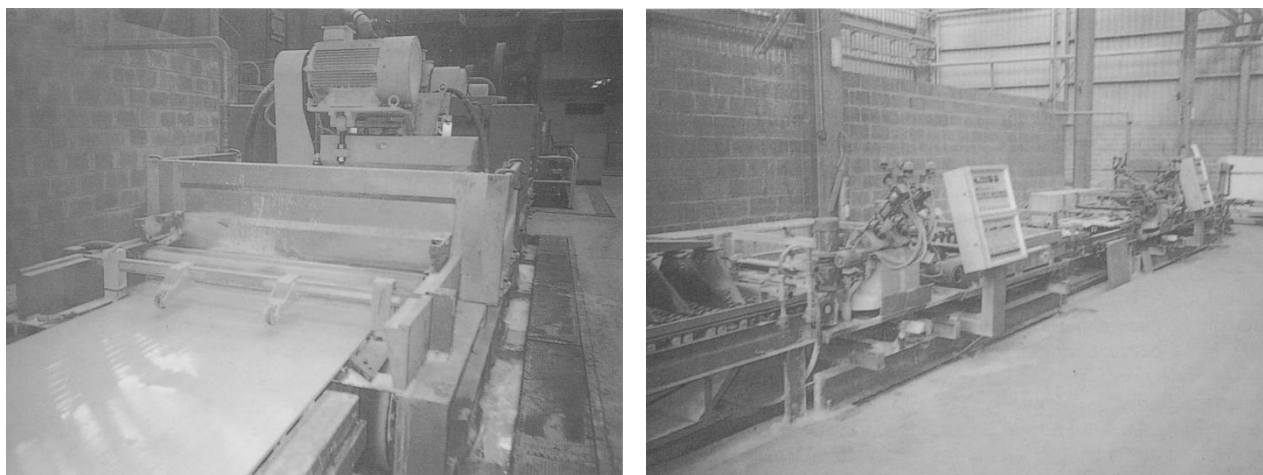


Fig. 39 Una macchina calibratrice a rulli e una linea di macchine per la finitura delle lastre
[Tassone, 2000, pp. 133, 138]

CAPITOLO 3

ANALISI DEI METODI E DEGLI STRUMENTI INNOVATIVI PER LA PROGETTAZIONE E LA REALIZZAZIONE DI ARCHITETTURE IN PIETRA

3.1. METODI E STRUMENTI INNOVATIVI DI PROGETTAZIONE

3.1.1. Stereotomia

3.1.1.1. Cenni storici

3.1.1.2. Le ricerche

3.1.2. Metodi computazionali di *form-finding* e di analisi strutturale

3.1.2.1. Cenni storici

3.1.2.1.1. Le prime teorie statiche per l'analisi di strutture in pietra tradizionali

3.1.2.1.2. I metodi di *form-finding* basati su modelli fisici

3.1.2.2. Le ricerche

3.2. SISTEMI INNOVATIVI DI REALIZZAZIONE DI PRODOTTI LAPIDEI

3.2.1. Sistemi integrati CAD/CAM/CNC lavoranti per asportazione di materiale

3.2.1.1. Tipologie di macchine CNC lavoranti per asportazione di materiale

3.2.1.2. Le ricerche

3.2.2. La stampa 3D

3.2.2.1. Cenni storici

3.2.2.2. Le ricerche

3. ANALISI DEI METODI E DEGLI STRUMENTI INNOVATIVI PER LA PROGETTAZIONE E LA REALIZZAZIONE DI ARCHITETTURE IN PIETRA

3.1. METODI E STRUMENTI INNOVATIVI DI PROGETTAZIONE

3.1.1. Stereotomia

Tra i mezzi di progettazione contemporanea di architetture in pietra autoportante sta assumendo nuova importanza la stereotomia. Questa disciplina può definirsi come “l’arte che insegna a tagliare le pietre ai fini della costruzione” (Fallacara, 2012, p. 14). Consente, infatti, di suddividere un continuo architettonico, ovvero una struttura in pietra resistente per forma, in porzioni discrete attraverso la definizione di un’opportuna apparecchiatura, di descrivere dal punto di vista geometrico i singoli conci che la compongono e di assicurare dal punto di vista meccanico l’equilibrio del sistema (D’Amato Guerrieri, 2006, p. 318).

Attualmente, le potenzialità della tradizionale tecnica stereotomica sono state ampliate grazie a nuovi strumenti informatici e strategie computazionali: la stereotomia è oggetto, infatti, di ricerche connesse alla modellazione computazionale, al *form-finding* digitale o ai processi di fabbricazione digitale e robotica. Il passaggio dalla stereotomia tradizionale alla stereotomia digitale è uno dei fattori che ha contribuito alla riscoperta della pietra massiva nella cultura architettonica contemporanea permettendo di attualizzare strutture ad arco o a volta in conci di pietra.

3.1.1.1. Cenni storici

La stereotomia come disciplina è stata teorizzata nel trattato *Le Premiere Tome de l’Architecture* scritto nel 1567 da Philibert de l’Orme (Fig. 40): egli dimostra le potenzialità progettuali del metodo per il tracciato delle volte coniche o *trompe* descrivendo la costruzione della *trompe d’Anet*, la volta conica che sostiene il *cabinet du roy* al Castello di Anet (Fallacara, 2012, p. 13; Fallacara, Minenna, 2014, p. 18).



Fig. 40 Frontespizio de *Le Premiere Tome de l’Architecture*, Philibert De l’Orme, 1567
[Fallacara, Minenna, 2014, p. 17]

Tuttavia, il termine stereotomia viene coniato nel 1644 a partire da due parole greche (Στερεός “solido” e Τομή “taglio”) da Jacques Curabelle che lo utilizza nell’opera “*Examen des oeuvres de Sr.*

Desargues” (Fallacara, Minenna, 2014, p. 17) (Fig. 41): l’autore criticando i testi di Girard Desargues sulla geometria proiettiva applicata al taglio delle pietre, si serve del neologismo per indicare la tecnica storicamente conosciuta con il termine francese *art du trait géométrique* che era parte essenziale del sapere corporativo dei *Tailleurs des Pierres*, ovvero della corporazione degli scalpellini. La disputa tra Curabelle e Desargues segna l’inizio del passaggio da un sapere corporativo a un sapere libero di tipo tecnico-scientifico applicato al taglio della pietra (Fallacara, 2012, p. 13).

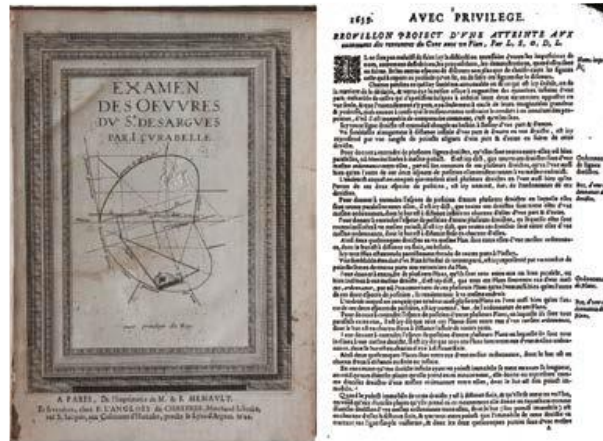


Fig. 41 Foto dei trattati di Jacques Curabelle e Girard Desargues [Fallacara, Ferrero, Minenna, 2015, p. XVIII]

Il termine stereotomia diviene di uso comune solo nel XIX secolo: non viene impiegato, infatti, nei trattati dedicati al taglio delle pietre composti tra XVII e XVIII secolo. Viene ripreso, tuttavia, nell’opera *“La théorie et la pratique de la coupe de pierres et de bois pour la construction des voûtes, et autre parties des bâtiments civils et militaire, ou traité de stéréotomie à l’usage de l’architecture”* di Amedée Francois Frezier scritta tra il 1737 e il 1739 (Fallacara, Minenna, 2014, p. 21) (Fig. 42).



Fig. 42 Frontespizio del trattato di A. F. Frézier [Fallacara, Minenna, 2014, p. 20]

La stereotomia è oggetto del libro terzo del “Trattato teorico e pratico dell’arte di edificare” di Rondelet, pubblicato a Parigi nel 1802: nell’opera l’autore prima di descrivere i metodi per apparecchiare archi e volte, analizza gli strumenti e le modalità per tracciare “le curve che possono

servire alla superficie interna delle volte”, sottolineando come le operazioni essenziali della “stereotomia o del taglio delle pietre” siano la “proiezione e sviluppo” delle curve (Rondelet, 2004b, pp. 27, 29). L’opera di Rondelet esplicita, quindi, il profondo legame esistente tra stereotomia e geometria descrittiva (Fig. 43).

Come ha scritto Pérouse de Montclos, ne “*L’Architecture à la française, du milieu du XVe à la fin du XVIIIe siècle*”, del 1982, “non è la geometria che ha prodotto la stereotomia in Francia; ma al contrario - grazie a Desargues, La Hire, Frézier e Monge - è la stereotomia che, in Francia, ha fatto nascere la geometria descrittiva”.

La stereotomia si basa, infatti, sui cosiddetti *traints* ovvero disegni che mostravano le proiezioni ortogonali delle strutture in pietra.

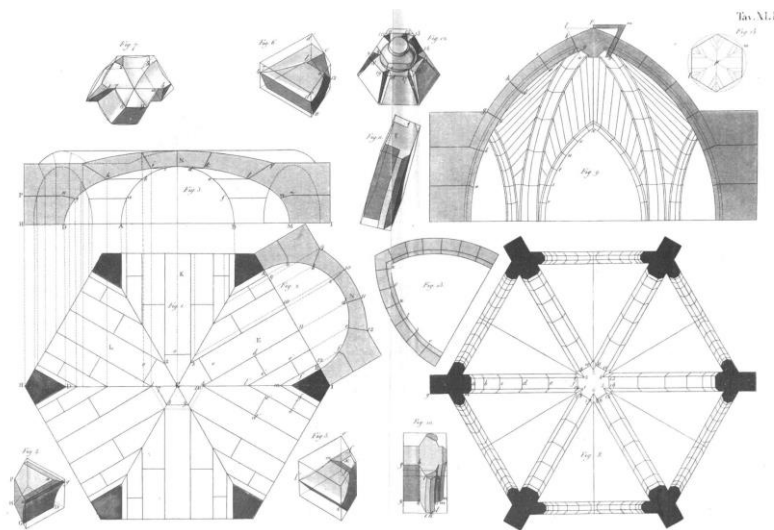


Fig. 43 Volta stereotomica su pianta esagonale
[Rondelet, 2004b, tavola XLI]

3.1.1.2. Le ricerche

Sino agli anni '90 la tecnica costruttiva stereotomica che è stata per secoli il “fondamento per disegnare e costruire spazi voltati” (Fallacara, Minenna, 2014, p. 21)¹¹, è stata oggetto di ricerche da parte di storici della scienza, dell’architettura, della geometria descrittiva e proiettiva e della meccanica dei corpi rigidi. Attualmente, l’interesse per la stereotomia, invece, non è più solo “teorico-accademico” ma “progettuale-applicativo” (Fallacara, 2012, p. 26): diversi centri di ricerca universitari indagano, infatti, le potenzialità della disciplina per il progetto di nuove architetture. Le ricerche in corso sono connesse alla modellazione computazionale, al *form-finding* digitale o ai processi di fabbricazione digitale e robotica. Le ricerche connesse alla modellazione computazionale sono condotte con *software* di modellazione solida come AutoCAD, con *software* di modellazione NURBS come Rhinoceros, o con *software* parametrici o parametrico-variazionali come 3DStudio o Grasshopper. Questi ultimi consentono di indagare il rapporto tra stereotomia e topologia.

Le ricerche relative al *form-finding* sono condotte, invece, con *software* come RhinoVAULT che si basa sul metodo TNA o come Kangaroo Physics che si basa su un sistema *particle-spring* (cfr.

¹¹ Fallacara G (2014) *Stereotomia e rappresentazione del mondo*. In Fallacara G, Minenna V. *Stereotomic Design*. Maglie (LE): Edizioni Gioffreda, 17-25.

3.1.2.2.). Infine, le ricerche sui processi di fabbricazione digitale e robotica indagano sia le tecniche di fabbricazione sottrattiva (fresatura, getto d'acqua, taglio con testa diamantata robotizzata) che additiva (stampa 3D, stampa e contro stampa, casseforme di tessuti) (cfr. 3.2.1.2.).

Le ricerche sulla stereotomia vengono condotte anche attraverso la realizzazione di prototipi che vengono sottoposti a test di tipo morfologico-costruttivo e strutturale. I maggiori laboratori di ricerca in cui vengono realizzati e testati prototipi di costruzioni stereotomiche sono (Fallacara, 2012, p. 28):

- il laboratorio GSA–*Geometrie Structure Architecture* dell'*Ecole nationale supérieure d'architecture Paris-Malaquais*;
- il laboratorio *Architektur und Digitale Fabrikation* del dipartimento di Architettura dell'ETH di Zurigo;
- il laboratorio di *Canterìa medioeval* presso l'ETSAM di Madrid;
- il laboratorio *Masonry Research* presso il MIT di Boston;
- il laboratorio *David Wendland* presso la TDU di Dresda.

In Italia il gruppo di ricerca del Politecnico di Bari indaga il rapporto tra stereotomia e topologia dal 2006, anno in cui fu pubblicato il saggio dell'architetto Giuseppe Fallacara dal titolo "*Digital stereotomy and topological transformations: reasoning about shape building.*", presentato al *Second International Congress on Construction History* tenutosi a Cambridge. I principi di questa branca della matematica sono assunti come base per il progetto di sistemi stereotomici complessi. È stato sviluppato un metodo parametrico-variazionale grazie al quale nuovi sistemi stereotomici possono essere ottenuti attraverso una deformazione omogenea di sistemi stereotomici semplici come le volte piane di Abeille o di Truchet, brevettate rispettivamente nel 1699 e nel 1704 e costituite da conci tutti uguali tra loro (Fallacara, Ferrero, Minenna, 2015, pp. 10-20) (Fig. 44). La volta piana di Abeille ha come concio-tipo "un poliedro che presenta le due sezioni assiali, a forma di trapezio isoscele, orientate in direzioni opposte" (Fallacara, Ferrero, Minenna, 2015, p. 15)¹². L'estradosso è caratterizzato da una maglia quadrata mentre l'intradosso presenta un cassettonato strutturale con fori piramidali (Fallacara, Ferrero, Minenna, 2015, p. 16). A livello statico, la volta di Abeille funziona come una "piastra piana bidirezionale che lavora identicamente nelle due direzioni" (Fallacara, Ferrero, Minenna, 2015, p. 15)¹³. Il concio-tipo della volta di Truchet, invece, è un solido definito da una base inferiore quadrata e da una base superiore di forma mistilinea "composta da quattro archi di cerchio identici disposti in coppia sui lati paralleli del quadrato in modo da formare curve concave e convesse" (Fallacara, Ferrero, Minenna, 2015, p. 16)¹⁴. Le basi del concio sono raccordate attraverso superfici rigate. L'intradosso e l'estradosso della volta risultano entrambi privi di fori.

Il metodo di progettazione elaborato dai ricercatori del Politecnico di Bari si basa su *software* parametrico-variazionali dotati di "strumenti di trasformazione e deformazione volumetriche della forma", come Grasshopper o 3D Studio, e consente di operare una modellazione informatica "indiretta" dei conci del sistema di progetto a partire da un assemblaggio piano di elementi solidi uguali derivati dalle soluzioni ideate da Abeille e Truchet (Fallacara, Ferrero, Minenna, 2015, p. 13)¹⁵.

¹² Fallacara G, *Stereotomia e topologia: un metodo universale per la progettazione di spazi voltati stereotomici*. In: Fallacara G, Ferrero M, Minenna V. Nuovi Sistemi Voltati Stereotomici: Progetto, Calcolo e Costruzione. Maglie (LE): Edizioni Gioffreda, 10-20.

¹³ Ibidem

¹⁴ Ibidem

¹⁵ Ibidem

L'utilizzo di *software* parametrici permette di modificare i dati di progetto come la dimensione e la forma degli elementi che compongono il sistema strutturale, attraverso un processo istantaneo di propagazione delle modifiche (Fallacara, Ferrero, Minenna, 2015, p. 13): il cambiamento da parte dell'utente del valore di parametri dimensionali come raggi, angoli e distanze, causa la variazione dell'entità geometrica cui i parametri sono riferiti e determina la propagazione delle variazioni a tutte le entità geometriche del modello tridimensionale correlate all'entità modificata (Fallacara, Ferrero, Minenna, 2015, p. 22; Fallacara, Minenna, 2014, pp. 35-37) (Fig. 45).

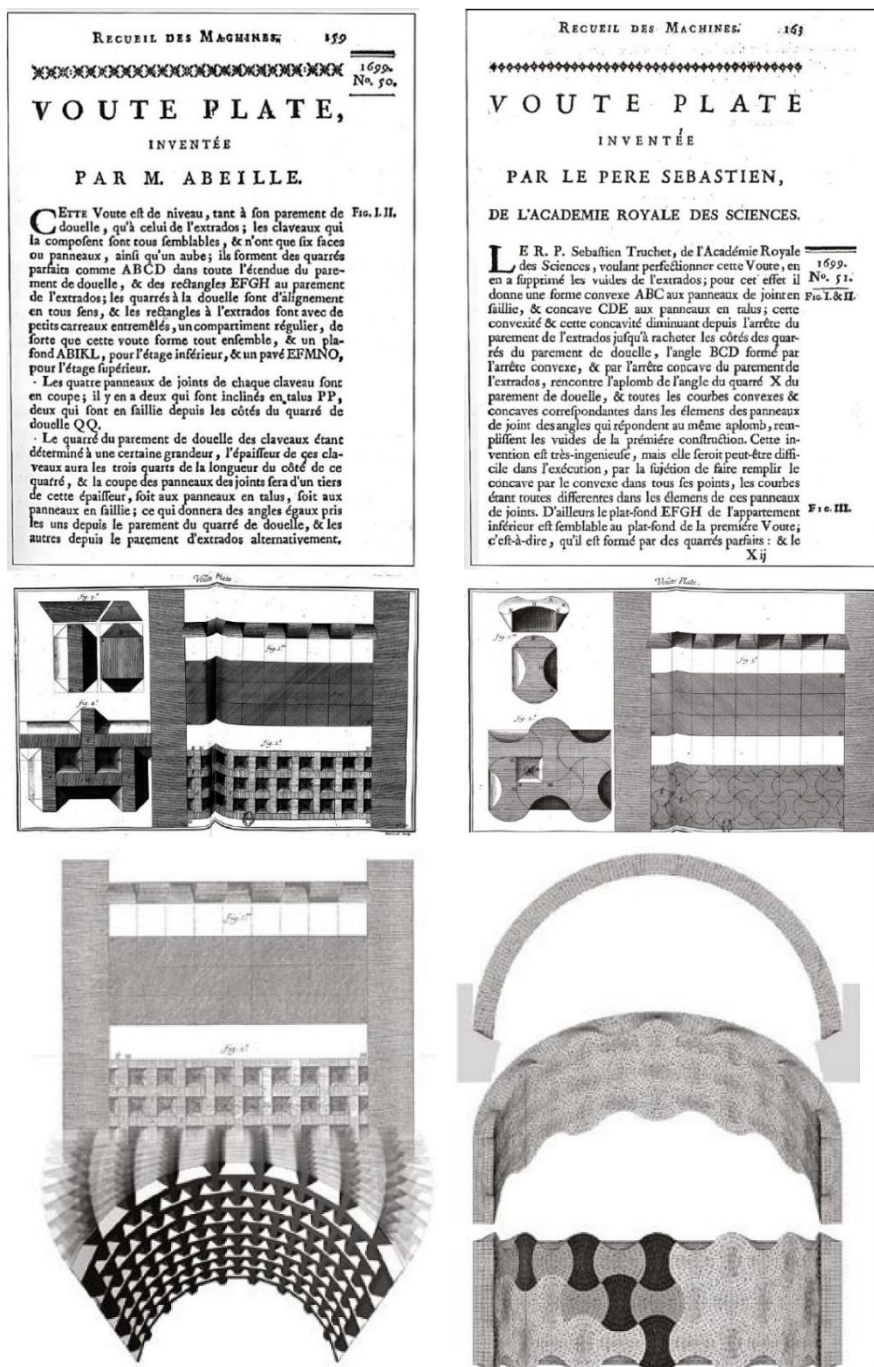


Fig. 44 I brevetti della volta piana di Abeille (1699) e di Truchet (1704); trasformazioni delle volte piane di Abeille e Truchet in volte a botte [Fallacara, Ferrero, Minenna, 2015, pp. 15-17]

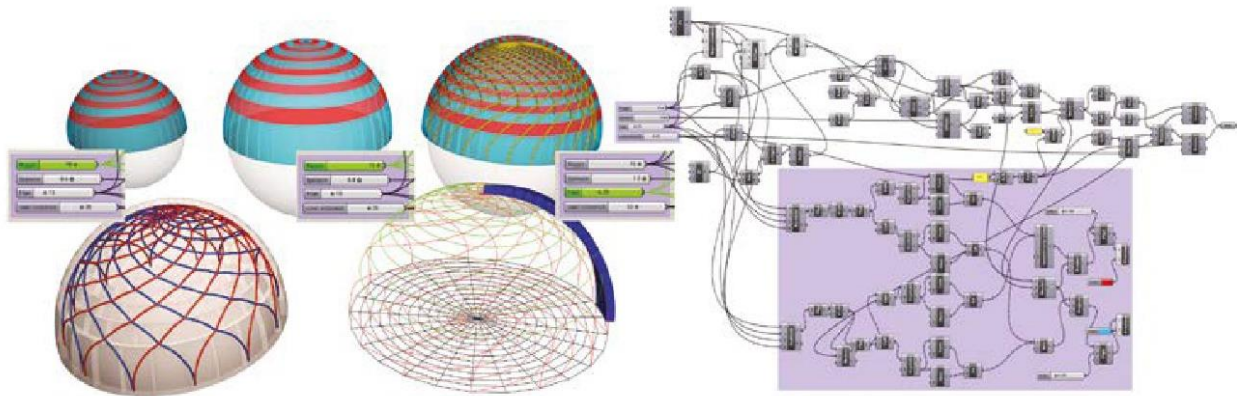


Fig. 45 Processo parametrico-variazionale applicato ad una semisfera per mezzo del *software* Grasshopper
[Fallacara, Ferrero, Minenna, 2015, p. 23]

Le potenzialità progettuali della stereotomia e del metodo basato sulla trasformazione topologica o omeomorfismo sono state esplorate in numerosi progetti e prototipi presentati in diverse pubblicazioni (D'Amato Guerrieri, 2006; Fallacara, Etlin, Tamboréro, 2008; Fallacara, 2012; Fallacara, Minenna, 2014; Fallacara, Ferrero, Minenna, 2015). In particolare, il metodo basato sulla deformazione topologica omogenea del sistema stereotomico piano brevettato da Abeille è stato applicato dai professori del Politecnico di Bari Claudio D'Amato e Giuseppe Fallacara per realizzare il portale di ingresso alla mostra "Città di Pietra" tenutasi a Venezia nel 2006 in occasione della 10. Mostra Internazionale di Architettura, denominato Portale Abeille (D'Amato Guerrieri, 2006, p. 323) (Fig. 46).

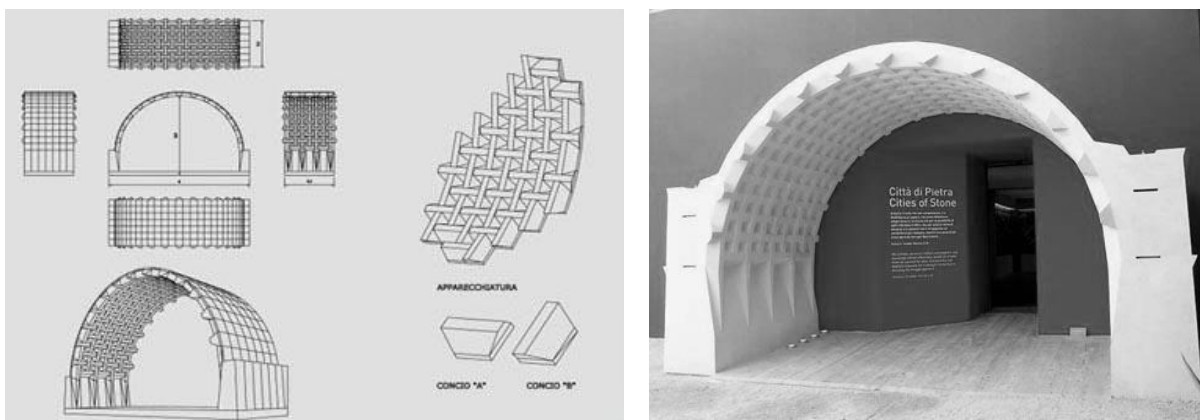


Fig. 46 Disegni e realizzazione del Portale Abeille
[<http://www.atelierfallacara.it/prototipi.html>]

Per la stessa occasione è stato realizzato anche l'obelisco Alexandros, esito delle ricerche relative alla specificità della connessione dei vari blocchi: l'obelisco è composto, infatti, da "maxi conci" dotati di superfici di contatto concavo-convesse calcolate matematicamente che permettono di migliorare il comportamento meccanico assicurando un'ottimale distribuzione delle pressioni e una più ampia aderenza (D'Amato Guerrieri, 2006, pp. 324-325). I conci sono stati definiti "osteomorfi" dal momento che la forma definitiva della superficie di contatto si ispira alle articolazioni ossee (Fig. 47). Le connessioni tra i giunti spaziali sono realizzate con malta di resina epossidica ad alta resistenza a

compressione che contribuisce a distribuire le forze in maniera omogenea evitando fessurazioni nelle fasi di montaggio e smontaggio (D'Amato Guerrieri, 2006, p. 332). La presenza di un'armatura costituita da un cavo zenitale post-teso di acciaio armonico, contribuisce, insieme ai giunti spaziali, ad aumentare la resistenza in caso di sisma (D'Amato Guerrieri, 2006, p. 333).



Fig. 47 Arco catenario e colonna a conci osteomorfi
[Fallacara, Ferrero, Minenna, 2015, p. 115]

La topologia viene indagata anche da altri ricercatori come strumento per il progetto di materiali compositi e di strutture a conci realizzati in materiali fragili. È stato evidenziato in alcune pubblicazioni come elementi interbloccabili la cui forma e disposizione derivano dall'applicazione del principio di incastro topologico, abbiano molti vantaggi tra cui la resistenza alla propagazione delle fratture, la tolleranza ai cedimenti locali e alla perdita di una parte dei blocchi da costruzione, la resistenza agli urti, la possibilità di costruzione a secco, la facilità di assemblaggio e smontaggio e la quasi totale riciclabilità dei blocchi (Estrin, Dyskin, Pasternak, 2011; Dyskin et al., 2001). È stato provato, in particolare, che l'incastro topologico può essere realizzato con tetraedri, cubi, ottaedri, dodecaedri, icosaedri, con tutti i loro derivati, inclusi gli elementi tubolari interbloccabili, e con "conci osteomorfi" caratterizzati da superfici di contatto concavo-convexe. Le strutture progettate secondo questo principio sono tenute insieme da un vincolo perimetrale continuo mentre localmente gli elementi che le costituiscono sono mantenuti in posizione da vincoli cinematici imposti attraverso la forma e la disposizione mutua degli elementi stessi (Estrin, Dyskin, Pasternak, 2011).

3.1.2. Metodi computazionali di *form-finding* e di analisi strutturale

Il progetto di sistemi ad arco o a volta in pietra pone problemi strutturali complessi vista la scarsa resistenza a trazione del materiale e la necessità di definire opportunamente la geometria e l'apparecchiatura dei singoli conci. Attualmente, però, sono disponibili nuovi metodi e strumenti che hanno ridotto le difficoltà di progettazione di questo tipo di strutture. Tra questi risultano essenziali i metodi computazionali di analisi meccanica e i metodi di *form-finding* basati non più su modelli fisici ma su modelli digitali, come il TNA e i sistemi *particle-spring*, che consentono al progettista di avere un controllo sulla distribuzione delle forze e sulla geometria complessiva. Le ricerche condotte mostrano come questi metodi innovativi abbiano ampliato le possibilità di ricerca formale consentendo di progettare strutture ad arco con sezione trasversale variabile e volte di forma libera. Questi metodi, pertanto, hanno contribuito alla riscoperta della pietra massiva nella cultura architettonica contemporanea.

3.1.2.1 Cenni storici

3.1.2.1.1. Le prime teorie statiche per l'analisi di strutture in pietra tradizionali

Per le strutture in pietra tradizionali come archi, volte e cupole, “il dimensionamento in chiave geometrica” è rimasto “sino a tempi recenti, il criterio più seguito dagli architetti” (Benvenuto, 1981, p. 324). Le prime teorie statiche elaborate in termini quantitativi furono stabilite alla fine del XVII secolo anche se in precedenza erano stati compresi “alcuni aspetti salienti del comportamento strutturale atti ad orientare le norme costruttive” (Benvenuto, 1981, p. 323).

I primi importanti progressi per la definizione di una teoria statica degli archi e delle volte si legano agli studi del matematico e astronomo francese Philippe De la Hire (1640-1718): la sua opera *Traité de Mécanique* introduce, infatti, “un approccio importante per la statica delle strutture in muratura” che iniziano ad essere intese come sistemi di blocchi rigidi dotati di peso (Benvenuto, 1981, p. 326). Dal momento che il problema da affrontare non era “la determinazione della sollecitazione reale di una struttura assegnata” ma la definizione di una “forma corrispondente alle ipotesi statiche assunte”, il sistema di solidi rigidi costituiva, infatti, “un modello capace di sufficiente espressività” (Benvenuto, 1981, p. 327). Inoltre, come base della sua teoria sulla statica degli archi, il matematico francese propone un teorema che anticipa una relazione essenziale della statica grafica che sarà chiarita solo alla fine del XIX secolo: impiega, infatti, un “anomalo poligono delle forze per esprimere l'equilibrio di un sistema di forze concorrenti” (Benvenuto, 1981, p. 327).

Il modello proposto da De la Hire, però, non considera l'attrito tra i conci, intesi come solidi euclidei pesanti perfettamente levigati. Di conseguenza nel suo studio di una sezione trasversale di una “volta circolare”, ovvero di un arco a tutto sesto, si giunge al paradosso che l'equilibrio può sussistere solo se i conci alle imposte hanno un peso infinito (Benvenuto, 1981, p. 329).

Inoltre, il matematico francese affrontando il problema del dimensionamento dei piedritti, introduce una “chiave di lettura” non corretta del comportamento dell'arco che verrà accettata dalla maggior parte degli studiosi del XVIII secolo e che sarà rifiutata solo dopo una lunga serie di prove sperimentali (Benvenuto, 1981, p. 326). Studiando l'equilibrio dell'arco nella situazione di rottura egli riconosce, infatti, la presenza della “macchina semplice” del cuneo: ipotizza un meccanismo di collasso in cui la parte centrale dell'arco compresa tra due raggi a 45° rimanendo integra, scivola

verso il basso esercitando un'azione di cuneo sulle parti restanti della struttura, promuovendone il ribaltamento senza scorrimento (Benvenuto, 1981, pp. 330-331).

Un altro rilevante contributo è rappresentato dagli studi di Claude Antoine Couplet (1642-1722), in particolare dalla sua memoria del 1730, dal titolo "*Seconde partie de l'examen de la poussée des voûtes*". In connessione con i suoi studi sulla spinta delle terre e sui muri di sostegno, egli affronta il problema delle volte considerando l'aderenza tra i conci: l'autore non valuta l'aderenza quantitativamente e in relazione ad un possibile meccanismo di collasso ma riconosce che il legame attritivo tra i conci ne impedisce lo scorrimento lungo i giunti e che "la rottura può avvenire soltanto per distacco in seguito a rotazione mutua intorno a determinati punti dell'estradosso o dell'intradosso" indicati con il termine "cerniere" (Benvenuto, 1981, p. 338). L'arco viene, quindi, "ricondotto a un sistema di 4 "stanghe"" che giunge a rottura se l'angolo tra le due stanghe di imposta si apre e gli angoli tra le stanghe che si congiungono alle reni si chiudono (Benvenuto, 1981, p. 338). Il ragionamento di Couplet non porta, tuttavia, a un calcolo rigoroso perché assume l'ipotesi erronea di De la Hire secondo la quale i giunti di rottura alle reni si trovano a 45° .

Una formulazione nuova del problema dell'equilibrio delle volte in cui il calcolo non viene più limitato al progetto ma diviene funzionale anche alla verifica, viene proposta da Charles Coulomb nell'opera "*Essai sur une application de maximis et minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'Architecture*" pubblicata nel 1776: Coulomb, infatti, non mira più a "determinare la figura o le dimensioni della volta" affinché le sollecitazioni corrispondano ad un "prefissato schema statico ritenuto ottimale" ma si propone di "determinare le sollecitazioni che insorgono in una volta di assegnate dimensioni e figura" (Benvenuto, 1981, pp. 361-2). Sfruttando le leggi dell'attrito da lui stesso formulate che legano le componenti ortogonali al giunto con quelle tangenziali, lo studioso arriva a determinare la condizione di equilibrio in una volta sollecitata dal peso proprio e trattenuta dalla coesione e dall'attrito dei giunti, per la quale siano assegnate la curva di estradosso e di intradosso e i giunti siano perpendicolari alla curva di intradosso. Il procedimento proposto da Coulomb consente di confutare "l'arbitraria ipotesi secondo la quale la rottura si verificherebbe per un giunto inclinato a 45° " e di ricercare le "sezioni realmente più deboli" per individuare "il vero comportamento limite della volta" (Benvenuto, 1981, p. 366).

Gli studi di Coulomb sono "il primo concreto accenno all'esigenza di abbandonare il (..) metodo di De la Hire e con esso la lettura dell'arco come un cuneo spingente sui rin fianchi per affrontare l'analisi rigorosa del cinematismo di collasso" che viene descritto, successivamente, dallo scienziato illuminista italiano Mascheroni (1750-1800) (Benvenuto, 1981, p. 367): nella sua opera "Nuove ricerche sull'equilibrio delle volte", pubblicata nel 1785, si dimostra che al collasso l'arco si trasforma in un sistema articolato di "cerniere" tra i diversi conci, localizzate in chiave, alle reni e alle imposte e si ricavano formule utili alla verifica e al dimensionamento, che essendo legate alla geometria dell'arco stesso risultano di immediata applicabilità.

Gli scienziati dell'Ottocento non limitarono il loro "intervento ad una sistemazione organica (..) ma dettero una svolta alla stessa definizione delle domande, agli obiettivi della loro ricerca, introducendo quegli aspetti che nelle antiche trattazioni erano ignorati (..) in particolare la resistenza a compressione (e a flessione) del materiale, nonché la deformazione conseguente ai carichi" (Benvenuto, 1981, p. 384). Si comprese, infatti, che per determinare il punto di applicazione della

spinta orizzontale in chiave le sole equazioni cardinali della statica e il modello rigido applicato fino ad allora non erano sufficienti e che occorreva introdurre considerazioni attinenti “al comportamento deformativo della struttura e (..) alle proprietà del materiale” oltre che una valutazione della “distribuzione delle tensioni lungo l’altezza della sezione” (Benvenuto, 1981, p. 385).

La considerazione della distribuzione delle tensioni lungo l’altezza della sezione è stata introdotta nel 1826 da Luigi Navier che riuscì a calcolare “nuovi valori della spinta orizzontale in chiave” riferendosi ad una situazione limite in cui le sezioni in chiave e alle reni fossero “effettivamente reagenti con tensioni di compressione sopportabili dal materiale” (Benvenuto, 1981, pp. 387-8). Egli comprese che in questa situazione, corrispondente ad una distribuzione delle tensioni triangolare con valore nullo all’intradosso in chiave e all’estradosso alle reni, “la risultante delle pressioni normali al giunto” doveva essere applicata ad “una distanza dal lembo più compresso uguale a un terzo della larghezza effettiva di tale giunto” (Benvenuto, 1981, pp. 387-8).

Nel 1831 F. J. Gerstner introdusse per primo le nozioni di “linea di resistenza” e di “linea di pressione” intese rispettivamente come “il poligono che congiunge i centri di pressione su ognuno dei piani dei giunti” e “l’involuppo delle rette di azione delle forze reattive tra giunto e giunto” (Benvenuto, 1981, p. 388). Egli comprese, inoltre, che per l’equilibrio è necessario che la linea di resistenza passi all’interno dell’arco. L’autore si accorge che, a causa del carattere iperstatico del problema, “è possibile tracciare infinite linee di pressione passanti per i diversi punti della chiave e tangenti ai diversi punti delle reni, che soddisfino le condizioni di equilibrio” e che il problema risiede nella determinazione della linea di pressione reale (Benvenuto, 1981, p. 389).

E. Méry, infine, definì un “metodo pratico”, che consente di determinare il valore della spinta in chiave “nell’ipotesi che siano assenti, in ogni sezione dell’arco, tensioni di trazione” ovvero nella situazione in cui la linea di resistenza, detta curva delle pressioni, sia “sempre interna alla striscia definita dalle curve congiungenti i vertici superiori e inferiori (..) del nocciolo centrale d’inerzia di ogni sezione trasversale” e denominata terzo medio (Benvenuto, 1981, p. 390). L’autore comprende che “per l’arco di sezione rettangolare o per la volta a botte, tali curve corrono ad una distanza” rispettivamente dall’estradosso e dall’intradosso, “pari a un terzo dell’altezza h ” (Benvenuto, 1981, p. 390). Tra tutte le curve delle pressioni interne al terzo medio egli consiglia di “assumere quella che passa per l’estremo superiore del terzo medio nella sezione in chiave e per l’estremo inferiore del terzo medio nel “giunto di rottura alle reni”, inclinato di 60° negli archi a tutto sesto e collocato all’imposta negli archi ribassati” (Benvenuto, 1981, p. 390). Il metodo da lui proposto consente di determinare pienamente la curva delle pressioni e di tracciarla attraverso una costruzione geometrica di statica grafica basata sul poligono funicolare delle forze. È tuttora utilizzato per effettuare verifiche statiche di archi di piccola luce.

3.1.2.1.2. I metodi di *form-finding* basati su modelli fisici

In architettura e ingegneria strutturale, con il termine *form-finding* si identifica “il processo di progettazione di forme strutturali ottimali attraverso l’uso di strumenti sperimentali e strategie” adatti a “simulare un preciso comportamento meccanico” (Tedeschi, 2014, p. 353)¹⁶. Storicamente i metodi di *form-finding* si sono basati su modelli fisici realizzati con materiali e tecniche diverse.

¹⁶ Pugnale A (2014) (*Digital*) *Form-finding*. In: Tedeschi A. AAD_ Algorithms-aided design-parametric strategies using Grasshopper®. Brienza (Pz): Le Penseur Publisher, 353-359.

La tecnica di *form-finding* più antica e diffusa per archi, volte e gusci è detta *reverse hanging* e si basa sulla realizzazione di un modello fisico fatto con cavi elastici o membrane prive di rigidità rotazionale (Tedeschi, 2014, p. 353): la tecnica consente di determinare la configurazione di una struttura che lavori in pura compressione invertendo la forma funicolare assunta dal corrispondente modello lavorante a trazione sotto l'azione della forza di gravità. Il principio su cui si fonda il metodo venne richiamato per la prima volta nel 1675 in una pubblicazione di Hooke che propose di specchiare la curva generata da una catena sospesa alle estremità, soggetta al solo peso proprio, in modo da definire la forma strutturale ottimale per un arco.

Lo stesso principio proposto per gli archi può essere usato per determinare la forma di volte o gusci in calcestruzzo o mattoni e per le *gridshell* in acciaio o legno. Per realizzare i modelli di queste strutture tridimensionali sono stati storicamente utilizzati tre metodi (Tedeschi, 2014, pp. 355-356). Il più antico, impiegato anche da Gaudì, consente di discretizzare volte a botte e cupole attraverso l'uso di corde caricate con pacchi di sabbia. Un altro metodo usato per trovare la forma delle *gridshell* è basato, invece, su reti non rigide realizzate spesso con catene. Un terzo metodo per gusci in calcestruzzo fu sviluppato da Heinz Isler nel 1955 e utilizzava pezzi di tessuto o di membrana umidi che venivano sospesi e poi congelati.

Oltre al metodo *reverse hanging*, sono stati sviluppati altri due modi per determinare la forma strutturale attraverso modelli fisici.

Il primo è basato sullo studio di superfici minime ottenute immergendo contorni chiusi, spesso fatti con delle corde, in acqua saponata (Tedeschi, 2014, p. 356). Il metodo nasce per simulare lo stato di presollecitazione tipico delle reti di cavi o tensostrutture. È stato utilizzato da Frei Otto che con il suo gruppo di ricerca presso l'Istituto di Strutture Leggere di Stoccarda, ha definito un insieme di regole per generare questi film saponosi. Le superfici minime sono state utilizzate, tuttavia, anche per il *form-finding* di strutture lavoranti a compressione pura tra cui il ponte in calcestruzzo armato di Sergio Musmeci sul fiume Basento (1967-69).

Il secondo metodo alternativo al *reverse hanging* è detto "*pneumatic or inflated hill method*" e consente di ottenere una forma strutturale attraverso il gonfiaggio di membrane (Tedeschi, 2014, p. 358). Questo processo di *form-finding* è stato sfruttato negli anni '60 dall'architetto italiano Dante Bini per sviluppare una tecnica di costruzione rapida di cupole di calcestruzzo armato brevettata con il nome di "Binishell": la tecnica prevedeva l'impiego di casseforme pneumatiche piane gonfiate dopo il getto del calcestruzzo in modo da realizzare la cupola nell'arco di due settimane.

3.1.2.2. Le ricerche

Le tecnologie digitali hanno messo a disposizione dei progettisti nuovi metodi e strumenti per il *form-finding* e per l'analisi strutturale che sono stati applicati anche allo studio e al progetto di strutture ad arco o a volta in pietra.

I nuovi metodi e strumenti per il *form-finding* digitale consentono di migliorare le prestazioni di una configurazione spaziale già esistente, senza che questo implichi necessariamente "la ricerca dell'ottimo strutturale" (Tedeschi, 2014, p. 359)¹⁷. Questi metodi stanno, quindi, modificando il

¹⁷ Ibidem

concetto originale di *form-finding* inteso come ricerca della forma ottimale, in quello che è stato definito da Alberto Pugnale, di “*form-improvement*” (Tedeschi, 2014, p. 359). Il *form-finding*, di conseguenza, non viene più inteso come semplice strumento per la risoluzione di problemi strutturali ma anche come un mezzo con cui il progettista può giungere a soluzioni formali innovative capaci di rispondere a esigenze architettoniche e ingegneristiche. L’esistenza di questi nuovi strumenti consente anche di immaginare una nuova centralità delle strutture voltate in pietra nell’architettura contemporanea.

Tra i nuovi metodi utilizzati per il *form-finding* di strutture lavoranti in pura trazione o in pura compressione ci sono i sistemi detti *Particle-spring*, originariamente sviluppati per la simulazione realistica del movimento di tessuti o abiti e per l’animazione di personaggi (Kilian, Ochsendorf, 2005). Questi sistemi possono simulare il comportamento fisico di corpi deformabili e consentire ai progettisti di studiare in tempo reale e in modo interattivo come si modifica la forma della struttura di progetto al variare delle forze, dei supporti e delle proprietà fisiche impostate (Tedeschi, 2014, p. 361). Attraverso questi sistemi un modello continuo può essere discretizzato in un numero finito di masse (*particles*) connesse da molle perfettamente elastiche prive di massa (*spring*): alle masse che possono essere vincolate o cambiare posizione e velocità all’evolvere della simulazione, sono applicati i carichi esterni simulati da vettori; alle molle che si comportano in accordo con la legge di Hooke, è assegnato un valore di lunghezza iniziale e una ben determinata rigidità. La simulazione procede in modo iterativo: le *particles* si spostano dalla loro posizione iniziale finché non raggiungono uno stato di equilibrio che dipende dalla geometria iniziale, dai vettori forza e dalle proprietà delle molle (Tedeschi, 2014, p. 362). Poiché le *particles* si comportano come cerniere sferiche, si determina una soluzione equilibrata che sostiene i carichi esclusivamente attraverso forze assiali.

Sono disponibili molti pacchetti *software* in grado eseguire una simulazione *particle-spring* tra cui CADenary sviluppato da A. Kilian, D. Chak e M. Galbraith nel 2002, ma la maggior parte di essi non risulta completamente integrata con *software* di modellazione e presenta difficoltà di utilizzo (Tedeschi, 2014, p. 363). Un motore fisico basato su un sistema *particle-spring* facile da usare, orientato al progetto e integrato in Grasshopper come plug-in è Kangaroo. È stato sviluppato da D. Piker e consente al progettista di interagire con la forma strutturale ottenuta attraverso simulazioni *particle-spring* in modo diretto o parametrico-associativo (Tedeschi, 2014, p. 363). La prima modalità di interazione prevede la manipolazione diretta dei punti di ancoraggio, delle forze e delle proprietà delle molle. La seconda modalità consente di modificare questi dati agendo sui componenti dell’algoritmo usato per definirli.

Il plug-in Kangaroo consente a partire dalla discretizzazione di geometrie NURBS in linee e punti, di convertire le prime in molle e i secondi in *particle* usando componenti specifici del *software* per creare un algoritmo visuale, di eseguire la simulazione e di determinare lo stato di equilibrio (Tedeschi, 2014, p. 364).

Alcuni studi hanno proposto i sistemi *particle-spring* come nuovo strumento per il progetto di strutture funicolari di forma libera o con sezione trasversale variabile e per l’analisi di strutture murarie storiche come quelle delle cattedrali gotiche (Clifford, 2013; Kilian, Ochsendorf, 2005). Hanno dimostrato che questi sistemi consentono di generare forme strutturalmente ottimali ma anche di determinare soluzioni con un grado di ottimizzazione strutturale inferiore che risultino, però, maggiormente rispondenti ad altri vincoli di progetto di tipo formale, acustico o normativo. Hanno evidenziato, infatti, la flessibilità dello strumento che può anche essere applicato secondo un

approccio di *form-responding* che assume come dato iniziale non modificabile una forma desiderata per generare strutture lavoranti a compressione pura (Clifford, 2013).

Un altro metodo computazionale di *form-finding* basato su modelli digitali è detto *Thrust Network Analysis* (TNA) ed è nato come estensione del metodo grafico di tracciamento della curva delle pressioni usato per la verifica degli archi (Block, Van Mele, Rippmann, 2015; Rippmann, Lachauer, Block, 2012). Il metodo è ispirato dal lavoro di O'Dwyer's sull'analisi funicolare di strutture voltate in muratura ed è basato sul teorema di sicurezza formulato nel 1982 da Jacques Heyman nell'opera "*The Masonry Arch*", che afferma che una struttura in muratura è in condizioni di sicurezza se può essere determinata una funicolare dei carichi che è in equilibrio con i carichi applicati incluso il peso proprio e che è interamente contenuta all'interno della geometria della struttura (Block, Van Mele, Rippmann, 2015). Il metodo consente non solo di valutare la stabilità di strutture voltate storiche ma anche di progettare strutture voltate di forma complessa usando un approccio intuitivo basato su rappresentazioni grafiche che permettono al progettista di avere un controllo bidirezionale sulla distribuzione delle forze interne e sulla geometria complessiva (Block, Ochsendorf, 2007; Rippmann, Lachauer, Block, 2012). Gli elementi fondamentali del metodo sono, infatti, dei diagrammi reciproci chiamati *form diagram* e *force diagram* o diagramma di Maxwell-Cremona. Il primo rappresenta la geometria della struttura a nodi ed elementi lineari mentre il secondo rappresenta l'equilibrio delle forze interne ed esterne della struttura (Rippmann, Lachauer, Block, 2012). I due diagrammi sono figure reciproche o duali in quanto, in accordo con la definizione di Maxwell, "sono composte da un uguale numero di linee tali che le linee corrispondenti nelle due figure sono parallele e le linee corrispondenti che in una figura convergono in un punto formano un poligono chiuso nell'altra" (Block, Ochsendorf, 2007). Di conseguenza l'equilibrio di un nodo del primo diagramma è rappresentato da un poligono chiuso nel secondo diagramma e viceversa. Attraverso questi diagrammi si possono generare soluzioni funicolari ovvero lavoranti a sola compressione per strutture soggette a carichi verticali (Fig. 48).

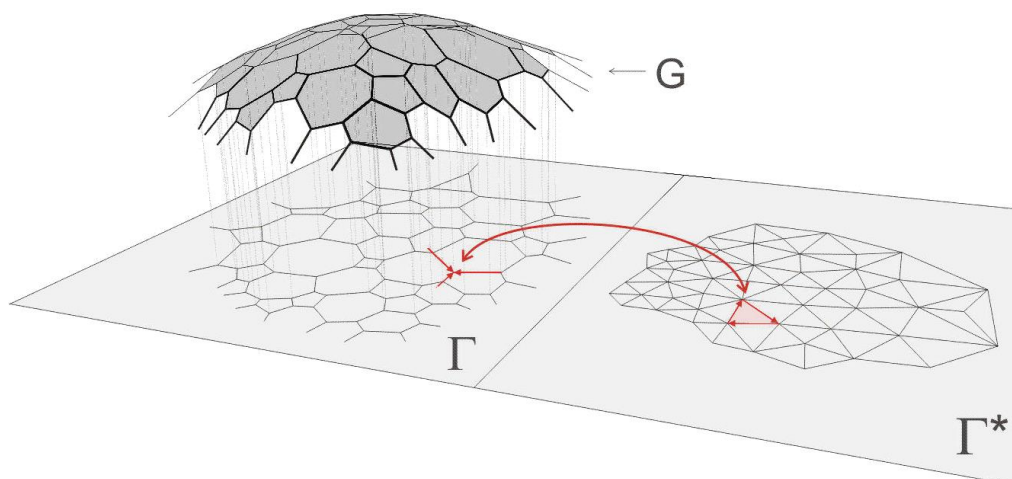


Fig. 48 I diagrammi reciproci e il guscio tridimensionale ottenuto come soluzione attraverso il metodo TNA

[Block, Ochsendorf, 2007, p. 169]

Le fasi di un tipico processo progettuale comprendono (Rippmann, Lachauer, Block, 2012):

1. La definizione da parte dell'utente del *form diagram* che rappresenta la topologia delle forze della struttura in piano e che è la proiezione orizzontale della soluzione finale;
2. La generazione del *force diagram* connettendo i baricentri delle aree del *form diagram* e ruotando il diagramma ottenuto di 90° per imporre il parallelismo tra gli spigoli corrispondenti dei due diagrammi. La lunghezza degli elementi lineari nel *force diagram* è, a meno di un fattore di scala, uguale al modulo della forza assiale negli elementi lineari del *form diagram*;
3. La modifica da parte dell'utente di uno dei due diagrammi spostando, scalando o ruotando uno o più nodi o elementi lineari;
4. L'adattamento dei diagrammi nel processo di determinazione dell'equilibrio orizzontale;
5. La definizione, a partire dai diagrammi reciproci ottenuti, di un fattore di scala e dell'altezza dei vincoli di contorno;
6. Il calcolo dell'altezza dei nodi della soluzione (*thrust network*) per garantire l'equilibrio in direzione verticale per i carichi ad essi applicati;
7. La verifica e la valutazione della soluzione rispetto alle intenzioni progettuali attraverso la visualizzazione tridimensionale della *thrust network*.

Durante il processo progettuale digitale, sono ripetute due procedure di risoluzione sequenziali che riflettono le due fasi di ricerca dell'equilibrio (Rippmann, Lachauer, Block, 2012): la prima garantisce l'equilibrio orizzontale, facendo in modo che spigoli corrispondenti dei diagrammi reciproci siano orientati nella stessa direzione; la seconda determina equilibrio verticale della *thrust network* a partire dall'equilibrio orizzontale ottenuto nella prima fase, per un dato fattore di scala.

La modificazione guidata dall'utente dei diagrammi reciproci, seguita dalle procedure risolutive che in due fasi impongono l'equilibrio orizzontale e verticale, è ripetuta finché la forma della *thrust network* risultante non risponde alle richieste di progetto. Il controllo attivo dei diagrammi reciproci consente, quindi, di esplorare differenti geometrie voltate, comparando contestualmente l'ampiezza complessiva delle forze nelle soluzioni ottenute.

Alcuni studi recenti hanno mostrato come il metodo TNA possa essere usato per il progetto di strutture voltate espressive ed efficienti, lavoranti a compressione pura e realizzate con materiali di scarsa qualità o con una minima quantità di materiale, aumentata solo dove localmente necessario (Block, Ochsendorf, 2007; Block, Van Mele, Rippmann, 2015; Rippmann, Lachauer, Block, 2012). Hanno, inoltre, implementato il metodo creando un plug-in del *software* di modellazione CAD Rhinoceros detto RhinoVAULT (Fig. 49). Attraverso questo programma è stata progettata l'Armadillo Vault esposta alla Biennale di Venezia del 2016 (Frearson, 2016) (Fig. 50).

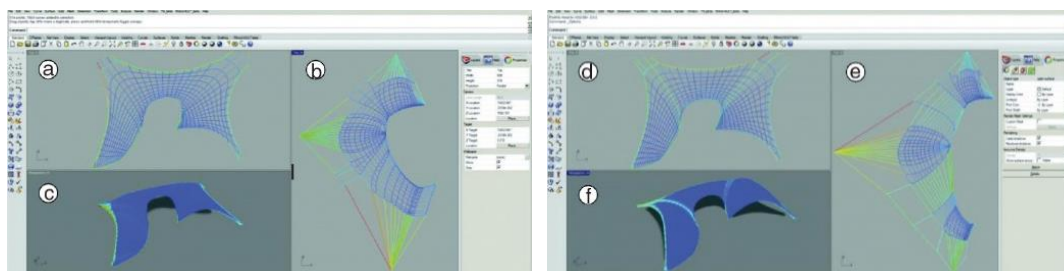


Fig. 49 Schermate del plug-in RhinoVAULT
[Rippmann, Laucher, Block, 2012, p. 227]



Fig. 50 L'Armadillo Vault esposta alla Biennale di Venezia 2016 e progettata con RhinoVAULT dal gruppo di ricerca del professor Block dell'ETH di Zurigo [Frearson, 2016, su <https://www.dezeen.com>, foto Iwan Baan]

Attualmente, oltre ai metodi di *form-finding* basati su modelli digitali, sono disponibili metodi computazionali di analisi meccanica applicabili a strutture voltate composte di conci separati da interfacce di spessore minimo riempite con malta. I metodi esistenti sono di diverso tipo e si distinguono per la diversa modellazione dei conci e degli elementi di interfaccia (Brocato, Mondardini, 2012).

Se i conci e i giunti sono considerati come solidi deformabili di diversa natura con comportamento non lineare, può essere elaborato un modello omogeneo equivalente. Se, invece, si considera la muratura come composta di materiale non resistente a trazione o con fessure diffuse, si può praticare un'analisi non lineare. In alternativa si può assumere che gli spostamenti avvengano soltanto all'interfaccia tra i conci considerati come elementi rigidi o si può elaborare un modello eterogeneo non lineare della struttura in cui i conci e le interfacce sono considerati deformabili.

I modelli per strutture a blocchi che hanno restituito risultati compatibili con quelli sperimentali sono di tre tipi (Brocato, Mondardini, 2012):

- modelli a elementi finiti in cui si considerano le discontinuità caratterizzanti le strutture stesse, realizzati sotto opportune ipotesi con *software* come Cast3M;
- modelli agli elementi finiti continui realizzati con *software* come ABAQUS, in cui la struttura è composta da un materiale omogeneo con fessure diffuse;
- modelli agli elementi discreti realizzati con *software* come UDEC.

Con riferimento a strutture voltate in pietra, alcuni studi si sono concentrati sull'analisi meccanica di sistemi strutturali derivati dal brevetto del 1699 di Joseph Abeille per una volta piana (Brocato, Mondardini 2012, 2015). È stato indagato il comportamento di famiglie di volte piane o sferiche in conci di pietra ottenute modificando alcuni parametri geometrici per comprendere secondo quale

meccanismo sopportano i carichi o per individuare i parametri per l'ottimizzazione attraverso il tracciamento di grafici radar (diagrammi di Kiviat). In queste ricerche è stato adottato un modello numerico agli elementi finiti realizzato con il *software* Cast3M in cui i conci sono considerati come solidi dal comportamento elastico lineare mentre per le interfacce è stato assunto un comportamento unilaterale coesivo-attribitivo (Mohr-Coulomb).

3.2. SISTEMI INNOVATIVI DI REALIZZAZIONE DI PRODOTTI LAPIDEI

3.2.1. Sistemi integrati CAD/CAM/CNC lavoranti per asportazione di materiale

L'innovazione più importante nell'industria dei lapidei, dopo la diffusione di macchine che utilizzano il diamante, è legata all'introduzione di tecnologie elettroniche ed informatiche che hanno reso accessibili molte lavorazioni della pietra in spessori rilevanti “che fino a poco tempo fa erano di alto contenuto artigianale e risultavano estremamente lunghe e costose” (Acocella, 2004, p. 607). Le cosiddette macchine a controllo numerico (CNC, Controllo Numerico Computerizzato), macchine sotto il controllo automatico di un computer, hanno consentito, infatti, non solo la programmazione e l'automazione dei cicli produttivi ma anche la semplice realizzazione di prodotti lapidei caratterizzati da “concavità, convessità, curve irregolari e sagomature di varia natura che prima richiedevano un laborioso lavoro manuale” (Acocella, 2004, p. 607) (Fig. 51).

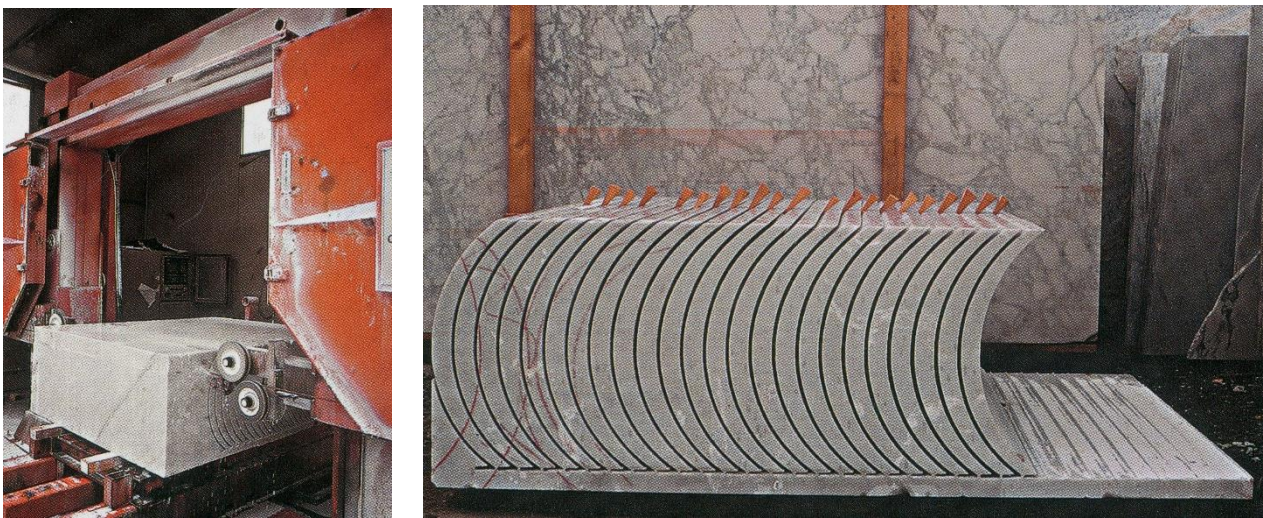


Fig. 51 Macchina a controllo numerico (tagliatrice a filo diamantato) in azione; elementi curvi in massello dopo le operazioni di taglio

[Acocella, 2004, p. 607]

Anche se le macchine a controllo numerico sono disponibili dalla fine degli anni '60 del secolo scorso, sono state acquisite nell'industria della pietra soltanto dagli anni '90 (Dernie, 2003, p. 47). Attualmente, hanno assunto molta importanza sia nel campo del design che in quello dell'architettura: vengono utilizzate, infatti, soprattutto per realizzare “pezzi strutturali e speciali per l'architettura”, arredi e sculture (Acocella, 2004, p. 607).

Le operazioni di questi macchinari innovativi sono gestite da *software* di tipo CAD/CAM: questi programmi, infatti, guidano i movimenti di tagliatrici a filo diamantato multiassiali, frese sagomatrici, torni, copiatori, contornatrici ed “editano graficamente” i disegni degli elementi da realizzare elaborati nel piano e nello spazio tridimensionale” (Acocella, 2004, p. 607).

I sistemi CAD (*Computer Aided Design*) sono sistemi *software* per la progettazione assistita dal computer e consentono la modellazione tridimensionale informatica dell'oggetto da produrre mentre i sistemi CAM (*Computer Aided Manufacturing*) sono sistemi *software* per la fabbricazione assistita dal computer. I sistemi integrati CAD/CAM usano gli strumenti di disegno CAD per definire le geometrie degli oggetti da realizzare in modo tale che possano essere processate dalla porzione CAM del programma per definire il percorso macchina (Dernie, 2003, p. 47) che risulta significativamente

diverso a seconda dell'utensile impiegato (Beltrametti, Gasparre, 2014). Grazie a questi sistemi al braccio della macchina può essere trasferita una grande quantità di dati numerici per definire la posizione del punto di taglio nello spazio con una precisione al millimetro (Dernie, 2003, p. 47). Le diverse macchine esistenti devono essere preparate per ogni specifica lavorazione e presentano caratteristiche peculiari che risultano molto rilevanti nella definizione del lavoro (Beltrametti, Gasparre, 2014).

I sistemi CAD/CAM/CNC basati sulle tecniche di taglio in positivo per asportazione di materiale consentono di realizzare con la pietra naturale manufatti “concavi”, che risultano cioè privi di forti sottosquadri e che non necessitano di cicli di lavorazioni interne al volume dell'oggetto, caratterizzati da almeno una superficie piana da fissare al piano di lavoro (Fallacara, 2012, p. 18). Poiché la modellazione che permette di ridurre il materiale alla forma desiderata è basata su processi di fresatura o di taglio con disco (Fallacara, 2012, p. 18), per limitare i costi di produzione devono essere minimizzate “le attività “sottrattive”” (Beltrametti, Gasparre, 2014).

I sistemi integrati CAD/CAM/CNC hanno consentito la “totale informatizzazione della fase esecutiva di produzione” di elementi architettonici lapidei anche di forma complessa e l'attuazione di un “principio di circolarità e sincronicità della sequenza idea-progetto-costruzione” in base al quale il progettista contemporaneo può essere “autore anche della fase esecutiva dell'opera” (Fallacara, 2012, p. 15). Grazie a queste nuove tecnologie molte limitazioni al progetto di architetture in pietra sono state rimosse permettendo di concepire e realizzare opere che fino a pochi anni fa erano ritenute impossibili in termini di tempistica ed economicità. Questi strumenti, quindi, si possono considerare uno dei fattori che hanno reso possibile la riscoperta della pietra massiva nella cultura architettonica contemporanea.

3.2.1.1. Tipologie di macchine CNC lavoranti per asportazione di materiale

Le macchine CNC disponibili nell'ambito dei processi di taglio per asportazione di materiale, consentono di ottenere diversi gradi di flessibilità geometrica, di precisione e di uniformità superficiale e risultano, quindi, adatte alla realizzazione di manufatti differenti.

La macchina che consente la minore flessibilità geometrica è la sega circolare: con questo tipo di macchina si possono ottenere manufatti definiti esclusivamente da facce piane (Rippman, Block, 2011a).

Le fresatrici sono adatte per realizzare oggetti complessi, con curvature locali ampie ed un alto grado di uniformità superficiale. Se multiassiali possono impiegare utensili diversi nei diversi assi (Dernie, 2003, p. 47). Una fresa a disco può approssimare superfici a doppia curvatura con una serie di tagli paralleli mentre una fresa verticale a disco a 5 assi può muoversi linearmente in tre direzioni e ruotare intorno a due assi distinti. Il movimento lungo o intorno ad ogni asse è controllato numericamente importando un codice detto *ISO-G code*. Le fresatrici robotiche a 5 assi consentono di ottenere il massimo grado di flessibilità geometrica nella generazione dei manufatti di forma libera che possono essere dotati anche di facce a doppia curvatura (Rippman, Block, 2011a).

Tra tutte le macchine lavoranti per asportazione di materiale impiegabili per realizzare conci solidi, le tagliatrici a filo diamantato sono le attrezzature più interessanti (Rippman, Block, 2011a). Rispetto alle frese, infatti, sono caratterizzate da una maggiore flessibilità geometrica e da una maggiore

precisione e velocità. Un altro vantaggio risiede nell'uso efficiente del materiale: diversamente dal processo di fresatura, infatti, il materiale asportato è in forma di blocco e può, quindi, essere impiegato per realizzare altri elementi di dimensioni più piccole.

Le tagliatrici a filo diamantato possono avere da 2 a 4 assi: le tagliatrici a due assi consentono di descrivere superfici a curvatura singola mentre quelle a 3 o a 4 assi consentono di descrivere superfici rigate. L'elevato grado di flessibilità geometrica delle tagliatrici a 4 assi le rende adatte per la realizzazione di conci di volte di forma libera (Rippman, Block, 2011a). I quattro gradi di libertà che caratterizzano queste macchine sono rappresentati dall'asse lungo cui si muove il telaio, dai due assi lungo cui si muove il filo e dall'asse di rotazione del piano di appoggio del manufatto (Fig. 52).

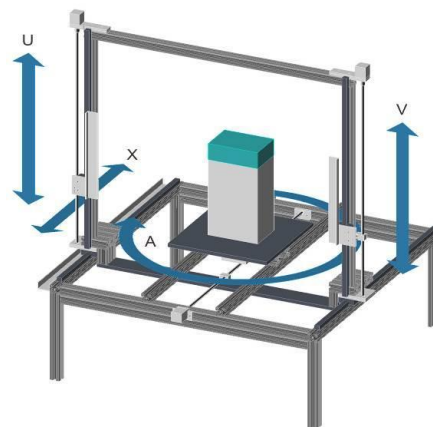


Fig. 52 Rappresentazione schematica di una tagliatrice a filo diamantato a 4 assi a controllo numerico
[Rippman, Block, 2011a]

3.2.1.2. Le ricerche

La possibilità offerta dai sistemi CAD/CAM/CNC di realizzare prodotti lapidei in modo efficiente è uno dei fattori che ha portato la cultura architettonica contemporanea a riscoprire il valore espressivo di archi, coperture voltate e strutture in elevazione in conci di pietra. Le potenzialità dei sistemi CAD/CAM/CNC, infatti, sono state evidenziate soprattutto in ricerche relative alla progettazione di sistemi voltati di forma libera per i quali è essenziale ottimizzare il progetto dei conci tenendo conto sia delle esigenze strutturali che dei vincoli costruttivi. Gli studi condotti hanno sviluppato i processi di manifattura digitale esistenti riducendo i tempi di preparazione del processo macchina e di realizzazione del singolo concio ed aumentando la precisione ottenibile nel processo di taglio (Rippmann, Block 2011a, 2011b, 2012; Rippmann et al., 2013). In particolare, le strategie di ottimizzazione sviluppate attraverso impostazioni *software* prototipiche e personalizzate, consentono di determinare la disposizione migliore del volume del concio all'interno del blocco di materiale da lavorare, e di identificare le superfici da processare secondo modalità differenti. In una delle strategie di ottimizzazione proposte, le superfici a doppia curvatura delle facce di intradosso e di estradosso dei conci di una struttura voltata, infatti, vengono processate in modo diverso rispetto alle facce di contatto con i conci adiacenti: le superfici di intradosso ed estradosso vengono realizzate eseguendo con una fresa a disco una serie di incisioni parallele a distanza maggiore dello spessore della lama e rimuovendo il materiale sovrabbondante in una successiva fase di post-processamento; le facce di

contatto dei conci, invece, vengono realizzate con un taglio singolo (Rippmann et al., 2013). Un'altra strategia di ottimizzazione, invece, è stata sviluppata per macchine di taglio a filo e si basa sull'approssimazione delle superfici dei conci a superfici rigate (Rippmann, Block 2011a).

3.2.2. La stampa 3D

La stampa 3D è una tecnologia per la manifattura additiva che consente a partire da un disegno CAD la realizzazione di oggetti tridimensionali per generazione e sovrapposizione di strati successivi di materiale (Beltrametti, Gasparre, 2014; Tedeschi, 2014, p. 316). Al contrario delle tecniche di lavorazione per asportazione di materiale, quindi, con questa tecnologia la riduzione dei costi e la “massimizzazione dell'efficienza produttiva” si ottengono limitando al minimo la quantità di materiale impiegata (Beltrametti, Gasparre, 2014).

La stampa 3D rappresenta “un'evoluzione ulteriore delle potenzialità delle macchine computerizzate a controllo numerico” (Beltrametti, Gasparre, 2014): la matematica dell'oggetto da realizzare, infatti, viene trasmessa dal file CAD alla stampante 3D e l'oggetto da realizzare viene prodotto senza necessità di adeguare le caratteristiche di lavoro alla macchina.

Il processo di manifattura comprende tre fasi successive ovvero la creazione di un modello 3D digitale, la conversione del modello 3D in un codice in formato leggibile dalla macchina e la stampa dell'oggetto fisico (Tedeschi, 2014, p. 316). Il modello digitale viene creato con *software* di modellazione come Rhinoceros e deve essere suddiviso in strati per definire il percorso di deposizione del materiale utilizzato dalla stampante.

I vantaggi della stampa 3D rispetto alle tecnologie tradizionali risiedono nella possibilità di produrre agevolmente oggetti dalla geometria particolarmente complessa, senza necessità di “predisporre complesse lavorazioni e elaborare preliminarmente manufatti dedicati” come stampi o calchi (Beltrametti, Gasparre, 2014). I minori vincoli posti alla progettazione determinano, inoltre, un ampliamento delle possibilità di ricerca formale. Il limite maggiore è relativo alle dimensioni dei prodotti realizzabili con questa tecnica di manifattura additiva: la grandezza dei prodotti dipende, infatti, dalle dimensioni della camera di lavoro delle stampanti.

3.2.2.1. Cenni storici

Le stampanti 3D sono state impiegate nell'ambito della prototipazione rapida per supportare processi di sviluppo di nuovi prodotti fin dagli anni '80 (Beltrametti, Gasparre, 2014): la prima stampante 3D, infatti, è stata realizzata da 3D Systems nel 1984. Tuttavia, la diffusione della tecnologia in molti settori della manifattura è avvenuta a partire dalla seconda metà degli anni '90.

Le tecniche di stampa 3D sviluppate negli anni si distinguono per la diversa modalità con cui vengono realizzati i diversi strati e per la cinematica delle stampanti. Le tecniche più comunemente impiegate sono la stampa per deposizione o FDM (*Fusion Deposition Modeling*), la stampa per sinterizzazione laser o SLS (*Selective Laser Sintering*) e la stereolitografia (SL o SLA) (Pignatelli, 2013; Tedeschi, 2014, p. 317).

La stampa per deposizione è stata sviluppata nel 1988 da Scott Crump. Prevede l'impiego di una testina di stampa detta estrusore che deposita piccole gocce di materiale fuso e muovendosi nel piano

componi i singoli strati. Durante la fase di stampa il materiale da depositare, solitamente filamenti plastici, viene spinto nell'estrusore che lo riscalda fino alla temperatura di fusione (Pignatelli, 2013; Tedeschi, 2014, p. 318). Le gocce di materiale fuso depositate solidificano e si uniscono fra loro garantendo la coesione all'interno di ogni singolo strato e tra strati adiacenti. I vantaggi di questa modalità di stampa risiedono nella semplicità del processo di trasformazione del materiale e nella continuità della produzione. I materiali tipicamente utilizzati sono polimeri termoplastici con una bassa temperatura di fusione come il PLA, il PCL e il PLGA (Esposito Corcione et al., 2018).

La stampa per sinterizzazione è stata sviluppata nel 1986 da Carl Deckard presso l'Università del Texas (Tedeschi, 2014, p. 317). Il materiale di partenza è costituito da micro-particelle di polvere generalmente plastica o metallica, che vengono depositate per strati. Un raggio laser ne percorre il contorno scaldando le micro-particelle che si fondono creando lo strato in lavorazione. Il sistema SLS ha un livello di precisione molto superiore al sistema FDM e consente di stampare sia materiali plastici che leghe metalliche anche se i costi delle stampanti sono elevati (Pignatelli, 2013).

La stereolitografia, infine, è stata sviluppata nel 1983 da Charles Hull (Tedeschi, 2014, p. 317). Si basa su un principio simile a quello della sinterizzazione ma impiega un polimero liquido scaldato e catalizzato da un laser a ultravioletti. Consente di realizzare oggetti con un grado di precisione più elevato rispetto a quello delle altre tecniche, nell'ordine dei 5 centesimi di millimetro (Pignatelli, 2013). I costi dei dispositivi di stampa in SLA, tuttavia, sono elevati.

Le prime applicazioni della stampa 3D hanno riguardato il campo della prototipazione rapida: in questo campo questa tecnica di manifattura ha permesso di ridurre i costi dei modelli, di eliminare gli errori di progettazione rilevabili solo in fase applicativa e di evitare interpretazioni errate o discrezionali dei disegni costruttivi (Beltrametti, Gasparre, 2014). Attualmente, le applicazioni riguardano sempre più anche l'ambito della produzione ovvero la fabbricazione di parti e componenti per uso finale (Beltrametti, Gasparre, 2014): i settori in cui si sta diffondendo questa tecnologia sono quello aerospaziale, biomedicale, soprattutto per la realizzazione di protesi, delle automotive e della produzione orafa. A livello sperimentale, la stampa 3D è stata introdotta anche nel settore delle costruzioni per realizzare componenti architettonici e unità abitative in quanto offre la possibilità di esplorare nuove geometrie e di ridurre i tempi di edificazione (Esposito Corcione et al., 2018).

3.2.2.2. Le ricerche

Tra i sistemi di fabbricazione additivi, la stampa 3D sta assumendo sempre maggiore importanza anche nel settore lapideo: questo nuovo sistema robotico di costruzione si lega, infatti, alla ricerca su materiali artificiali innovativi, spesso ottenuti da scarti della lavorazione della pietra naturale o progettati per avere prestazioni superiori rispetto ai litotipi di origine.

I vantaggi rispetto ad altri sistemi di fabbricazione risiedono nella riduzione dei costi di realizzazione anche grazie all'eliminazione di casseforme o attrezzature provvisorie, nell'elevato grado di precisione ottenibile che si traduce in tolleranze dell'ordine di 5-10 mm, nella possibilità di usare materiali di scarto in un'ottica di economia circolare e di realizzare agevolmente e rapidamente forme libere concavo-convexe. Le applicazioni possibili non riguardano solo il campo del design ma anche quello dell'architettura.

In Italia esistono aziende e gruppi di ricerca che si occupano di stampa 3D in pietra¹⁸. Nel Lazio, in particolare, è stata sviluppata la piattaforma Marble EcoDesign che sta studiando una nuova tecnica di stampa 3D che sfrutti come materiale da costruzione la polvere di scarto generata dalle operazioni per l'estrazione del marmo nelle cave di Coreno Ausonio: questo rifiuto speciale di difficile smaltimento, viene miscelato con speciali resine e catalizzato con raggi UV, per diventare materiale da estrudere in stampanti 3D opportunamente adattate allo scopo. La nuova stampante 3D realizzata dal Design Lab Frosinone è di tipo ibrido ed è basata sulla tecnologia FFF.

Il recupero della polvere di pietra è stato proposto anche in relazione a processi di stampa 3D basati sulla tecnologia FDM: è stato sviluppato, infatti, un materiale composito polimerico basato sul PLA (*Polylactic acid*), utilizzando come *filler* polvere di pietra leccese (Esposito Corcione et al., 2018) (Fig. 53). È stato dimostrato sperimentalmente che la presenza della polvere lapidea non influisce negativamente sulla lavorabilità del materiale composito che è risultato, quindi, adatto ad essere utilizzato in processi di stampa per deposizione.



Fig. 53 I filamenti in PLA (B) e in materiale composito basato su PLA e polvere di pietra leccese (C) prodotti attraverso un estrusore (A) per essere utilizzati in processi di stampa per deposizione [Esposito Corcione et al., 2018, p. 281]

A livello europeo si è imposta, invece, la tecnologia D-Shape sviluppata dall'ingegnere pisano Enrico Dini che ha registrato in Gran Bretagna due brevetti riguardanti un plotter e un legante ecocompatibile usati per stampare oggetti di pietra artificiale (Chiellino, 2010; Tassinari, 2014). Il processo di stampa si basa sulla tecnica della stereolitografia: la macchina utilizzata può stampare oggetti di forma complessa sovrapponendo strati di sabbia da 5 millimetri di spessore o di altri materiali granulari, ad un legante ecologico inorganico a base di sali che è stato brevettato con il gruppo Fedeli (Chiellino, 2010). Come materiali granulari possono essere utilizzati anche aggregati di riciclo o materiali reperibili localmente in modo da ottenere maggiori benefici ambientali.

Il nuovo materiale stampato solidificato è stato sottoposto a test di trazione, compressione e flessione ed ha mostrato proprietà di resistenza ottimali: per la sua resistenza a trazione, molto superiore a quella del calcestruzzo a base di cemento Portland, il materiale non necessita di armature metalliche di rinforzo.

La stampante D-Shape che usa la tecnologia di progetto CAD-CAE-CAM, è formata da una struttura reticolare in alluminio, facilmente trasportabile, assemblabile e smontabile, e da 300 ugelli che estrudono il materiale (Tassinari, 2014). Inizialmente, poteva realizzare oggetti con una larghezza e un'altezza massime di 6 m mentre non poneva vincoli sulla lunghezza dal momento che un carrello ne consentiva la movimentazione (Chiellino, 2010) (Fig. 54). Attualmente, invece, sono disponibili stampanti di dimensioni pari a 12x12x10 m.

¹⁸ <http://www.desamanera.com> (URL consultato il 14/02/2016); <http://www.marbleecodesign.com> (URL consultato il 14/02/2016)

Il lavoro dell'architetto Andrea Morgante denominato Radiolaria e realizzato nel 2008 con la stampante D-Shape, rappresenta un primo esempio di padiglione monolitico stampato direttamente dal modello CAD (Tedeschi, 2014, p. 421) (Fig. 54).

Nel 2010 è stata stampata con D-Shape anche la prima abitazione realizzata in un blocco unico, denominata CasaTuttaDiUnPezzo (Fig. 55): la casa, progettata del designer Marco Ferreri, misura 2,40x4,00x3,50 m ed ospita una camera da letto, un bagno e una cucina. È stata realizzata in tre settimane ed esposta alla Triennale di Milano del 2010 (Dini, 2015).

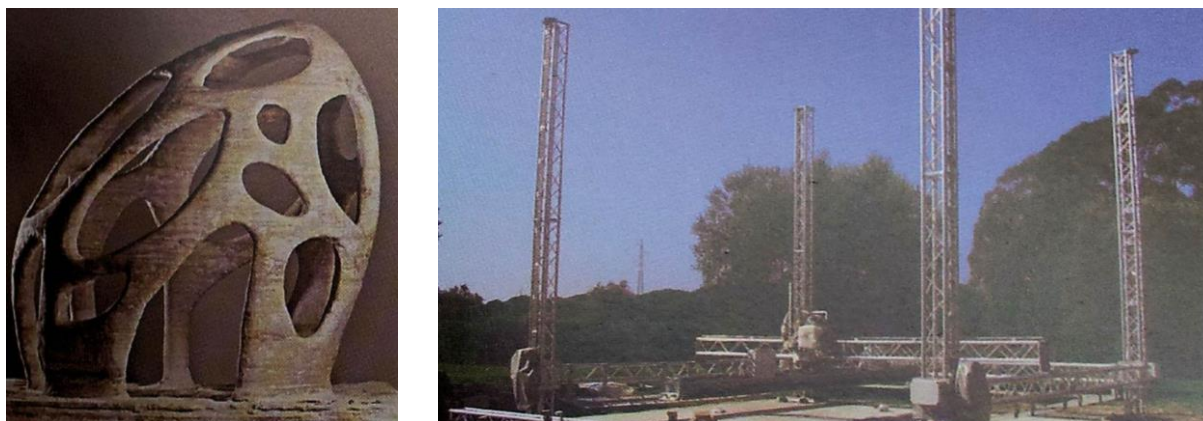


Fig. 54 Il padiglione Radiolaria progettato da A. Morgante e la stampante D-Shape3D [Tedeschi, 2014, p. 421]



Fig. 55 La CasaTuttaDiUnPezzo progettata da Ferreri per la Triennale di Milano del 2010 [Tassinari, 2014, su <https://www.stampa3dforum.it>; Dini, 2015, su <https://www.d-shape.com>]

CAPITOLO 4

ANALISI DELLE TECNICHE COSTRUTTIVE CONTEMPORANEE ATTRAVERSO CASI DI STUDIO

4.1. SISTEMI MURARI

4.1.1. Cenni storici

4.1.2. Muri portanti a conci di pietra

4.1.3. Muri portanti a tecnologia mista

4.1.4. Muri autoportanti di tamponatura o di paramento

4.1.5. Schede di analisi di casi di studio

4.2. LA PIETRA ARMATA

4.2.1. Cenni storici

4.2.2. Le ricerche contemporanee

4.2.3. Schede di analisi di casi di studio

4.3. GABBIONI

4.3.1. Cenni storici

4.3.2. Le ricerche contemporanee e le potenzialità della tecnica costruttiva

4.3.3. Schede di analisi di casi di studio

4.4. ELEMENTI EMERSI DALL'ANALISI DEI CASI DI STUDIO

4.4.1. Riscoperta e potenzialità degli involucri in pietra massiva

4.4.2. Innovatività degli involucri lapidei massivi contemporanei rispetto alla cultura costruttiva lapidea tradizionale

4. ANALISI DELLE TECNICHE COSTRUTTIVE CONTEMPORANEE ATTRAVERSO CASI DI STUDIO

4.1. SISTEMI MURARI

4.1.1. Cenni storici

Il muro di pietra è “uno dei concetti fondativi dell’architettura” (Acocella, 2004, p. 42): la struttura muraria “dotata di massa, di continuità materica, sottoposta prevalentemente a sforzi di compressione” e l’intelaiatura lignea “sottile, leggera (..), sollecitata a trazione” costituiscono, infatti, i “due archetipi costruttivi fondamentali” dell’architettura delle origini, tipici rispettivamente delle civiltà del mondo mediterraneo e dei paesi nordici (Acocella, 2004, p. 42): nelle aree del mediterraneo, infatti, i muri in pietra in opera poligonale precedono l’uso del mattone di argilla (Lenci, 2018, p. 7).

Le murature in pietra tradizionali sono state realizzate con due procedimenti costruttivi, quello a conci e quello misto a conci e a concrezione.

Il procedimento a conci si basa sulla sovrapposizione e giustapposizione di elementi preformati di diverso tipo, assemblati a secco o impiegando la malta. Nelle murature costruite a secco le pietre sono disposte in modo da realizzare una struttura caratterizzata dal minor numero di vuoti e resa stabile dal peso e dall’attrito tra le superfici lapidee a contatto (Menicali, 1992, p. 36). La malta, invece, viene impiegata per ripartire uniformemente i carichi e garantire la tenuta all’aria e all’acqua.

Nelle murature ordinarie realizzate a secco o impiegando la malta, sono stati tradizionalmente impiegati frammenti informi di roccia, indicati come “pietra grezza”, o elementi litici parzialmente sbazzati e squadrati detti “scampoli di cava” (Menicali, 1992, p. 36). La pietra da taglio, invece, era riservata alla costruzione di “murature di pregio sia per l’aspetto estetico del paramento finito che per la durevolezza dei materiali maggiormente selezionati” (Menicali, 1992, p. 37). La costruzione a secco dei muri in pietra da taglio implicava la necessità di lavorare in modo molto accurato le facce e gli angoli degli elementi lapidei per ridurre lo spessore dei giunti e limitare i vuoti.

Le diverse modalità di assemblaggio degli elementi lapidei hanno permesso di definire strutture regolari o irregolari. Le strutture regolari sono ottenute sovrapponendo strati orizzontali denominati corsi o filari, “tutti di una medesima altezza oppure di altezze diverse, ma costanti per gli elementi di un medesimo strato” (Menicali, 1992, p. 35). Il loro funzionamento statico si basa sul concatenamento tra gli elementi di pietra ottenuto sfalsando i giunti verticali dei conci di filari orizzontali contigui e evitando di far corrispondere le commessure verticali con gli angoli esterni ed interni generati dall’incrocio dei muri. Nelle strutture irregolari, invece, vengono impiegati elementi con forma e dimensioni variabili che non vengono organizzati in filari orizzontali ma “combinati nel modo più conveniente per creare un aggregato con il minor numero di vuoti” (Menicali, 1992, p. 35) in cui i giunti siano sempre in corrispondenza delle facce orizzontali di altri blocchi e frammenti.

Nel procedimento misto a conci e a concrezione, invece, la costruzione del muro viene effettuata gettando del calcestruzzo tra due setti di contenimento in conci. Questo tipo di apparecchio è stato codificato sin dall’epoca romana con l’*opus caementicium* che consisteva nel gettare un impasto formato da spezzoni lapidei e o laterizi, legati con malta di calce e pozzolana, tra due setti a conci apparecchiati secondo diverse modalità tra cui l’*opus incertum* e l’*opus reticolatum* (Marta, 1990, pp. 28-30).

In epoca moderna con l'introduzione dei procedimenti a scheletro portante basati sul principio del telaio, il sistema costruttivo a corpo unico basato sull'ossatura muraria tradizionale è stato poco valorizzato dalle principali tendenze di ricerca ed architettoniche. Questo linguaggio tradizionale è sembrato estraneo all'architettura contemporanea. Attualmente, però, numerosi contributi individuali di architetti "parlano di una nuova possibile stagione (...) dell'opera muraria (...) al servizio del progetto contemporaneo" (Acocella, 2004, p. 144). Molti architetti, infatti, sono tornati ad impiegare la pietra in spessori rilevanti per realizzare muri portanti a conci regolari o irregolari e muri portanti a tecnologia mista. Altri hanno, invece, impiegato la pietra in murature autoportanti di tamponatura o di paramento in edifici con struttura a setti o a telaio. Il "lavoro di aggiornamento" si incentra spesso non sul "dire costruttivo" cioè sulle regole di costruzione che vengono perpetuate e rispettate ma "sul dire architettonico" (Acocella, 2004, p. 94): in particolare la scelta della tecnica costruttiva del muro irregolare consente di valorizzare le valenze intrinseche del materiale lapideo rappresentativo del "senso del luogo" e dei "valori paesaggistici" di determinati contesti territoriali (Acocella, 2004, p. 96). In altre occasioni, invece, vengono proposte tecniche innovative di realizzazione legate alla disponibilità di nuovi mezzi di lavorazione e messa in opera.

4.1.2. Muri portanti a conci di pietra

Nel XX secolo, con la diffusione del calcestruzzo e dell'acciaio, il sistema costruttivo a corpo unico basato sull'ossatura muraria tradizionale a conci lapidei è stato poco valorizzato. Un primo momento di rinascita della tecnica costruttiva della muratura portante in pietra naturale si verificò in Francia, nel secondo dopoguerra e fu legato alle necessità imposte dalla ricostruzione. Durante i primi due decenni successivi alla fine della Seconda Guerra Mondiale, infatti, la pietra naturale fu impiegata per realizzare le strutture portanti di nuovi edifici di abitazione, destinati per la maggior parte ad alloggi popolari (Fig. 56): gli edifici costruiti con la cosiddetta tecnica della pietra pretagliata constano di 47108 appartamenti di cui 13552 furono realizzati dall'architetto Fernand Pouillon (Zerbi, 2010).

Il ritorno alla tecnica della muratura fu determinato da diversi fattori tra cui l'industrializzazione del settore lapideo francese consentita dalla diffusione di nuove macchine che permettevano una maggiore velocità di estrazione di blocchi di dimensioni ridotte. La razionalizzazione dell'estrazione e del taglio permise di ridurre l'entità di tempo, mano d'opera ed energia necessaria per l'estrazione e la lavorazione della pietra naturale e di aumentare la quantità di materiale litico disponibile sul mercato (Zerbi, 2010): l'industrializzazione dei processi di produzione rese, quindi, competitivo sul piano economico l'impiego della pietra.

Il ritorno alla tecnica della muratura fu promosso anche dalle pubblicazioni e dall'operato di Pol Abraham, presidente della Commissione per la Normalizzazione della Muratura. Nelle sue pubblicazioni Abraham sottolineò come l'"industrializzazione dei processi produttivi e il ricorso a elementi normalizzati ripetibili" fosse "la sola risposta possibile alla domanda crescente di nuovi edifici" (Zerbi, 2010). Inoltre, durante la sua direzione, l'Associazione francese per la normalizzazione (AFNOR) definì una normativa per le prove e la classificazione delle rocce calcaree: per ognuna delle diverse tipologie di queste rocce venne elaborata una scheda che ne illustrava le caratteristiche tecniche e fisiche, l'aspetto, la classe petrografica, la tessitura, la classe di durezza, i campi d'impiego in base alle condizioni climatiche, i giacimenti e le cave di estrazione. L'Associazione stabilì, inoltre, "le dimensioni dei diversi formati per la produzione in serie della

pietra pretagliata” (Zerbi, 2010). Lo spessore dei conci di pietra da utilizzare per la costruzione delle facciate portanti fu fissato a 40 cm mentre quello per i muri divisorii a 30 cm. Lo spessore di 40 cm consentiva, infatti, di garantire la sicurezza statica, una buona resistenza agli agenti atmosferici e adeguate condizioni di comfort termico, acustico e igrometrico. Le altre dimensioni dei conci furono stabilite rispettando rapporti modulari al fine di limitare gli aggiustamenti in cantiere. Si privilegiò, comunque, l’utilizzo di conci di grandi dimensioni vista la disponibilità sui cantieri di idonee apparecchiature di sollevamento. Le murature realizzate tramite conci grandi erano apparecchiate in modo tale che ogni elemento formava l’intero spessore della parete mentre quelle realizzate i conci piccoli avevano un’apparecchiatura “per testa e per taglio” (Zerbi, 2010). La posa in opera prevedeva l’impiego di malta sia per i giunti orizzontali che verticali.

Gli spessori fissati dall’Associazione per la normalizzazione consentivano di costruire edifici di tre o quattro piani al massimo nel caso in cui si fosse adoperata una pietra tenera. Tuttavia, l’impiego di pietre più dure consentì di realizzare anche edifici di undici piani, come quelli della Résidence le Parc à Meudon-la-Forêt (1957-1962) progettati dall’architetto Fernand Pouillon (Zerbi, 2010).

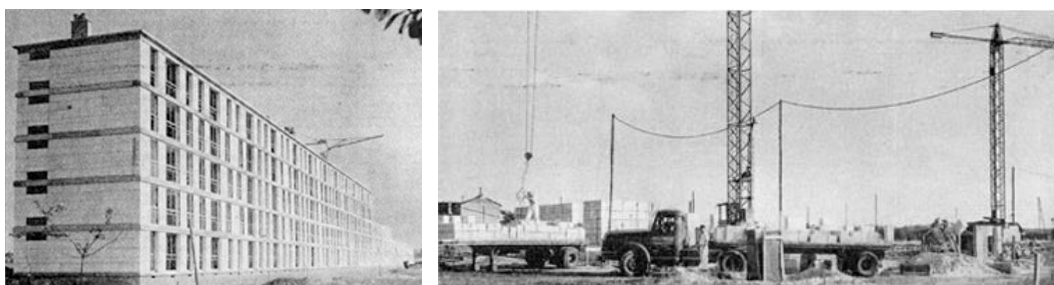


Fig. 56 Il cantiere del quartiere costruito a Sarcelles (Val-d’Oise) da Labourdette e Boileau fra 1955 e 1970

[Zerbi, 2010, su <http://www.architetturadi pietra.it>]

Negli ultimi anni ci sono state alcune esperienze di rivalutazione dei sistemi costruttivi murari o trilitici in pietra portante. La maggior parte di queste esperienze sono state condotte “in ambito mediterraneo in contesti in cui la materia lapidea è abbondante” e sono state apprezzate “per la loro sostenibilità, per le alte prestazioni di raffrescamento passivo degli ambienti ed, infine, per i costi competitivi” (Turrini, 2009). Il recupero della tecnica costruttiva si è verificato anche in contesti differenti ma è stato motivato comunque dalla possibilità di progettare edifici a basso consumo energetico.

Costruttivamente i sistemi murari portanti contemporanei sono stati realizzati a corpo unico, impiegando blocchi di grandi dimensioni, o a corpo multiplo.

Tra gli esempi di architetture in cui sono stati impiegati muri portanti a conci di pietra apparecchiati con regolarità vi sono numerosi progetti di Gilles Perraudin tra cui la Cantina di Vauvert (1996-99), il Centro scolastico a Marguerittes (1998-99) e la Cantina Les Aurelles (2000-01): queste opere, localizzate nel sud della Francia, sono caratterizzate da un “originale e conciso purismo arcaista, scevro di sovrastrutture formali e pregnante di significato costruttivo” basato sui “caratteri di semplicità, chiarezza e correttezza costruttiva” (Turrini, 2009). Un altro esempio di architettura che presenta caratteristiche costruttive e figurative vicine a quelle degli edifici di Perraudin pur essendo un’opera temporanea e solo parzialmente coperta, è rappresentato dalla cappella progettata da Eduardo Souto de Moura nell’ambito del Padiglione della Santa Sede curato da Francesco Dal Co ed

esposto a Venezia durante la XVI Biennale di Architettura (Argenti, 2018): anche in quest'opera, infatti, sono stati impiegati muri portanti realizzati con grandi blocchi di pietra secondo un linguaggio essenziale.

La Birreria a Malta progettata dallo studio di Peake, Short and Partners, invece, è una delle prime esperienze attuali di rivalutazione dei sistemi costruttivi in pietra portante in cui le murature perimetrali a conci apparecchiati in modo regolare sono state raddoppiate per interporvi una intercapedine ventilata. Una tecnica simile è stata impiegata da Zumthor nella casa per anziani progettata a Coira.

Un altro esempio di sistema murario portante realizzato secondo il principio del corpo multiplo è costituito dagli edifici comunali progettati a Madarcos nel 1996 da C Martinez, E Pemjean e R Pemjean: il sistema di chiusura verticale di questi edifici è costituito da muri portanti in pietra apparecchiati a secco, da una contro-parete interna in mattoni e da uno strato isolante.

4.1.3. Muri portanti a tecnologia mista

Le murature portanti a tecnologia mista si basano contemporaneamente sulla tecnica a conci e sul procedimento a concrezione: vengono realizzati, infatti, setti in blocchi lapidei da lasciare a faccia vista che costituiscono casseforme a perdere per il getto di un nucleo in calcestruzzo armato. Questi setti possono partecipare o meno alla resistenza dell'insieme: in caso di compartecipazione si realizza un tipo di muratura armata.

In epoca moderna un esempio di muratura composita in blocchi di pietra e calcestruzzo armato è costituito dalla Chiesa di San Giovanni Battista, realizzata da Giovanni Michelucci nei pressi di Firenze tra il 1960 e il 1964 per commemorare i caduti nella costruzione dell'autostrada del Sole. In quest'edificio viene impiegata una tecnica sperimentale per aumentare la resistenza a trazione della struttura: vengono progettati, infatti, muri portanti in "pietra armata" alternando ricorsi orizzontali in blocchi di calcare pisano e cordoli di calcestruzzo armati con staffe e ferri longitudinali e trasversali (Acocella, 2004, p. 113). Il pietrame dorato di San Giuliano di Pisa usato per questa muratura composita "dall'irregolarità studiata", è stato messo in opera con abbondanti giunti di malta (Acocella, 2004, p. 115).

Alcuni architetti contemporanei hanno impiegato nelle loro opere muri portanti composti combinando la pietra con la tecnologia del calcestruzzo armato.

Peter Zumthor nei Bagni termali di Vals (1994-1996) ha progettato pareti portanti caratterizzate da una "stretta compartecipazione strutturale tra anima concretizia e paramento lapideo" (Acocella, 2004, p. 165): il rivestimento litico esterno ad elevato spessore (12-15 cm), risulta, infatti, inscindibilmente incorporato nel nucleo interno dell'ossatura muraria poiché è stato impiegato come cassero per il getto del calcestruzzo armato.

Hervé Beaudouin, invece, ha recentemente sviluppato una tecnica definita "*form-moulded stone*" che consente di realizzare muri composti di calcestruzzo e pietra (Dernie, 2003, p. 57) (Fig. 57, Fig. 58). La tecnica si basa sull'impiego di casseforme realizzate con due tavolati di contenimento: quello posteriore è a tutta altezza mentre quello anteriore viene innalzato parallelamente alla messa in opera dei ricorsi del paramento esterno in pietra, realizzato solitamente con materiale di riciclo, e al getto

del calcestruzzo. La muratura viene armata disponendo sul lato posteriore del cassero una rete metallica.



Fig. 57 Sezione e dettaglio assonometrico di una parete realizzata con la tecnica “*form-moulded stone*”

[Dernie, 2003, p. 57]

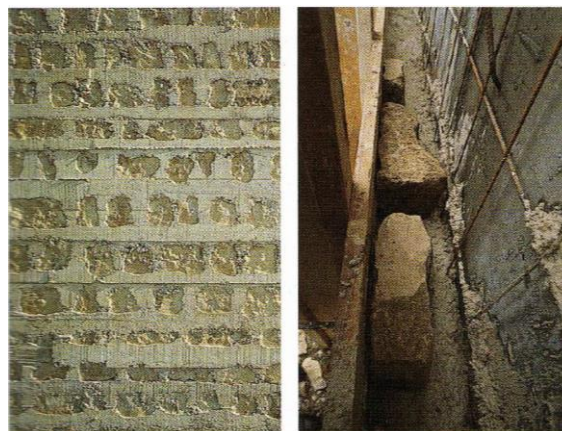


Fig. 58 Dettaglio di una parete dell'edificio per uffici realizzato a Niort da Hervé Beaudouin con la tecnica “*form-moulded stone*”; foto della parete in costruzione

[Dernie, 2003, p. 57]

Anche la pietra artificiale è stata impiegata in combinazione con la tecnica del calcestruzzo armato per realizzare murature composite: un esempio significativo è costituito dalla sinagoga di Dresda progettata da Wandel Hoefer Lorch+Hirsch nel 2001. La struttura monolitica in muratura di questo edificio è costruita, infatti, con blocchi di Formstein conformati in modo da creare un canale continuo in ogni ricorso orizzontale per il getto di cordoli in calcestruzzo armato (Pongratz, Perbellini, 2009, p. 48).

4.1.4. Muri autoportanti di tamponatura o di paramento

In edifici a scheletro portante o a setti gettati in opera la tecnica costruttiva della muratura può essere impiegata per realizzare tamponature o contro-pareti esterne che rivestono la struttura.

Molti architetti contemporanei hanno fatto ricorso alla pietra per realizzare sistemi di tamponatura massivi capaci di integrare l'edificio nel contesto naturale o urbano di progetto e di limitare le escursioni termiche diurne o stagionali. I metodi costruttivi impiegati sono diversi a seconda delle intenzioni progettuali e del tipo di struttura portante impiegato.

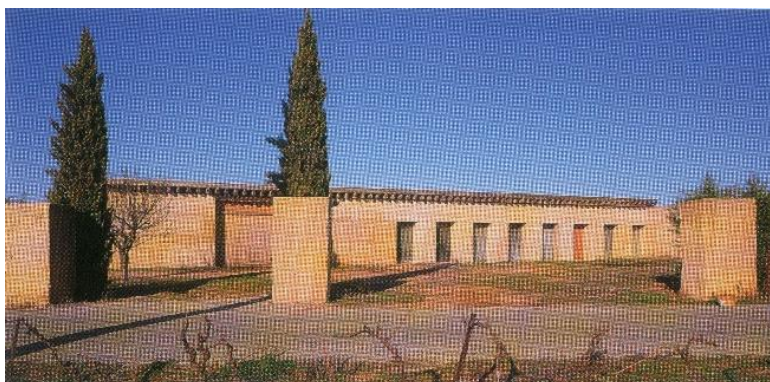
Un primo metodo consiste nel realizzare una contro-parete esterna ad una struttura a setti di calcestruzzo armato. Esempi di questa metodologia sono rappresentati dalla Casa delle Guide Alpine in Valmasino progettata da Gianmatteo e Roberto Romegialli e dalla Casa a Bom Jesus progettata da Eduardo Souto de Moura.

Un secondo metodo applicabile in edifici a scheletro portante consiste nel realizzare chiusure verticali a corpo multiplo abbinando ad una muratura esterna in pietra e malta una muratura interna in mattoni o in blocchi di cemento. Esempi di questa seconda modalità costruttiva sono il nuovo municipio di Iragna progettato da Cavadini, la casa privata progettata da Gouwy, Grima e Rames nel 1998 a Séniergues e la Stone House progettata da Herzog & de Meuron.

Il pacchetto di chiusura di edifici con struttura a telaio può essere realizzato anche con una muratura a secco protetta da schermi trasparenti o abbinata ad una contro-parete interna realizzata in materiali leggeri. La prima tecnica è stata adottata nel 2002 dallo studio Jensen & Skodvin Architects nel progetto della Mortensrud Church di Oslo: le murature, infatti, sono protette esternamente da uno schermo vetrato (Redazionale, 2003a). La seconda tecnica è stata adottata nella Scuola di alti studi Musicali della Galizia progettata da Antón García-Abril Ruiz a Santiago de Compostela: le lastre lapidee montate a secco impiegate per caratterizzare le facciate di questo edificio, infatti, sono separate con una camera d'aria da una contro-parete interna realizzata in materiali leggeri e completata da uno strato isolante (Pavan, 2013).

4.1.5. Schede di analisi di casi di studio

CANTINE A VAUVERT



Vista dell'esterno

[Hugues, Steiger, Weber, 2007, p. 108]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

Vauvert, Francia

1996-1999

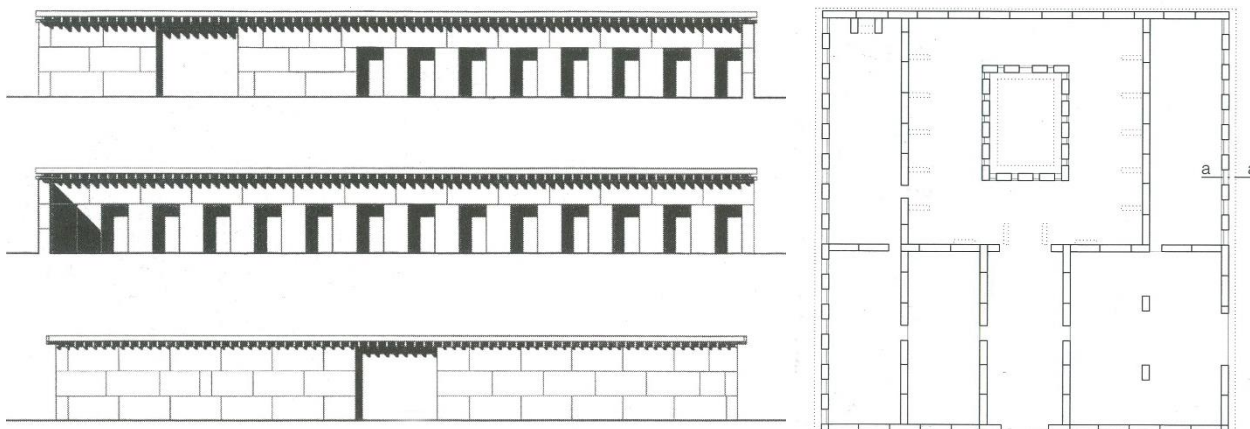
PROGETTISTA

Gilles Perraudin

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

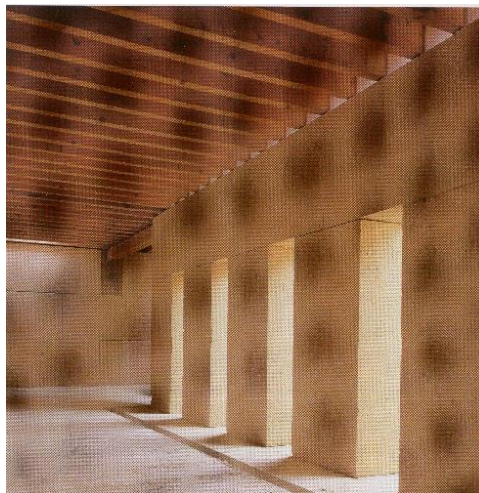
Le cantine sono caratterizzate da un impianto quadrato di lato pari a 30 metri. La volumetria compatta della costruzione presenta su due lati una serie di aperture di identiche dimensioni, realizzate attraverso dei dispositivi trilitici. Lo spazio interno è articolato in celle organizzate intorno ad una corte interna pilastrata.

Sui setti in pietra portante posano le travi lignee che sostengono la copertura a tetto giardino.



I prospetti est, ovest e sud e la pianta

[Acocella, 2004, p. 294; Hegger et al., 2006, p. 208]



Vista dell'interno

[Hugues, Steiger, Weber, 2007, p. 108]

MATERIALE LAPIDEO

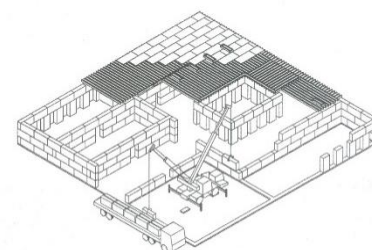
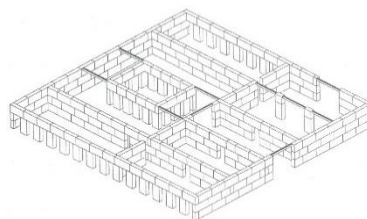
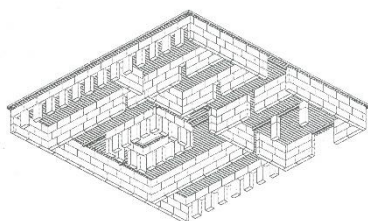
Pietra locale estratta nelle cave di Vers (calcare conchilifero)

TECNICA COSTRUTTIVA

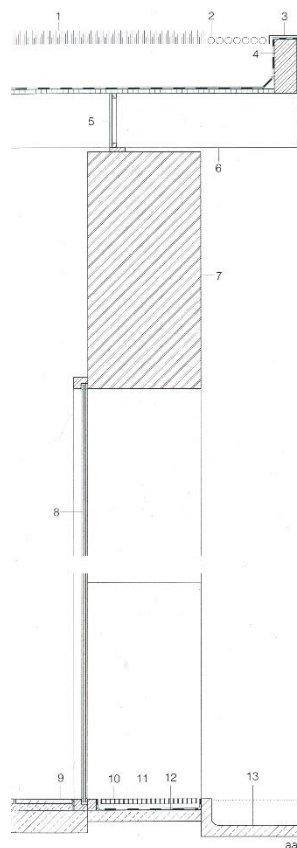
I muri, i piedritti e gli architravi sono realizzati con grandi blocchi squadrati di pietra a spigoli vivi, di dimensioni pari a 0,52x1,05x2,10 metri e del peso di 2,5 tonnellate. I singoli elementi parallelepipedi sono stati conformati direttamente in cava attraverso processi meccanizzati di segazione a partire da blocchi estratti con dimensioni pari a 1,10x1,05x2,30 m. Inoltre, non hanno richiesto successive lavorazioni in aziende di trasformazione: sono rifiniti, infatti, a taglio di sega.

È stata effettuata una posa a secco, priva di malta e di dispositivi di ancoraggio meccanico, su una piattaforma in calcestruzzo. È stata usata della malta di cemento solo per creare un cuscinetto di 5 cm al di sotto della prima fila di blocchi lapidei per ripartire i carichi e garantire la perfetta orizzontalità. L'unica altra operazione effettuata ad umido consiste nella sigillatura dei giunti tra i piani di contatto degli elementi litici parallelepipedi, finalizzata a garantire la tenuta all'aria.

La messa in opera è stata effettuata con una gru a braccio mobile posta all'interno dell'area di cantiere, contestualmente allo scarico dei blocchi dall'autocarro: in tal modo il tempo di costruzione è stato ridotto ad 1 mese.



Rappresentazioni assonometriche del sistema costruttivo e della metodica di montaggio dei monoliti
[Acocella, 2004, p. 295]



Stralcio della sezione di dettaglio
[Hegger et al., 2006, p. 209]

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

Gilles Perraudin sceglie di recuperare una tradizione costruttiva massiva riattualizzandola “in chiave contemporanea” per definire un’architettura sostenibile dal punto di vista ambientale, capace di rispondere alle esigenze di riduzione dei costi e dei tempi di costruzione (Acocella, 2004, p. 293). La scelta di utilizzare elementi massivi in pietra locale estratti in una cava distante solo 30 km dal cantiere, consente, infatti, di impiegare anche blocchi che presentano imperfezioni o difetti di taglio scartati dal processo di fabbricazione di lastre da rivestimento e pavimentazione, e di limitare il costo del materiale. Il contenimento dei costi globali di costruzione dell’opera è reso possibile anche dall’adozione di una tecnica di montaggio semplice e veloce basata sull’utilizzo di grù.

Perraudin, inoltre, impiega la pietra massiva per le sue elevate prestazioni di inerzia termica che consentono di attenuare l’escursione di temperatura, dannosa per la preservazione dei vini.

BIBLIOGRAFIA: Acocella, 2004, pp. 292-297; Hegger et al., 2006, pp. 208-209; Hugues, Steiger, Weber, 2007, p. 108; Redazionale, 1999a, pp. 969-971; Turrini, 2009.

CENTRO SCOLASTICO A MARGUERITTES



L'ingresso al complesso scolastico
[Acocella, 2004, p. 168]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

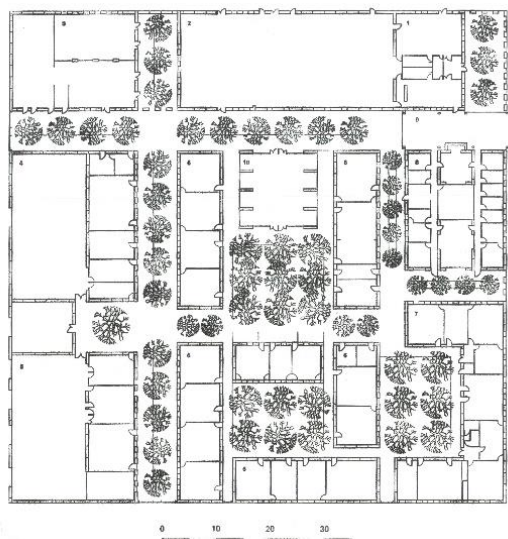
Marguerittes, Francia
1998-1999

PROGETTISTA

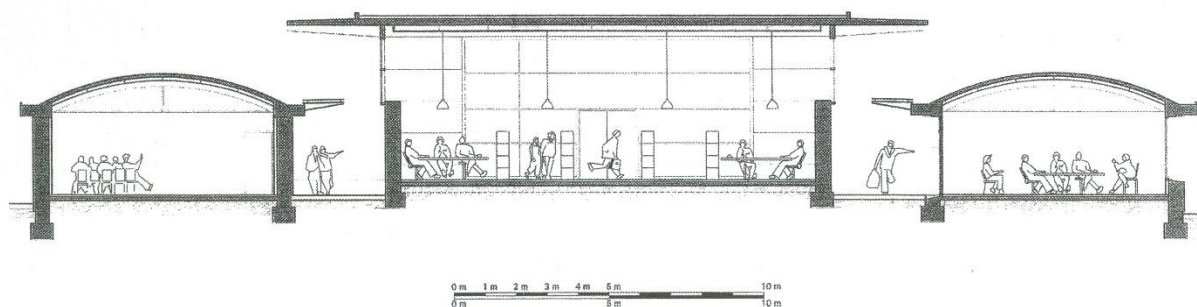
Gilles Perraudin

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

Il complesso scolastico è inserito in un antico uliveto ed è caratterizzato da un impianto quadrato. È composto da diversi corpi indipendenti ad un solo piano, distribuiti da percorsi interni, patii e giardini. Le coperture degli edifici sono realizzate in metallo dipinto di bianco. Le facciate lapidee sono protette da pensiline trasparenti.



Pianta del complesso scolastico
[Acocella, 2004, p. 168]



Sezione trasversale della biblioteca
[Acocella, 2004, p. 170]

MATERIALE LAPIDEO

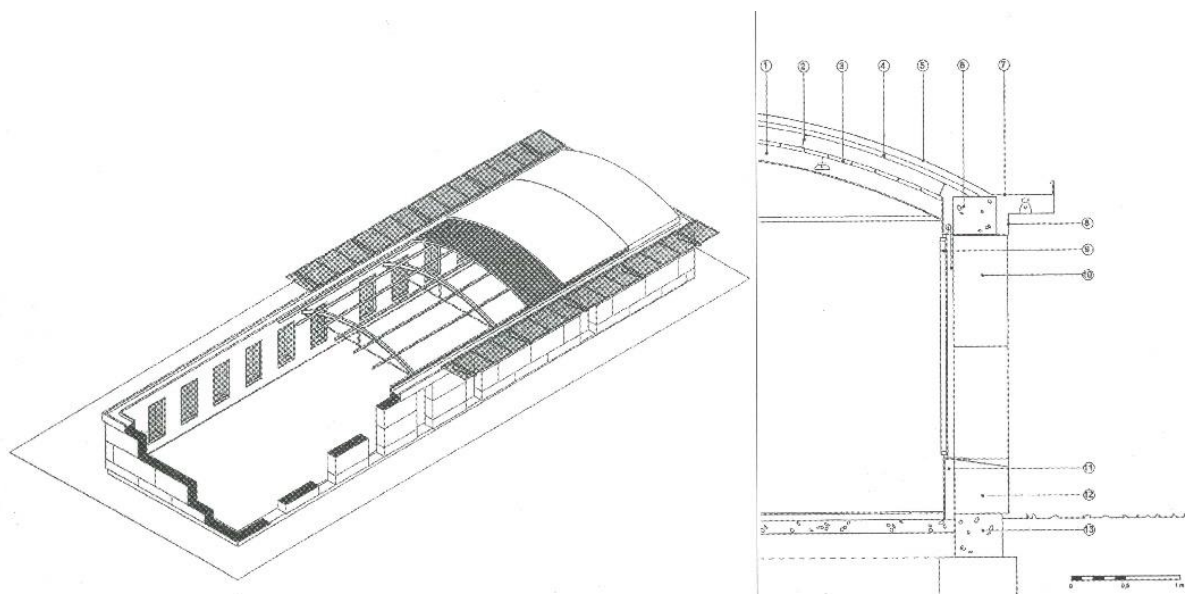
“Molassa conchigliata”, calcare locale tenero di colore biondo, estratto nei territori di Vers-Pont-du-Gard

TECNICA COSTRUTTIVA

La muratura portante è in “opera isodoma ciclopica” (Acocella, 2004, p. 169): i blocchi lapidei che la compongono sono, infatti, di 50 cm spessore, 1 m altezza e 2 m larghezza. I blocchi sono stati estratti per segazione automatica e montati direttamente in cantiere senza subire successive lavorazioni in laboratorio.

Il processo costruttivo rapido e meccanizzato ha previsto l’utilizzo di gru per la posa a secco dei blocchi che sono stati lasciati a vista. Al termine della fase di montaggio, le commessure della muratura sono state sigillate per garantire la tenuta all’aria.

Gli architravi lapidei previsti dal progetto sono stati sostituiti da cordoli in calcestruzzo nel rispetto dalla normativa.



Spaccato assometrico dell’edificio e sezione costruttiva del muro portante e della copertura
[Acocella, 2004, p. 170]

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

Perraudin impiega la pietra massiva per le sue qualità statiche e per le sue elevate prestazioni di inerzia termica e fonica. Queste due ultime proprietà risultano particolarmente importanti nel sito di progetto poiché consentono di limitare gli effetti negativi delle elevate escursioni termiche e dei rumori derivanti da una vicina strada a scorrimento veloce.

Perraudin sceglie, inoltre, di usare la pietra locale per inserire il nuovo edificio nel paesaggio naturale. Il materiale lapideo locale e la tecnica costruttiva massiva adottata risultano, infine, ecologici ed economici. Il progettista, infatti, recupera materiale litico di scarto derivante dalle operazioni di estrazione condotte nelle cave dei territori di Vers-Pont-du-Gard. I blocchi estratti in queste cave che presentano sacche di argilla o di conchiglie, infatti, non possono essere commercializzati per la produzione di elementi decorativi e vengono declassati a materiali di scarto. Perraudin utilizzando questi blocchi come materiale da costruzione per le murature portanti degli edifici del centro scolastico, limita il consumo di materiale naturale grezzo e riduce i costi di estrazione, posa in opera e manutenzione degli edifici di progetto.

BIBLIOGRAFIA: Acocella, 2004, pp. 168-171; Turrini, 2009.

CAPPELLA DEL PADIGLIONE DELLA SANTA SEDE



L'ingresso alla cappella

[Frearson, 2018, su <https://www.dezeen.com>]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

Venezia, Italia

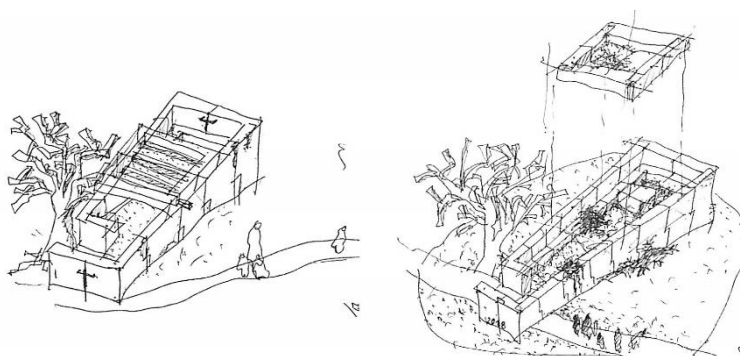
2018

PROGETTISTA

Eduardo Souto de Moura

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

La cappella è una delle 11 opere che compongono il Padiglione della Santa Sede, “un intervento diffuso” (Ricci, 2018) curato da Francesco Dal Co e realizzato sull’isola di San Giorgio Maggiore a Venezia nell’ambito della XVI Biennale di Architettura come riflessione sul “rapporto degli edifici con il tema del sacro” (Argenti, 2018, p. 21). La cappella è stata costruita impiegando esclusivamente la pietra. È caratterizzata da un impianto trapezoidale e da un’altezza massima inferiore ai 3 metri. All’interno sono presenti soltanto un altare e una panca dove sedersi. L’altare è coperto da una lastra di pietra che è stata progettata discosta dalla parete di fondo in modo da consentire l’ingresso della luce naturale. Dietro l’altare è stata disegnata una croce attraverso un taglio orizzontale che incrocia i giunti verticali dei blocchi.



Schizzi di studio per il progetto della cappella

[Argenti, 2018, p. 22]

MATERIALE LAPIDEO

Pietra di Vicenza

TECNICA COSTRUTTIVA

Le pareti della cappella sono formate da blocchi di pietra di 40 cm di spessore. I blocchi sono caratterizzati esternamente da una superficie grezza poiché, dopo l'estrazione, sono stati messi in opera senza alcuna lavorazione. Internamente, invece, presentano una superficie levigata, “come trasfigurata dal sacro” (Argenti, 2018, p. 24).



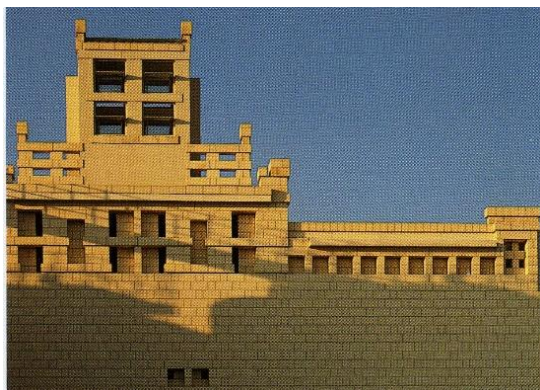
Vista laterale e vista dell'interno della cappella
[Frearson, 2018, su <https://www.dezeen.com>]

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

L'impiego della pietra in spessori rilevanti consente al progettista di reinterpretare “l'archetipo del sacro” e di realizzare una cappella “radicata al suolo, massiva nonostante le ridotte dimensioni, arcaica nonostante la sua breve vita, poetica proprio in ragione della sua essenzialità” (Argenti, 2018, pp. 23-24).

BIBLIOGRAFIA: Argenti, 2018, pp. 21-30; Frearson, 2018; Ricci, 2018.

BIRRERIA A MALTA



Prospetto principale e prospetto laterale
[Dernie, 2003, p. 70]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

Malta

1991

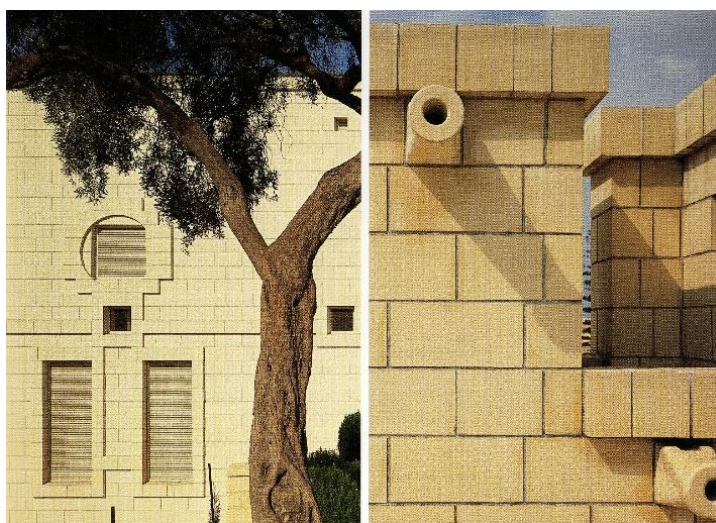
PROGETTISTA

Peake, Short and Partners

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

L'edificio a due piani è dotato di una torre di ventilazione e di un *buffer space* interno in cui è ubicata la sala di produzione: la torre e il *buffer space* garantiscono temperature interne ottimali nelle diverse stagioni grazie anche all'inerzia termica delle pareti in pietra.

Sono stati impiegati dettagli costruttivi tradizionali tra cui doccioni a cannone, rielaborati, però, con un linguaggio contemporaneo.



Dettagli della muratura e dei doccioni
[Dernie, 2003, p. 71]

MATERIALE LAPIDEO

Calcare locale

TECNICA COSTRUTTIVA

Le pareti sono realizzate in blocchi di pietra. Per contrastare gli effetti dell'ampia escursione termica sono state raddoppiate le murature perimetrali ed è stata interposta un'intercapedine ventilata.

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

I progettisti hanno scelto di impiegare la pietra in elementi tecnici massivi per sfruttare l'inerzia termica del materiale in un'ottica di progettazione passiva e sostenibile, riprendendo la tradizione costruttiva delle case maltesi. L'uso della pietra locale è motivato anche dalla sua economicità come materiale da costruzione rispetto al calcestruzzo.

BIBLIOGRAFIA: Dernie, 2003, pp. 70-71; Turrini, 2009.

CASA PER ANZIANI A COIRA



Veduta dell'opera e particolare del fronte principale
[Acocella, 2004, pp. 156-157]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

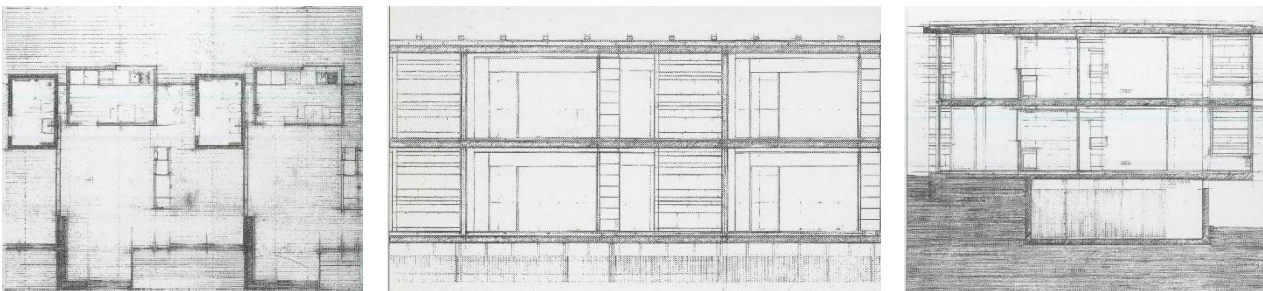
Coira, Svizzera
1989-1993

PROGETTISTA

Peter Zumthor

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

L'edificio è stato progettato come parte integrante del complesso di una clinica preesistente, per ospitare 21 alloggi ed un'infermeria. È conformato come un semplice volume parallelepipedo e si articola su due piani. I prospetti sono caratterizzati da ampie superfici vetrate e da un'apparecchiatura muraria in pietra. La copertura e i marcapiani sono in calcestruzzo a vista.



Planimetria del modulo spaziale e strutturale della cellula abitativa; sezioni trasversale e longitudinale

[Acocella, 2004, pp. 158-159]

MATERIALE LAPIDEO

Tufo sloveno poroso di colore chiaro (pietra vulcanica non locale)

TECNICA COSTRUTTIVA

Gli elementi murari che caratterizzano l'edificio sono costituiti da setti portanti ad L, realizzati in conci di tufo perfettamente squadrati e spianati. I conci sono apparecchiati in modo da definire una

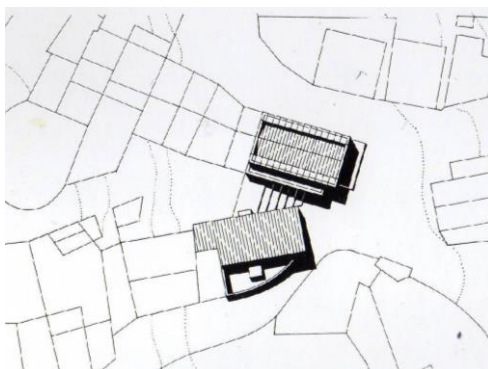
muratura in opera quadrata irregolare a doppio paramento con interposta un'intercapedine d'aria. La pietra è lasciata a vista anche negli interni. Per i giunti, che risultano molto sottili, è stata utilizzata una malta della stessa tonalità cromatica del tufo.

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

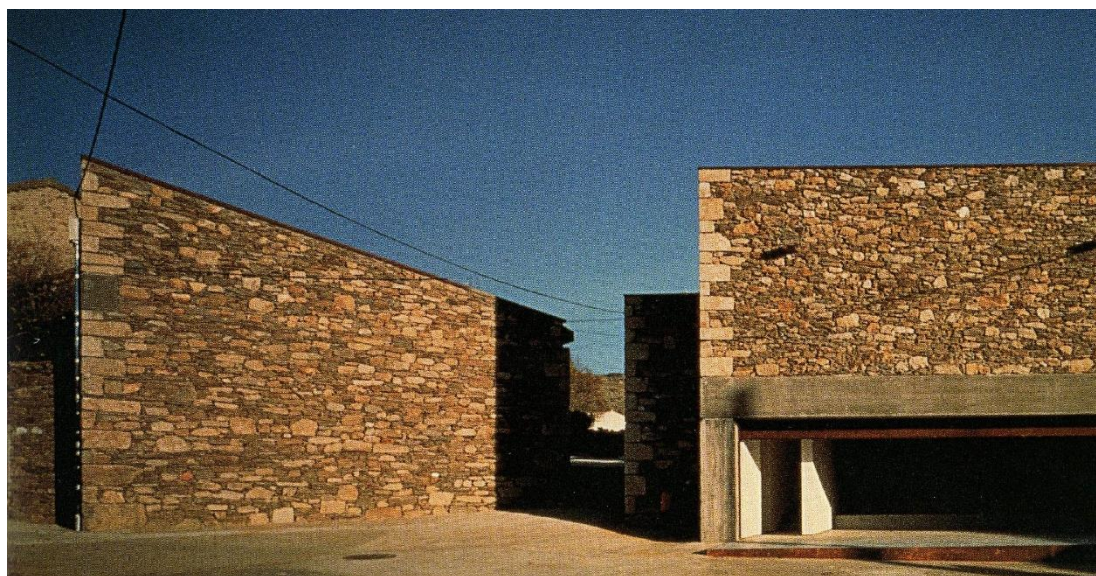
Zumthor sceglie di impiegare la pietra per inserire il nuovo edificio nel paesaggio montano dei Grigioni. La pietra viene impiegata in spessori rilevanti per consentire un adeguato isolamento.

BIBLIOGRAFIA: Acocella, 2004, pp. 156-159.

TOWN HALL AND MEETING ROOM



Inquadramento
[Dernie, 2003, p. 188]



Il prospetto dell'edificio degli uffici e della sala riunioni
[Dernie, 2003, p. 189]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

Madarcos, Spagna

1996

PROGETTISTA

C. Martinez, E. Pemjean, R. Pemjean

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

I due edifici di progetto ad un solo piano, sono ben inseriti nel piccolo villaggio di Madarcos caratterizzato da edifici bassi. Ospitano una sala conferenze, archivi e uffici amministrativi. Hanno un orientamento diverso e sono separati da un'ampia scala esterna che consente di superare il dislivello dell'area di progetto. I prospetti sono caratterizzati da poche aperture e dalla tessitura irregolare dei muri in pietra.

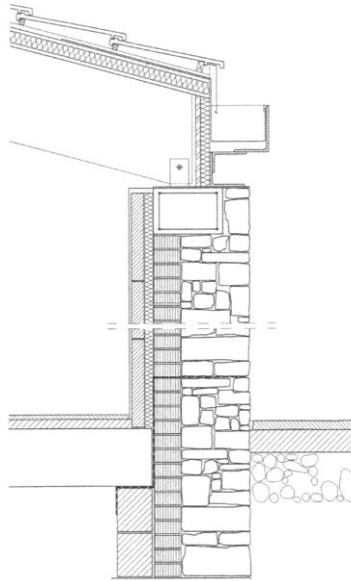
MATERIALE LAPIDEO

Gneiss locale

TECNICA COSTRUTTIVA

I muri esterni spessi 300 mm, sono apparecchiati a secco con elementi di pietra irregolari adiacenti ad una parete in mattoni di 115 mm di spessore. Il pacchetto di chiusura verticale presenta all'interno uno strato isolante.

Un cordolo superiore in calcestruzzo distribuisce il carico della copertura sulle murature.



Stralcio di sezione
[Dernie, 2003, p. 190]

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

I progettisti impiegano murature in pietra per richiamare le costruzioni agricole tradizionali tipiche dell'area.

BIBLIOGRAFIA: Dernie, 2003, pp. 188-191.

BAGNI TERMALI DI VALS



Una vista dell'esterno dei Bagni termali di Vals

[Acocella, 2006a, su <http://www.architetturadi Pietra.it>, foto Alfonso Acocella e Gabriele Lelli]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

Vals, Svizzera

1994-1996

PROGETTISTA

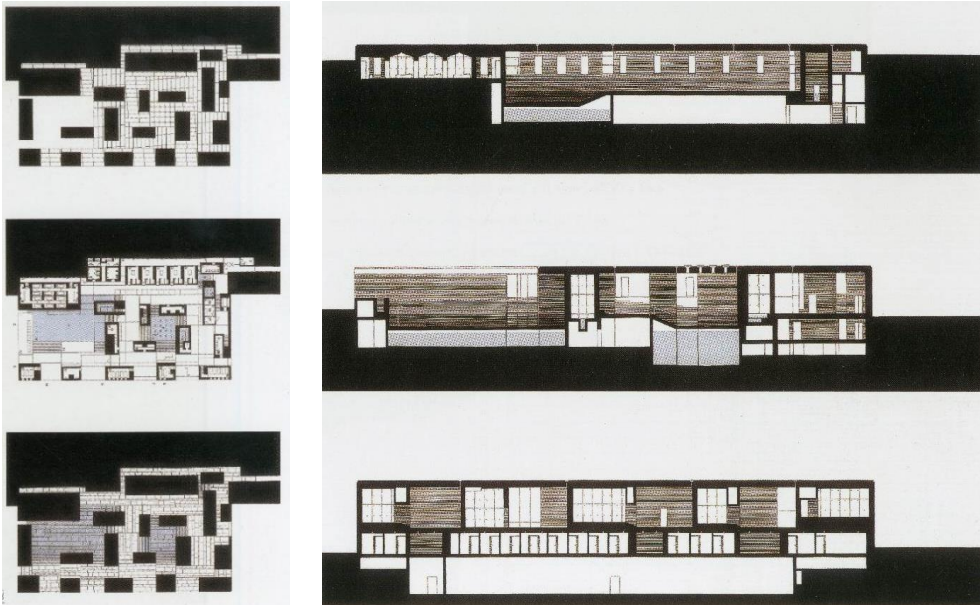
Peter Zumthor

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

Il nuovo edificio termale è un grande volume in pietra progettato in adiacenza ad un pendio naturale e scavato da profonde aperture.

L'interno è caratterizzato dalla presenza di elementi strutturali massivi cavi ed accessibili al loro interno, articolati secondo un preciso ordine spaziale. Il tema compositivo generale è quello dell'"avvolgimento spiraliforme" delle diverse cellule spaziali delle vasche termali (Acocella, 2004, p. 165).

Le superfici delle pareti sono caratterizzate da un rivestimento in pietra dal disegno contemporaneo. La pietra è usata anche nel pavimento con una tessitura ad *opus quadratum*.



Planimetria alla quota della copertura e planimetrie del livello principale dell’edificio termale;
sezioni longitudinali
[Acocella, 2004, pp. 162, 165]

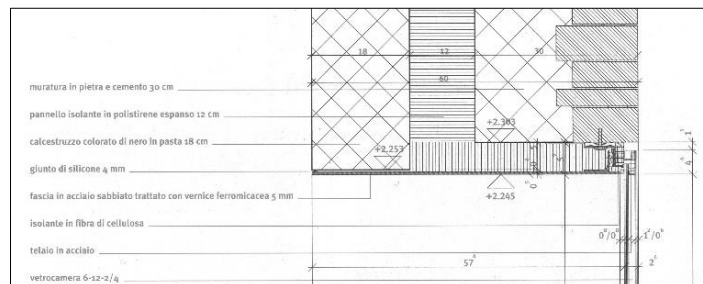
MATERIALE LAPIDEO

Quarzite di Vals, pietra locale silicea e scistosa

TECNICA COSTRUTTIVA

Le pareti portanti sono caratterizzate da un rivestimento esterno ad elevato spessore (12-15 cm) realizzato con lastre sottili o lunghi masselli litici. L’altezza di questi elementi varia tra 31 mm, 47 mm e 63 mm mentre la loro lunghezza varia da 80 cm a 2,5 m: le misure usate sono complementari e sono state studiate in relazione alle dimensioni e alle quote di imposta delle aperture e delle scale. Gli elementi in pietra sono stati apparecchiati a giunti stretti utilizzando un particolare collante sintetico. Risultano inscindibilmente incorporati nel nucleo cementizio interno dell’ossatura muraria essendo stati impiegati come cassero per il calcestruzzo armato: vista la compartecipazione strutturale tra nucleo cementizio e rivestimento lapideo, i critici hanno definito la soluzione costruttiva adottata da Zumthor come “muro composito di Vals” (Acocella, 2004, p. 165).

Le pareti sono state realizzate per elevazioni murarie successive di 80 cm in modo da evitare sconnessioni tra gli elementi litici per effetto della spinta esercitata dal calcestruzzo in fase di getto.



Dettaglio costruttivo
[Redazionale, 1997a, p. 75]

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

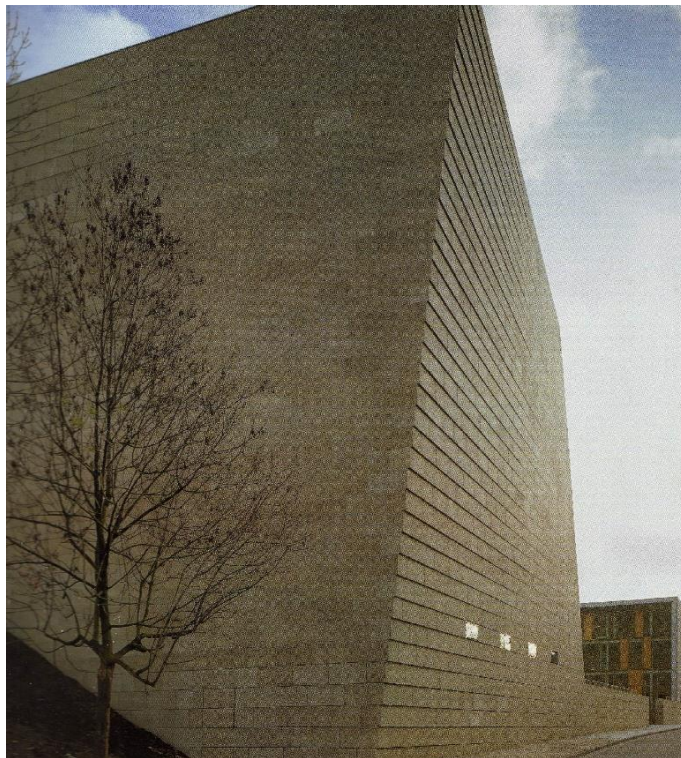
Zumthor sceglie di impiegare la pietra per integrare il nuovo edificio nel paesaggio naturale circostante della valle dei Grigioni. Nelle intenzioni del progettista, infatti, il “grande volume in pietra, coperto d’erba, incastrato nella montagna con cui forma un tutt’uno”, deve “trasmettere l’impressione” di essere “una presenza senza tempo nel paesaggio” (Acocella, 2004, p. 161).

BIBLIOGRAFIA: Acocella, 2004, pp. 160-167; Acocella, 2006a; Hugues, Steiger, Weber, 2007, p. 115; Redazionale, 1997a, pp. 56-75.

NUOVA SINAGOGA DI DRESDA



Localizzazione
[Dernie, 2003, p. 104]



Dettaglio del prospetto
[Dernie, 2003, p. 107]

LOCALIZZAZIONE E ANNO
Dresda (Saarbruken), Germania
2001

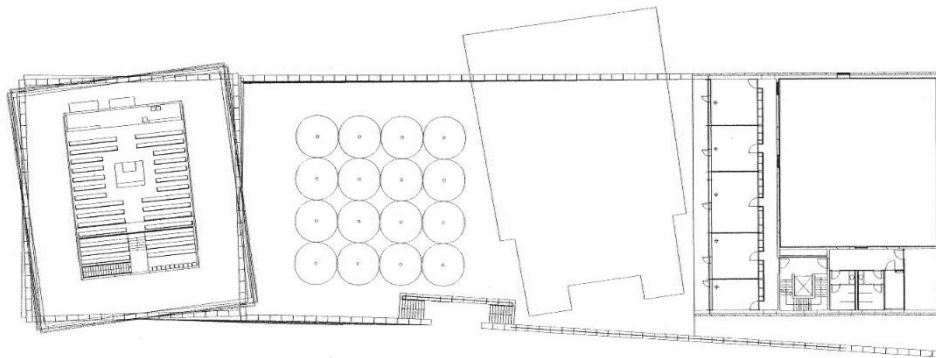
PROGETTISTA
Wandel Hofer Lorch+Hirsch

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

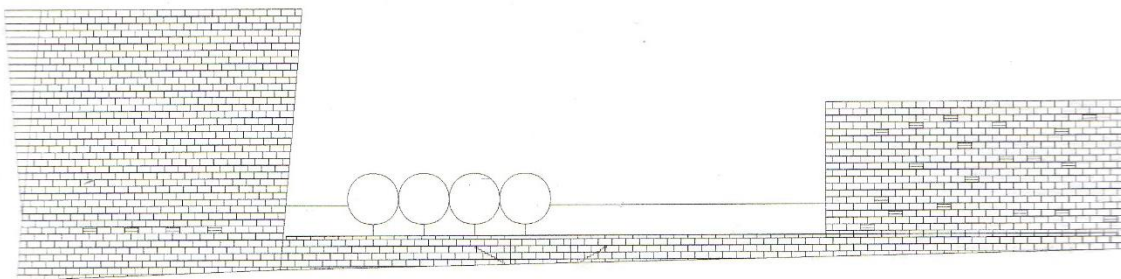
Il complesso religioso di progetto è composto da due edifici disposti alle due estremità di una corte rettangolare circondata da muri bassi in pietra: uno degli edifici ospita la nuova sinagoga mentre l'altro una biblioteca e dei servizi comuni per la comunità Ebraica. Il complesso è allineato con il fiume Elbe ed ubicato nell'area dove sorgeva la sinagoga della città progettata da Semper e distrutta nel 1938, durante il nazismo.

Il volume della sinagoga ha una forma tortile dettata sia dalla geometria del sito che dall'esigenza di un orientamento verso est. Il volume cubico è stato distorto, infatti, attraverso la progressiva rotazione dei ricorsi della muratura in blocchi prefabbricati: si determina non solo una torsione della facciata ma anche un "effetto "gradonato"" tra strati contigui di blocchi (Pongraz, Perbellini, 2009, p. 46).

L'edificio di culto è caratterizzato dal contrasto materico tra l'involucro interno realizzato in ottone e quello esterno realizzato in materiale lapideo: questo contrasto simboleggia "il conflitto tra stabilità e fragilità, tra permanente e provvisorio" (Dernie, 2003, p. 104).



La pianta del piano terra della sinagoga
[Dernie, 2003, p. 104]



Il prospetto est della sinagoga
[Dernie, 2003, p. 105]

MATERIALE LAPIDEO

Pietra artificiale denominata Formstein ovvero calcestruzzo ricostituito fabbricato in Belgio (il mix è dato da cemento grigio e bianco, calcare giallo, sabbia, granulato di quarzo e pigmento giallo 940 di Bayer)

TECNICA COSTRUTTIVA

La struttura monolitica in muratura è realizzata con blocchi di pietra artificiale di dimensioni pari a 60x60x120 cm. I blocchi sono stati gettati in stampi metallici e poi incisi con l'acido per riprodurre l'aspetto di superfici in pietra naturale. Hanno una sezione a U: presentano, infatti, una cavità longitudinale sulla faccia superiore che crea un canale continuo in ogni ricorso orizzontale, al cui interno è stato gettato un cordolo in calcestruzzo armato. Quest'ultimo lega tra loro tutti i blocchi di ogni strato e stabilizza la costruzione.

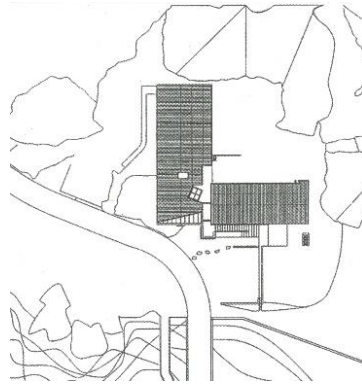
Ognuno dei 41 strati di blocchi che compongono le murature è ruotato di 15° rispetto al precedente, in modo che la facciata riesca a rivolgersi esattamente verso est.

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

Gli architetti hanno scelto di non impiegare l'arenaria naturale locale perché non avrebbe consentito di realizzare la struttura monolitica di progetto e sarebbe stata soggetta ad un forte degrado cromatico sotto l'azione degli agenti atmosferici. È stata impiegata, quindi, una pietra artificiale che richiamasse il carattere del materiale locale.

BIBLIOGRAFIA: Corvino, 2014; Dernie, 2003, pp. 104-107; Mäckler, 2004, p. 125; Pongratz, Perbellini, 2009, pp. 46-48.

CASA DELLE GUIDE ALPINE IN VALMASINO



Inquadramento

[Acocella, 2004, p. 136]



Viste della facciata principale

[Acocella, 2004, pp. 136, 139]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

Filorera, Italia

1997-1999

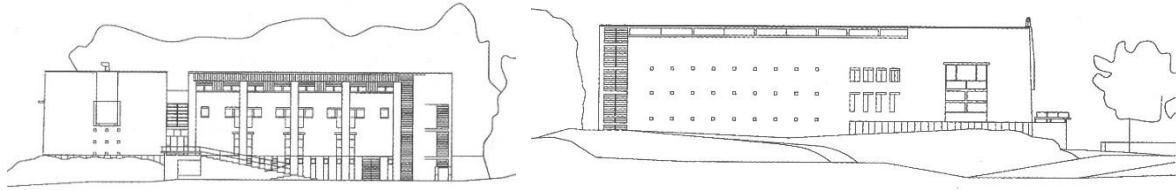
PROGETTISTA

Gianmatteo e Roberto Romegialli

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

L'edificio che ospita un centro polifunzionale con un rifugio per escursionisti, è organizzato in due blocchi perpendicolari affacciati su una corte interna. L'impianto è allineato con un ponte romano in pietra costruito per attraversare il torrente Masino.

L'immagine dell'edificio è definita da murature realizzate in pietra locale e da elementi in calcestruzzo armato a vista tra cui il vano scala cilindrico. La pietra è stata usata anche per gli architravi delle aperture maggiori: sono stati utilizzati, infatti, blocchi monolitici di granito regolarizzati. Nel corpo che ospita la palestra, invece, sono state inserite piccole aperture quadrate in vetrocemento. Infine, i prospetti che affacciano sulla corte interna sono stati caratterizzati con logge in legno e vetrate.



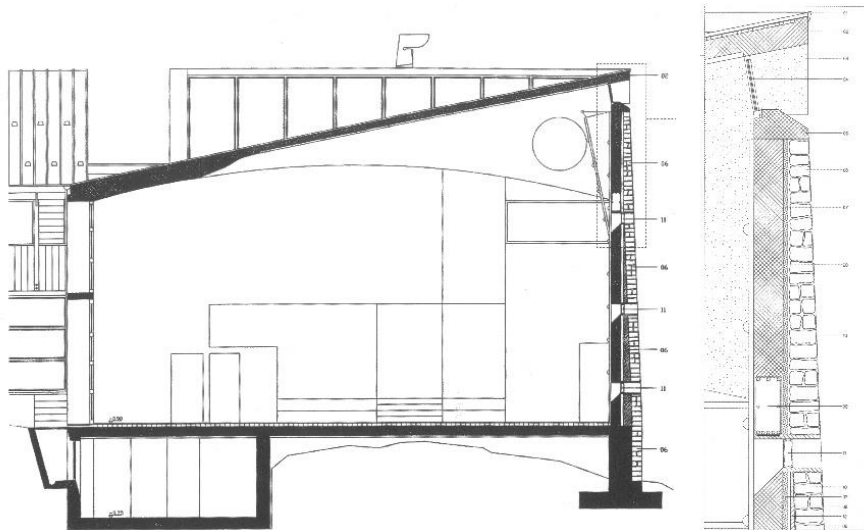
Il prospetto principale e il prospetto laterale
[Acocella, 2004, p. 138]

MATERIALE LAPIDEO

Scampoli di granito ghiadone locale

TECNICA COSTRUTTIVA

Le pareti verticali sono realizzate accostando a dei setti interni portanti in calcestruzzo armato di 20 cm di spessore dei muri litici esterni spessi 30 cm. Questi ultimi sono costruiti con pietra a spacco posata in opera impiegando la malta. La rifinitura è stata eseguita secondo una tecnica propria della tradizione costruttiva locale, denominata “rasapietra”: i giunti di malta, infatti, sono stati rasati e lavorati con appositi utensili in modo da dissimulare le irregolarità degli scampoli lapidei impiegati. La tecnica è stata usata per proteggere la superficie esterna della muratura dalle infiltrazioni d’acqua.

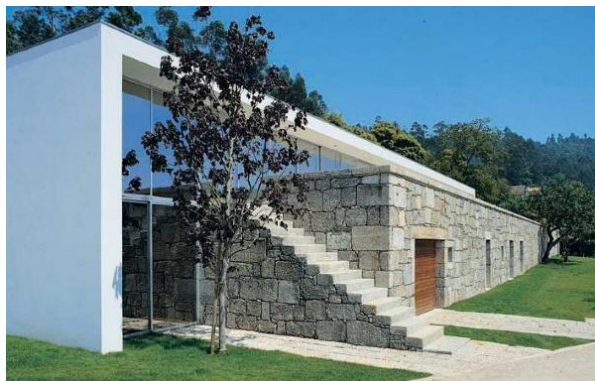
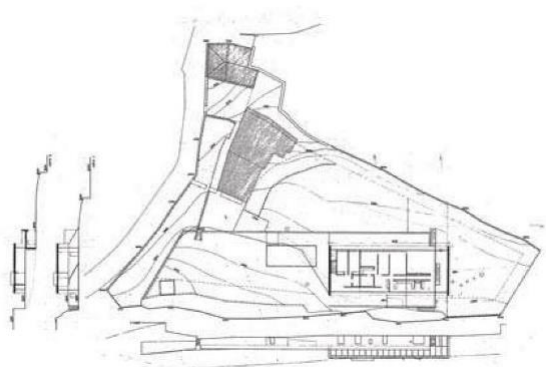


Sezione trasversale del corpo di fabbrica che ospita la palestra; dettaglio della sezione
[Acocella, 2004, p. 141]

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

I progettisti hanno scelto di usare la pietra per integrare il nuovo edificio nel contesto naturale. L’adozione di una muratura irregolare in scampoli di pietra esprime, infatti, “un forte radicamento materiale e culturale al luogo” anche se l’edificio è estraneo a “mimesi storicistico-vernacolari”, come dichiarato dagli stessi progettisti nella relazione di progetto (Acocella, 2004, p. 139, p. 137).

BIBLIOGRAFIA: Acocella, 2004, pp. 136-141.

CASA A BOM JESUS

Planimetria generale e vista dell'esterno
 [Angelillo, 2017, su <http://www.architetturadi pietra.it>]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

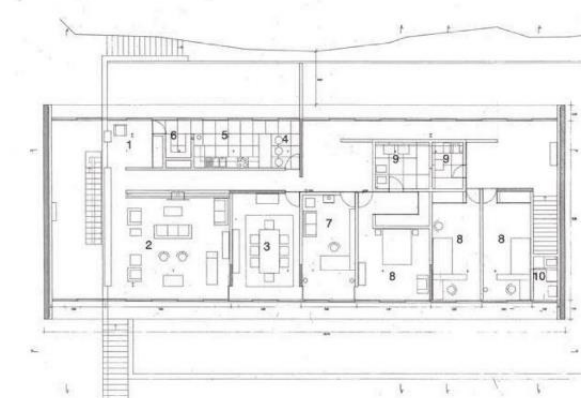
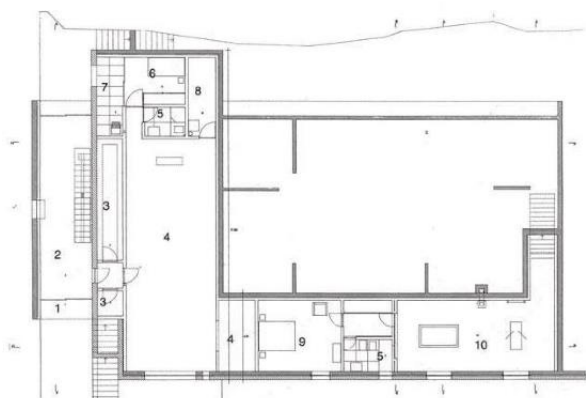
Dadim, Braga, Portogallo
 1994

PROGETTISTA

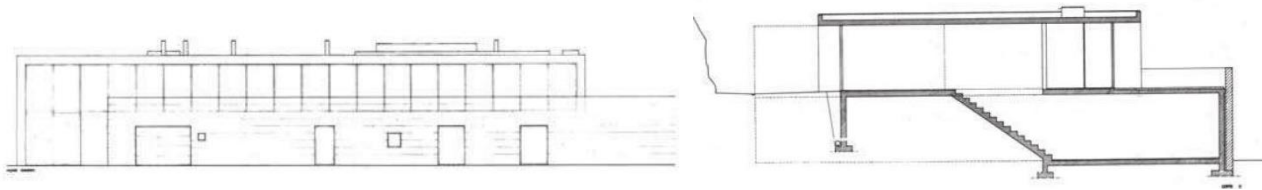
Eduardo Souto de Moura

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

L'edificio si sviluppa su due livelli ed ospita due residenze. È caratterizzato dall'uso di materiali dalle proprietà contrastanti: alla matericità di un muro in blocchi di granito si contrappongono, infatti, il carattere astratto di un volume in calcestruzzo armato intonacato e dipinto di bianco e la trasparenza di grandi superfici vetrate.



Planimetrie
 [Angelillo, 2017, su <http://www.architetturadi pietra.it>]



Prospetto e sezione trasversale

[Angelillo, 2017, su <http://www.architetturadi pietra.it>]

MATERIALE LAPIDEO

Granito locale ottenuto dalla demolizione di costruzioni preesistenti

TECNICA COSTRUTTIVA

La pietra usata in grandi blocchi deriva dalla demolizione di un preesistente edificio e di un muro di sostegno: i blocchi di dimensioni variabili tra 30 e 50 cm sono stati riutilizzati per realizzare due nuove murature. Una di queste si configura come una contro-parete esterna che riveste uno dei setti in calcestruzzo armato che costituisce la struttura portante dell'edificio.

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

L'architetto afferma la leggerezza dell'architettura moderna attraverso l'esaltazione della pesantezza del materiale lapideo. La scelta della pietra consente, inoltre, al progettista di integrare l'edificio nel contesto e di riciclare materiale di scarto.

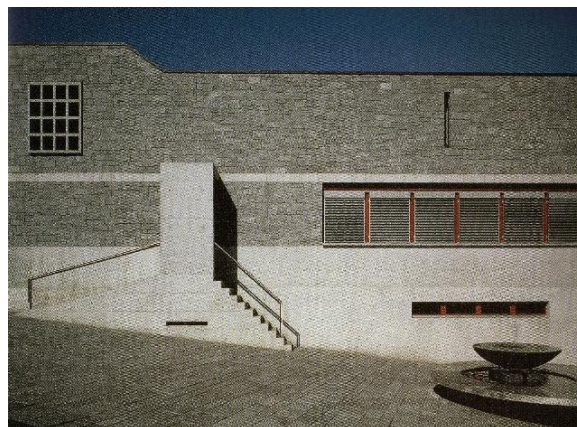
BIBLIOGRAFIA: Angelillo, 2017; Girasante F (2006) *Materiali e sistemi di facciata*. In: Girasante F, Potenza D. *Dalla pietra all'architettura*. Foggia: Claudio Grenzi Editore, pp. 65-66; Pavan V (2006) *I linguaggi dell'architettura contemporanea*. In: Girasante F, Potenza D. *Dalla pietra all'architettura*. Foggia: Claudio Grenzi Editore, pp. 38-39.

NUOVE INFRASTRUTTURE COMUNALI A IRAGNA



Inquadramento

[Dernie, 2003, p. 192]



L'edificio del comune nel contesto urbano; particolare del prospetto sud

[Dernie, 2003, pp. 192, 193]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

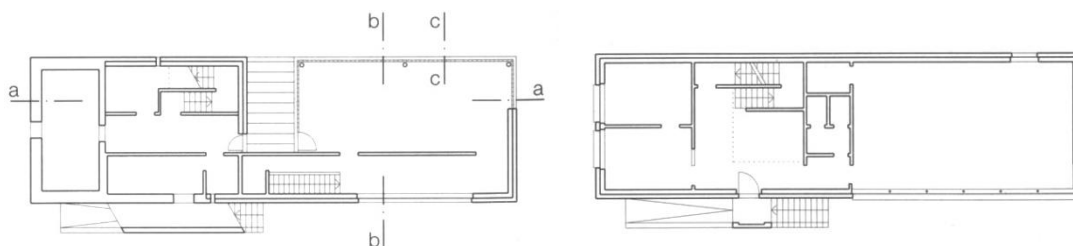
Iragna, Svizzera
1994-5

PROGETTISTA

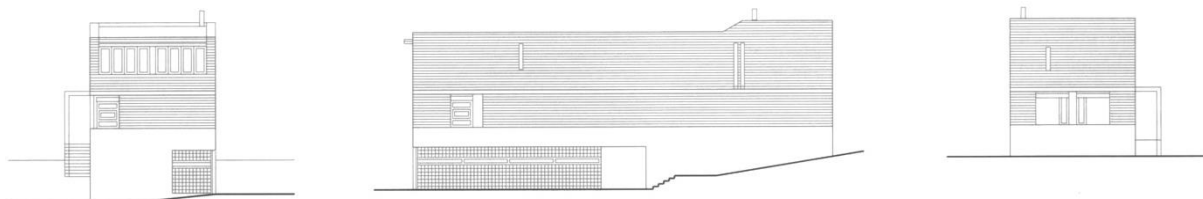
Raffaele Cavadini

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

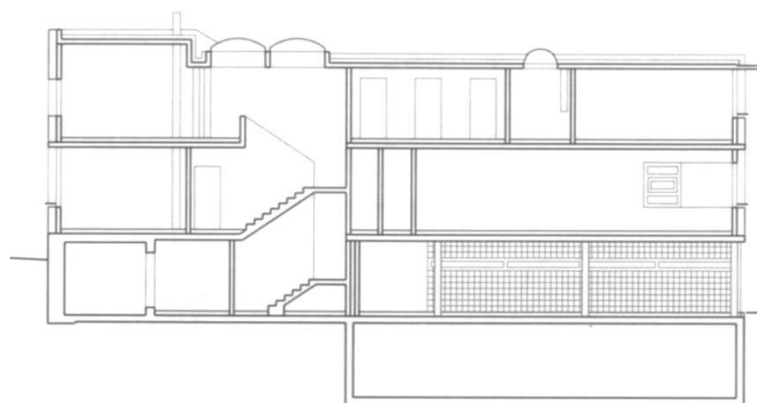
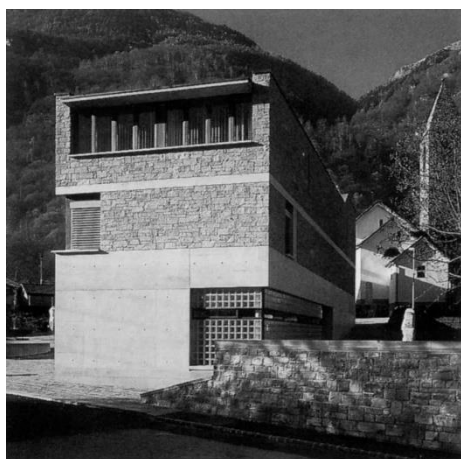
Le infrastrutture di progetto comprendono una piazza, una cappella funeraria e un nuovo municipio che si affaccia su un piazzale triangolare in pendenza, pavimentato con lastre di gneiss locale. Uno zoccolo di calcestruzzo di colore chiaro separa la pavimentazione della nuova piazza dalla muratura lapidea delle pareti dell'edificio comunale. L'utilizzo di solai in calcestruzzo armato ha consentito di caratterizzare le facciate del municipio con finestre a nastro e aperture vetrate ubicate negli angoli del volume.



Le piante dei primi due livelli dell'edificio
[Redazionale, 1999b, p. 974]



I prospetti
[Redazionale, 1999b, p. 974]



Vista del prospetto caratterizzato da finestre a nastro e sezione longitudinale dell'edificio
[Redazionale, 1999b, pp. 974, 975]

MATERIALE LAPIDEO

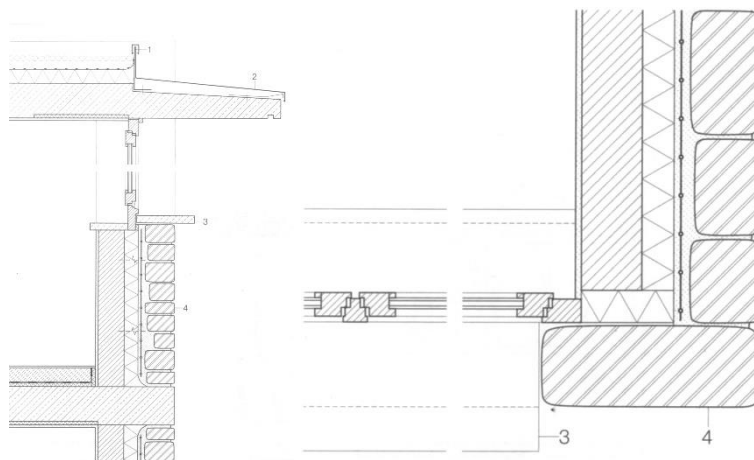
Gneiss d'Iragna

TECNICA COSTRUTTIVA

Le pareti dell'edificio municipale sono caratterizzate da un rivestimento esterno in pietra. La soluzione costruttiva comprende, oltre al rivestimento litico, una membrana impermeabile, uno strato di isolante termico di 80 mm e una muratura in mattoni di 150 mm con finitura interna ad intonaco. Lo spessore finale della parete è di 450 mm.

Le pietre a spacco utilizzate sono di lunghezza variabile tra i 200 e i 500 mm, di altezza compresa tra i 100 e i 250 mm e di spessore variabile tra i 100 e i 170 mm. I blocchi di pietra sono inseriti in uno spesso strato di malta di cemento come nell'antica tecnica dell'*opus incertum* ma è presente anche una rete di armatura. Gli spazi tra le pietre più grandi sono chiusi con piccoli elementi lapidei.

La muratura si imposta su uno zoccolo di calcestruzzo al livello del solaio del primo piano. È interrotta, inoltre, da solette di calcestruzzo a vista.



Dettagli costruttivi
[Redazionale, 1999b, p. 975]

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

Il progettista ha scelto di impiegare la pietra locale per inserirsi in modo rispettoso nella struttura esistente del paese e legarsi, quindi, alla tradizione urbana. La città, infatti, è situata in un'area del Ticino in cui sono attive piccole cave e laboratori di trasformazione di granito. Gli edifici di progetto si pongono, quindi, come una reinterpretazione dei metodi tradizionali di costruzione legati ad una risorsa locale.

L'uso della pietra massiva si lega anche alla sua elevata inerzia termica.

BIBLIOGRAFIA: Dernie, 2003, pp. 192-197; Hugues, Steiger, Weber, 2007, p. 114; Norberg-Schulz, 2012; Redazionale, 1999b, pp. 973-976.

CASA PRIVATA A SÉNIERGUES



Vista da est
[Dernie, 2003, p. 145]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

Séniergues, Francia
1998

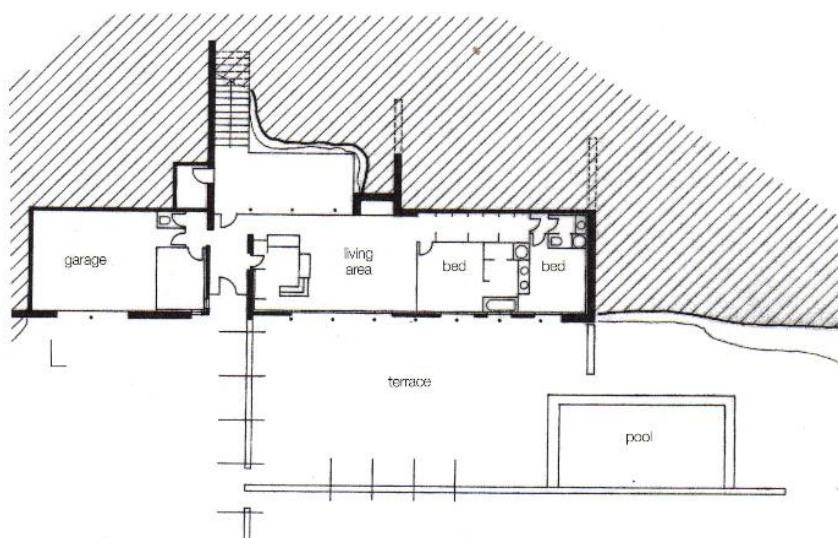
PROGETTISTA

Gouwy, Grima, Rames

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

L'edificio ad un solo piano è conformato per adattarsi alla pendenza dell'area di progetto: un cortile è stato interposto tra la casa e il pendio ed è stato adottato un tetto piano per conferire alla costruzione il carattere di un elemento di terrazzamento.

I prospetti sono caratterizzati da ampie aperture vetrate, concluse da architravi metalliche, che rivelano la profondità delle chiusure verticali.



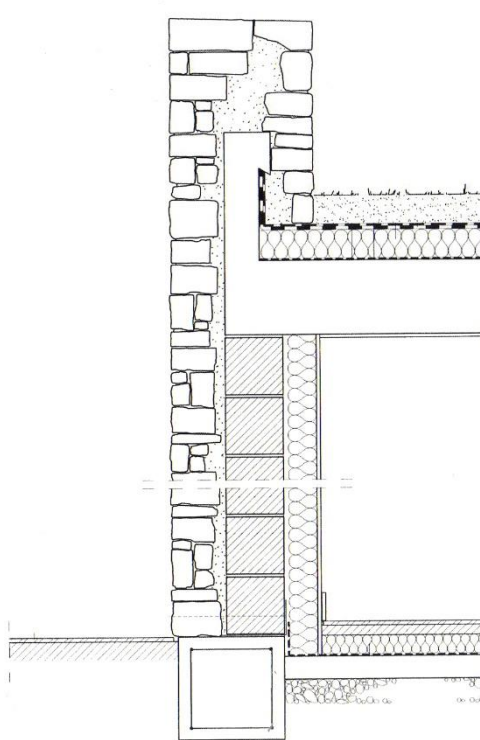
Planimetria del piano terra
[Dernie, 2003, p. 144]

MATERIALE LAPIDEO

Pietra locale di recupero

TECNICA COSTRUTTIVA

I muri perimetrali di 500 mm di spessore sono realizzati abbinando una contro-parete esterna in conci irregolari di pietra apparecchiati secondo la tecnica dell'*opus incertum* con spessi letti di malta, ed una tamponatura interna in blocchi di cemento spessa 190 mm. La muratura in pietra non è portante ma costituisce il rivestimento della struttura in calcestruzzo dell'edificio. La soluzione costruttiva è completata internamente da uno strato isolante di 100 mm di spessore e da uno strato di finitura.



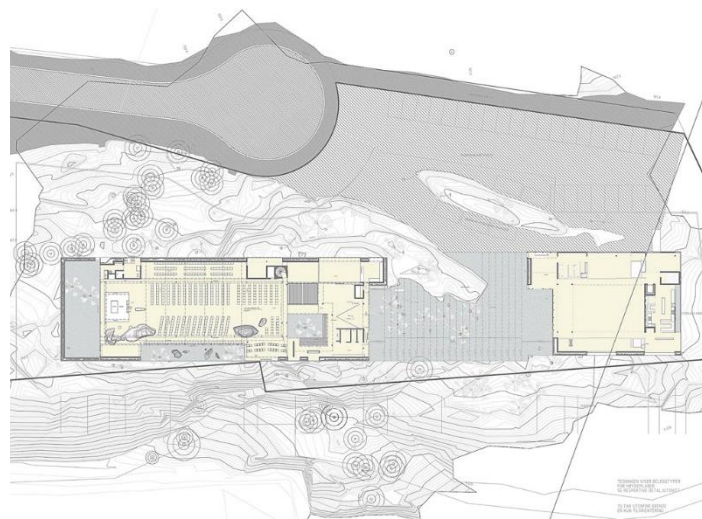
Stralcio di sezione
[Dernie, 2003, p. 145]

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

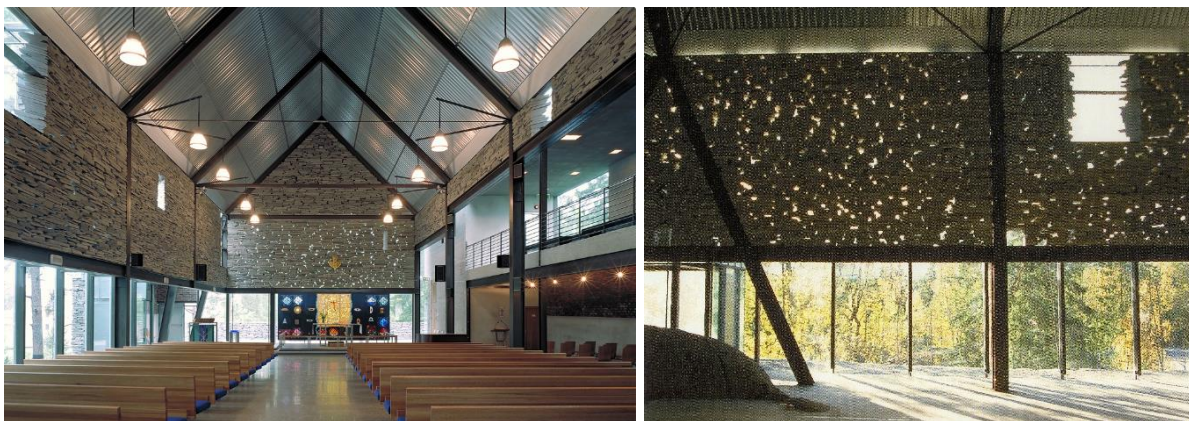
I progettisti hanno scelto di impiegare la pietra per integrare l'edificio nel contesto naturale di progetto. Hanno impiegato, inoltre, la tecnica costruttiva della muratura a conci irregolari per richiamare la tradizione costruttiva della regione. L'adozione di materiale litico di recupero, infine, presenta dei benefici ambientali limitando il consumo di pietra naturale grezza.

BIBLIOGRAFIA: Dernie, 2003, pp. 144-145.

MORTENSRUD CHURCH



Inquadramento
[Dernie, 2003, p. 122]



Viste dell'interno

[Jensen & Skodvin Architects, 2011, su <http://www.archdaily.com>; Dernie, 2003, p. 123]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

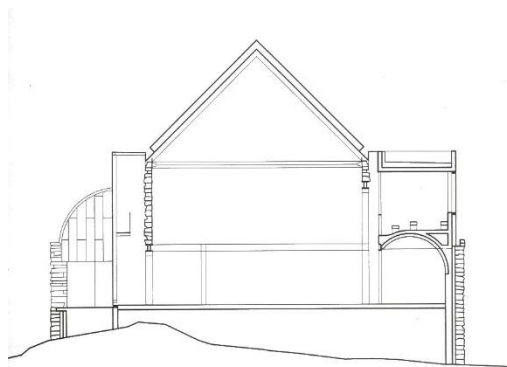
Oslo, Norvegia
2002

PROGETTISTA

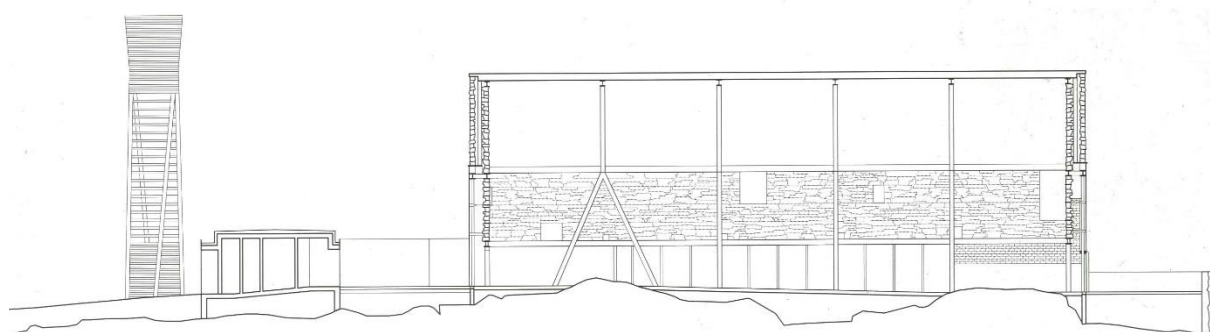
Jensen & Skodvin Architects

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

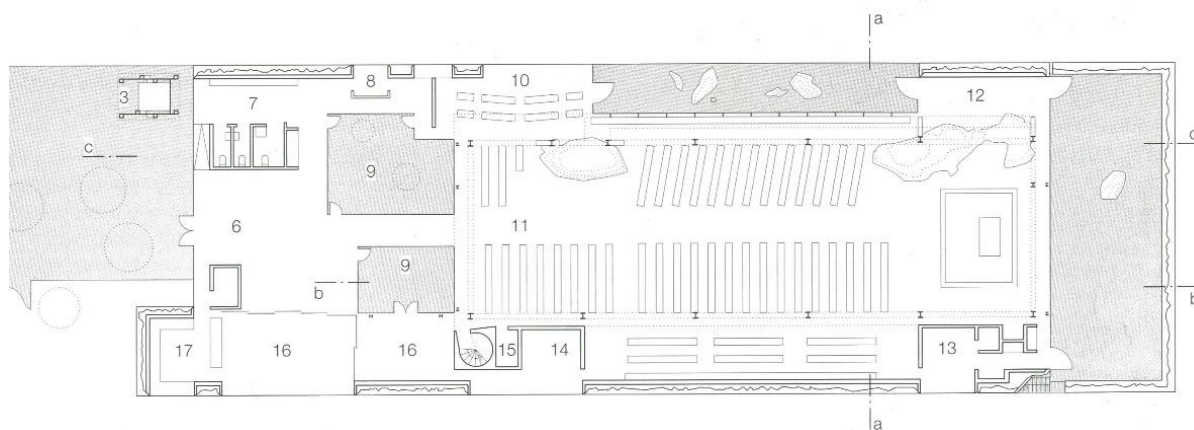
La chiesa e l'edificio parrocchiale di progetto sono ubicati sulla sommità di una collina, con orientamento nord-sud, e sono separati da una corte esterna. La struttura della chiesa è costituita da telai in acciaio lasciati a vista. La copertura è a falda ed è sostenuta da travi IPE in acciaio connesse con i pilastri. I prospetti sono caratterizzati da ampie vetrate e da murature in pietra.



Sezione trasversale
[Redazionale, 2003a, p. 1265]



Sezione longitudinale
[Redazionale, 2003a, p. 1265]



Pianta della chiesa
[Redazionale, 2003a, p. 1265]

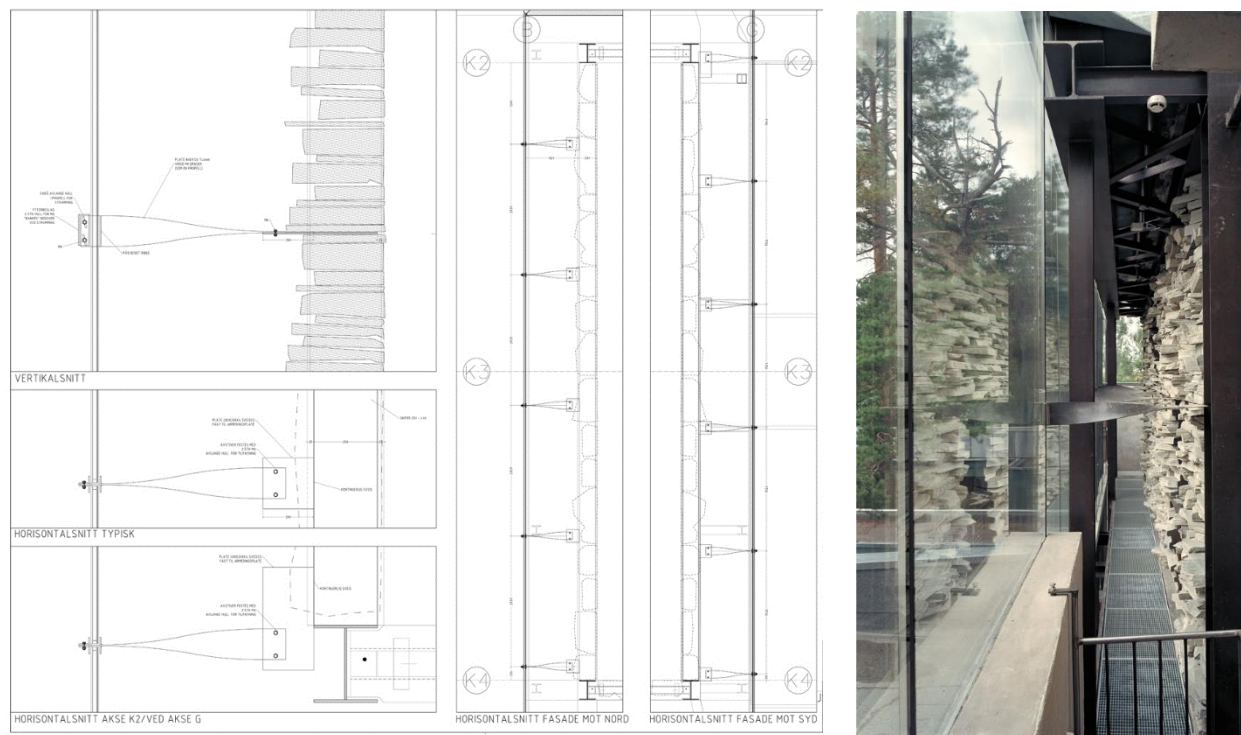
MATERIALE LAPIDEO

Ardesia

TECNICA COSTRUTTIVA

Il telaio strutturale in acciaio a vista è tamponato, su tre lati dell'edificio, da murature in pietra realizzate senza uso di malta. Il fronte esterno della muratura è irregolare diversamente da quello

interno, ed è protetto dallo schermo trasparente della facciata vetrata posto a una distanza variabile tra 90 e 160 cm. Le murature si estendono dal livello del primo piano a quello di imposta della copertura inclinata. Sono rinforzate orizzontalmente ogni metro da piatti in acciaio di dimensioni pari a 5x250 mm, collegati con le colonne.



Disegni costruttivi e foto di dettaglio

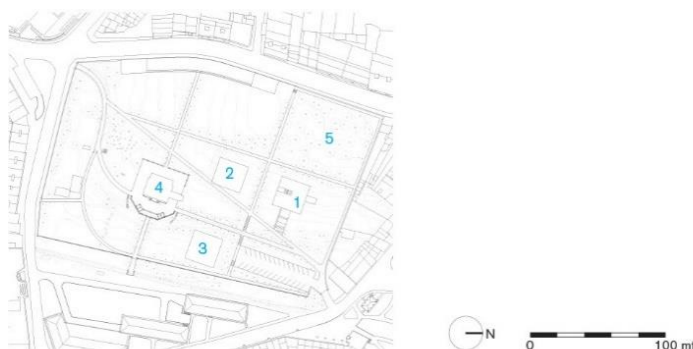
[Jensen & Skodvin Architects, 2011, su <http://www.archdaily.com>]

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

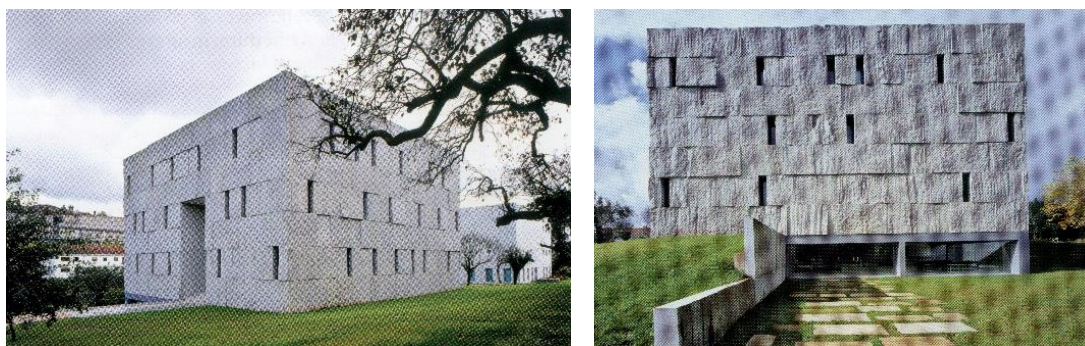
La tecnica costruttiva impiegata è stata scelta dagli architetti per contenere i costi di costruzione. La pietra è stata utilizzata anche per inserire il nuovo edificio nel contesto naturale di progetto. La scelta di non impiegare la malta per la muratura si collega alla volontà di consentire l'ingresso della luce naturale nello spazio interno della chiesa.

BIBLIOGRAFIA: Dornie, 2003, pp. 122-123; Jensen & Skodvin Architects, 2011; Redazionale, 2003a, pp. 1264-1266.

SCUOLA DI ALTI STUDI MUSICALI DELLA GALIZIA



Planimetria generale della Finca Vista Alegre
[Pavan, 2013, p. 122]



Viste dell'esterno
[Pongratz, Perbellini, 2009, p. 73]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

Santiago de Compostela, Spagna

1999-2004

PROGETTISTA

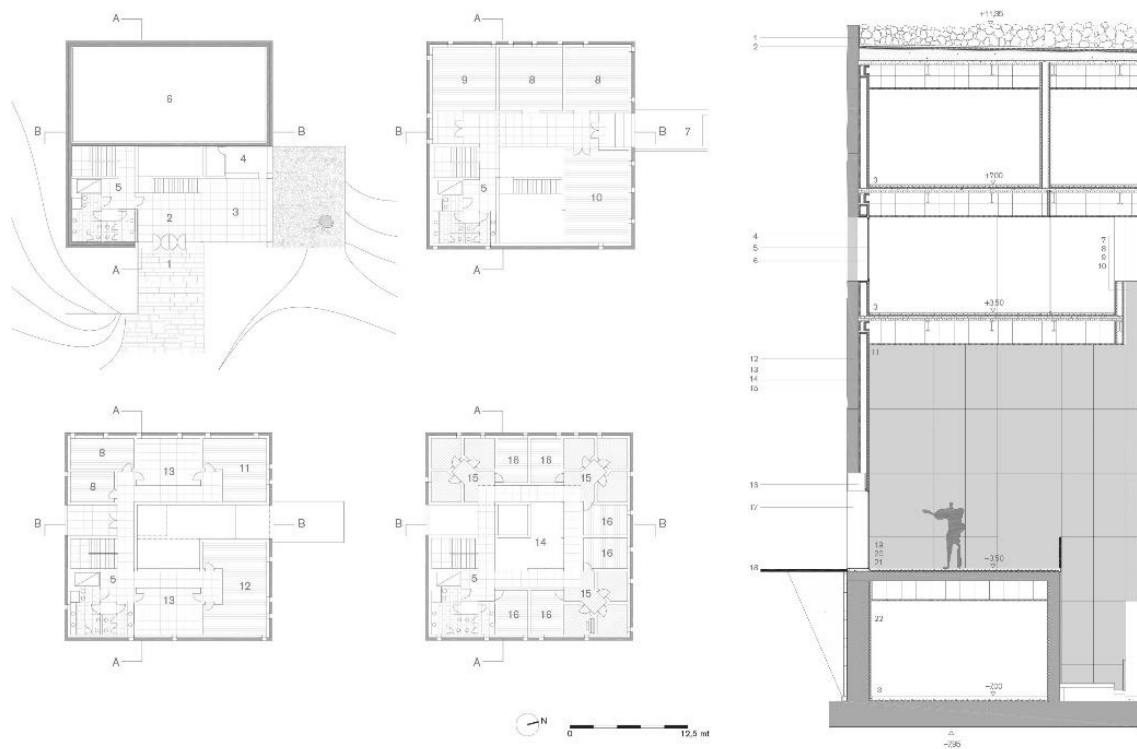
Antón García-Abril Ruiz

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

Il nuovo edificio scolastico che ospita un auditorium, delle aule per studenti e degli uffici per i docenti, si inserisce nel parco universitario di Finca Vista Alegre. L'attacco a terra è mediato da un basamento di calcestruzzo che risolve il dislivello dell'area di progetto e consente l'accesso.

Il volume cubico scultoreo è inciso dai vuoti delle aperture che segnalano la profondità delle pareti in lastre di pietra che rivestono esternamente la struttura in acciaio.

Alla superficie scabra delle facciate che mostrano i segni della lavorazione della pietra, si contrappongono le pareti dell'ambiente centrale interno: queste ultime, infatti, sono rivestite con lastre sottili dello stesso litotipo usato per l'esterno, lavorate a filo di sega e montate con un disegno a griglia regolare. Anche i pavimenti sono realizzati con lo stesso tipo di pietra delle pareti, sottoposto però ad un processo di fiammatura.



Piante del piano di accesso alla caffetteria, del piano terra, del primo e del secondo piano, e stralcio della sezione costruttiva longitudinale [Pavan, 2013, pp. 122, 128]

MATERIALE LAPIDEO

Granito di Mondariz (Galizia, Spagna)

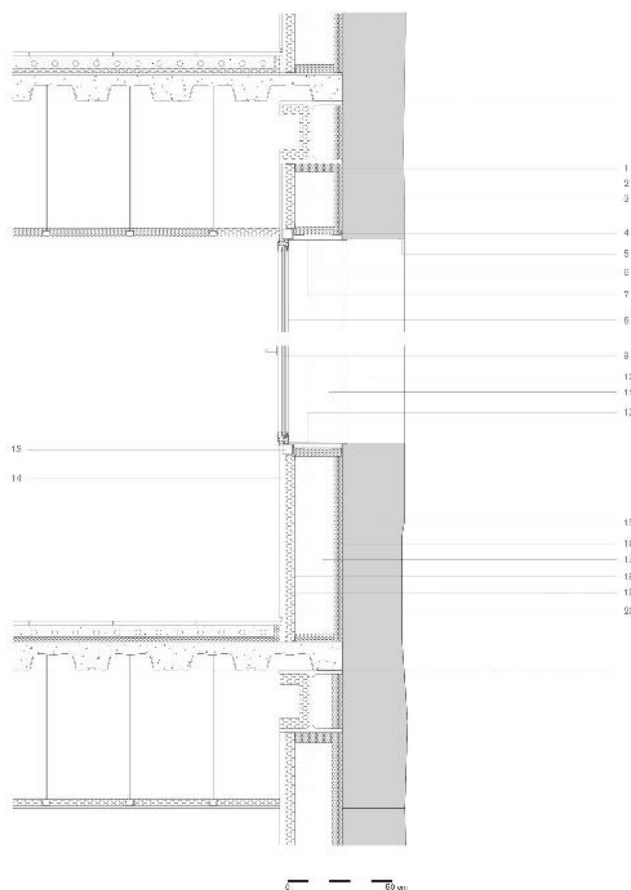
TECNICA COSTRUTTIVA

Lastre di granito dello spessore di 30-35 cm, di altezza pari a 175 cm e di larghezza variabile (circa 300 cm) formano delle pareti lapidee autoportanti che rivestono la struttura a telaio in acciaio dell'edificio. Sono state montate a secco, esternamente alla struttura in acciaio, ma sono state collegate tra di loro con staffe di stabilizzazione su tutti i lati. Sono state disposte "a coltello" in modo da definire una muratura con ricorsi di altezza regolare (Pavan, 2013, p. 112).

I lastroni sono stati ottenuti con un sistema manuale "a spacco" a partire da blocchi di spessore doppio (Pavan, 2013, p. 116): è stata impiegata la tecnica di trapanatura, un sistema che lascia a vista le tracce delle perforazioni praticate sulla metà dello spessore del blocco. Le lastre sono state tagliate "al contro" cercando il piano di stereometria naturale, in modo da consentire l'agevole divisione per rottura in due (Pavan, 2013, p. 116).

La superficie interna delle lastre di parete è stata spruzzata con 4 cm di poliuretano. Il pacchetto di chiusura è stato completato installando all'interno una contro-parete di Pladur-Meta e lana di roccia, separata dai due strati più esterni dell'involucro da una camera d'aria di circa 20 cm.

Le pareti del grande spazio interno, invece, sono state caratterizzate con un rivestimento in lastre sottili di granito di Mondaritz.



Stralcio della sezione di dettaglio della facciata granitica
[Pavan, 2013, p. 132]

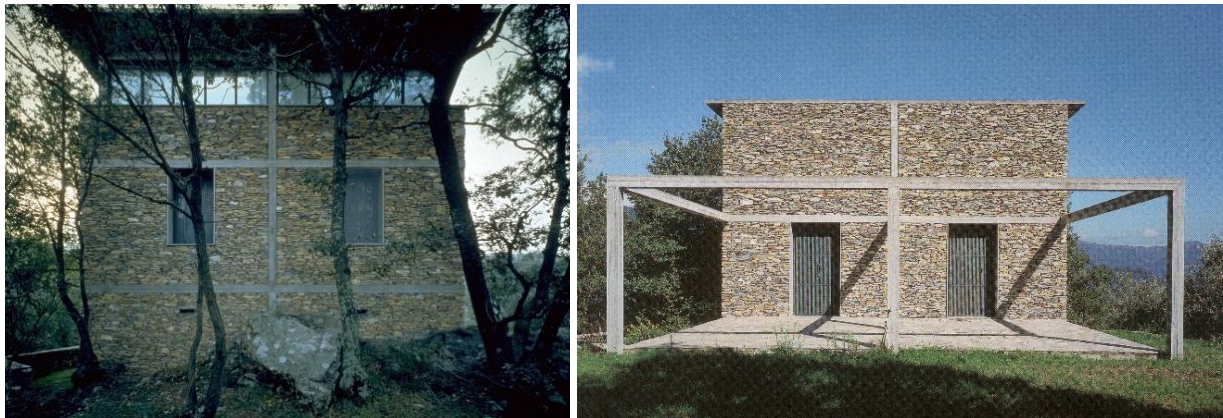
MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

L'architetto ha impiegato la pietra per creare "un'opera senza tempo", che desse l'impressione di essere da sempre presente nel luogo di progetto (Pavan, 2013, p. 112). Ha voluto realizzare, infatti, "un'architettura profondamente radicata nel contesto galiziano, basata sulle specificità culturali e ambientali, che segnano la memoria del luogo" (Pavan, 2013, p. 114).

Come dichiarato dal progettista, la combinazione dei caratteri di perfezione stereotomica del volume e di irregolarità della superficie hanno lo scopo di provocare "un'inquietudine materiale e spaziale" (Pavan, 2013, p. 112). Il trattamento della superficie delle lastre e la tecnica costruttiva scelta consentono, inoltre, di attualizzare l'"espressività tettonica", costruttiva del materiale (Pongratz, Perbellini, 2009, p. 73).

BIBLIOGRAFIA: Pavan, 2013; Pongratz, Perbellini, 2009, pp. 72-76.

STONE HOUSE



Viste dell'esterno

[<https://www.herzogdemeuron.com>; Mack, 1997, p. 64]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

Tavole, Italia

1982-1988

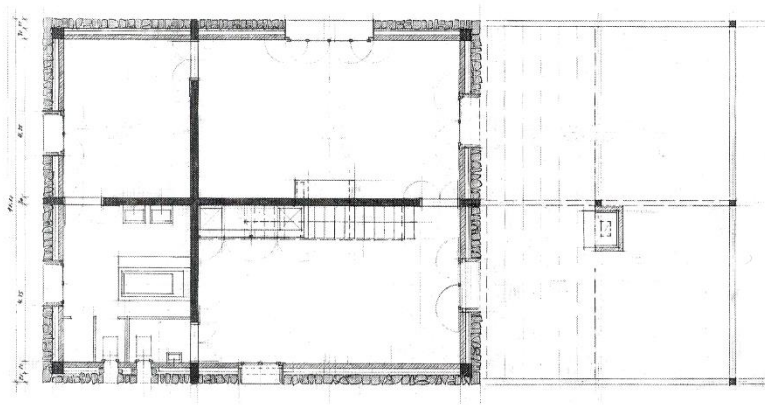
PROGETTISTA

Herzog & de Meuron

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

L'edificio a tre piani ospita una residenza unifamiliare ed è caratterizzato da un impianto astratto e strettamente geometrico: piante e sezioni sono derivate dagli elementi strutturali in calcestruzzo armato costituiti da setti e pilastri.

Il carattere massivo dell'edificio è sottolineato dall'uso della pietra nelle tamponature e dalla profondità delle aperture, oscurate da persiane metalliche. Solo al terzo livello sono presenti finestre a nastro. La massività dell'involucro lapideo si contrappone alla linearità degli elementi strutturali e di una pergola in calcestruzzo. Quest'ultima copre una preesistente terrazza inglobata nel progetto.



Vista dell'esterno e pianta del primo piano

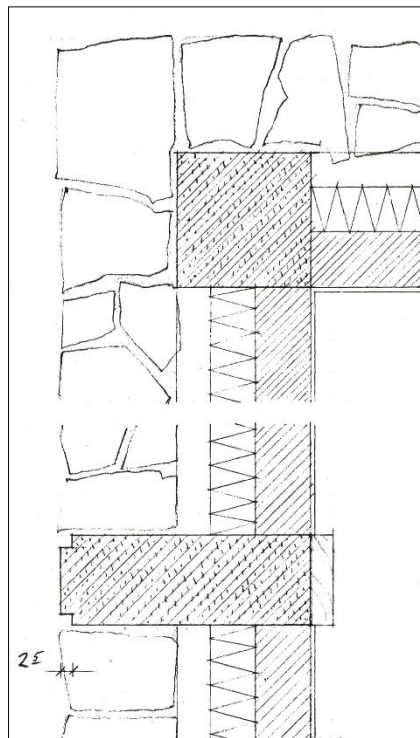
[Mack, 1997, pp. 67, 62]

MATERIALE LAPIDEO

Pietra naturale locale derivante dalla demolizione di un edificio preesistente

TECNICA COSTRUTTIVA

Le tamponature delle maglie strutturali in calcestruzzo armato sono realizzate con una muratura lapidea di 25 cm di spessore realizzata a secco e lasciata a vista. La muratura lapidea è separata da una camera d'aria di 8 cm dagli strati che definiscono internamente la soluzione di involucro: questi sono costituiti da 10 cm di isolante termico, da una muratura in mattoni di 12 cm e da una finitura a intonaco di 1,5 cm.



Dettaglio costruttivo

[Mack, 1997, p. 63]

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

I progettisti hanno scelto di impiegare la pietra per integrare l'edificio nel paesaggio naturale circostante caratterizzato da oliveti e muri di terrazzamento in pietra. La tecnica costruttiva impiegata per realizzare le pareti riprende, infatti, il linguaggio dell'architettura minore della regione e richiama l'aspetto dei terrazzamenti. Consente, inoltre, di riciclare materiale lapideo di scarto.

BIBLIOGRAFIA: Mack, 1997, pp. 56-67; Zaera, 1993, pp. 66-69; <https://www.herzogdemeuron.com>.

4.2. LA PIETRA ARMATA

4.2.1. Cenni storici

I manufatti realizzati in pietra, per la trascurabile resistenza a trazione di questo materiale, hanno una scarsa capacità di contrastare i carichi laterali che, se elevati, generano la comparsa di fratture che portano rapidamente al collasso. Tradizionalmente, l'insorgenza di sollecitazioni di trazione in architetture realizzate in pietra è stata contrastata aumentando lo spessore e, quindi, il peso degli elementi tecnici, spesso maggiorato ulteriormente attraverso l'impiego di pinnacoli (Dernie, 2003, p. 64; Turrini, 2009): l'aumento del peso, infatti, consente di evitare lo scorrimento degli elementi lapidei in quanto verticalizza le spinte che risultano applicate all'interno del terzo medio della sezione resistente che, di conseguenza, lavora interamente a compressione. In alternativa, per contrastare i carichi laterali, sono stati impiegati contrafforti o speroni.

Soltanto dal XVII-XVIII secolo, in Francia, è stata introdotta l'idea di utilizzare il ferro quale materiale resistente a trazione in abbinamento con la pietra lavorante a compressione. Esempi di tale abbinamento sono il Colonnato Est del Louvre realizzato da Perrault e il pronao della chiesa di Saint Geneviève a Parigi realizzato nel 1770 da Rondelet. Quest'ultimo "ha saputo riunire in regole empiriche la dicotomia tra il principio storico di proporzionalità" tra luce e sezione e "le nuove frontiere della scienza delle costruzioni" giungendo all'invenzione di "tecniche costruttive proto-moderne" (Rondelet, 2004a)¹⁹: gli architravi in pietra di Sainte Geneviève, infatti, presentano un'armatura in ferro che "precorre quella delle strutture in cemento armato" (Rondelet, 2004a)²⁰.

Le difficoltà insite nell'unione dell'acciaio con i materiali lapidei naturali hanno limitato l'uso della tecnologia della pietra armata ad opere di particolare importanza. Inoltre, la possibilità di impiegare il calcestruzzo armato e l'acciaio per realizzare strutture ha fatto sì che in epoca moderna la pietra sia stata utilizzata quasi esclusivamente per pavimenti e rivestimenti.

L'idea statica della pietra armata viene riscoperta dopo la Seconda Guerra Mondiale quando matura un nuovo interesse per l'impiego di questo materiale con funzione portante. Le prime sperimentazioni sono rappresentate da alcuni prototipi realizzati a Carrara in occasione delle Fiere del Marmo sfruttando le esperienze acquisite grazie alla tecnologia del calcestruzzo armato e del calcestruzzo armato precompresso. Gli esperimenti più interessanti condotti nell'ambito del polo produttivo apuano, sono rappresentati da una passerella pedonale in marmo e da una trave in marmo precompressa (Fallacara, Ferrero, Minenna, 2015, p. 6)

La passerella pedonale progettata dall'ingegnere pisano Cartei ed esposta alla fiera del 1965, è caratterizzata da un impalcato in pietra armata di 8 m di luce (Fig. 59): è stata realizzata, infatti, con sei travi a T in marmo di dimensioni pari a 18x25 cm, che presentano all'intradosso delle scanalature destinate ad alloggiare le barre d'acciaio di armatura. L'aderenza delle barre alla pietra è garantita dall'impiego di resina epossidica (Fallacara, Ferrero, Minenna, 2015, p. 6).

La trave in marmo precompressa presenta, invece, una sezione a "pi greco" alta soltanto 25 cm e riesce a coprire una luce di 10 m (Fig. 60): grazie alla precompressione applicata mediante la post-tensione di nove fili d'acciaio, la trave riesce a sostenere, oltre al peso proprio, anche un carico di 1000 chilogrammi applicato nella sezione di mezzeria (Fallacara, Ferrero, Minenna, 2015, p. 6).

¹⁹ Felici M (2004) *Prefazione*. In: Rondelet G. Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare. Roma: Editrice Librerie Dedalo.

²⁰ *Ibidem*

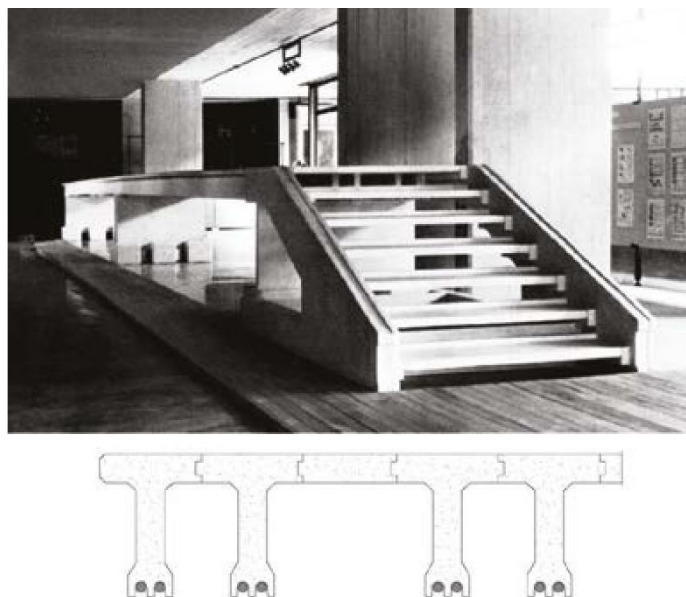


Fig. 59 La passerella in marmo armato precompresso realizzata a Carrara nel 1965: vista e sezione [Fallacara, Ferrero, Minenna, 2015, p. 5]

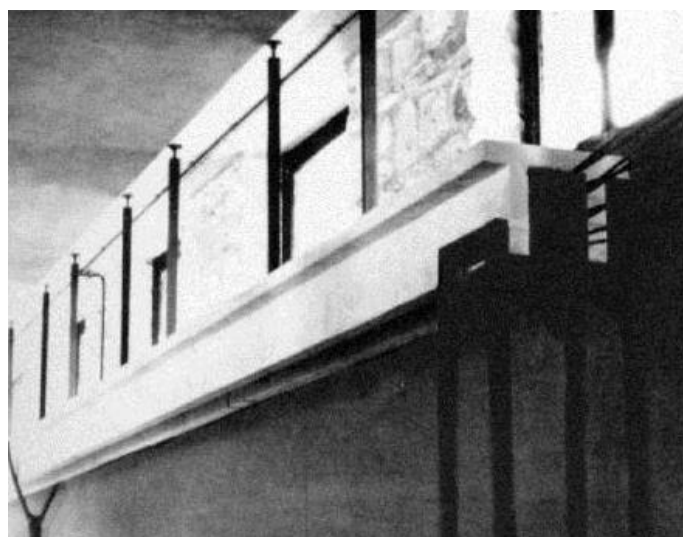


Fig. 60 La trave precompressa realizzata a Carrara nel 1965 [Di Sivo, 2004, p. 31]

Questi esperimenti condotti “in un contesto di operatori qualificati sotto il profilo tecnologico piuttosto che in ambito scientifico o accademico”, “si basano essenzialmente su prove empiriche unite a una rigorosa progettazione geometrica” (Fallacara, Ferrero, Minenna, 2015, p. 6)²¹.

Con la stessa logica di integrazione tra pietra e acciaio è stata realizzata la scala di accesso agli uffici della Sovrintendenza ai monumenti di Verona ai Chiostri di San Fermo a Verona nel 1968, su progetto dell’ingegner Zorzi e dell’architetto Cecchini (Fig. 61). La scala è costituita da sei rampe e da quattro pianerottoli “in marmo massiccio precompresso collegati insieme con una cucitura longitudinale e

²¹ Ferrero M, Rosso F (2015) *Progettazione tecnica e calcolo statico dei sistemi voltati in pietra da taglio*. In: Fallacara G, Ferrero M, Minenna V. *Nuovi Sistemi Voltati Stereotomici: Progetto, Calcolo e Costruzione*. Maglie (LE): Edizioni Gioffreda, 2-8.

trasversale in barre pretese di acciaio speciale” (Di Sivo, 2004, p. 31): il marmo bronzetto pergamena, quindi, non viene utilizzato con funzione di semplice rivestimento ma collabora con la struttura portante. Per effettuare la precompressione del materiale litico è stato adottato il procedimento Dywidag, comunemente impiegato nella progettazione di impalcati da ponte: sono state utilizzate delle barre in acciaio con un diametro di 26 mm, che sono state messe in tensione attraverso un martinetto e “contrastate con dadi a delle piastre terminali in ferro” (Di Sivo, 2004, p. 31).

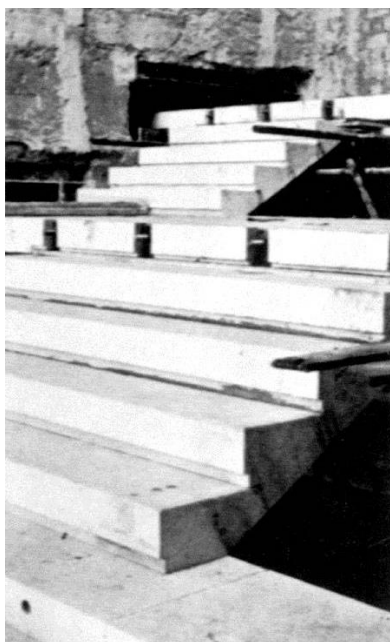


Fig. 61 La scala di accesso agli uffici della Sovrintendenza ai monumenti di Verona
[Di Sivo, 2004, p. 31]

4.2.2. Le ricerche contemporanee

I recenti sviluppi delle strutture in pietra e acciaio sono legati soprattutto all’operato di Peter Rice (1935-92) ed in particolare al “Padiglione del Futuro” costruito in occasione dell’Expò ’92 tenutasi a Siviglia (Dernie, 2003, p. 64). In occasione di questa esposizione che aveva come tema la scoperta, Rice fu chiamato a collaborare con i progettisti del padiglione, Martorell Bohigas Mackay, per realizzare la facciata est che doveva contribuire a sostenere la copertura di forma libera (Brown, 2001, p. 146). La soluzione ideata dall’ingegnere inglese consisteva in un portico lungo 260 m e alto 30 m, costituito da una struttura in granito rosa porriño e da “un sistema di cavi e tiranti ad essa connesso tale da indurre solo sforzi di compressione nei moduli granitici” (Girasante, Potenza, 2006, p. 44)²². La struttura ad archi a tutto sesto e colonne era stata interamente realizzata in laboratorio impiegando moduli in massello di 20x20x140 cm (Fig. 62): i moduli lapidei sono stati assemblati con resina epossidica a piastre quadrate di granito rosa di 80 cm di lato in modo da definire delle “sotto-unità seriali” da montare in cantiere (Girasante, Potenza, 2006, p. 44)²³. Rice, sfruttando al massimo la

²² Ragone M (2006) *Tecnologie e nuove tendenze*. In: Girasante F, Potenza D, a cura di. Dalla pietra all’architettura. Foggia: Claudio Grenzi Editore, 41-45.

²³ Ibidem

resistenza a compressione delle pietra, ha realizzato archi che, grazie alla precompressione effettuata con cavi d'acciaio postesi, lavoravano su una luce di 17,3 m (Brown, 2001, pp. 147, 149).



Fig. 62 Particolare degli archi in pietra armata del Padiglione del Futuro progettati da Rice [Dernie, 2003, p. 65]

L'integrazione della pietra con cavi in acciaio postesi è stata riproposta da Rice nel progetto per la facciata della Cattedrale di Lille del 1999 ma è grazie soprattutto al Padiglione dell'Expò di Siviglia che la tecnica fondata sulla combinazione di pietra e cavi in acciaio ha iniziato a diffondersi nella cultura architettonica contemporanea (Dernie, 2003, p. 64). "La ricerca pionieristica dell'ingegnere inglese, nata dal parallelismo tra le sperimentazioni sul vetro e quelle sulla pietra (..) è stata (..) sviluppata da diversi rappresentanti dell'architettura contemporanea anglosassone" quali Eric Parry e Michael Hopkins (Turrini, 2009).

Il primo ha impiegato, infatti, pilastri prefabbricati in pietra armata precompressa nell'Edificio per uffici a Finsbury Square. Invece, i risultati della ricerca intrapresa da Hopkins a partire dagli anni '90 del secolo scorso e tesa ad attualizzare la pietra in dispositivi costruttivi portanti parzialmente prefabbricati e assemblati in cantieri razionalizzati, sono la Portcullis House per il parlamento londinese (1992-2001) e il Queen's Building di Cambridge (1993-95) (Turrini, 2009).

Esito ultimo della "fase empirico/sperimentale" o di ricerca sulla pietra naturale armata si può considerare il Santuario di Padre Pio a San Giovanni Rotondo progettato da Renzo Piano (Fallacara,

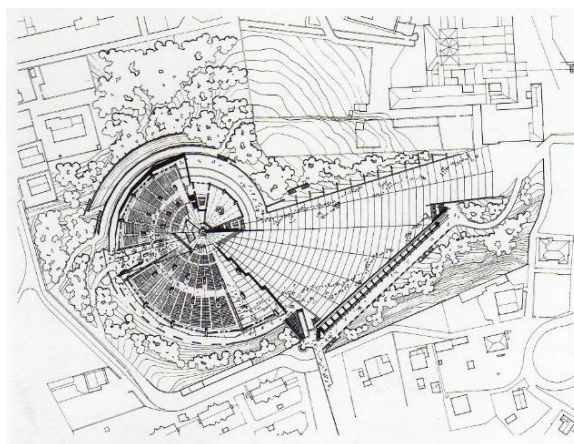
Ferrero, Minenna, 2015, p. 6)²⁴. Quest'opera “dopo decenni di oblio, di oscuramento estetico-figurativo oltre che tecnico” ha riproposto la “forma dell'arco” nella grande architettura monumentale (Acocella, 2004, p. 356).

Attualmente, la ricerca sulla pietra armata viene condotta anche in ambito accademico: alcuni studi sperimentali hanno testato, infatti, le prestazioni di pannelli di rivestimento o di travi parallelepipedo realizzati in pietra armata con acciaio o con nuovi materiali, quali polimeri rinforzati in fibre di carbonio, sottolineando l'efficacia e la fattibilità di questo tipo di tecnica costruttiva (Metalssi et al., 2013; Pedreschi, 2013; Ye et al., 2014).

²⁴ Ferrero M, Rosso F (2015) *Progettazione tecnica e calcolo statico dei sistemi voltati in pietra da taglio*. In: Fallacara G, Ferrero M, Minenna V. *Nuovi Sistemi Voltati Stereotomici: Progetto, Calcolo e Costruzione*. Maglie (LE): Edizioni Gioffreda, 2-8.

4.2.3. Schede di analisi di casi di studio

AULA LITURGICA PADRE PIO



Pianta del livello principale
[Dernie, 2003, p. 158]



L'esterno dell'Aula Liturgica Padre Pio
[Potenza, 2005, p. 45]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

San Giovanni Rotondo (FG), Italia
1991-2004

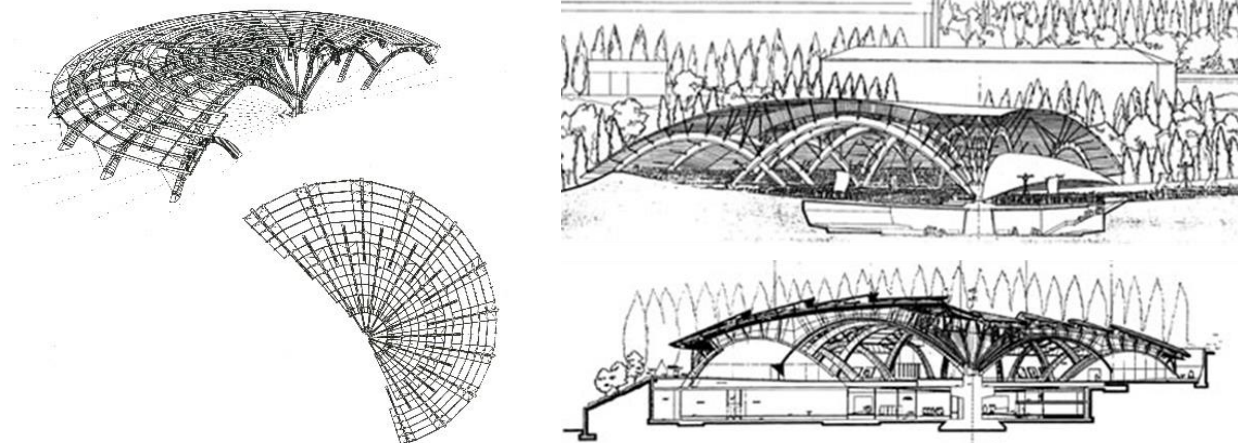
PROGETTISTA

Renzo Piano

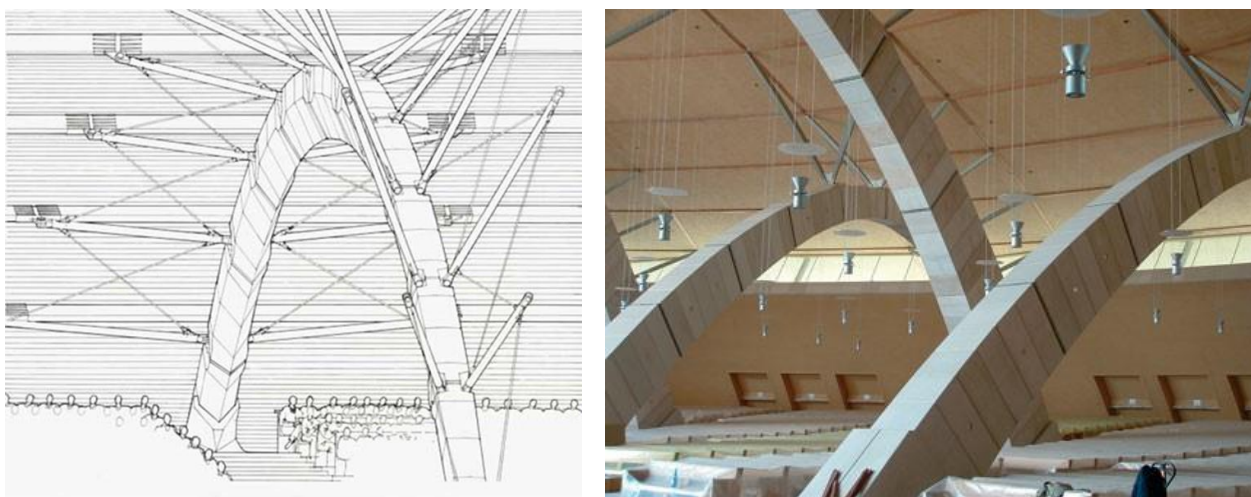
DESCRIZIONE DEL PROGETTO

La chiesa ha una struttura costituita da arcate in pietra armata disposte in modo radiale. Queste sono state realizzate grazie al calcolo strutturale computerizzato e alle tecniche di taglio a controllo

numerico (CNC). Si distinguono in due gruppi: le arcate del primo gruppo hanno luci maggiori e si impostano tra il punto in cui è collocato l'altare e il perimetro dell'Aula, sostenendo la parte più alta della copertura; le arcate del secondo gruppo hanno luci inferiori e sono disposte esternamente ed in sequenza alternata rispetto a quelle del primo gruppo in modo da aumentare il numero dei punti di appoggio della copertura. La campata maggiore ha una larghezza di 45 m e un'altezza di 16 m e costituisce uno tra i più grandi archi in pietra portante mai realizzati al mondo. La copertura impostata sulle arcate è stata realizzata in legno lamellare e rame. La facciata principale è in acciaio e vetro.



Schema assonometrico e planimetrico della struttura ad archi convergenti;
il progetto iniziale di Piano e una sezione del complesso
[Acocella, 2004, pp. 357, 360-361]



Disegno progettuale iniziale di uno degli archi in pietra di sostegno della copertura;
veduta parziale delle arcate
[Acocella, 2004, pp. 359, 370]

MATERIALE LAPIDEO

Bronzetto di Apricena (pietra calcarea pugliese con elevata resistenza a compressione)

TECNICA COSTRUTTIVA

Gli archi sono formati da 13 “pacchetti litici pre-assemblati a terra” detti maxiconci costituiti da 5 o 6 conci di pietra sagomati da macchine computerizzate e indicati nel protocollo di costruzione con la dicitura di miniconci (Pongratz, Perbellini, 2009, p. 78).

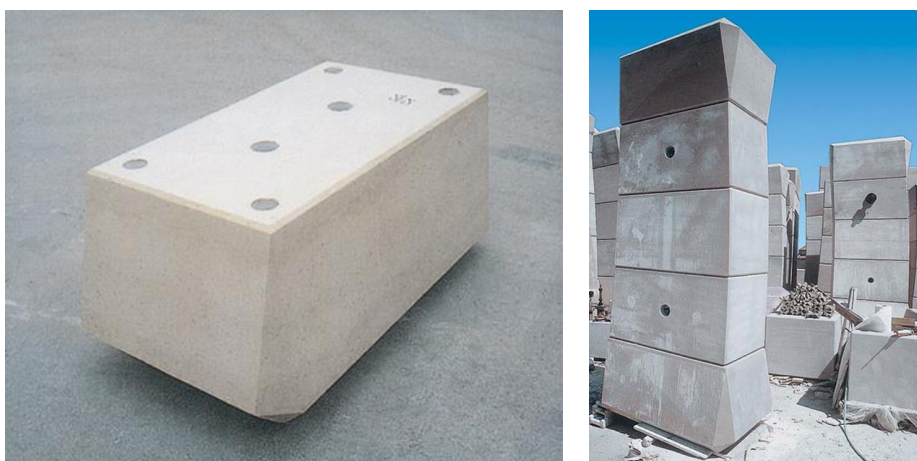
I miniconci presentano sulle facce di giunzione 6 fori per l'alloggiamento delle guaine in cui sono stati inseriti gli elementi d'acciaio usati per armare le arcate strutturali. Sulle facce laterali presentano, invece, due coppie di fori necessarie per la movimentazione durante la fase di costruzione. Tutti i fori sono stati realizzati con perforatrici computerizzate. Dei 6 fori praticati sulle facce di giunzione dei miniconci, due sono di 120 mm e quattro di 45 mm: i primi accolgono i trefoli dell'armatura di post-compressione; i secondi accolgono i trefoli dell'armatura secondaria o lenta.

Per formare i maxiconci, si sono collegati i miniconci con del collante fibrorinforzato ad altissime prestazioni dello spessore di circa 3 mm. Sulla superficie su cui è stata stesa la resina sono state posizionate ad intervalli regolari delle fascette di acciaio inox dello spessore di 2 mm per garantire la formazione di un giunto costante tra le facce di giunzione dei miniconci.

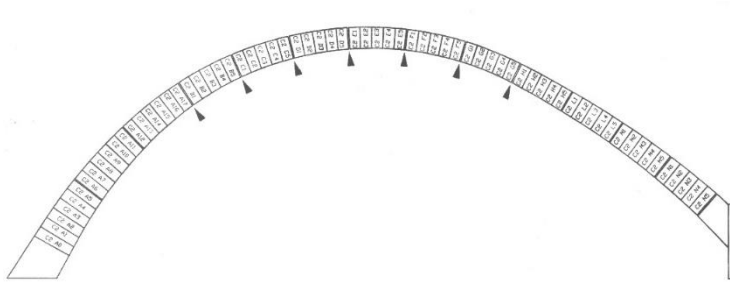
I maxiconci sono stati assemblati utilizzando centine metalliche di sostegno. Nei giunti tra maxiconci contigui sono state inserite delle piastre di acciaio. Tra gli elementi lapidei e la piastra d'acciaio è stato eseguito, inoltre, il getto di una malta fibrorinforzata. All'apice di ogni piastra sono stati successivamente innestati i puntoni metallici a V di sostegno della copertura.

Le arcate lapidee sono state armate con cavi d'acciaio che sono stati inseriti all'interno delle guaine predisposte nei fori dei miniconci, attraverso specifici macchinari.

I piedi d'imposta degli archi sono stati realizzati in calcestruzzo armato gettato in opera e sono stati conformati in modo da raccordarsi alla sezione dei maxiconci in pietra. Sono in parte cavi: presentano, infatti, delle aperture sulle facce laterali che hanno consentito, al termine della fase di montaggio dell'arcata, il tensionamento dei trefoli di armatura. Su questi elementi di imposta sono state posizionate delle piastre d'acciaio di 2 cm di spessore, simili a quelle interposte tra i vari maxiconci. Dopo il tensionamento dei cavi, all'interno delle guaine inserite nei fori dei miniconci è stata iniettata della malta fluida in modo da rendere solidale la struttura dell'arco e il sistema delle armature.



Uno dei miniconci e alcuni maxiconci
[Acocella, 2004, pp. 364, 366]



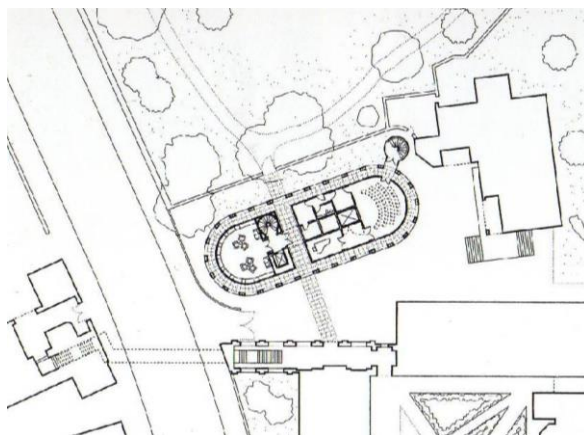
Arcata strutturale: disegno di identificazione dei miniconci;
dettaglio di uno degli appoggi in calcestruzzo
[Acocella, 2004, pp. 362, 369]

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

Renzo Piano usa un materiale locale per legare l'edificio al contesto ma attualizza l'elemento tecnico tradizionale dell'arco attraverso la sperimentazione di una tecnica costruttiva innovativa. Il materiale viene, inoltre, impiegato per la sua capacità di esprimere "la forza espressiva dello spazio sacro" (Potenza, 2005, p. 7).

BIBLIOGRAFIA: Acocella, 2004, pp. 356-371; Dernie, 2003, pp. 158-163; Pongratz, Perbellini, 2009, pp. 76-78; Potenza, 2005; Turrini, 2009.

QUEEN'S BUILDING, EMMANUEL COLLEGE



Inquadramento: Auditorium, Master's Lodge, Old Library
[Dernie, 2003, p. 100]



Vista dell'esterno dell'auditorium
[Dernie, 2003, p. 101]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

Cambridge, UK
1993-1995

PROGETTISTA

Michael Hopkins

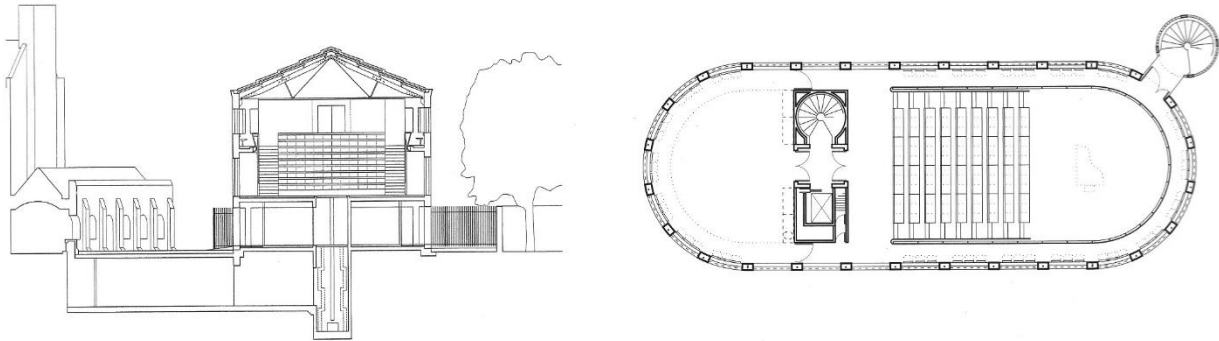
DESCRIZIONE DEL PROGETTO

L'edificio che ospita l'auditorium è noto come Queen's Building ed è inserito nella corte principale dell'Emmanuel College, progettato in parte da Wren nel XVII secolo ed interamente realizzato in pietra di Ketton.

L'edificio si articola su tre piani e presenta una facciata lapidea spessa 40 cm. È caratterizzato da un'intelaiatura portante costituita da pilastri in pietra armata e da piattabande litiche di collegamento.

I pilastri e le piattabande definiscono al piano terra un portico continuo e suddividono il resto della facciata in maglie quadrate, contraddistinte da specchiature opache o trasparenti: i campi definiti dal reticolo strutturale, infatti, sono stati tamponanti con pannelli prefabbricati rivestiti in pietra e con ampie vetrate rispettivamente al primo e all'ultimo piano dell'edificio.

La leggibilità dell'intelaiatura portante è stata evidenziata nei prospetti attraverso due strategie progettuali: sono state scelte, infatti, dimensioni differenti per i conci delle specchiature e dei pilastri ed è stata realizzata una sottile scanalatura lungo il perimetro esterno dei pannelli prefabbricati di tamponamento.



Sezione trasversale e planimetria del secondo piano

[Dernie, 2003, p. 101]

MATERIALE LAPIDEO

Pietra di Ketton (calcare del Lincolnshire)

TECNICA COSTRUTTIVA

La struttura dell'edificio è costituita da 28 colonne in conci di pietra piena spesse 400 mm e dotate di armatura post-tesa a tensione modificabile per resistere ai carichi laterali: l'armatura è realizzata in barre d'acciaio inossidabile.

Al livello di ogni piano è stato inserito un blocco prefabbricato che permette di ripartire il carico e che è dotato di un accessorio in acciaio inossidabile che consente l'ispezione e la sostituzione. Questi blocchi cuscinetto sopportano anche la spinta delle piattabande, composte ciascuna da 5 conci cuneiformi in pietra di Ketton.

Le spinte delle piattabande dei lati rettilinei dell'edificio sono auto-bilanciate e, quindi, le colonne che le sostengono non tendono ad inflettersi. Le colonne delle porzioni curve della facciata, invece, sono soggette ad una spinta verso l'esterno e sono state, pertanto, collegate ai solai in calcestruzzo attraverso i blocchi cuscinetto: i solai, infatti, per la contrazione dovuta al ritiro, esercitano sulle colonne una forza sufficiente per controbilanciare l'azione delle piattabande. Al livello della gronda le spinte sono controbilanciate, invece, da una cornice prefabbricata.

Le prove eseguite sui pilastri in pietra armata hanno dimostrato che essi possono sopportare una tensione permanente di 2 N/mm^2 ed una tensione massima di 4 N/mm^2 in presenza di carichi laterali. I risultati delle prove hanno mostrato, inoltre, che per garantire la distribuzione del carico tra i conci lapidei e, quindi, il corretto funzionamento strutturale, risultava necessario l'impiego della malta nei

giunti: nella costruzione degli elementi strutturali dell'edificio è stata utilizzata, pertanto, una malta di calce.

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

Hopkins sceglie di impiegare la pietra di Ketton per inserire il nuovo edificio nel complesso storico dell'Emmanuel college. Tuttavia, impiega la pietra in modo innovativo, sperimentando le possibilità espressive di un'architettura massiva in pietra portante armata.

BIBLIOGRAFIA: Dornie, 2003, pp. 100-103; Turrini, 2009.

PORTCULLIS HOUSE



Vista dell'edificio affacciato sul Tamigi
[Turrini, 2007a, su <http://www.architetturadi pietra.it>]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

Londra, UK

1992-2001

PROGETTISTA

Michael Hopkins

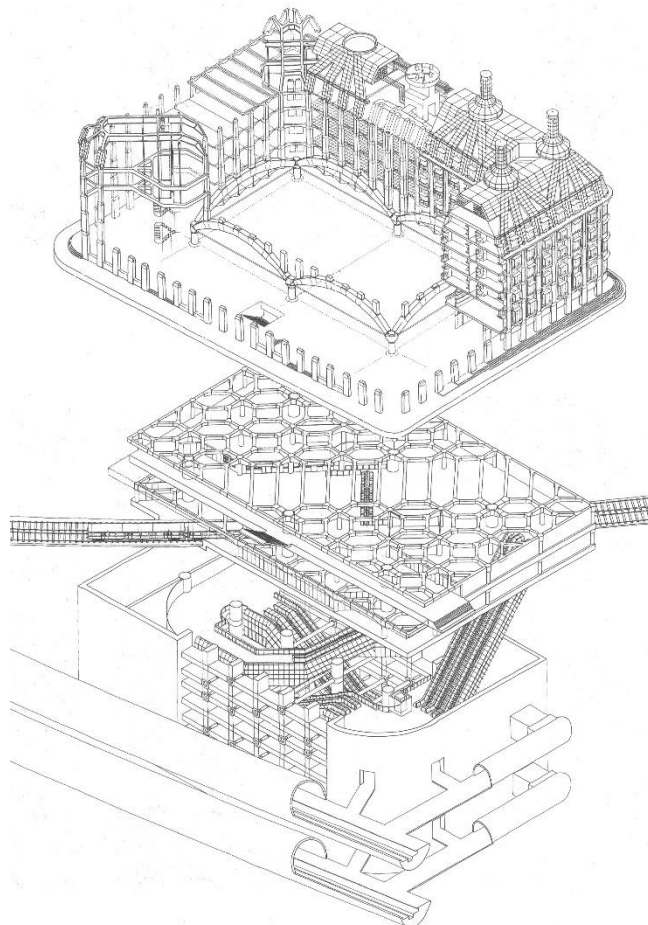
DESCRIZIONE DEL PROGETTO

La Portcullis House costituisce la nuova sede per il Parlamento britannico. Ospita sale riunioni, biblioteche, uffici per i deputati, ristoranti e negozi a servizio anche del vicino Parlamento di Westminster. L'edificio presenta un impianto a corte e si articola su sette piani. Gli elementi di collegamento verticale sono ubicati al centro dei quattro angoli della costruzione e la distribuzione ai singoli piani è consentita da corridoi centrali. La corte interna è protetta da una copertura realizzata in vetro, acciaio e travi di legno lamellare.

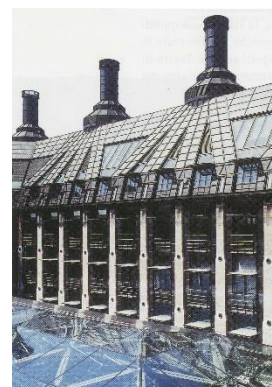
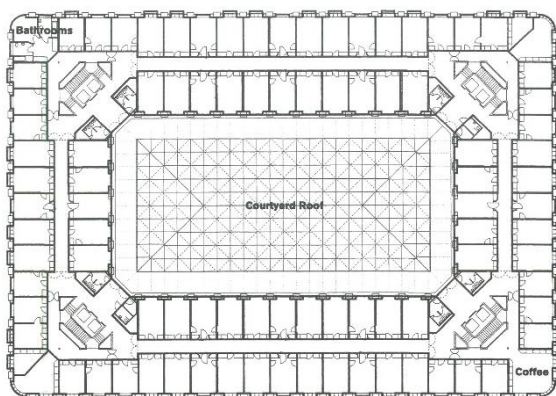
La Portcullis House è stata costruita al di sopra della stazione della metropolitana di Westminster, uno dei progetti pertinenti all'ampliamento della Jubilee Line conclusosi nel 1999: la presenza della metropolitana ha rappresentato un importante vincolo per la definizione del sistema portante dell'edificio.

I prospetti sono caratterizzati da pilastri rastremati in pietra armata che presentano, in corrispondenza di ogni livello, degli elementi marcapiano in calcestruzzo opportunamente sagomati: questi elementi costituiscono parte integrante delle solette prefabbricate dei solai. I pilastri suddividono le facciate in campiture, tamponate dalle superfici vetrate o metalliche di finestre e *bow-windows*. Gli infissi, le schermature e le veneziane delle aperture, infatti, sono stati realizzati in alluminio anodizzato color

bronzo. Le campiture individuate dal sistema dei pilastri sono caratterizzate anche dalla presenza di condutture di ventilazione rivestite in alluminio. Queste ultime sono raccordate a dei camini solari visibili al livello della copertura dell'edificio, che contribuiscono all'efficace climatizzazione degli ambienti interni.



Esploso assometrico della stazione di Westminster e della Portcullis House
 [Paschini, 2000, p. 68]



Pianta di un piano per uffici e viste della copertura in vetro della corte interna
 [Donati, 2001, p. 46]

MATERIALE LAPIDEO

Arenaria di Birchover di colore rosato e granito bruno di Dartmoor (utilizzato solo al piano terreno)

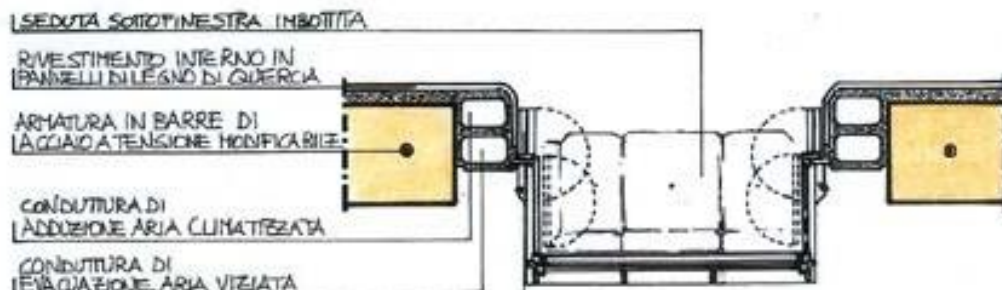
TECNICA COSTRUTTIVA

La struttura è costituita da pilastri rastremati realizzati con conci di pietra regolari di dimensioni modulari variabili tra 120x60x30 cm e 60x60x30 cm. I pilastri presentano un'armatura in acciaio post-tesa a tensione modificabile inserita all'interno dei conci lapidei. Sono parzialmente prefabbricati e sono dotati in corrispondenza di ogni livello di nodi-marcapiano in calcestruzzo con cerniere in acciaio ricoperte da borchie in alluminio. Questi nodi-marcapiano costituiscono parte integrante delle solette "ad ala di gabbiano" dei solai realizzate in calcestruzzo armato precompresso (Turrini, 2007a; Donati, 2001). Le solette che hanno dimensioni pari a 13,8x3,6 m e spessore variabile tra 12 e 25 cm, possono assestarsi per rotazione grazie al tipo di giunto impiegato.

I pilastri in pietra che scandiscono i prospetti esterni dell'edificio trasferiscono i carichi sui setti pertinenti alla sottostante stazione della metropolitana. I pilastri dei prospetti che affacciano sulla corte interna dell'edificio, invece, scaricano sui sei archi in calcestruzzo parzialmente prefabbricati: gli archi sono dotati di catene metalliche e sono sostenuti da sei pilastri in calcestruzzo, pertinenti anch'essi alla struttura portante della stazione di Westminster.



Dettaglio della soluzione angolare di facciata
[Turrini, 2007a, su <http://www.architetturadi pietra.it>]



Dettaglio costruttivo
[Turrini, 2007a, su <http://www.architetturadi pietra.it>]



Una delle solette ad ala di gabbiano e il cantiere dell'edificio
[Donati, 2001, p. 48]

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

Hopkins sceglie di impiegare la pietra per inserire il nuovo edificio in un contesto urbano caratterizzato dalla presenza di opere storiche monumentali “dall’alto valore istituzionale e simbolico” quali il Big Ben, il Tower Bridge e il Palazzo di Westminster (Turrini, 2007a). Alla volontà di rispettare i valori riconosciuti nel contesto urbano, si aggiunge la volontà di usare la pietra in modo innovativo e di sperimentare le possibilità espressive di un’architettura massiva in pietra portante armata.

BIBLIOGRAFIA: Donati, 2001, pp. 40-48; Paschini, 2000, pp. 68-69; Turrini, 2007a.

EDIFICIO PER UFFICI A FINSBURY SQUARE



Particolare dei prospetti
[Dernie, 2003, p. 201]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

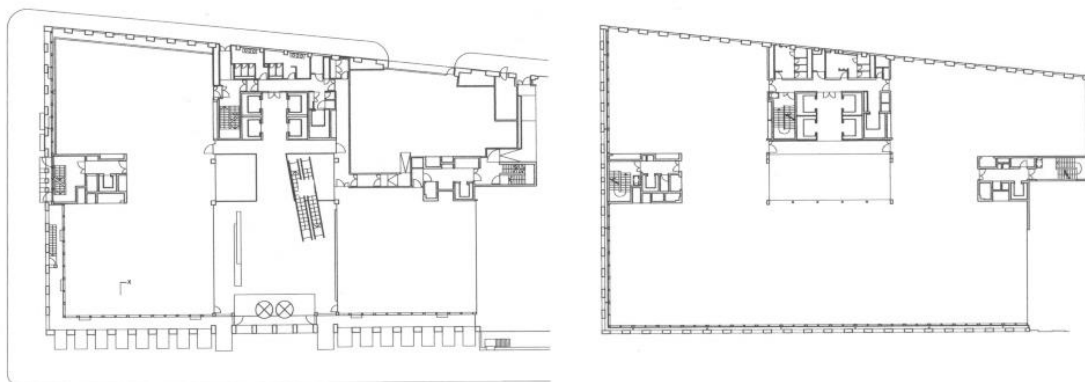
Londra, UK
2002

PROGETTISTA

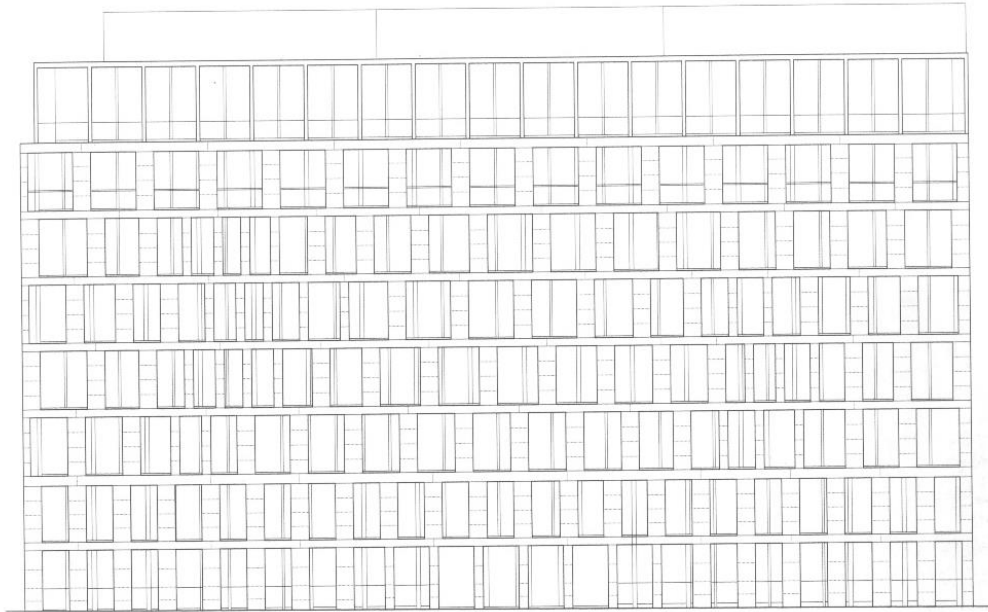
Eric Parry Architects
Ingegneri strutturisti Whitby, Bird and Partners

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

L'edificio per uffici si sviluppa su sei piani. La facciata sulla piazza Finsbury è caratterizzata da un ritmo tripartito. Il ritmo primario è scandito da colonne in pietra armata mentre il ritmo secondario è definito dall'alternanza di elementi in acciaio inossidabile più spessi e più sottili disposti con un passo di 1,5 m. Questi elementi sostengono le vetrate, che risultano arretrate di 500 mm rispetto alle colonne lapidee. Gli elementi d'acciaio più spessi contengono anche i discendenti per l'acqua piovana. Il prospetto su Wilson Street, invece, è caratterizzato da pannelli prefabbricati rivestiti in pietra.



Piante del piano terra e di un piano tipo
[Dernie, 2003, p. 203]



Prospetto
[Dernie, 2003, p. 203]

MATERIALE LAPIDEO

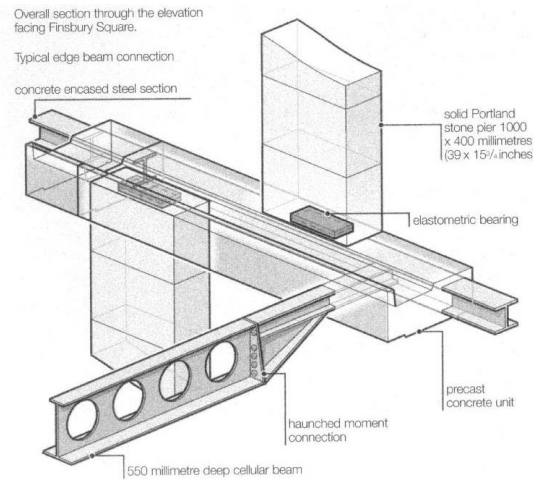
Pietra di Portland

TECNICA COSTRUTTIVA

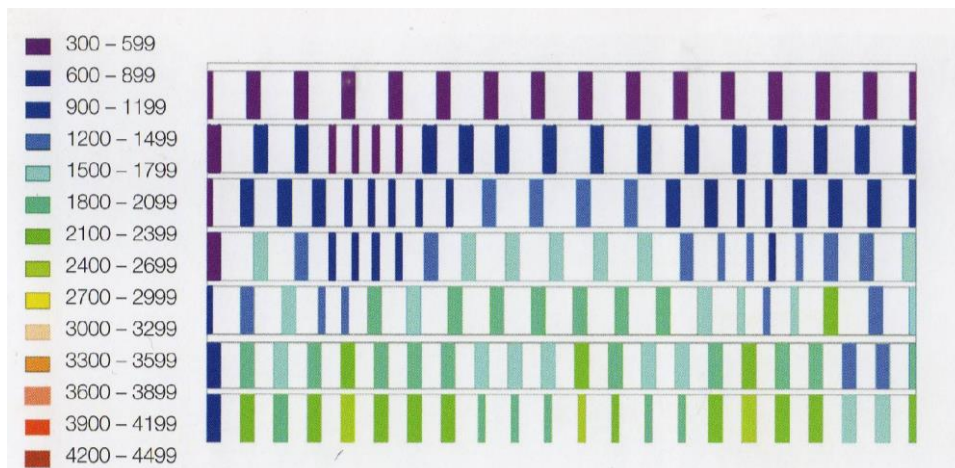
Il 237 pilastri della facciata sono in pietra armata precompressa. Pesano ognuno più di 5,5 tonnellate ed hanno dimensioni variabili, con altezze superiori a 3,8 m.

Sono stati costruiti fuori opera, in un laboratorio di assemblaggio, con 4 blocchi di pietra ciascuno adottando una tolleranza dimensionale di $\pm 1,5$ mm. In tutti i blocchi sono stati praticati due fori di 50 mm di diametro in cui alloggiare le barre di armatura in acciaio inossidabile di 20 mm di diametro. I blocchi di base e di sommità delle colonne, inoltre, sono stati lavorati per realizzare delle rientranze di 140 mm destinate ad accogliere la piastra finale, la rondella e la filettatura sporgente delle armature. I pilastri, 7 giorni dopo il completo assemblaggio, sono stati precompressi con martinetti idraulici. Eseguita la precompressione, è stata iniettata intorno alle barre di armatura una malta di cemento e sabbia.

Le colonne sono collegate alle travi di facciata grazie a delle piastre di trasferimento e a dei cuscinetti di appoggio elastomerici mantenuti nella posizione di progetto con caviglie di acciaio inossidabile. Le travi di facciata sono state prefabbricate fuori opera: sono state realizzate ricoprendo profilati UB in acciaio con pietra ricostituita con aggregati di calcare dolomitico. Esse sono strutturalmente connesse con travi alveolari alte 550 mm, disposte trasversalmente alla facciata su luci di 15 m.



Dettaglio assonometrico della giunzione tra la struttura in acciaio e i pilastri della facciata
[Dernie, 2003, p. 204]



Analisi della distribuzione dei carichi sugli elementi strutturali della facciata
[Dernie, 2003, p. 206]

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

L'uso della pietra di Portland per il nuovo edificio è stato imposto dal regolamento edilizio: il contesto urbano di Finsbury Square, infatti, è caratterizzato interamente dall'uso di questa pietra. Parry la impiega in modo innovativo e sperimenta le possibilità espressive di un'architettura massiva in pietra portante armata. La tecnica costruttiva adottata, inoltre, permette all'architetto di relazionare lo spazio interno dell'edificio con quello pubblico della piazza e di comporre la massività della pietra con la leggerezza e la trasparenza delle vetrate in un suggestivo gioco di ombre e di luci.

BIBLIOGRAFIA: Dernie, 2003, pp. 200-207; Turrini, 2009.

4.3. GABBIONI

4.3.1. Cenni storici

La tecnica costruttiva dei gabbioni è stata impiegata in architettura solo dalla fine del XX secolo. Tuttavia, il sistema “a gabbioni” inteso come pratica costruttiva basata sull’impilamento di grandi cesti e successivamente di contenitori in rete metallica, risale al XVI secolo ed è stata sviluppata dai costruttori di opere militari e idrauliche per realizzare sistemi di contenimento del terreno (Turrini, 2007b). Tale pratica, per la sua semplicità e velocità di esecuzione, si è diffusa rapidamente e continua ad essere impiegata nei campi dell’ingegneria naturalistica e della progettazione paesaggistica: i gabbioni in quanto dispositivi autoportanti resistenti per gravità sia alle spinte laterali che ai carichi statici verticali sono utilizzati, infatti, per realizzare “muri di sostegno e di contenimento per argini, terrazzamenti, pendii collinari, scarpate stradali, e in generale in opere anti-erosione e anti-frana di difesa del suolo e di progettazione del verde e del paesaggio, a piccola e grande scala” (Turrini, 2007b) (Fig. 63, Fig. 64).



Fig. 63 Muro in gabbioni realizzato nella stazione ferroviaria di Perca-Plan de Coronas (Bz)
[foto Silvia Mariani]

Dal XVI secolo ad oggi la tecnologia dei gabbioni si è evoluta dal punto di vista costruttivo e produttivo.

I primi gabbioni in rete metallica indicati con il termine di “*sack gabion*” erano tubolari ed erano usati nei corsi d’acqua per contrastare fenomeni di erosione (Dernie, 2003, p. 52). Questa tipologia è ancora impiegata soprattutto nell’idraulica fluviale per la protezione della base degli argini (CIRIA, CUR, CETMEF, 2007). I gabbioni scatolari sono stati introdotti successivamente per avere maggiore flessibilità costruttiva e poter realizzare strutture di forma più regolare come i muri di contenimento (Dernie, 2003, p. 52). È stata sviluppata anche una terza tipologia nota come “*gabion mattress*” caratterizzata da una dimensione in altezza molto inferiore rispetto a quelle in lunghezza e in larghezza, che è utilizzata per il controllo dell’erosione del letto dei fiumi (CIRIA, CUR, CETMEF, 2007; Enviromesh).

Attualmente la tecnologia si è standardizzata sul piano produttivo consentendo un miglioramento della qualità dei gabbioni e la riduzione dei tempi di installazione (Turrini, 2007b; Enviromesh 2007,

2017). I gabbioni di forma parallelepipedica, infatti, sono prodotti industrialmente con dimensioni standard, utilizzando reti a doppia torsione a maglia esagonale o reti elettrosaldate a maglia quadrata o rettangolare (Enviromesh). Le dimensioni standard delle reti a maglia esagonale sono pari a 80x100 mm mentre quelle delle reti a maglia rettangolare sono di 50x80 mm (Turrini, 2007b). Le reti a maglia quadrata, invece, hanno generalmente un passo pari a 76,2 mm ma possono essere prodotte anche con aperture di 25,4 mm (Enviromesh, 2007). Le dimensioni tipiche delle unità costruttive modulari, invece, sono pari a 100x100x200 cm (Turrini, 2007b; CIRIA, CUR, CETMEF, 2007) ma è possibile realizzare gabbioni con dimensioni personalizzate, pari ad ogni multiplo dell'apertura della maglia (Enviromesh 2007, 2017). La rete metallica viene protetta dalla corrosione attraverso un rivestimento Galfan, ovvero in lega di zinco-alluminio, o attraverso un processo di galvanizzazione: questa seconda tipologia di ricoprimento protettivo appare preferibile poiché il processo di galvanizzazione, venendo eseguito dopo il taglio della rete in pannelli, interessa tutta la superficie della stessa, comprese le sezioni di estremità (Enviromesh, 2007). Si possono impiegare anche dei rivestimenti aggiuntivi in materiali polimerici, tipicamente in PVC (Enviromesh 2007, 2017; CIRIA, CUR, CETMEF, 2007). I moduli costruttivi, infine, possono essere anche realizzati in acciaio inossidabile ma il loro costo è superiore di 3-4 volte rispetto ai moduli con rivestimento Galfan o in zinco (Enviromesh, 2007).

Attualmente, si sono diffusi anche processi di prefabbricazione fuori opera: aziende specializzate, infatti, assemblano sul piano i diversi pannelli che compongono le facce del modulo costruttivo con elementi di connessione che ne consentono la rotazione in modo tale da facilitare l'imballaggio e il trasporto in cantiere. In opera i pannelli vengono ruotati nella posizione corretta e vengono eseguite le operazioni di legatura finali che conferiscono ad ogni unità la conformazione parallelepipedica (Enviromesh).

Il riempimento dei gabbioni viene solitamente realizzato con spezzoni di pietra naturale derivanti da cave, che sono molto apprezzati per le valenze estetiche e il buon interbloccaggio (Enviromesh, 2017). Possono essere impiegati anche aggregati lapidei, ciottoli o scarti di lavorazione o di estrazione: il riempimento con aggregati lapidei di piccole dimensioni viene realizzato per gabbioni con maglie a piccola apertura (76,2x76,2 mm; 50,8x25,4 mm; 25,4x25,4 mm) rinforzati internamente da diaframmi mentre il riempimento con i ciottoli, visto il limitato interbloccaggio, è eseguito per gabbioni in reti con filo di diametro superiore a 3 mm per evitare eccessive deformazioni (Enviromesh 2007, 2017). In generale, il pietrame selezionato non deve essere gelivo o friabile e deve presentare un buon assortimento dimensionale, con una pezzatura media pari a 1,5-2 volte la dimensione di apertura della maglia della rete (Turrini, 2007b). Le tipologie di pietra tipicamente utilizzate sono l'arenaria, il calcare, il granito e il basalto (Enviromesh 2007, 2017). Oltre alla pietra possono essere impiegati come materiali di riempimento anche mattoni e frammenti di calcestruzzo derivanti dalla demolizione di elementi strutturali (Enviromesh 2007, 2017).

Il riempimento dei gabbioni può essere eseguito meccanicamente o a mano: generalmente si adottando metodi di vibrocompattazione e si opera un leggero *overfilling*, per evitare che l'assestamento del pietrame generi vuoti e diminuisca le prestazioni di resistenza statica dell'elemento (Turrini, 2007b).

Adottando un rivestimento in membrana geotessile si può realizzare la massa del modulo costruttivo con riempimento granulare e lo strato più esterno a vista con elementi litici di pezzatura più grande: questa tecnica è usata per creare i cosiddetti "*lined gabion o bastion*" (Dernie, 2003, p. 52).

I moduli costruttivi possono avere sezione quadrata, rettangolare o trapezoidale e vengono assemblati in sito secondo diverse configurazioni: i gabbioni adiacenti, infatti, vengono collegati attraverso delle giunzioni per definire strutture monolitiche a facce verticali, inclinate o a profilo scalettato.



Fig. 64 Muro di contenimento a gabbioni (Royal Tunbridge Wells, Kent)
[<http://www.hy-ten.co.uk>]

4.3.2. Le ricerche contemporanee e le potenzialità della tecnica costruttiva

Dagli anni Novanta del XX secolo, anche grazie ai perfezionamenti produttivi introdotti, si è iniziato ad impiegare i gabbioni come moduli costruttivi in architettura (Turrini, 2007b). I primi progettisti che hanno utilizzato questa tecnica sono stati Ian Ritchie e John Smart: il primo ha impiegato i gabbioni nella Terrasson Cultural Greenhouse (Terrasson, Francia, 1999) e nel London Regatta Centre (Londra, UK, 1999) sfruttandone le potenzialità prestazionali connesse con l'elevata inerzia termica. Tuttavia, “il muro in gabbioni viene elevato per la prima volta a vero e proprio sistema costruttivo architettonico e medium espressivo” nell'edificio della Cantina vinicola Dominus progettato da Herzog & de Meuron in California (1995-97) (Turrini, 2007b). Dopo la realizzazione di quest'edificio il processo di trasferimento della tecnica costruttiva “dal campo del *landscape design* all'architettura” è uscito dalla “dimensione sperimentale” e i gabbioni a riempimento lapideo sono stati più diffusamente impiegati negli edifici (Turrini, 2007b).

Dalla fine degli anni '90, inoltre, i gabbioni assottigliati fino a spessori di 10-15 cm sono stati impiegati anche come elementi di rivestimento non autoportanti collegati a strutture metalliche o in calcestruzzo armato. Esempi di questo tipo di applicazione sono l'edificio residenziale plurifamiliare progettato a Montpellier dallo studio Edouard Francois & Associés (1997-2000) e la casa privata Haus 9x9 progettata ad Augsburg da Titus Bernhard (2002-03). La soluzione costruttiva impiegata a Montpellier dallo studio Edouard Francois & Associés si basa sull'ibridazione tra la tecnica esecutiva dei gabbioni metallici a riempimento lapideo e il processo di prefabbricazione di pannelli di chiusura in calcestruzzo armato (Turrini, 2007b). Ricerche progettuali su pannelli prefabbricati in calcestruzzo con rivestimento esterno in gabbioni metallici riempiti con frammenti di pietra, sono state condotte in Francia anche da Bertrand Bonnier (Turrini, 2007b): egli, infatti, ha impiegato questo tipo di pannelli compositi per il livello inferiore della sede del Centro Ricerche Agronomiche di Reims (1992-1996) e per il basamento dell'edificio CESNAC all'aeroporto di Bordeaux (1993) (Fig. 65). Bonnier insieme a Michel Guthmann, inoltre, ha introdotto una tecnica costruttiva innovativa che richiama quella dei gabbioni pur non essendo basata sull'impiego di moduli parallelepipedici metallici: questa tecnica, infatti, prevede che il materiale litico sciolto di rivestimento sia trattenuto da una rete

metallica fissata alla struttura portante dell'edificio. La tecnica è stata applicata nell'edificio residenziale Logements Les Galets di Pont-Audemer (1999-2003). Una soluzione simile è stata utilizzata anche nell'edificio residenziale plurifamiliare Sei Unità progettato da Gino Guarneri e Roberto Mascazzini a Sesto San Giovanni (MI) nel 2015.



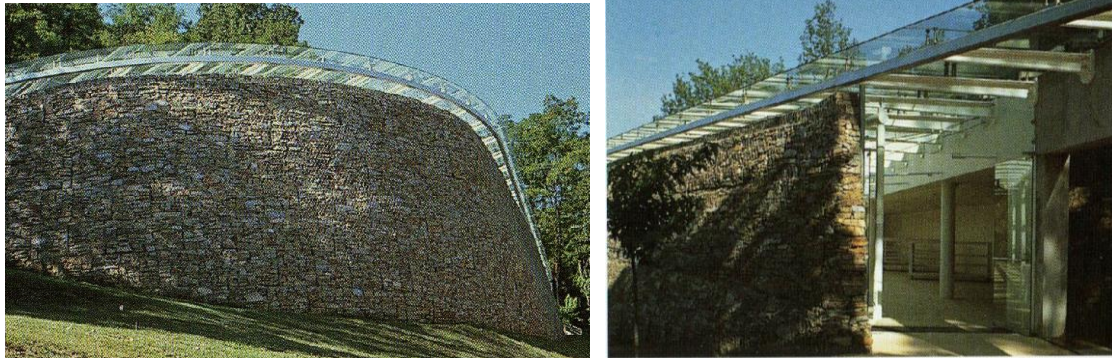
Fig. 65 La sede del Centro Ricerche Agronomiche di Reims e l'edificio CESNAC all'aeroporto di Bordeaux, progettati da Bertrand Bonnier
[<http://www.archi-guide.com>]

I vantaggi della tecnica costruttiva a gabbioni risiedono nella sua economicità, nella possibilità di impiegare come riempimento elementi di pietra locale ottenuti dalla demolizione di edifici o da scarti di cava e nella semplicità del processo costruttivo che consente l'installazione anche attraverso l'impiego di manodopera locale (Dernie, 2003, p. 52). I gabbioni, inoltre, sono durevoli, richiedono interventi di manutenzione minimi, ed essendo smontabili e facili da trasportare, possono essere riutilizzati (Turrini, 2007b). Inoltre, la fabbricazione e la posa in opera ecocompatibili e a basso impatto energetico e le notevoli proprietà di inerzia termica li rendono adatti a realizzare edifici ad alta efficienza energetica. I gabbioni presentano, infine, “un'elevata capacità di integrazione espressiva con il paesaggio naturale” poiché reinterpretano l'aspetto di dispositivi murari irregolari a secco tipici della costruzione tradizionale (Turrini, 2007b). Questi vantaggi sono stati sottolineati da alcune ricerche (Conti et al., 2016; Cumo et al., 2015) finalizzate alla progettazione di edifici ad alta decostruibilità, a basso impatto ambientale e ad elevata semplicità costruttiva, nell'ipotesi di un loro inserimento in aree naturali protette o di particolare valore. Attraverso la metodologia del *Life Cycle Assessment* nota anche come LCA (ISO 14040, 2006) è stato dimostrato, inoltre, che l'impatto ambientale di pareti verticali realizzate con moduli a gabbioni è molto inferiore a quello di pareti tradizionali realizzate con blocchi in laterizio porizzato vista la minore energia richiesta nelle fasi di produzione, trasporto, gestione e smaltimento (Milano, 2010).

La tecnica costruttiva a gabbioni impiegata per realizzare muri autoportanti o rivestimenti risponde, in conclusione, alle esigenze di sostenibilità dell'architettura contemporanea. La sua diffusione dimostra anche come “nelle tendenze attuali dell'architettura in pietra le categorie concettuali ed estetiche di espressiva solidità, rude schiettezza materica, primitivismo ciclopico, polimorfismo naturalistico, rappresentino un contraltare praticabile e alternativo ai valori di leggerezza, regolarità, minimalismo, ermetismo figurale di una certa contemporaneità” (Turrini, 2007b).

4.3.3. Schede di analisi di casi di studio

GREENHOUSE



La parete autoportante in gabbioni e l'entrata
[Dernie, 2003, p. 72]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

Terrasson, Francia
1994

PROGETTISTA

Ian Ritchie Architects

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

L'edificio che ospita un auditorium è situato in un parco. È caratterizzato da una parete curva a scarpa realizzata con gabbioni, e da una copertura in vetro e acciaio indipendente dalla parete stessa.

MATERIALE LAPIDEO

Pietra locale

TECNICA COSTRUTTIVA

La parete nord dell'edificio è realizzata con gabbioni in rete metallica a maglia esagonale e sezione trapezoidale. Rappresenta uno dei primi esempi dell'uso dei gabbioni a riempimento litico nella costruzione di un edificio.

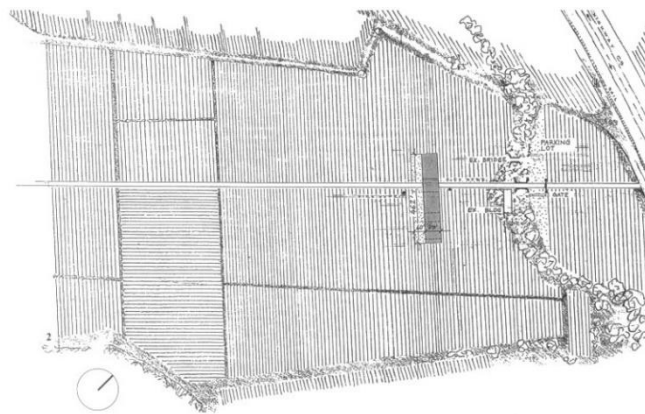
MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

Il progettista ha scelto di impiegare la tecnica dei gabbioni per richiamare l'immagine dei muri di contenimento che definiscono i terrazzamenti del parco in cui è ubicato l'edificio. Le pietre usate per il riempimento dei gabbioni, inoltre, sono state disposte come quelle delle murature tipiche delle costruzioni vernacolari della zona.

L'uso dei gabbioni consente, infine, di definire una parete massiva che agisce come tamponamento termico.

BIBLIOGRAFIA: Dernie, 2003, pp. 72-73; Turrini, 2007b.

DOMINUS WINERY



Inquadramento
[Betsky, 1998, p. 8]



Vista dell'esterno
[Betsky, 1998, pp. 10-11]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

Yountville, California

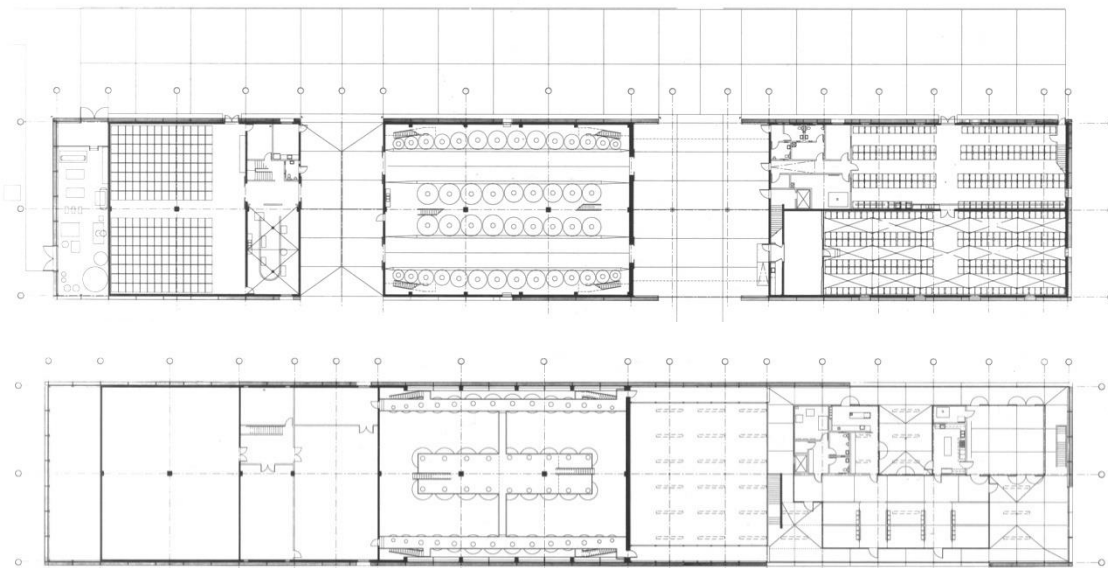
1995-1997

PROGETTISTA

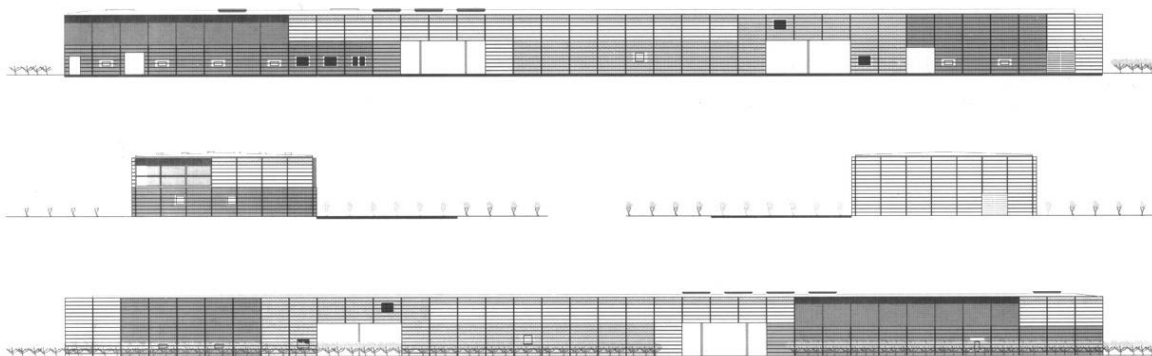
Herzog & de Meuron

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

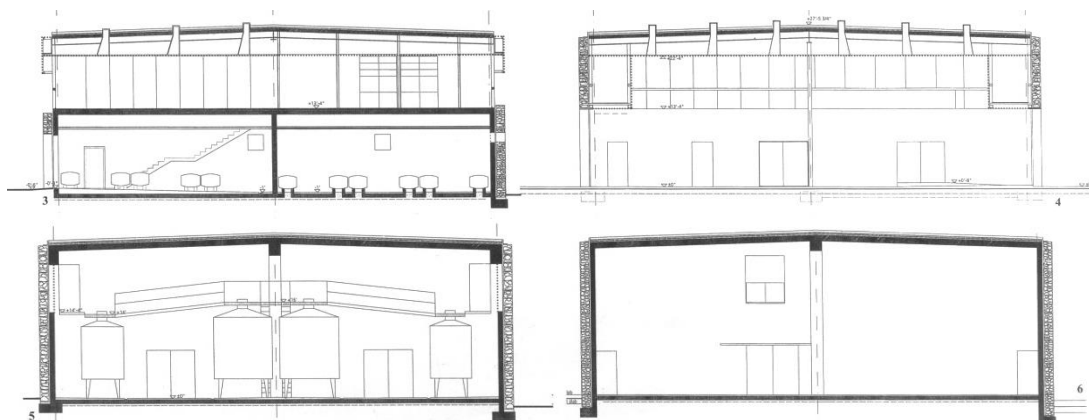
L'edificio è inserito in un'area collinare ricca di vigneti e ospita un'azienda vinicola. Ha una volumetria chiusa di forma parallelepipedica: le dimensioni della pianta sono pari a 135x24 m e l'altezza è di 8 m. Le murature perimetrali sono realizzate in pietra con la tecnica costruttiva dei gabbioni. La continuità del muro è interrotta da un taglio orizzontale a metà altezza che corrisponde ad una balconata, e da due grandi varchi concepiti come ingresso principale all'azienda e come ingresso di servizio per gli autocarri. Il varco più grande è in asse con un percorso lineare che attraversa il sistema di vigneti. I due passaggi separano, inoltre, le tre unità funzionali dell'edificio, costituite da un ambiente per la fermentazione dei vini (*Tank Room*), da un ambiente per la maturazione (*Barrique Cellar*) e da un ambiente per l'imbottigliamento e lo stoccaggio (*Storeroom*).



Planimetrie del piano terra e del piano superiore
[Redazionale, 1997b, p. 184]



I prospetti occidentale, settentrionale, meridionale e orientale dell'edificio
[Redazionale, 1997b, p. 184]



Sezioni trasversali
[Betsky, 1998, p. 13]



Vista dell'interno e particolare del prospetto
[Dernie, 2003, pp. 54-55]

MATERIALE LAPIDEO

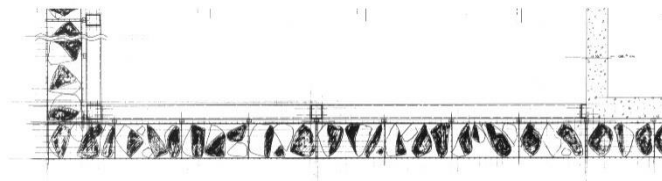
Bozze ovvero elementi irregolari di basalto locale di colori diversi, provenienti dal vicino Grand Canyon

TECNICA COSTRUTTIVA

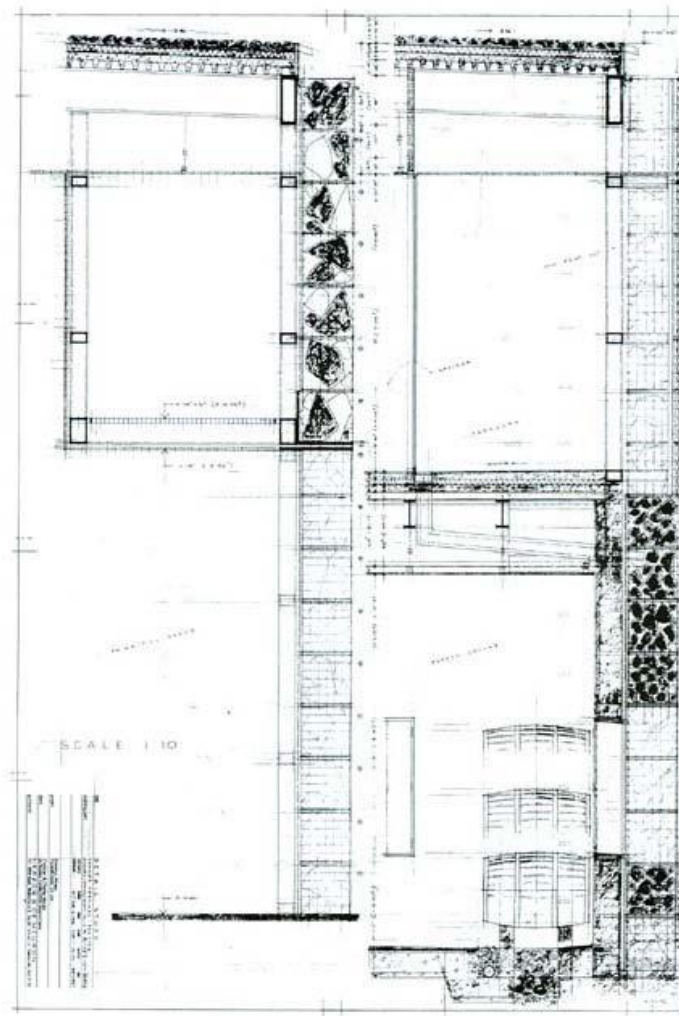
Le pareti della cantina vinicola sono state realizzate con la tecnica dei gabbioni. I moduli costruttivi in rete di acciaio sono stati importati dalla Svizzera e sono stati assemblati e riempiti in sito con frammenti lapidei. Hanno dimensioni modulari pari a 900x450x450 mm e sono apparecchiati in modo regolare, come conci di una muratura in opera quadrata. Per testare la fattibilità della tecnica costruttiva, sono stati realizzati preventivamente due *mock up* a Basilea e a Yountville.

I gabbioni pur definendo muri autoportanti, sono collegati alla struttura metallica intelaiata dell'edificio o alle barre in acciaio inossidabile che armano i pannelli prefabbricati in calcestruzzo che completano internamente le chiusure verticali. Una trave in calcestruzzo contro-terra sostiene, inoltre, la prima fila di gabbioni.

Per il riempimento dei moduli costruttivi sono stati impiegati frammenti lapidei di diverse dimensioni in modo da alleggerire e smaterializzare l'involucro edilizio: per i gabbioni che compongono la porzione inferiore delle pareti esterne, infatti, sono state usate pietre piccole e regolari mentre per quelli che definiscono la porzione superiore delle chiusure verticali sono state impiegate pietre più grandi e irregolari. Le murature hanno, quindi, gradi di trasparenza diversi.



Dettaglio costruttivo della soluzione di parete
[Redazionale, 1997b, p. 190]



Studi di sezioni costruttive dell'involucro in gabbioni
 [Turrini, 2007b, su <http://www.architetturadi pietra.it>]

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

I progettisti hanno scelto di impiegare la pietra locale per integrare l'edificio nel paesaggio realizzando quasi un'opera di "land art" (Betsky, 1998, p. 10; Dernie, 2003, p. 53).

La tecnica costruttiva utilizzata, inoltre, consente di realizzare un involucro massivo che regola, con le sue qualità di inerzia termica e di permeabilità all'aria, il microclima interno evitando picchi di temperatura dovuti alle elevate escursioni termiche tipiche del clima dell'area di progetto. I gabbioni sono stati impiegati anche per filtrare e schermare la luce solare a seconda delle necessità dei diversi ambienti.

BIBLIOGRAFIA: Betsky, 1998, pp. 8-17; Dernie, 2003, pp. 53-55; Redazionale, 1997b, pp. 182-191; Turrini, 2007b; <https://www.herzogdemeuron.com>.

CHÂTEAU-LE-LEZ HOUSING



Particolare del prospetto
[Dernie, 2003, p. 95]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

Montpellier, Francia

2000

PROGETTISTA

Edouard François and Associates

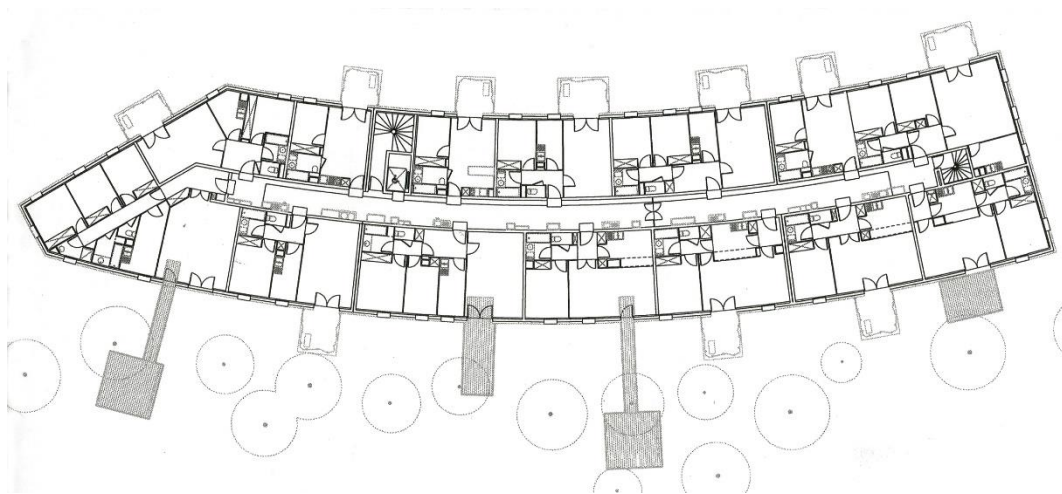
DESCRIZIONE DEL PROGETTO

L'edificio in linea a profilo scalettato, ospita 64 alloggi popolari prevalentemente orientati ad est o ad ovest. Gli alloggi sono distribuiti su 7 piani. È presente anche un livello basamentale che ospita i parcheggi per i residenti, delimitato da un muro irregolare a grandi elementi di pietra.

La facciata è concepita come un giardino verticale in quanto il rivestimento a spessore a gabbioni che la caratterizza è progettato per consentire la crescita di piccole piante: nei pannelli di rivestimento, infatti, sono stati inseriti dei semi di piante tappezzanti e in corrispondenza dei giunti è stato previsto un sistema integrato di micro-irrigazione.

Le finestre sono arretrate rispetto al filo della facciata e ne rivelano la profondità.

Alla struttura principale sono collegati balconi e logge caratterizzate da pareti in legno. Le logge sono accessibili tramite passerelle sopraelevate e sono sostenute da strutture metalliche, quasi a richiamare l'immagine delle case sugli alberi (Dernie, 2003, p. 94).



Pianta del piano tipo
[Pousse, 2000, p. 73]

MATERIALE LAPIDEO

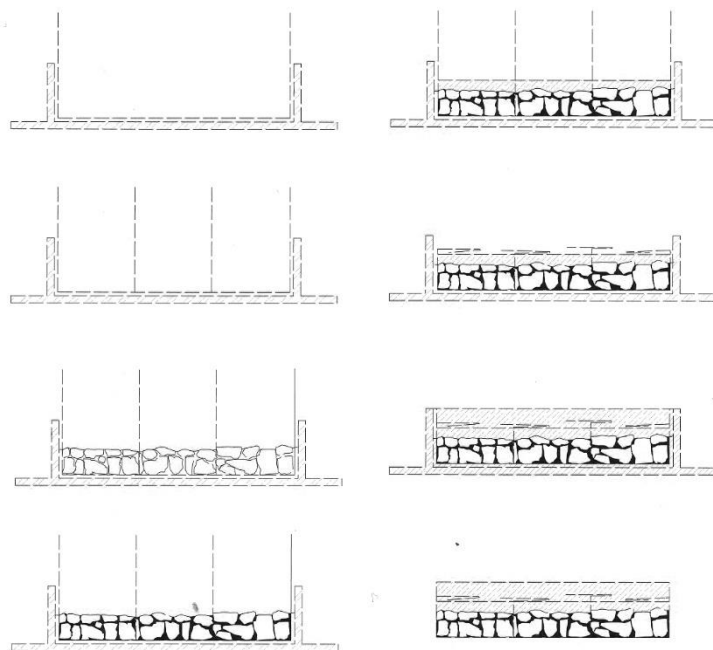
Pietra lavica

TECNICA COSTRUTTIVA

Al di sopra del muro basamentale irregolare a grandi elementi lapidei, si elevano le pareti esterne in pannelli di pietra autoportanti realizzati attraverso l'“ibridazione tra la tecnica esecutiva dei normali gabbioni metallici con riempimento litico e la tradizionale prefabbricazione a piè d'opera di pannelli di chiusura in cemento armato” (Turrini, 2007b). I pannelli composti di facciata hanno dimensioni pari a 2,77x1,35 m e spessori diversi, variabili tra i 30 e i 40 cm. Sono stati prefabbricati in sito integrando gabbioni di 10-15 cm di spessore con uno strato di calcestruzzo retrostante.

Il processo di realizzazione ha previsto diverse fasi. Inizialmente, una rete in acciaio $\Phi 5$ a maglie quadrate di 50 mm di lato, è stata posizionata sul fondo di una cassaforma di acciaio insieme a delle barre di armatura; successivamente, sono stati eseguiti il riempimento in frammenti lapidei e la battitura di uno strato di terra, sabbia e semi di piante che ha permesso di evitare che, in fase di getto, il calcestruzzo penetrasse negli interstizi tra le pietre; infine, dopo aver inserito le staffe necessarie per il montaggio dei pannelli alla struttura dell'edificio, è stato effettuato in due fasi il getto del calcestruzzo.

A montaggio avvenuto, il pacchetto di chiusura è stato completato internamente con l'aggiunta di uno strato isolante su cui è stata eseguita la finitura ad intonaco.



Disegni illustranti il processo di costruzione dei pannelli di rivestimento
[Dernie, 2003, p. 96]

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

I progettisti hanno scelto di impiegare la pietra in modo innovativo per tradurre la loro concezione architettonica basata sull'integrazione tra edificio ed elementi naturali. L'innovazione costruttiva è stata legata alla prefabbricazione. L'uso del materiale litico per i pannelli di facciata e per il livello basamentale, inoltre, ha permesso di integrare l'edificio nel contesto caratterizzato da un parco con alberature centenarie e dal fiume Lez i cui argini sono rivestiti con pietre naturali.

Il rivestimento a spessore delle pareti dell'edificio realizzato con una pietra lavica ad elevato coefficiente di porosità, ha consentito anche di realizzare un pacchetto di chiusura con buone caratteristiche di coibenza.

BIBLIOGRAFIA: Dernie, 2003, pp. 94-97; Pousse, 2000, pp. 72-75; Redazionale, 2007, pp. 70-75; Turrini, 2007b.

HAUS 9X9

Viste dei prospetti

[Pongratz, Perbellini, 2009, pp. 35, 37]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

Augsburg, Germania

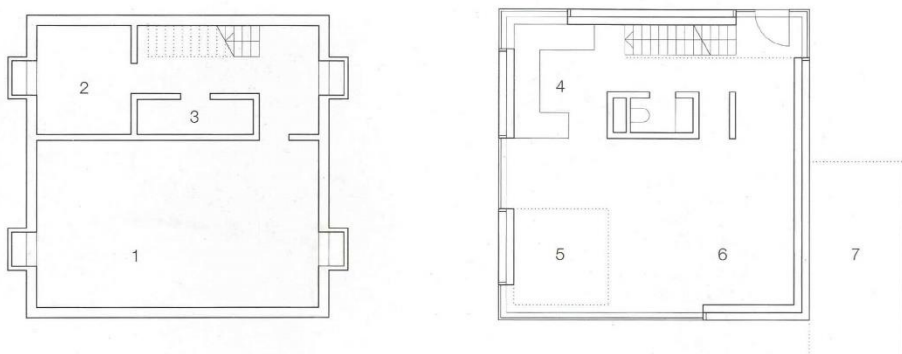
2002-2003

PROGETTISTA

Titus Bernhard

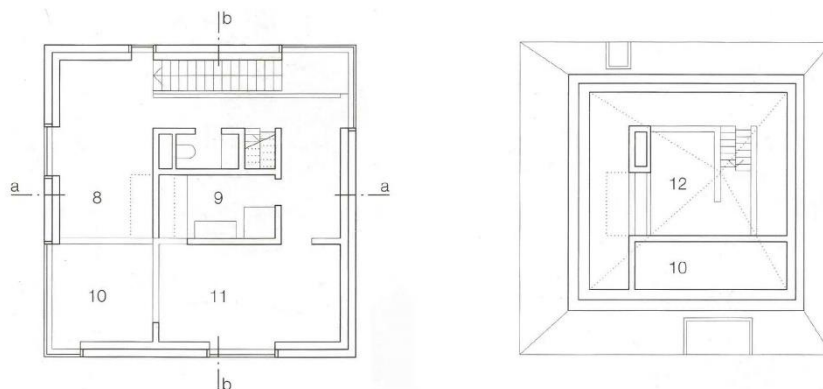
DESCRIZIONE DEL PROGETTO

La casa unifamiliare è stata concepita come una “scultura abitabile” (Pongratz, Perbellini, 2009, p. 32). Ha una pianta quadrata delle dimensioni di 9x9 m e si sviluppa su più piani, per un'altezza di 6 m: la zona giorno è ubicata al piano terra, le camere da letto al primo piano mentre uno studio è ricavato sotto la copertura piramidale. Tutta la superficie esterna compresa quella del tetto è caratterizzata da un rivestimento a gabbioni interrotto solo da larghe aperture vetrate o opache, rivestite in legno di quercia.



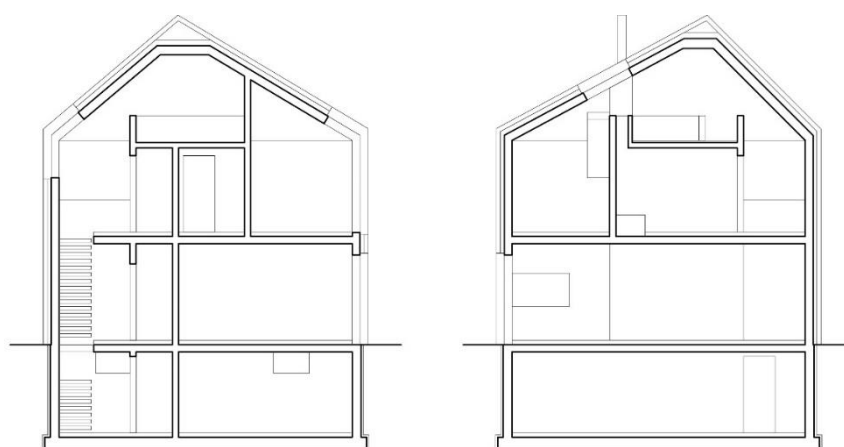
Piante dei livelli inferiori dell'edificio

[Redazionale, 2003b, p. 1274]



Piante dei livelli superiori dell'edificio

[Redazionale, 2003b, p. 1274]



Sezioni

[courtesy of Titus Bernhard]

MATERIALE LAPIDEO

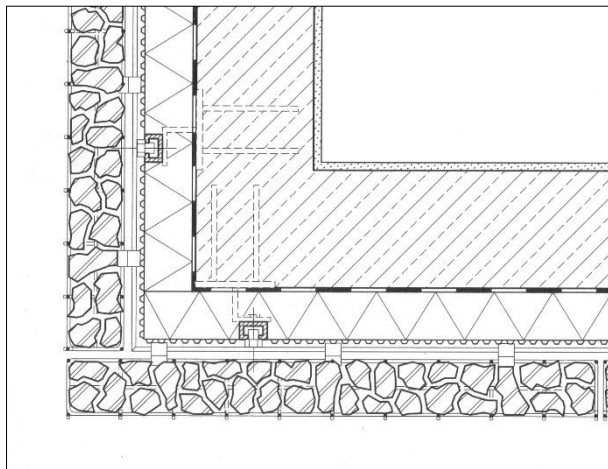
Pietra dolomite di color avorio-dorato

TECNICA COSTRUTTIVA

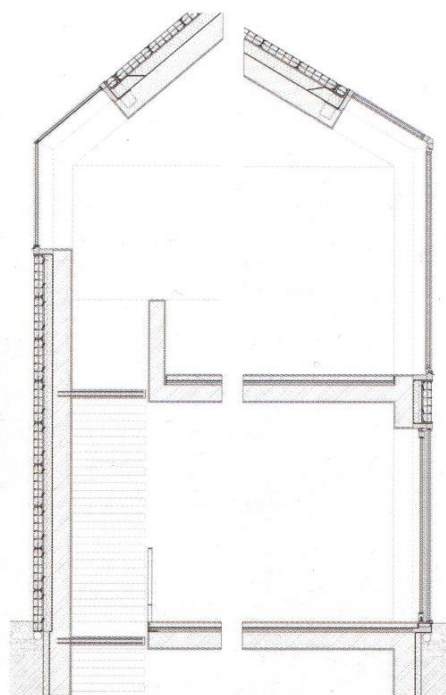
Le pareti e la copertura presentano un rivestimento in gabbioni in rete metallica galvanizzata a maglia rettangolare riempiti con frammenti di pietra. I singoli moduli costruttivi, di dimensioni pari a 100x50x12 cm e del peso di circa 80 kg, sono stati ancorati alla struttura portante in calcestruzzo dell'edificio tramite agganci metallici fissati ad una sottostante orditura di acciaio. Tra i gabbioni e la struttura cementizia dell'abitazione, sono stati interposti uno strato di drenaggio impermeabile di 1 cm che permette il deflusso dell'acqua piovana e della condensa, uno strato isolante di 14 cm in polistirene, e una guaina bituminosa di tenuta di 5 mm. Internamente, la finitura dei setti portanti in calcestruzzo, spessi 22-25 cm, è stata realizzata con uno strato di intonaco di 1,5 cm.

L'impresa costruttrice ha adottato "tecniche che hanno previsto un livello massimo di prefabbricazione" (Pongratz, Perbellini, 2009, p. 34): le 365 gabbie a misura previste dal progetto sono state prodotte industrialmente e riempite a mano con circa 40000 pietre. In fase di costruzione, per realizzare il rivestimento di alcune zone del tetto, è stato necessario fissare il pannello inferiore

del singolo modulo costruttivo metallico alla struttura portante dell'edificio, riempire il gabbione con i frammenti lapidei e effettuare la chiusura dello stesso con il pannello superiore.



Dettaglio costruttivo
[Redazionale, 2003b, p. 1276]



Immagini delle fasi esecutive dell'involucro in gabbioni; sezione
[Turrini, 2007b, su <http://www.architetturadi pietra.it>; Pongratz, Perbellini, 2009, p. 37]

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

Il progettista ha adottato la tecnica costruttiva dei gabbioni come “dichiarazione programmatica contro una progettazione che banalizza il senso dell'architettura locale” (Pongratz, Perbellini, 2009, p. 32). Il paramento in pietra viene impiegato, inoltre, per gli alti livelli di isolamento termico che

riesce ad assicurare: la massa dei gabbioni, infatti, regola in modo efficiente il trasferimento di calore sia in estate che in inverno.

BIBLIOGRAFIA: Pongratz, Perbellini, 2009, pp. 32, 34-37; Redazionale, 2003b, pp. 1274-1277; Turrini, 2007b.

SEI UNITÀ

Vista dell'esterno

[Guarnieri, Mascazzini, su <http://www.theplan.it>]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

Sesto San Giovanni (MI), Italia

2015

PROGETTISTA

Gino Guarnieri Architects - Roberto Mascazzini Architetto

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

L'edificio residenziale plurifamiliare è stato progettato mantenendo la forma e le dimensioni di un antico fienile preesistente nell'area di progetto che è stato demolito per realizzare i nuovi alloggi. Ospita 6 unità abitative indipendenti distribuite su tre livelli e dotate ciascuna di un proprio giardino. La facciata è suddivisa in campiture simmetriche dal sistema degli oscuranti delle aperture degli appartamenti rivestito in rame aggraffato. È caratterizzata da un rivestimento realizzato in pietra e laterizio che interessa anche la copertura a falda.



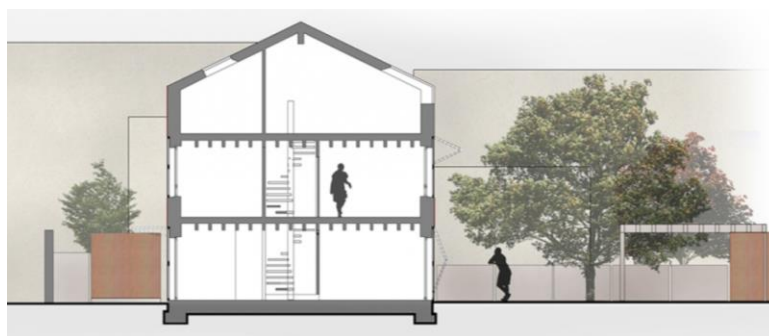
Pianta del piano primo

[Guarnieri, Mascazzini, su <http://www.theplan.it>]



Prospetti

[Guarnieri, Mascazzini, su <http://www.theplan.it>]



Sezione trasversale

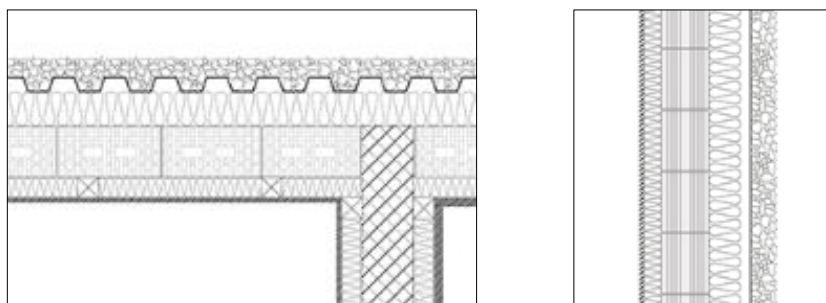
[Guarnieri, Mascazzini, su <http://www.theplan.it>]

MATERIALE LAPIDEO

Mattone pieno e ciottoli di porfido derivanti dalla demolizione di murature e pavimentazioni del preesistente edificio

TECNICA COSTRUTTIVA

Le pareti e la copertura sono rivestiti da uno strato di frammenti litici e laterizi, spesso 6-10 cm: il frantumato, messo in opera partendo dalla base delle pareti, è trattenuto da una rete di acciaio corten con maglia 15x100 mm, collegata alla struttura in calcestruzzo armato dell'edificio. La soluzione costruttiva comprende, inoltre, fogli di lamiera grecata in alluminio 14/10 che consentono il deflusso delle acque meteoriche, uno strato isolante in polistirene estruso di 12 cm, una muratura in blocchi di laterizio porizzato, un'ulteriore strato isolante in polistirene estruso di 6 cm e una finitura intera in cartongesso di 1,2 cm di spessore.



Dettagli costruttivi della soluzione di parete in pianta e in sezione
[courtesy of Studio Roberto Mascazzini Architetto]

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

I progettisti hanno scelto di impiegare una tecnica costruttiva innovativa mutuata da quella dei gabbioni, per riciclare materiali di scarto derivanti dalla demolizione di un antico edificio e per legare la nuova costruzione alla preesistenza con la definizione di un involucro “storico” (Guarnieri, Mascazzini). La scelta di questa tecnica consente, inoltre, di ridurre i consumi energetici, di rallentare il riscaldamento degli ambienti nella stagione estiva e di limitare le dispersioni di calore nella stagione invernale. La tecnica costruttiva e la scelta del materiale permettono, infine, di limitare al minimo gli interventi di manutenzione.

BIBLIOGRAFIA: Guarnieri, Mascazzini; Redazionale, 2016.

HOUSE IN THE LANDSCAPE



Vista dell'esterno

[Griffiths, 2014, su <https://www.dezeen.com>, foto Maciej Lulko]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

Zawiercie, Polonia

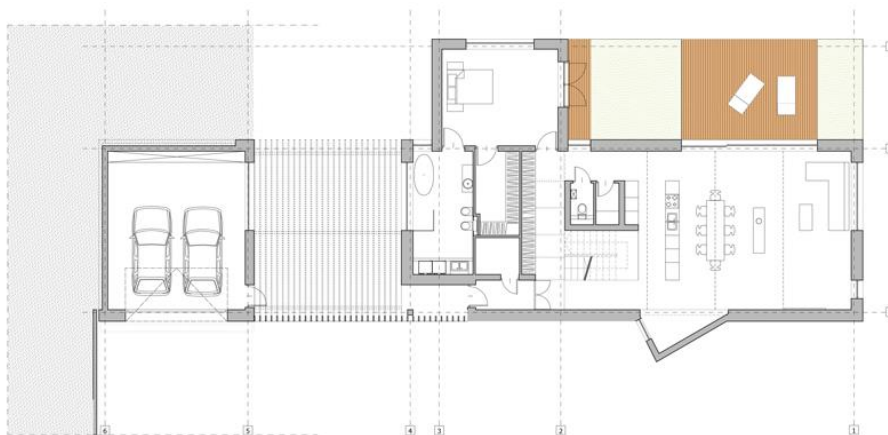
2013

PROGETTISTA

Studio Kropka

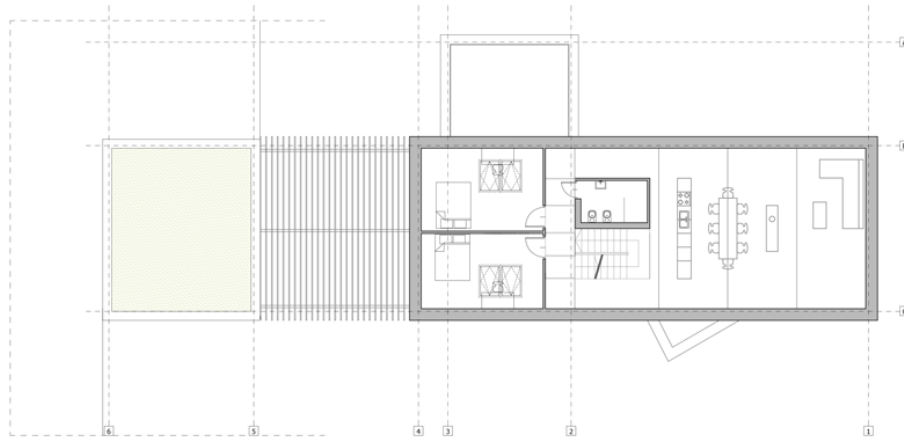
DESCRIZIONE DEL PROGETTO

L'edificio residenziale monofamiliare per quattro persone si sviluppa su due livelli ed è costituito da due volumi connessi da un *brise-soleil* in legno: il volume principale è caratterizzato da una copertura a falda rivestita in fogli di lamiera di zinco titanio ed ospita la residenza mentre il volume secondario ha una copertura piana ed è destinato a garage. Entrambi sono caratterizzati da un rivestimento a gabbioni con riempimento litico. Al corpo principale sono addossati due volumi rivestiti in legno, uno dei quali ospita una camera da letto.

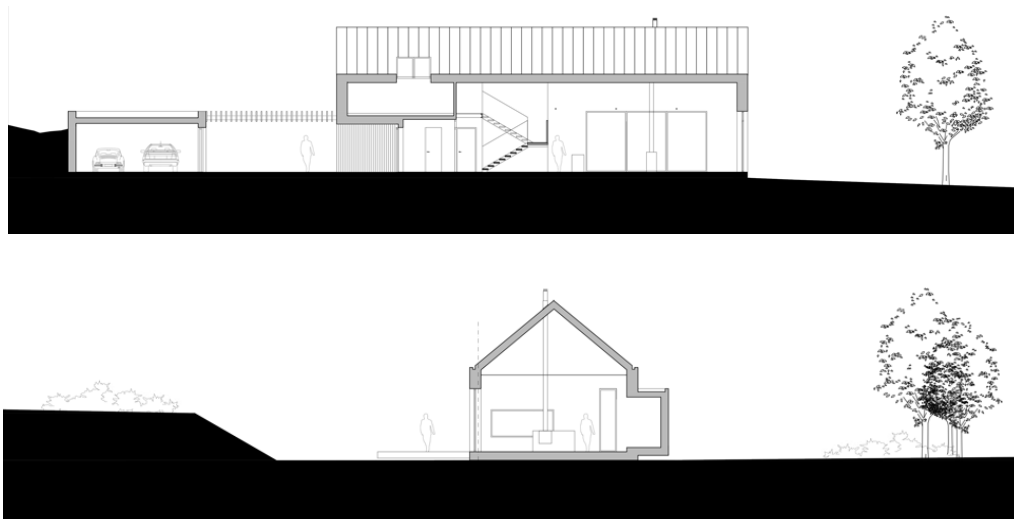


Pianta del primo livello

[Griffiths, 2014, su <https://www.dezeen.com>]



Pianta del secondo livello
 [Griffiths, 2014, su <https://www.dezeen.com>]



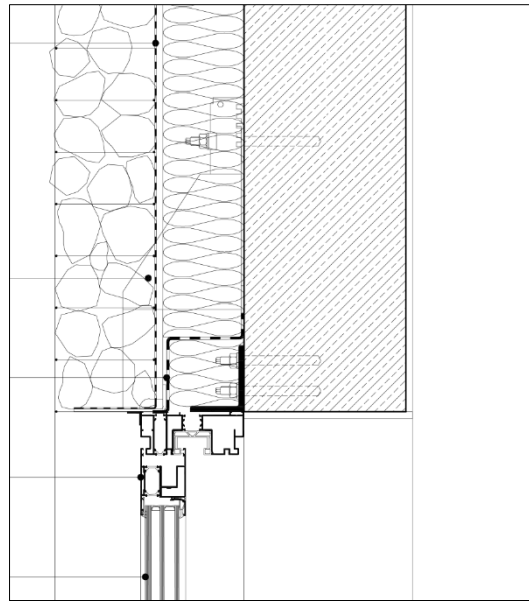
Sezioni longitudinale e trasversale
 [Griffiths, 2014, su <https://www.dezeen.com>]

MATERIALE LAPIDEO

Calcere locale

TECNICA COSTRUTTIVA

Le pareti sono rivestite da gabbioni in rete metallica a maglia rettangolare riempiti con frammenti lapidei di forma irregolare. I moduli costruttivi hanno uno spessore di 15 cm. Sono stati collegati uno con l'altro e fissati con supporti metallici alle pareti strutturali dell'edificio spesse 24 cm. La soluzione di involucro è completata da un'intercapedine d'aria di 2 cm, da una membrana permeabile al vapore e da uno strato di isolante termico in poliisocianurato (PIR) spesso 10 cm. Lo strato di finitura più interno è spesso 1 cm.



Dettaglio costruttivo
[courtesy of Kropka Studio]

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

I progettisti hanno scelto di impiegare i gabbioni e la pietra locale per richiamare la tradizione costruttiva dell'area di progetto con un linguaggio contemporaneo: il calcare impiegato per il riempimento dei moduli a gabbioni, infatti, è stato usato nell'architettura vernacolare della regione, in particolare nei castelli e nelle chiese. La scelta del materiale e della tecnica costruttiva hanno consentito, quindi, di integrare l'edificio nel paesaggio. Inoltre, è stato possibile realizzare un rivestimento durevole e dal costo contenuto.

BIBLIOGRAFIA: Griffiths, 2014; Kropka Studio, 2014; <http://www.kropka-studio.pl>.

SHOREHAM BEACH HOUSE



Shoreham Beach House

[Griffiths, 2016, su <https://www.dezeen.com>, foto Jim Stephenson]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

Shoreham-by-Sea, UK

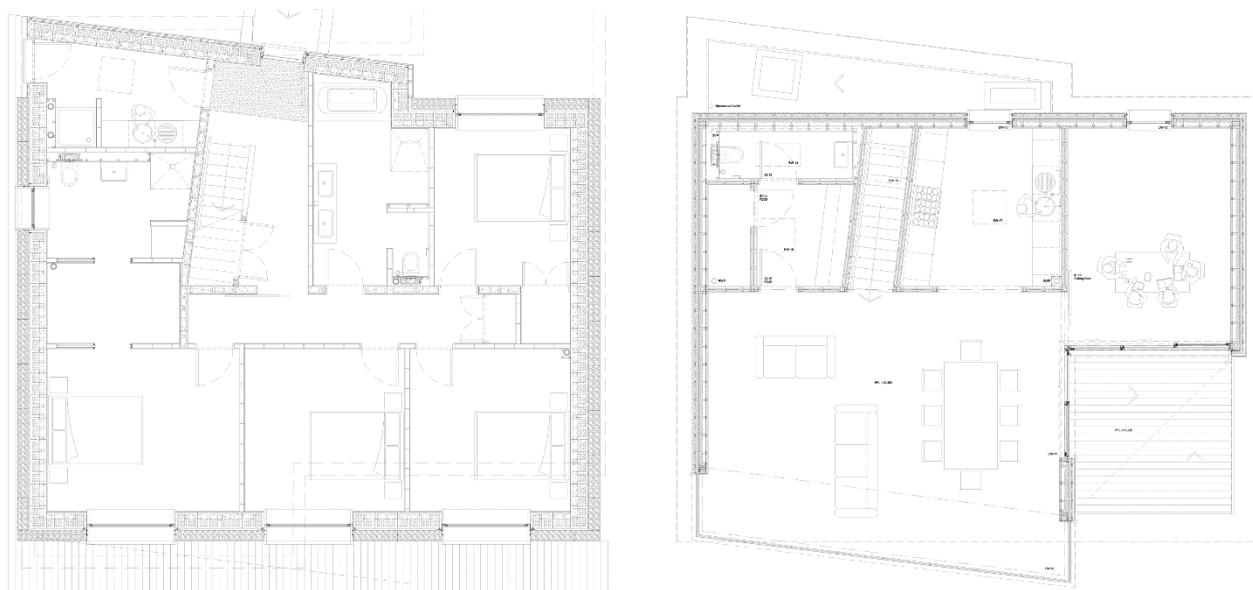
2014-2015

PROGETTISTA

Studio ABIR Architects

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

L'edificio ospita una residenza per una famiglia di 4 persone e si articola su due piani: al piano superiore è ubicata la zona giorno mentre a quello inferiore la zona notte. L'edificio è caratterizzato da tre materiali principali ovvero vetro, legno di castagno e pietra: il vetro è impiegato per le finestre a tutta altezza del soggiorno; il legno di castagno è utilizzato per rivestire le pareti del piano superiore; la pietra è adottata, infine, come riempimento dei gabbioni che rivestono le pareti del piano inferiore.



Piante del piano terra e del primo piano

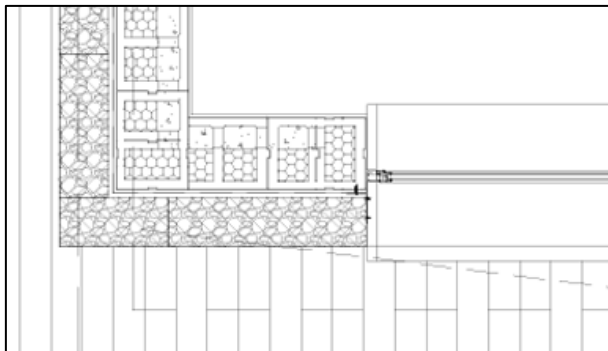
[Griffiths, 2016, su <https://www.dezeen.com>]

MATERIALE LAPIDEO

Ciottoli lapidei di colori diversi dragati da un canale locale

TECNICA COSTRUTTIVA

I gabbioni lapidei rivestono le pareti della casa composte da blocchi cassero Durisol ottenuti riciclando pallet lignei e riempiti con isolante termico e calcestruzzo.



Dettaglio costruttivo

[Griffiths, 2016, su <https://www.dezeen.com>]

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

La scelta della tecnica costruttiva e del materiale hanno consentito ai progettisti di integrare l'opera nel contesto: il riempimento dei gabbioni richiama, infatti, i ciottoli della spiaggia su cui affaccia l'edificio. Inoltre, la tecnica costruttiva ha permesso di contenere le spese e i tempi di costruzione: le pareti del piano terra con rivestimento a gabbioni sono state realizzate, infatti, in sole due settimane.

BIBLIOGRAFIA: Astbury, 2017; Griffiths, 2016; Redazionale, 2017; <https://www.abir.co.uk>.

LOGEMENTS LES GALETS

Vista dell'esterno

[<http://mg-au.fr/projets/#architecture>]

LOCALIZZAZIONE E ANNO

Pont-Audemer, Francia

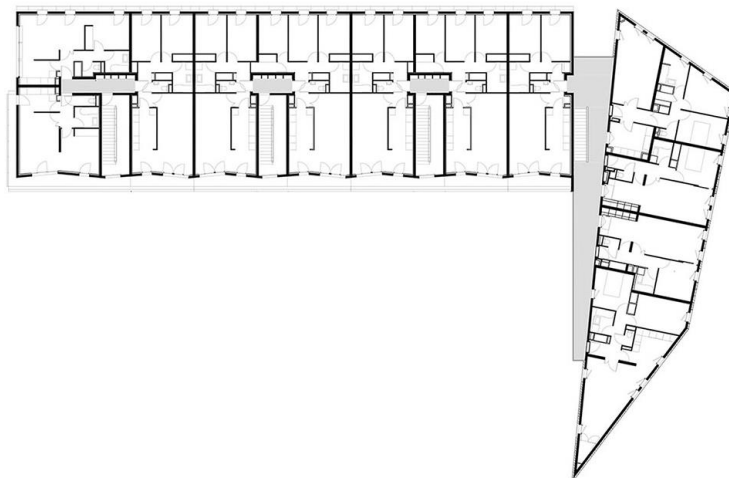
1999-2003

PROGETTISTA

Bertrand Bonnier e Michel Guthmann

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

L'edificio si articola su quattro piani: al piano terra ospita un laboratorio medico mentre ai piani superiori ospita 44 appartamenti. È costituito da due corpi di fabbrica, uno con impianto rettangolare e l'altro con una conformazione planimetrica trapezoidale, che definiscono un cortile interno al lotto adibito a giardino. La facciata principale del secondo corpo di fabbrica è caratterizzata da un rivestimento in ciottoli di colore scuro che interessa parzialmente anche il prospetto verso il cortile interno. Le aperture vetrate sono arretrate rispetto al filo del rivestimento litico e il distacco tra i due piani è sottolineato dal colore bianco delle specchiature e degli infissi. L'impaginamento delle finestre è irregolare.



Pianta del piano tipo

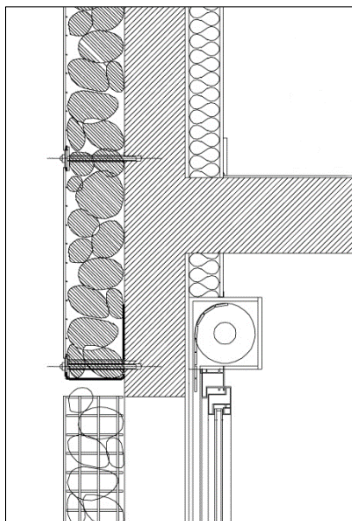
[<http://mg-au.fr/projets/#architecture>]

MATERIALE LAPIDEO

Ciottoli dragati dal Canale della Manica

TECNICA COSTRUTTIVA

Il rivestimento della facciata principale è stato realizzato con un tecnica che richiama quella dei gabbioni: una rete metallica è stata fissata a 15 cm di distanza dai setti strutturali in calcestruzzo armato, spessi 16 cm, attraverso elementi di connessione in acciaio inossidabile e lo spazio risultante è stato riempito manualmente con ciottoli. La soluzione di involucro è completata internamente da uno strato isolante in lana di roccia di 8 cm e da una finitura in cartongesso.



Dettaglio costruttivo
[courtesy of Michel Guthmann]

MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DELLA PIETRA

I progettisti hanno scelto di realizzare un rivestimento in ciottoli secondo una tecnica mutuata da quella dei gabbioni per richiamare, con un linguaggio contemporaneo, le architetture tradizionali della Normandia. L'uso del materiale litico locale contribuisce, inoltre, a radicare l'edificio nel contesto.

BIBLIOGRAFIA: Turrini, 2007b; <http://mg-au.fr/projets/#architecture>;
https://architopik.lemoniteur.fr/index.php/realisation-architecture/les_galets/2959.

4.4. ELEMENTI EMERSI DALL'ANALISI DEI CASI DI STUDIO

4.4.1. Riscoperta e potenzialità degli involucri in pietra massiva

Nel XX secolo, con la diffusione del calcestruzzo e dell'acciaio, la pietra è stata usata soprattutto in lastre sottili di rivestimento. Il valore della leggerezza è stato privilegiato nella progettazione e la riduzione dello spessore delle lastre ha permesso anche di realizzare involucri traslucidi come quelli del Christ Pavilion, costruito per l'Expo di Hannover del 2000 da Von Gerkan, Marg & Partners, e della Caja De Ahorros, progettata a Granada tra il 1992 e il 2001 da Alberto Campo Baeza (Acocella, 2004, p. 414; Rosso et al., 2016a). Inoltre, sono stati introdotti nel settore lapideo prodotti nuovi come i “pannelli compositi di pietra sottile”, il “modulmarmo” e il “modulgranito” in cui i materiali lapidei sono stati assottigliati fino a spessori di pochi millimetri (Girasante, Potenza, 2006, p. 42)²⁵. Da alcuni anni, però, anche se le tendenze maggioritarie restano quelle “di assottigliamento della materia lapidea in texture atettoniche” (Turrini, 2009), si assiste ad una riscoperta degli attributi di “pesantezza” e “radicamento” dei materiali lapidei (Girasante, Potenza, 2006, p. 37)²⁶.

Dall'analisi dei casi di studio condotta, infatti, è emerso che nella cultura architettonica contemporanea i materiali lapidei sono tornati ad essere impiegati in spessori rilevanti per realizzare involucri edilizi ed elementi strutturali, tanto da poter parlare di una riscoperta della pietra massiva. In relazione agli involucri, questo rinnovamento linguistico è avvenuto attraverso il recupero e l'attualizzazione della tecnica costruttiva tradizionale della muratura e la diffusione della tecnica dei gabbioni, precedentemente impiegata solo nel campo dell'ingegneria naturalistica e della progettazione paesaggistica. La maggior parte degli architetti contemporanei considerati nell'analisi dei casi di studio ha adottato la pietra per realizzare murature autoportanti di tamponatura o paramento e rivestimenti a spessore. Alcuni, invece, hanno attualizzato la pietra come materiale strutturale.

Dall'analisi delle motivazioni che hanno condotto i progettisti ad impiegare un determinato materiale lapideo o una particolare soluzione costruttiva, è emerso che il rinnovamento del linguaggio architettonico è strettamente legato al riconoscimento delle potenzialità della pietra massiva, connesse a valori espressivi e di sostenibilità economica ed ambientale.

Con riferimento alle valenze espressive, è stato evidenziato come per molti progettisti tra cui Zumthor e Cavadini, l'uso massivo dei materiali lapidei sia motivato dall'esigenza di integrarsi con il paesaggio naturale o urbano, di reinterpretare la cultura costruttiva tradizionale e di esprimere l'identità locale. Dal momento che storicamente la natura e la qualità delle rocce disponibili in un territorio hanno influito sui caratteri dell'architettura locale e sullo sviluppo delle tecniche costruttive connotando l'identità e la specificità dei diversi contesti geografici, l'adozione di involucri in pietra massiva è risultata in molti casi essenziale per garantire l'instaurarsi di un dialogo rispettoso tra la nuova costruzione e la preesistenza.

Numerosi progetti hanno mostrato, inoltre, come sia possibile realizzare con la pietra massiva architetture sostenibili sul piano ambientale ed economico: l'impiego del materiale lapideo in spessori rilevanti permette di realizzare con costi e tempi di costruzione contenuti elementi tecnici durevoli, dotati di elevata inerzia termica e fonica, facilmente riciclabili o ottenuti attraverso il recupero o il riciclo di materiale lapideo. Le strategie individuate per limitare i costi e i tempi di produzione e

²⁵ Ragone M (2006) *Tecnologie e nuove tendenze*. In: Girasante F, Potenza D, a cura di. Dalla pietra all'architettura. Foggia: Claudio Grenzi Editore, 41-45.

²⁶ Pavan V (2006) *I linguaggi dell'architettura contemporanea*. In: Girasante F, Potenza D, a cura di. Dalla pietra all'architettura. Foggia: Claudio Grenzi Editore, 37-39.

messa in opera di elementi tecnici in pietra massiva comprendono il coordinamento del progetto con le tipiche dimensioni dei blocchi estratti, l'adozione di tecniche di montaggio semplice e veloce e l'impiego di blocchi di grandi dimensioni che, a causa di imperfezioni o difetti di taglio, non sarebbero commercializzati per la produzione di elementi litici sottili (Acocella, 2004, p. 296). Queste strategie possono essere efficacemente combinate tra loro come mostrato da Perraudin nei progetti delle cantine di Vauvert e del centro scolastico a Marguerittes, in cui grandi blocchi di materiali lapidei locali, non adatti per la produzione di lastre sottili per pavimenti e rivestimenti, sono stati posti in opera con processi costruttivi rapidi e meccanizzati basati sull'impiego di gru. Altre strategie che permettono di limitare i costi di costruzione si basano sull'utilizzo di elementi lapidei ottenuti dalla demolizione di strutture preesistenti nell'area di progetto: gli scarti di demolizione possono essere impiegati per realizzare murature, come nella Casa a Bom Jesus progettata da Souto de Moura e nella Stone House di Herzog & de Meuron, o involucri a gabbioni, come nell'edificio residenziale Sei Unità progettato da Guarnieri e Mascazzini. Il riciclo di materiali litici ottenuti da processi di demolizione e il recupero di scarti di estrazione o di lavorazione della pietra naturale in involucri massivi in muratura o a gabbioni consentono anche di ridurre l'impatto ambientale del settore lapideo limitando i problemi di smaltimento e il consumo di materiali grezzi. La pietra massiva ha benefici ambientali anche in un'ottica di progettazione passiva: l'elevata inerzia termica dei materiali lapidei utilizzati in spessori rilevanti consente, infatti, di attenuare l'escursione termica giornaliera e stagionale aumentando il comfort termico interno soprattutto in condizioni estive. La massività degli involucri in pietra massiva è stata sfruttata per ottenere una buona prestazione termico-energetica non solo in edifici produttivi, come la Dominus Winery di Herzog & de Meuron, la Cantina di Vauvert di Perraudin e la Birreria a Malta di Peake, Short and Partners, ma anche in attrezzature, come il centro scolastico a Marguerittes di Perraudin e il municipio di Iragna di Cavadini, e in edifici residenziali, come la Haus 9x9 di Bernhard e le Sei Unità di Guarnieri e Mascazzini.

4.4.2. Innovatività degli involucri lapidei massivi contemporanei rispetto alla cultura costruttiva lapidea tradizionale

Dall'illustrazione sintetica dell'evoluzione storica delle tecniche costruttive della muratura e dei gabbioni e dall'analisi degli edifici selezionati come casi di studio, è emerso che la cultura architettonica contemporanea ha sviluppato soluzioni costruttive innovative rispetto al passato dal punto di vista tecnico, prestazionale e/o linguistico.

Dal punto di vista tecnico-prestazionale, la maggior parte degli involucri lapidei contemporanei si distingue dai sistemi murari tipici delle costruzioni storiche dal momento che il carattere massivo delle soluzioni tecniche non è più connesso con l'adozione del principio del corpo unico: mentre storicamente l'impiego della pietra in spessori rilevanti era motivato dalla necessità di assolvere con un singolo strato funzionale sia a compiti di resistenza statica che di comfort ambientale, attualmente il materiale lapideo costituisce lo strato più esterno di pacchetti di chiusura compositi progettati secondo il principio del corpo multiplo e costituiti, quindi, anche da altri materiali con funzioni distinte e complementari. Il cambiamento del principio costruttivo alla base della progettazione ha consentito di superare alcune delle carenze prestazionali degli involucri tradizionali connesse con le istanze di fruizione: i sistemi murari storici, infatti, pur garantendo una buona prestazione termico-energetica nella stagione estiva grazie all'elevata inerzia termica del materiale, presentano delle

carenze nella stagione invernale legate al loro insufficiente potere isolante. Nelle soluzioni contemporanee l'abbinamento della pietra ad altri strati funzionali, tra cui mattoni ed isolanti termici, permette di ridurre il consumo energetico per il riscaldamento e di garantire adeguati livelli di comfort termico nella stagione fredda. Tuttavia, dal momento che il principio del corpo multiplo non è impiegato per realizzare involucri leggeri come nelle tendenze progettuali attualmente maggioritarie, le soluzioni contemporanee consentono di mantenere gli attributi di durabilità e inerzia termica dei sistemi murari storici. L'elevato spessore dello strato litico esterno, infatti, aumentando la massa dell'involucro, attenua le escursioni termiche e risulta meno sensibile all'azione aggressiva degli agenti atmosferici rispetto ai rivestimenti in lastre di pietra sottili.

Un altro elemento di innovatività dal punto di vista tecnico-prestazionale è connesso con l'adozione di involucri massivi in pietra in combinazione con elementi strutturali in calcestruzzo armato o in acciaio. In molte soluzioni costruttive contemporanee, lo strato lapideo risulta, infatti, collegato a setti portanti in calcestruzzo, come nell'Haus 9x9 di Bernhard e nei Logements Les Galets di Bonnier e Guthmann, o viene abbinato a telai in acciaio o in calcestruzzo, come nella Scuola di Alti Studi Musicali della Galizia di Abril, nella Mortensrud Church di Jensen & Skodvin e nella Stone House di Herzog & de Meuron. Nelle terme di Vals progettate da Zumthor, la pietra risulta inscindibilmente connessa con il nucleo concretizio della muratura a tecnologia mista, partecipando alla resistenza statica. L'adozione di tecnologie miste pietra-calcestruzzo armato e la possibilità di collegare le altre soluzioni di involucro con le strutture in calcestruzzo armato o in acciaio degli edifici garantiscono una maggiore sicurezza in caso di eventi sismici rispetto alle murature storiche.

Anche dal punto di vista linguistico le soluzioni contemporanee analizzate presentano degli elementi di innovatività: le valenze espressive della cultura costruttiva lapidea tradizionale, infatti, vengono reinterpretate attraverso strategie progettuali che facendo riferimento al linguaggio architettonico contemporaneo consentono di evitare approcci storicistici. Una delle strategie attualmente utilizzate da molti progettisti per definire un equilibrio tra il linguaggio architettonico tradizionale e contemporaneo degli edifici con involucri in pietra massiva è legata all'impiego di finestre a nastro, vetrate a tutt'altezza o aperture poste agli angoli del volume: la leggerezza e la trasparenza delle aperture vetrate contrasta, infatti, con il carattere massivo degli involucri in pietra e con la profondità e la continuità delle pareti lapidee tradizionali. Facciate vetrate a tutta altezza sono state adottate nella Shoreham Beach House dello Studio ABIR Architects, nella Casa a Bom Jesus progettata da Souto de Moura, nella casa per anziani di Coira e nelle Terme di Vals progettate da Zumthor mentre finestre a nastro e aperture poste nell'angolo del volume dell'edificio sono state impiegate nel municipio di Iragna progettato da Cavadini e nell'Haus 9x9 di Bernhard. In alcuni esempi, tra cui la casa privata progettata da Gouwy, Grima, Rames e l'House in the Landscape dello Studio Kropka, il contrasto con le aperture trasparenti è sottolineato dall'uso di architravi e infissi metallici con colori discordanti rispetto al cromatismo dell'involucro litico. In altri casi, come nei Logements Les Galets di Bonnier e Guthmann, l'impaginato irregolare delle finestre rivela che, differentemente dal passato, la pietra non ha funzione portante. L'uso di altri materiali moderni come il calcestruzzo, l'acciaio o altri materiali metallici è un'altra delle strategie progettuali adottate per far riferimento al linguaggio architettonico contemporaneo in edifici in pietra. Nella Stone House di Herzog & de Meuron, il carattere materico e massivo delle pareti lapidee viene sottolineato dal contrasto con la linearità dello scheletro strutturale in calcestruzzo lasciato a vista. Nella Casa a Bom Jesus progettata da Souto de

Moura, invece, il piano basamentale in pietra contrasta con il carattere concettuale del volume concretizio intonacato di bianco che definisce il piano superiore. In altri casi il calcestruzzo è adottato per realizzare il piano basamentale dell'edificio come nella Scuola di Alti Studi Musicali della Galizia di Abril, nella casa delle Guide Alpine dei Romegialli e nel municipio di Iragna di Cavadini. In questi ultimi due esempi è utilizzato anche per definire il volume del corpo scala. I materiali metallici, invece, sono impiegati per elementi strutturali lasciati a vista come nella Mortensrud Church di Jensen & Skodvin, per suddividere in campiture la facciata lapidea come nelle Sei Unità di Guarnieri e Mascazzini o per caratterizzare altre parti dell'edificio come nell'House in the Landscape dello Studio Kropka.

CAPITOLO 5

ANALISI DELLE PRESTAZIONI TERMICO-ENERGETICHE DI INVOLUCRI LAPIDEI MASSIVI INNOVATIVI

5.1. INERZIA TERMICA

5.1.1. Definizione e importanza nella storia dell'architettura

5.1.2. Riferimenti normativi

5.1.2.1. Legislazione italiana

5.1.2.2. Norme tecniche

5.1.3. Ricerche su involucri edilizi ad elevata inerzia termica

5.1.3.1. L'inerzia termica in rapporto con la prestazione termico-energetica degli edifici

5.1.3.2. Approcci di calcolo

5.1.3.3. Metodologia adottata

5.2. EFFICIENZA PRESTAZIONALE DI INVOLUCRI INNOVATIVI IN PIETRA MASSIVA IN RAPPORTO ALLE TECNICHE TRADIZIONALI DELL'EDILIZIA STORICA

5.2.1. Introduzione

5.2.2. Metodologia

5.2.3. Risultati e discussione

5.2.3.1. Risultati dell'analisi in regime stazionario e dinamico sul caso di riferimento e validazione del modello

5.2.3.2. Risultati dell'analisi comparativa in regime dinamico

5.2.4. Conclusioni

5.3. STUDIO DELLE PRESTAZIONI DI INVOLUCRI INNOVATIVI E TRADIZIONALI IN PIETRA MASSIVA IN DIVERSE CONDIZIONI CLIMATICHE

5.3.1. Metodologia

5.3.2. Risultati e discussione

5.3.2.1. Prestazioni degli involucri studiati nelle condizioni climatiche di Bologna

5.3.2.2. Prestazioni degli involucri studiati nelle condizioni climatiche di Catania

5.3.3. Raffronto tra i risultati ottenuti nei diversi contesti di studio

5.3.4. Conclusioni

5. ANALISI DELLE PRESTAZIONI TERMICO-ENERGETICHE DI INVOLUCRI LAPIDEI MASSIVI INNOVATIVI

5.1. INERZIA TERMICA

5.1.1. Definizione e importanza nella storia dell'architettura

L'inerzia termica di un componente edilizio può essere definita come la sua capacità di opporsi alle variazioni di temperatura. Questa caratteristica risulta particolarmente importante in regime estivo quando le variazioni giornaliere di temperatura esterna non possono essere trascurate ai fini di una corretta valutazione del comportamento energetico del sistema edificio.

Le variazioni di temperatura che si verificano sulla faccia esterna di componenti di involucro ad elevata inerzia termica si ripercuotono sulla faccia interna con un certo ritardo. Risultano, inoltre, attenuate in misura tanto maggiore quanto maggiore è la capacità termica areica (C_m) data dal prodotto tra il calore specifico a pressione costante (c_p), espresso in kJ/kgK, e la massa termica areica (m), espressa in kg/m² (Equ. 1).

$$C_m = c_p \cdot m \quad (1)$$

La temperatura superficiale di una parete massiva, quindi, aumenta lentamente e il valore massimo è mantenuto per lungo tempo. La maggiore stabilità delle temperature di una parete massiva rispetto a quelle di una parete leggera risulta particolarmente vantaggiosa in climi caratterizzati da elevate escursioni termiche. Storicamente, infatti, le architetture tradizionali diffuse in aree dal clima temperato hanno sfruttato la massa termica dell'involucro e la ventilazione naturale come strategie passive per adattarsi dinamicamente all'ambiente esterno (Stazi et al., 2015). La tipologia costruttiva di parete prevalente fino al XX secolo era, infatti, basata sulla capacità ovvero sull'accumulo del calore in involucri a corpo unico ad alta massa termica. Nel tempo, tuttavia, si è registrata una transizione da edifici tradizionali a capacità, che si adattavano dinamicamente al clima senza l'uso di sistemi di riscaldamento, a edifici caratterizzati da un involucro agente come barriera termica alle condizioni climatiche esterne (Stazi et al., 2013). Dagli anni '60 si è diffusa, infatti, la tipologia costruttiva di parete basata sulla stratificazione ovvero l'involucro multistrato con cavità d'aria interna che rallenta il flusso di calore offrendo resistenza allo scambio termico. Dagli anni '90, contemporaneamente all'introduzione in Italia della prima norma sul risparmio energetico, è stata adottata, invece, una tipologia costruttiva di parete basata sulla resistenza in cui l'isolamento è realizzato con materiali che agiscono come barriere termiche contro le perdite di calore.

5.1.2. Riferimenti normativi

5.1.2.1. Legislazione italiana

L'approccio al progetto di edifici energeticamente efficienti è stato basato per molti anni sul controllo della trasmittanza termica dell'involucro edilizio e, di conseguenza, su elevati livelli di isolamento. Questo approccio è ancora riflesso nella normativa italiana relativa al risparmio energetico che fissa i valori massimi accettabili della trasmittanza per gli elementi dell'involucro edilizio a seconda delle zone climatiche. Da alcuni anni, però, l'importanza dell'inerzia termica delle chiusure ai fini del miglioramento delle condizioni di comfort termico interno e della riduzione della domanda energetica

per il raffrescamento e il riscaldamento degli edifici è stata riconosciuta anche a livello normativo. I principali riferimenti nazionali sono il decreto legislativo n. 311/2006, il DPR n. 59 del 2/4/2009 e il Decreto Ministeriale 26/6/2009.

Il decreto legislativo n. 311/2006, “Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico in edilizia”, infatti, ha adottato come indicatore dell’inerzia termica la massa superficiale dei componenti edilizi specificandone il valore minimo per le pareti opache verticali, orizzontali o inclinate nei casi di edifici di nuova costruzione e di ristrutturazione di edifici esistenti: in tutte le zone climatiche ad esclusione della F, per le località nelle quali il valore medio mensile dell’irradianza sul piano orizzontale, nel mese di massima insolazione estiva, sia maggiore o uguale a 290 W/m^2 , il valore della massa superficiale delle pareti opache verticali, orizzontali o inclinate deve essere superiore a 230 kg/m^2 al fine di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva e di contenere la temperatura interna degli ambienti.

Il decreto legislativo stabilisce, inoltre, che “gli effetti positivi che si ottengono con il rispetto dei valori di massa superficiale delle pareti opache (..), possono essere raggiunti, in alternativa con l’utilizzo di tecniche e materiali, anche innovativi, che permettano di contenere le oscillazioni della temperatura degli ambienti in funzione dell’andamento dell’irraggiamento solare”. In questo caso deve essere prodotta un’adeguata documentazione e certificazione dei materiali e delle tecnologie utilizzate che attestino la loro equivalenza con le disposizioni relative alla massa superficiale.

Il DPR n. 59 del 2/4/2009, che costituisce il regolamento di attuazione dell’art.4, comma 1, lettere a) e b) del D. Lgs. 192/2005, ha introdotto come parametro di verifica dell’inerzia termica la trasmittanza termica periodica (YIE) espressa in $\text{W/m}^2\text{K}$: la trasmittanza termica periodica valuta la capacità di una parete opaca di sfasare ed attenuare il flusso termico che la attraversa nell’arco di 24 ore. La norma al fine di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva e di contenere la temperatura interna degli ambienti, stabilisce nel caso di edifici di nuova costruzione e nel caso di ristrutturazioni di edifici esistenti un valore massimo della trasmittanza termica periodica delle pareti opache: in tutte le zone climatiche ad esclusione della F, per le località nelle quali il valore medio mensile dell’irradianza sul piano orizzontale, nel mese di massima insolazione estiva sia maggiore o uguale a 290 W/m^2 , tutte le pareti verticali opache con l’eccezione di quelle comprese nel quadrante nord-ovest / nord / nord-est, devono essere caratterizzate da un valore della massa superficiale maggiore di 230 kg/m^2 o da un valore del modulo della trasmittanza termica periodica inferiore a $0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$; inoltre, tutte le pareti opache orizzontali ed inclinate devono presentare un valore del modulo della trasmittanza termica periodica inferiore a $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$. Il decreto stabilisce, infine, che “gli effetti positivi che si ottengono con il rispetto dei valori di massa superficiale o di trasmittanza termica periodica delle pareti opache (..), possono essere raggiunti, in alternativa con l’utilizzo di tecniche e materiali, anche innovativi, (..) che permettano di contenere le oscillazioni della temperatura degli ambienti in funzione dell’andamento dell’irraggiamento solare”. In questo caso deve essere prodotta un’adeguata documentazione e certificazione dei materiali e delle tecnologie utilizzate che attestino la loro equivalenza con le disposizioni relative alla trasmittanza termica periodica.

Il DPR rimanda alla norma UNI EN ISO 13786: 2008, “Prestazione termica dei componenti per edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di Calcolo” e successivi aggiornamenti per la definizione ed il calcolo della trasmittanza termica periodica.

Il Decreto Ministeriale 26/6/2009 “Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici” (G.U. 10/7/2009 n. 158 – in vigore dal 25/7/2009) fa riferimento ad altri due indicatori dinamici che possono essere usati per quantificare l’inerzia termica di una struttura in regime estivo. La norma, infatti, propone come riferimento nazionale una metodologia per la valutazione della qualità termica estiva dell’involucro edilizio che si basa sulla determinazione di due parametri qualitativi, lo sfasamento (S) espresso in ore, ed il fattore di attenuazione (fa), coefficiente adimensionale. Il metodo basato sulla determinazione di questi due parametri qualitativi è alternativo al metodo basato sulla determinazione dell’indice di prestazione termica dell’edificio per il raffrescamento (E_{pe,inv}). Il riferimento nazionale per il calcolo dello sfasamento e del fattore di attenuazione è la norma tecnica UNI EN ISO 13786. Sulla base dei valori assunti da questi due indicatori dinamici il Decreto Ministeriale introduce una classificazione valida per tutte le destinazioni d’uso e chiarisce che, nei casi in cui le coppie di parametri caratterizzanti l’edificio non rientrano coerentemente negli intervalli fissati nella tabella proposta (Tabella. 3), si deve considerare il valore dello sfasamento per attribuire all’edificio un dato livello di qualità prestazionale.

Sfasamento [h]	Attenuazione [-]	Prestazioni	Qualità prestazionale
$S > 12$	$fa < 0,15$	ottime	I
$12 \geq S > 10$	$0,15 \leq fa < 0,30$	buone	II
$10 \geq S > 8$	$0,3 \leq fa < 0,40$	medie	III
$8 \geq S > 6$	$0,40 \leq fa < 0,60$	sufficienti	IV
$6 \geq S$	$0,6 \leq fa$	mediocri	V

Tabella. 3 La classificazione definita dal DM 26/6/2009 in relazione alla qualità termica estiva dell’involucro edilizio

5.1.2.2. Norme tecniche

La norma UNI EN ISO 13786, “Prestazione termica dei componenti per edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di Calcolo”, costituisce il riferimento nazionale per il calcolo degli indicatori dinamici rappresentativi dell’inerzia termica.

Essa definisce i metodi di calcolo del comportamento termico in regime dinamico di componenti edilizi completi e fornisce un metodo di calcolo semplificato per i componenti piani costituiti da strati piani di materiali edilizi omogenei. La norma specifica, inoltre, le caratteristiche termiche in regime dinamico di un componente edilizio che ne descrivono il comportamento termico in condizioni al contorno variabili con andamento sinusoidale: i confini del sistema, infatti, sono considerati sottoposti a variazioni sinusoidali di temperatura o di flusso termico.

Tra le proprietà termiche definite dalla norma nell’ipotesi di flusso termico monodimensionale vi è la trasmittanza termica periodica, espressa in $W/(m^2 K)$ e indicata con il simbolo Y_{mn} : date due zone termiche m ed n , questa quantità è pari all’ampiezza complessa della densità di flusso termico attraverso la superficie del componente adiacente alla zona m (\hat{q}_m) diviso per l’ampiezza complessa della temperatura nella zona n ($\hat{\theta}_n$). È, quindi, il rapporto tra la conduttanza termica periodica (L_{mn}) espressa in W/K e l’area A espressa in m^2 (Equ. 1):

$$Y_{mn} = \frac{L_{mn}}{A} = -\frac{\hat{q}_m}{\hat{\theta}_n} \quad (1)$$

La norma definisce anche altri due indicatori dinamici, il fattore di decremento e lo sfasamento.

Il fattore di decremento (f) è definito come il rapporto tra il modulo della trasmittanza termica dinamica e la trasmittanza termica in condizioni stazionarie (U) (Equ. 2):

$$f = \frac{|L_{mn}|}{A U} = \frac{|\hat{q}_m|}{|\hat{\theta}_n| U} \quad (2)$$

Lo sfasamento è definito, invece, come il ritardo temporale tra il massimo del flusso termico entrante nell'ambiente interno ed il massimo della temperatura dell'ambiente esterno.

5.1.3. Ricerche su involucri edilizi ad elevata inerzia termica

5.1.3.1. L'inerzia termica in rapporto con la prestazione termico-energetica degli edifici

L'importanza dell'inerzia termica è stata sottolineata in numerose ricerche anche se risulta difficile dare una valutazione generale del suo ruolo per il risparmio e l'efficienza energetica vista la variabilità delle condizioni climatiche e d'uso degli edifici (Aste, Angelotti, Buzzetti, 2009). È riconosciuto, tuttavia, che involucri edilizi ad alta inerzia termica sono particolarmente vantaggiosi in climi temperati caratterizzati da grandi escursioni termiche giornaliere e stagionali come il clima dell'area mediterranea in cui è necessaria molta energia per il raffrescamento dell'ambiente interno (Kontoleon, Theodosiou, Tsikaloudaki, 2013; Stazi et al., 2013; Stazi et al., 2015).

La maggior parte delle ricerche sono relative a interventi di ristrutturazione di edifici esistenti. Alcuni di questi studi sono riferiti a edifici con involucro tradizionale in pietra massiva: queste ricerche, condotte attraverso simulazioni dinamiche e misure sperimentali, hanno dimostrato che involucri pesanti garantiscono una significativa riduzione delle ore di dis-comfort termico interno estivo (Di Perna et al, 2011; Stéphan et al., 2014) e che la differenza tra la domanda energetica per il riscaldamento e il raffrescamento di edifici con pareti a bassa e ad alta inerzia termica può raggiungere rispettivamente il 10% e il 20% (Aste, Angelotti, Buzzetti, 2009). È stato evidenziato, inoltre, come sia impossibile progettare edifici energeticamente efficienti usando un approccio basato solo sul controllo della trasmittanza delle chiusure e come il controllo dell'inerzia termica sia essenziale soprattutto nei climi temperati (Aste et al., 2015).

Altri studi, tuttavia, hanno sottolineato che gli involucri lapidei tradizionali, nonostante il loro notevole spessore e la loro elevata inerzia termica, sono caratterizzati da un insufficiente potere isolante nella stagione invernale: ricerche basate sul monitoraggio in sito di edifici tradizionali in pietra hanno mostrato come, in assenza di impianti di riscaldamento, gli involucri lapidei non garantiscano il raggiungimento di condizioni di comfort termico pur mantenendo la temperatura interna più stabile rispetto ad involucri leggeri (Martín, Mazarrón, Cañas, 2010) e presentino, per spessori di 50 cm, una trasmittanza termica stazionaria variabile tra 1,25-1,70 W/ m² K (De Berardinis et al., 2014), superiore, quindi, ai valori limite di normativa, fissati dal D.Lgs. 311/2006 e variabili per le strutture opache verticali tra 0,62 e 0,33 W/m²K a seconda della zona climatica. Molti studi, pertanto, hanno sottolineato la necessità di interventi di miglioramento della prestazione energetica di edifici esistenti con involucri tradizionali massivi in pietra e hanno valutato gli effetti dell'inserimento di strati isolanti rispetto al comfort termico e al consumo energetico (De Berardinis

et al., 2014; Evola et al., 2015; Stazi, Angeletti, di Perna, 2012). Gli interventi possibili vengono valutati non solo in rapporto alla loro efficacia nel ridurre gli effetti ambientali negativi ma anche in base alla loro invasività: è stato sottolineato (De Berardinis et al., 2014) come la compatibilità sia la condizione essenziale per realizzare ogni intervento di *retrofit* di edifici esistenti inseriti in contesti storici e di valore. Il miglioramento delle prestazioni energetiche, infatti, deve essere basato sulla conoscenza delle caratteristiche tipologiche, tecniche e storiche dell'edificio e sul rispetto per la peculiarità di ogni contesto: non deve alterare, quindi, la percezione delle murature esistenti ma deve contemperare le esigenze di funzionalità, sicurezza ed efficienza energetica con la necessità di preservare il valore storico del patrimonio edilizio.

Nella comparazione delle diverse ipotesi progettuali di miglioramento prestazionale è stato mostrato (Evola et al., 2015) come la capacità termica dell'involucro edilizio abbia un effetto limitato sul comfort termico se non abbinata ad una strategia di ventilazione capace di smaltire il calore accumulato e come questa proprietà debba essere valutata in combinazione con il livello di isolamento per evitare il surriscaldamento estivo connesso ad un eccessivo spessore o ad un'errata posizione dello strato coibente.

5.1.3.2. Approcci di calcolo

Gli indicatori adottati in letteratura per caratterizzare l'inerzia termica degli involucri e degli edifici sono diversi.

In alcuni studi (Asan, 2006; Aste, Angelotti, Buzzetti, 2009; Gagliano et al., 2014; Kontoleon, Theodosiou, Tsikaloudaki, 2013; Stéphan et al., 2014; Ulgen, 2002) l'inerzia termica viene caratterizzata con due indicatori dinamici, il *decrement factor* (f) e il *time lag* (φ), calcolabili in via teorica sulla base dello standard internazionale EN ISO 13786. Questi due indicatori consentono di valutare rispettivamente la capacità di immagazzinamento del calore e il ritardo nella trasmissione dello stesso (Fig. 66) e vengono impiegati per caratterizzare sia l'inerzia termica dell'elemento costruttivo che quella del sistema edificio. L'inerzia dell'elemento costruttivo dipende dalle proprietà termiche dei materiali ovvero dalla conduttività termica, dal calore specifico e dalla densità. Il *decrement factor* e il *time lag* che la esprimono vengono calcolati sperimentalmente con riferimento alle temperature superficiali interne (T_{int}^S) ed esterne (T_{est}^S) della parete (Equ. 1, 2) (Stéphan et al., 2014):

$$f = \frac{A_{si}}{A_{se}} = \frac{T_{max,int}^S - T_{min,int}^S}{T_{max,est}^S - T_{min,est}^S} \quad (1)$$

$$\varphi = |t_2 - t_1| \quad \text{posto } T_{int}^S(t_1) = T_{max,int}^S \quad T_{est}^S(t_2) = T_{max,est}^S \quad (2)$$

L'inerzia del sistema edificio, invece, dipende oltre che dall'inerzia degli elementi costruttivi anche dall'interazione con ambiente esterno e dall'uso dello spazio interno: risultano fondamentali il livello di ricambio d'aria, l'irraggiamento solare, l'orientamento delle stanze e i carichi termici interni. Il *decrement factor* e il *time lag* che esprimono l'inerzia dell'edificio vengono calcolati sperimentalmente con riferimento alle temperature dell'aria esterna (T_{est}^a) ed interna (T_{int}^a) (Equ. 3, 4) (Stéphan et al., 2014):

$$f = \frac{A_{si}}{A_{se}} = \frac{T_{max,int}^a - T_{min,int}^a}{T_{max,est}^a - T_{min,est}^a} \quad (3)$$

$$\varphi = |t_2 - t_1| \quad \text{posto } T_{int}^a(t_1) = T_{max,int}^a \quad T_{est}^a(t_2) = T_{max,est}^a \quad (4)$$

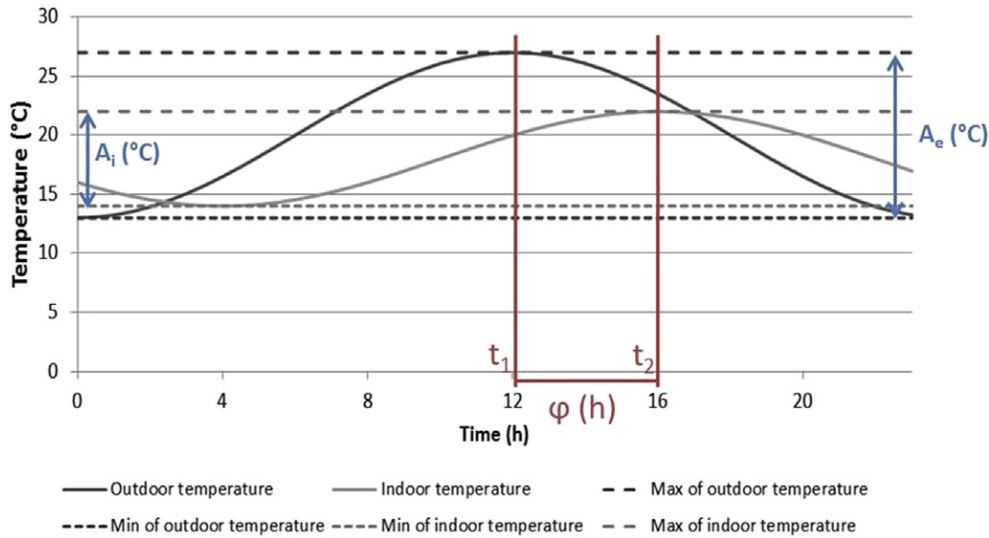


Fig. 66 Indicatori dell'inerzia termica

[Stéphan et al., 2014, p. 242]

I valori dei due indicatori calcolati sulla base di dati sperimentali riferiti alle temperature superficiali delle pareti o dell'aria, differiscono dai valori teorici che si ottengono sulla base della procedura proposta dalla norma EN ISO 13786 poiché questa considera esclusivamente condizioni al contorno sinusoidali e contatti perfetti tra i diversi materiali che compongono l'involucro edilizio (Stéphan et al., 2014).

Valori ridotti del *decrement factor* e valori elevati del *time lag* sono indice di una limitata variazione della temperatura interna il cui picco viene raggiunto con un notevole ritardo rispetto al massimo della temperatura esterna. È stato sottolineato, inoltre, come il valore di questi due indicatori sia legato alla densità e la conduttività termica del materiale costituente l'elemento costruttivo oggetto di analisi (Kontoleon, Theodosiou, Tsikaloudaki, 2013) e alla massa dello stesso anche se non in modo univoco (Aste, Angelotti, Buzzetti, 2009): all'aumentare della massa il *decrement factor* diminuisce mentre il *time lag* aumenta.

In altri studi (Aste, Angelotti, Buzzetti, 2009; Di Perna et al., 2011; Stazi et al. 2015) viene valutata, invece, la capacità termica areale interna (k_1) espressa in $\text{kJ/m}^2\text{K}$: questo parametro, definito dalla norma UNI EN ISO 13786, descrive la reale capacità di accumulare calore sulla superficie interna di un elemento costruttivo e identifica, quindi, lo spessore della massa termica interna che, nella stagione estiva, contribuisce realmente a ridurre la temperatura superficiale interna e ad attenuare la temperatura operativa. Valori elevati della capacità termica interna indicano, pertanto, una parete che ha una potenzialità elevata di accumulo sul lato interno. In base alla norma UNI questo parametro si calcola come il rapporto tra la capacità termica (C_m), dipendente dal periodo delle variazioni termiche interne, e l'area (A) dell'elemento (Equ. 5):

$$k_1 = \frac{C_m}{A} \quad (5)$$

La capacità termica areale interna dipende strettamente dalla posizione mutua tra la massa dell'elemento costruttivo e lo strato di isolamento termico (Stazi et al., 2015): nella definizione di ogni intervento di riqualificazione di edifici esistenti in cui si prevede l'introduzione di uno strato coibente si dovrebbe, pertanto, tendere alla massimizzazione del valore k_1 e al mantenimento del comportamento dinamico stagionale dell'involucro ai fini del contenimento del consumo energetico per il riscaldamento e il raffrescamento. La valutazione della capacità termica areale interna è essenziale per la comprensione del comportamento termico dell'involucro edilizio in quanto è stato dimostrato (Di Perna et al., 2011) che elementi costruttivi con identici valori di trasmittanza termica stazionaria e periodica si comportano diversamente dal punto di vista del comfort interno se presentano valori diversi di k_1 , soprattutto nel caso di alti carichi termici interni. In particolare, il rispetto del valore limite di trasmittanza termica periodica introdotto dalla normativa italiana non garantisce il raggiungimento delle condizioni di comfort interno se non viene associato con una valutazione dell'inerzia termica interna. È stato proposto, quindi, di introdurre la capacità termica areale interna come parametro di riferimento normativo per valutare l'inerzia di un elemento costruttivo e di identificarne per legge dei valori minimi correlati alla trasmittanza termica periodica dell'elemento stesso (Di Perna et al., 2011).

La capacità termica areale interna viene utilizzata per calcolare anche un indicatore dell'effettiva capacità termica dell'intero edificio definito capacità termica interna per unità di area netta di pavimento ed espresso in $\text{kJ/m}^2\text{K}$ (Aste et al., 2015): l'aumento di quest'ultimo indicatore corrisponde ad una diminuzione della domanda energetica per il raffrescamento dell'edificio.

5.1.3.3. Metodologia adottata

La metodologia comune alle ricerche sulle prestazioni di involucri edilizi ad alta inerzia termica è la simulazione dinamica. Questo metodo di calcolo, infatti, consente di valutare le prestazioni termico-energetiche di un edificio attraverso la stima dei consumi energetici, l'analisi del comportamento termico/inerziale dell'involucro e l'esame delle condizioni di comfort termico interno (Martucci, 2016). Il metodo viene prevalentemente impiegato con finalità comparativa: le simulazioni vengono eseguite, infatti, per diversi casi di studio in modo da quantificare i benefici connessi con l'adozione di un approccio progettuale in interventi di *retrofit* di edifici esistenti o individuare tra le alternative di progetto la soluzione migliore (Aste et al., 2015; De Berardinis et al., 2014; Evola et al., 2015; Stazi et al. 2013, Stazi et al., 2015). Inoltre, la norma UNI/TS 11300-1 del 2014 ("Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale") prevede la possibilità di adottare questo metodo per eseguire il calcolo dei fabbisogni di energia termica per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici, in alternativa al metodo di calcolo mensile descritto nella specifica tecnica e basato su un approccio semi-stazionario.

Le simulazioni dinamiche si basano sui parametri climatici che caratterizzano il contesto geografico in cui è ubicato l'edificio analizzato, come la temperatura e la radiazione solare. Essi variano con cadenza oraria e sub-oraria: in risposta alle modificazioni dei parametri ambientali esterni variano temporalmente tutti i parametri relativi al microclima e agli impianti interni come la temperatura operativa e la temperatura superficiale interna delle pareti.

Solitamente il modello da simulare viene calibrato correggendo iterativamente i dati di input a partire da dati reali misurati sperimentalmente in sito finché non si ottiene una buona corrispondenza tra i risultati della simulazione e le misurazioni effettuate (Aste et al., 2015; Di Perna et al., 2011; Stazi et al., 2013; Stazi et al., 2015). In assenza di dati sperimentali, la validazione dei risultati delle simulazioni dinamiche può essere effettuata attraverso una comparazione con i risultati ottenuti con *software* di valutazione della prestazione energetica degli edifici basati su un approccio di calcolo semi-stazionario (Salata et al., 2017).

Uno dei *software* di simulazione dinamica largamente usati in letteratura (Aste, Angelotti, Buzzetti, 2009; Aste et al., 2015; De Bernardinis et al., 2014; Di Perna et al., 2011; Evola et al., 2015; Stazi et al., 2013; Stazi et al., 2015) è EnergyPlus, solitamente impiegato in combinazione con l'interfaccia grafica Design Builder: questo motore di simulazione *open source*, sviluppato dallo *U.S. Department of Energy*, consente di stimare i carichi energetici di edifici con destinazione d'uso residenziale, commerciale e industriale per numerose località del mondo, di cui sono disponibili file climatici dettagliati riferiti ad un anno solare. Il *software* permette di valutare in modo accurato la temperatura degli ambienti, essenziale per il dimensionamento degli impianti di riscaldamento e raffrescamento e per la stima del comfort degli occupanti (Crawley et al., 2008). In Energy Plus, tuttavia, i dati di input e di output sono in formato testuale: viste le difficoltà di impostazione del modello e di lettura dei risultati, sono state sviluppate nel tempo diverse interfacce grafiche, tra cui Design Builder, che permettono di specificare con maggiore semplicità i parametri necessari per la simulazione.

Design Builder consente di definire la geometria dell'edificio e di suddividere il modello virtuale dello stesso in zone termiche distinte in modo da tenere conto delle diverse destinazioni d'uso degli ambienti. Permette, inoltre, di definire le caratteristiche termofisiche dei materiali costituenti gli elementi costruttivi e la tipologia di impianti di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione. Dispone, infatti, di *template* di sistemi impiantistici adatti ad edifici con diverse destinazioni d'uso e di librerie contenenti le caratteristiche dei principali materiali da costruzione e di alcuni tipi di elementi costruttivi, che possono essere ampliate e personalizzate dall'utente. Il programma può essere impiegato per modellare un intero edificio, esistente o di progetto, ma anche per simulare le prestazioni di una *test cell* ovvero di una singola zona termica dello stesso (Aste, Angelotti, Buzzetti, 2009). Alcune delle superfici che definiscono il modello virtuale possono essere qualificate come adiabatiche nel caso in cui rappresentino elementi di separazione tra zone termiche alla stessa temperatura.

5.2. EFFICIENZA PRESTAZIONALE DI INVOLUCRI INNOVATIVI IN PIETRA MASSIVA IN RAPPORTO ALLE TECNICHE TRADIZIONALI DELL'EDILIZIA STORICA

5.2.1. Introduzione

Dall'analisi dell'evoluzione storica delle tecniche costruttive e delle ricerche relative all'influenza dell'inerzia termica sulla prestazione termico-energetica degli edifici è emerso che gli involucri tradizionali in pietra massiva basati sul sistema a corpo unico presentano notevoli potenzialità nella stagione estiva: le murature lapidee storiche dovendo assolvere contemporaneamente a compiti di resistenza statica e di comfort ambientale presentano, infatti, spessori rilevanti ed elevati valori di inerzia termica che garantiscono un buon comportamento termico-energetico nella stagione estiva. Tuttavia, nella stagione invernale presentano delle carenze prestazionali legate al loro limitato potere isolante. Questi elementi di carenza prestazionale connessi con le istanze di fruizione devono essere superati negli interventi di nuova progettazione o di ricostruzione. Nel caso di interventi da attuarsi in contesti storicizzati fortemente connotati e caratterizzati dai materiali lapidei, è necessario, però, tutelare e valorizzare la cultura costruttiva tradizionale attraverso la definizione di involucri innovativi in pietra massiva capaci di esaltarne il valore identitario e le potenzialità prestazionali. La ricerca quantifica e confronta le prestazioni di alcuni degli involucri innovativi catalogati nel capitolo 4 con quelle della muratura storica in pietra per valutarne i benefici in termini di comfort termico e di consumo energetico.

5.2.2. Metodologia

Sono stati scelti come casi di studio i Bagni Termali di Vals di Peter Zumthor, la Scuola di Alti Studi Musicali della Galizia di Antón García-Abril Ruiz e la Haus 9x9 di Titus Bernhard poiché le rispettive soluzioni di involucro sono tra le più interessanti della produzione architettonica contemporanea come dimostrano le numerose pubblicazioni che analizzano criticamente queste opere (Acocella, 2004, pp. 160-167; Acocella, 2006a; Hugues, Steiger, Weber, 2007, p. 115; Pavan, 2013; Pongratz, Perbellini, 2009, p. 72-76; Redazionale, 1997a, pp. 56-75; Redazionale, 2003b, pp. 1274-1277; Turrini, 2007b). Le soluzioni tecniche impiegate esaltano, infatti, le valenze espressive e gli attributi di durabilità ed inerzia termica propri degli involucri lapidei tradizionali ma, essendo basate sul principio del corpo multiplo, ne superano le carenze prestazionali connesse alle istanze di fruizione. Inoltre, appaiono generalizzabili a diversi tipi edilizi.

Per quantificare i benefici degli involucri massivi contemporanei rispetto a quelli tradizionali sul comfort termico e sul consumo energetico, si è scelto di eseguire delle simulazioni dinamiche annuali con il *software* Design Builder che si basa sul motore EnergyPlus, strumento di analisi energetica ampiamente impiegato in letteratura (cfr. 5.1.3.3.). Le simulazioni sono state eseguite sul modello virtuale di un semplice edificio residenziale di progetto, ubicato nella città di Grosseto, che richiama le tradizionali case a schiera presenti in molti centri urbani italiani (Fig. 67): è stato modellato, infatti, un edificio di due piani con tetto a due falde che presenta due pareti trasversali in comune con altri edifici, caratterizzate come adiabatiche, e due pareti longitudinali esposte a nord e a sud con quattro aperture ciascuna. La città di riferimento rientra nella zona climatica D in base alla classificazione introdotta dal Decreto del presidente della Repubblica n. 412 del 26 agosto 1993 (tabella A e successive modifiche ed integrazioni) in merito al Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del

contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10. Il file climatico impiegato nelle simulazioni è relativo alla stazione meteorologica ubicata presso l'aeroporto di Corrado Baccharini di Grosseto.

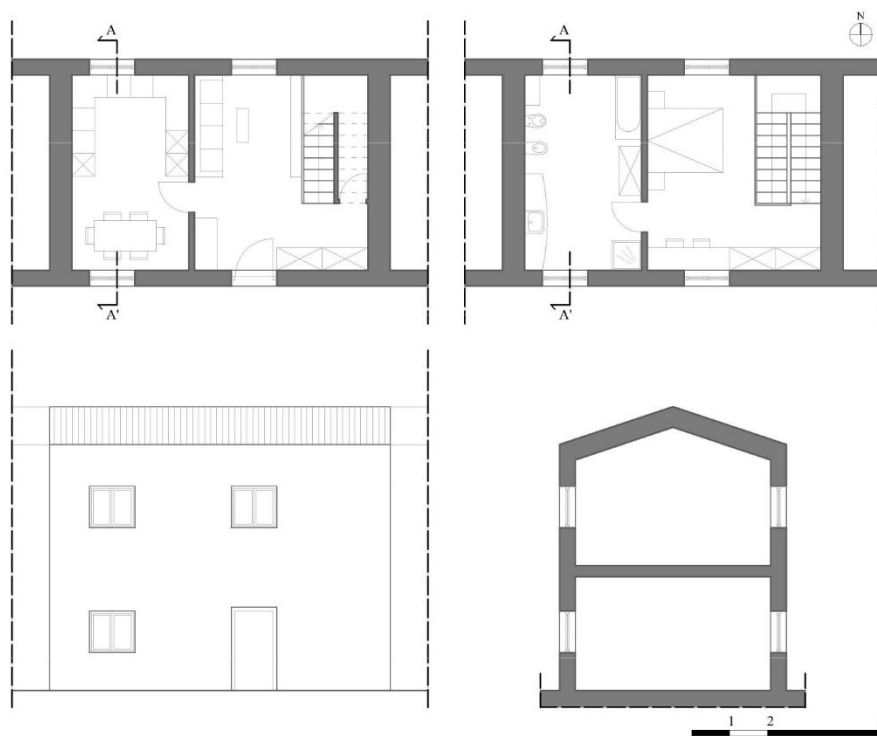


Fig. 67 Planimetrie, prospetto e sezione dell'edificio di progetto

Le simulazioni sono state eseguite variando esclusivamente la stratigrafia delle pareti: i casi simulati, riassunti nella Fig. 68, sono caratterizzati da involucri in muratura in pietra e malta ad *opus quadratum* con finitura interna ad intonaco (caso T[40], caso T[60]), e dagli involucri delle opere di Zumthor (caso I[Zum]), Abril (caso I[Abr]) e Bernhard (caso I[Ber]) modellati secondo la stratigrafia riportata dai dettagli costruttivi pubblicati²⁷. Le murature ad *opus quadratum*, essendo soluzioni tradizionali di involucro, rappresentano i casi di riferimento con cui sono state confrontate le prestazioni degli involucri contemporanei studiati: si differenziano per lo spessore totale, pari a 41,5 cm (caso T[40]) e a 61,5 cm (caso T[60]) e presentano entrambe una finitura interna ad intonaco. Il caso di riferimento T[40] è stato modellato oltre che in Design Builder anche in MasterClima MC11300, un *software* semplificato certificato dal CTI (Comitato Termotecnico Italiano), per confrontare il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento calcolato secondo l'approccio dinamico con quello calcolato con un approccio semi-stazionario. L'adozione per il caso T[40] dei due approcci di calcolo consente di validare i risultati ottenuti verificando che il relativo scostamento percentuale sia inferiore al 5%, ovvero al valore di soglia fissato dal CTI per il rilascio della certificazione dei *software* semplificati (Salata et al., 2017).

²⁷ In particolare, nella stratigrafia delle pareti del caso I[Ber] è stato inserito uno strato di guaina bituminosa per tener conto del particolare sistema scelto per lo smaltimento delle acque meteoriche nell'edificio residenziale Haus 9x9 progettato da Titus Bernhard (cfr. 4.3.3 e 6.2.2). Inoltre, per tenere conto della presenza dell'aria tra i frammenti lapidei di riempimento dei gabbioni, si è adottato il metodo di modellazione semplificato descritto nel paragrafo 6.1.2.1. e si è assunto un indice dei vuoti pari a 30%.

Gli involucri innovativi simulati in Design Builder hanno tutti una trasmittanza termica inferiore al valore limite fissato per le strutture opache verticali dal D. Lgs. 311/2006 per la zona climatica D cui appartiene la città di Grosseto, pari a $0,36 \text{ W/m}^2\text{K}$. Anche la copertura di progetto, il solaio controterra e le aperture vetrate (Tabella. 4) presentano valori di trasmittanza rispettosi dei limiti di legge pari a $0,32 \text{ W/m}^2\text{K}$ per strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, a $0,36 \text{ W/m}^2\text{K}$ per strutture opache orizzontali di pavimento e a $2,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ per le chiusure trasparenti.

	Dettaglio edificio di riferimento	Stratigrafia analizzata	Materiali	s (m)	U ($\text{W/m}^2 \text{K}$)
Caso T[40]			1_muratura in pietra e malta (40 cm) 2_intonaco (1,5 cm)	0,41	2,15
Caso T[60]			1_muratura in pietra e malta (60 cm) 2_intonaco (1,5 cm)	0,61	1,67
Caso I[Zum]	 Terme di Vals, dettaglio (Redazionale 1997a, p. 75)		1_rivestimento in pietra (13,5 cm) 2_cls armato (16,5 cm) 3_polistirene espanso (12 cm) 4_cls armato (18 cm)	0,60	0,30
Caso I[Abr]	 Scuola di Alti Studi Musicali - Galizia, dettaglio (Pavan, 2013, p. 132)		1_rivestimento in pietra (32,5 cm) 2_lana di roccia (4 cm) 3_aria (20 cm) 4_poliuretano (4 cm) 5_cartongesso (1,3+1,3 cm)	0,63	0,33
Caso I[Ber]	 Haus 9X9, dettaglio (Redazionale, 2003b, p. 1276)		1_gabbioni (12 cm) 2_aria (3 cm) 3_drenaggio (1 cm) 4_polistirene (14 cm) 5_guaina bituminosa (0,5 cm) 6_cls armato (22 cm) 7_intonaco (1,5 cm)	0,54	0,21

Fig. 68 I casi di simulazione: riferimenti, stratigrafie, spessore totale, trasmittanza

Elemento costruttivo	Materiale	Spessore	Trasmittanza termica
Solaio controterra	Pavimento in legno	0,015 m	0,21 W/(m ² K)
	Massetto	0,07 m	
	Isolante (fibra di vetro)	0,15 m	
	Impermeabilizzazione	0,005 m	
	Calcestruzzo	0,2 m	
Solaio intermedio	Pavimento in legno	0,015 m	0,55 W/(m ² K)
	Massetto	0,07 m	
	Calcestruzzo	0,2 m	
	Intonaco	0,015	
Solaio di copertura	Tegole	0,025 m	0,14 W/(m ² K)
	Impermeabilizzazione	0,005 m	
	Isolamento (lana di roccia)	0,22 m	
	Calcestruzzo	0,25 m	
	Intonaco	0,015	
Partizione	Cartongesso	0,025 m	1,56 W/(m ² K)
	Cavità d'aria	0,1 m	
	Cartongesso	0,025 m	
Finestra	Vetro PYR B clear	0,003 m	1,96 W/(m ² K)
	Cavità d'aria	0,013 m	
	Vetro PYR B clear	0,003 m	

Tabella. 4 Caratteristiche degli elementi costruttivi

Nell'ambiente di simulazione dinamica le quattro stanze dell'abitazione adibite a cucina, soggiorno, camera da letto e bagno sono state modellate come zone termiche distinte per tenere conto della loro diversa destinazione d'uso. Il sistema impiantistico è stato specificato selezionando tra i *template* disponibili nel programma una soluzione adatta ad edifici residenziali monofamiliari. Il *template* prescelto include un impianto di riscaldamento a radiatori alimentato a gas, un boiler per la produzione di acqua calda sanitaria e un sistema di raffrescamento alimentato ad elettricità. Le temperature di *setpoint* per gli impianti sono state impostate a 20 °C per la stagione invernale e a 26 °C per quella estiva secondo quanto stabilito dall'Organizzazione Italiana per la Standardizzazione e dal Comitato Europeo di Normalizzazione (specifica tecnica UNI EN 15251: 2008) nonché dalla norma tecnica UNI/TS 11300-1: 2014 ("Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale").

La simulazione dei cinque casi è stata eseguita con gli impianti di riscaldamento e di raffrescamento accesi per determinare i relativi consumi energetici: sono stati valutati i consumi totali annuali e i consumi energetici mensili per il riscaldamento e per il raffrescamento. Sono stati calcolati anche i guadagni e le dispersioni termiche delle pareti esterne. Per il caso di riferimento più performante (T[60]) e per i casi I[Zum], I[Abr] e I[Ber] le simulazioni sono state ripetute ad impianti spenti per determinare, su base oraria, le temperature operative in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) e in un tipico giorno estivo (31 Luglio). Nel medesimo giorno estivo, inoltre, sono stati valutati gli andamenti delle temperature superficiali esterne ed interne delle pareti sud (T_{est}^S ; T_{int}^S). Sulla base delle temperature superficiali massime ($T_{max,est}^S$; $T_{max,int}^S$) sono stati calcolati i valori di attenuazione (f) e il tempo di ritardo (ϕ) in modo da caratterizzare l'inerzia termica delle pareti (Equ. 1, 2):

$$f = \frac{A_{si}}{A_{se}} = \frac{T_{max,int}^S - T_{min,int}^S}{T_{max,est}^S - T_{min,est}^S} \quad (1)$$

$$\varphi = |t_2 - t_1| \quad \text{posto } T_{int}^S(t_1) = T_{max,int}^S \quad T_{est}^S(t_2) = T_{max,est}^S \quad (2)$$

5.2.3. Risultati e discussione

5.2.3.1. Risultati dell'analisi in regime stazionario e dinamico sul caso di riferimento e validazione del modello

Il caso di riferimento T[40] è stato modellato attraverso il *software* Design Builder e attraverso il *software* dell'AERMEC MasterClima MC 11300, versione 3.15 CE/PE. In MasterClima sono stati importati da Design Builder i pacchetti costruttivi utilizzati nell'edificio di progetto. Sono stati definiti, inoltre, i dati climatici e tutte le informazioni relative ai componenti opachi e trasparenti, ai diversi ambienti e al fabbricato nel suo complesso. Mentre, però, Design Builder considera la variazione oraria dei dati climatici, MasterClima MC 11300 considera dati climatici medi in accordo con la norma tecnica UNI 10349 (Salata et al., 2017).

Attraverso i due *software* è stato valutato il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento definito dalla specifica tecnica UNI/TS 11300-1 del 2014 ("Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale") come la quantità di calore che deve essere fornita ad un ambiente per mantenere le condizioni di temperatura desiderate durante un dato periodo di tempo.

I risultati calcolati secondo l'approccio dinamico sono inferiori a quelli calcolati secondo l'approccio semi-stazionario (Tabella. 5) poiché la variazione percentuale è inferiore al 5% ovvero al valore di soglia fissato dal Comitato Termotecnico Italiano per il rilascio della certificazione dei *software* commerciali utilizzabili per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, i risultati ottenuti con i due approcci di calcolo sono validati (Salata et al., 2017).

	<i>Software</i>		Variazione [%]
	MC11300	Design Builder	
Fabbisogno di energia termica per il riscaldamento [kWh]	7004,9	6734,1	3,9%

Tabella. 5 Validazione dei risultati delle simulazioni condotte con Design Builder e MC 11300

5.2.3.2. Risultati dell'analisi comparativa in regime dinamico

Dalle simulazioni dinamiche annuali condotte ad impianti accesi è emerso che le tre soluzioni di involucro contemporanee (I[Zum], I[Abr], I[Ber]) risultano vantaggiose in termini di consumi energetici totali rispetto ai casi di riferimento T[40] e T[60] (Tabella. 6): rispetto al caso T[40] gli involucri innovativi studiati, infatti, consentono un risparmio energetico variabile tra 38,6% e 40,7%, molto superiore al risparmio calcolato per il caso T[60], pari all'11,4%.

	Caso T[40]	Caso T[60]	Caso I[Zum]	Caso I[Abr]	Caso I[Ber]
Energia totale [kWh]	13891	12305,6	8386,9	8534	8233,1
Risparmio rispetto al caso T[40] [%]	-	11,4	39,6	38,6	40,7

Tabella. 6 Energia totale consumata in un anno per i diversi casi di simulazione

Relativamente ai consumi per il riscaldamento (Fig. 69), le tre soluzioni contemporanee consentono un risparmio energetico considerevole rispetto ad entrambe le soluzioni tradizionali grazie alla loro inferiore trasmittanza termica: le differenze percentuali rispetto al caso T[40], infatti, sono comprese tra 60,9% e 65,9%. Anche le differenze tra i consumi per il riscaldamento dei casi I[Zum], I[Abr] e I[Ber] rispetto al caso T[40] sono significative, soprattutto nel mese di Agosto (Fig. 70): il risparmio rispetto al caso di riferimento, infatti, è variabile tra 7,2% e 11,7%.

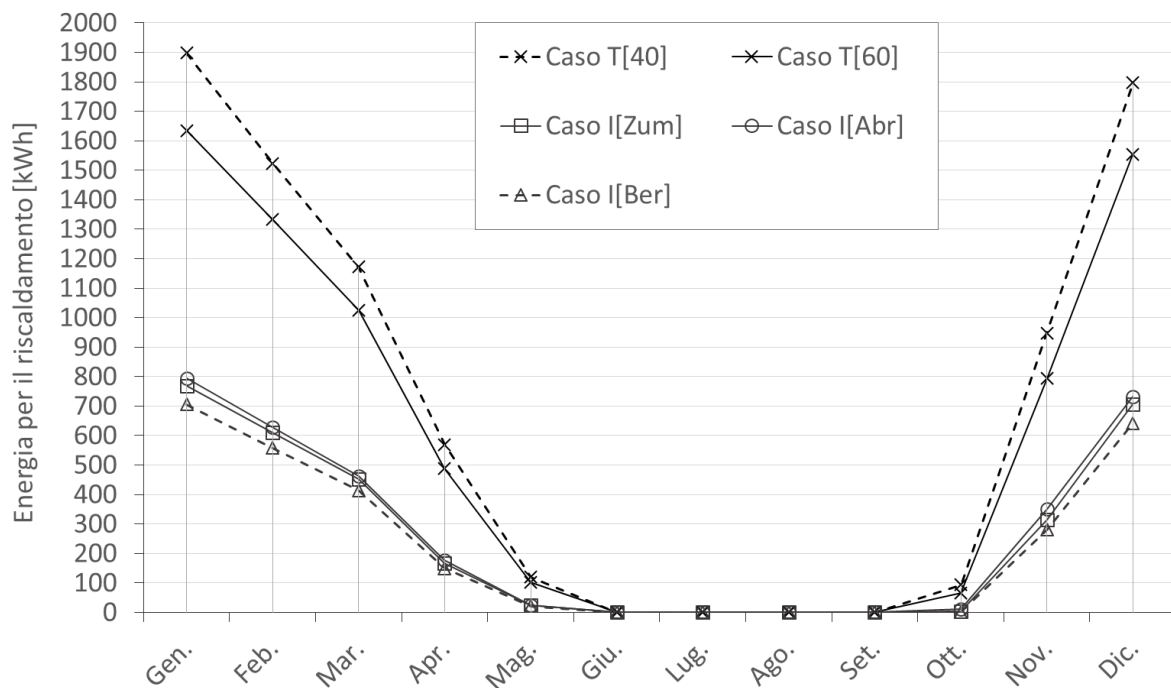


Fig. 69 Consumo energetico annuale per il riscaldamento

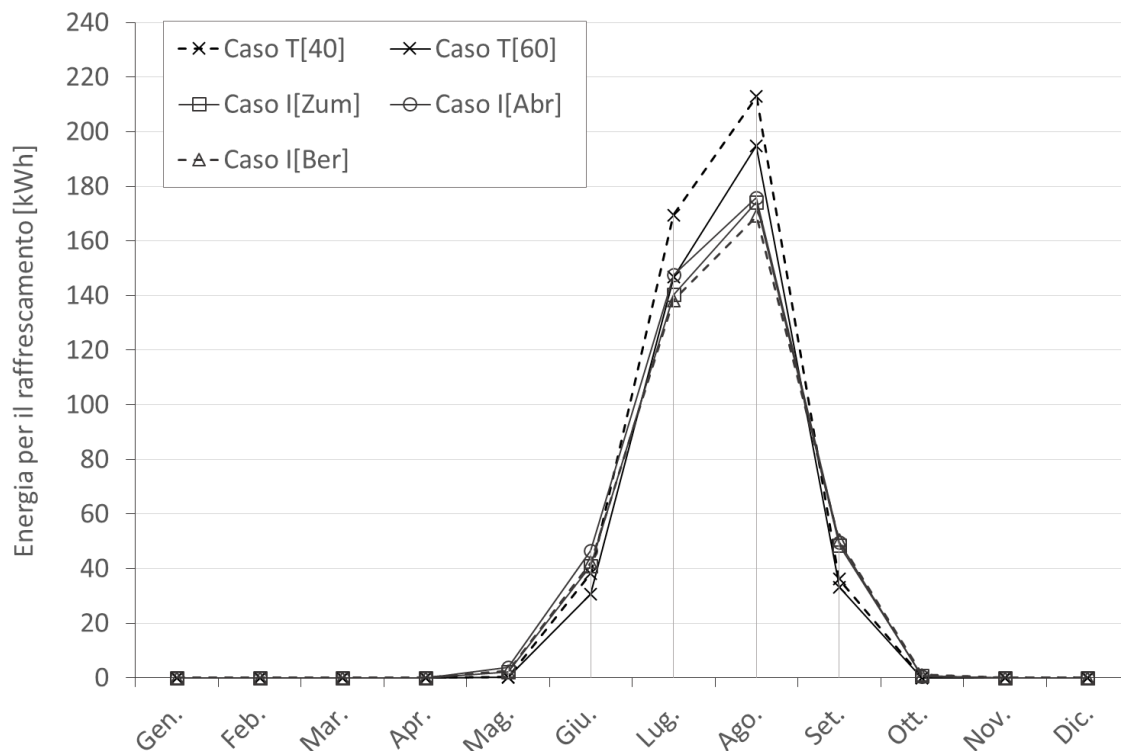


Fig. 70 Consumo energetico annuale per il raffrescamento

Relativamente agli scambi termici con l'ambiente esterno, è emerso che gli involucri tradizionali cedono una quantità maggiore di calore rispetto agli involucri contemporanei a causa della mancanza di uno strato coibente (Fig. 71).

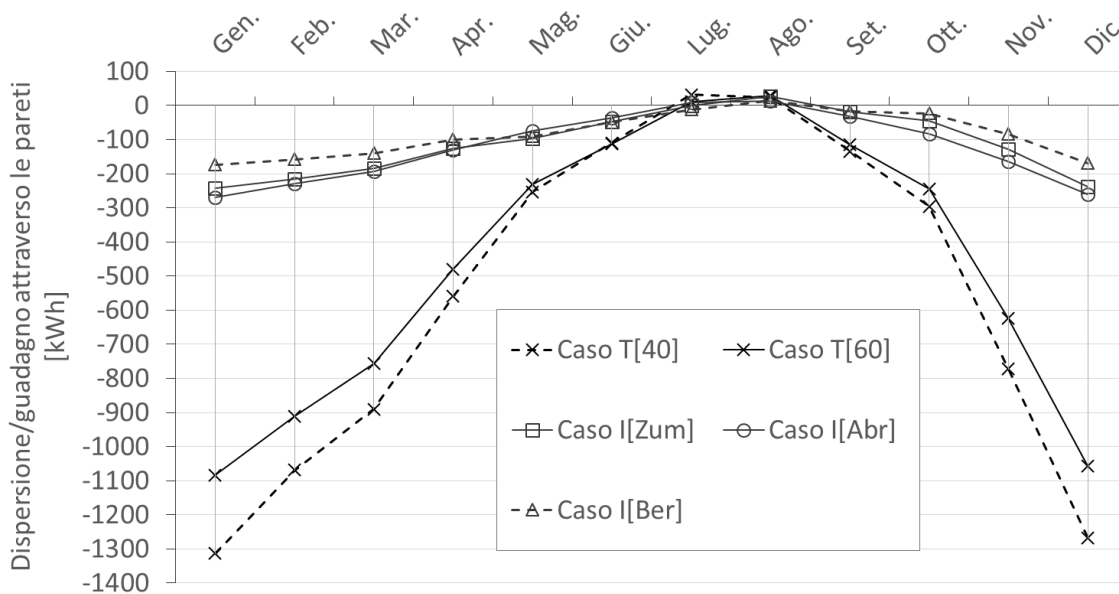


Fig. 71 Calore scambiato dalle pareti con l'ambiente esterno durante l'anno

Dalle simulazioni ad impianti spenti eseguite per il caso di riferimento più performante, T[60], e per i casi I[Zum], I[Abr] e I[Ber], è emerso che l’involucro basato sull’opera di Bernhard consente di ottenere all’interno dell’edificio il maggior livello di comfort termico in inverno ed in estate poiché le relative temperature operative calcolate in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) e in un tipico giorno estivo (31 Luglio) risultano rispettivamente le più elevate e le più contenute (Fig. 72). La prestazione invernale dei diversi casi di studio è strettamente correlata alla trasmittanza termica degli involucri analizzati: i casi con le pareti verticali caratterizzate dai valori minori di trasmittanza termica, infatti, consentono di ottenere temperature operative più elevate e, quindi, garantiscono una migliore prestazione termica. In estate, un fattore da considerare oltre alla trasmittanza termica è la posizione dello strato isolante nella stratigrafia di parete: il caso I[Abr], infatti, pur avendo una trasmittanza inferiore al caso T[60] offre una prestazione termica peggiore nella stagione calda in quanto il posizionamento dell’isolante termico sul lato interno della massa termica tende a mantenere il calore nell’edificio surriscaldando l’ambiente interno.

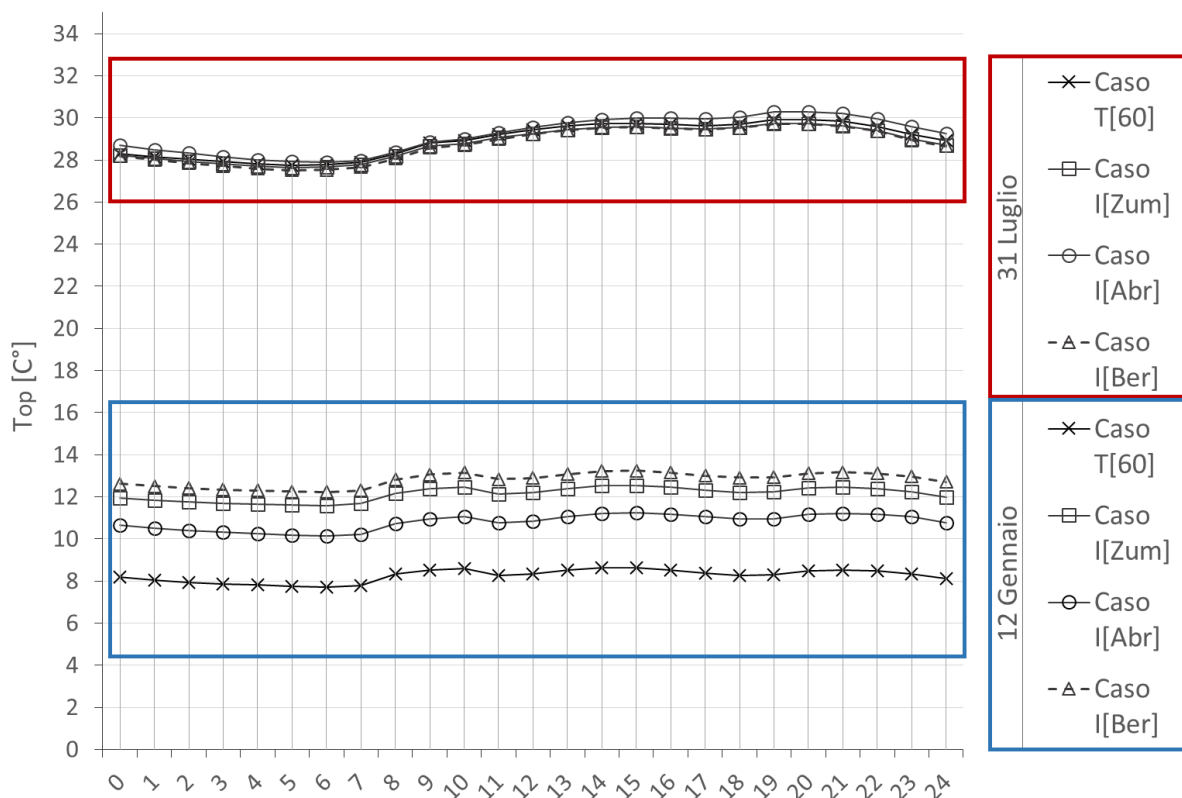


Fig. 72 Le temperature operative registrate all’interno dell’edificio nelle diverse ore di un tipico giorno invernale (12 Gennaio) e di un tipico giorno estivo (31 Luglio)

La prestazione termica estiva dei diversi casi di studio è stata valutata analizzando anche le temperature superficiali delle pareti sud dell’edificio di progetto. Nel giorno estivo scelto per la valutazione delle temperature operative, l’andamento delle temperature superficiali interne dei quattro casi simulati è risultato attenuato e sfasato rispetto a quello delle temperature superficiali esterne, confermando i benefici di soluzioni massive sul comfort termico estivo (Fig. 73, Fig. 74, Fig. 75, Fig. 76). Dal calcolo degli indicatori caratterizzanti l’inerzia termica delle pareti, infine, è emerso

che le soluzioni costruttive innovative studiate consentono di ritardare di 8 ore il verificarsi del picco di temperatura superficiale interna, con uno scarto di solo un'ora rispetto alla soluzione tradizionale (Tabella. 7). Inoltre, il caso I[Ber] consente, come il caso T[60], di attenuare l'ampiezza dell'onda termica di circa 20 volte. Il caso I[Zum] permette di ottenere un valore di attenuazione di poco superiore a quello della soluzione tradizionale mentre il caso I[Abr] risulta il più svantaggioso a causa della posizione dell'isolante termico nella stratigrafia di parete (Tabella. 7).

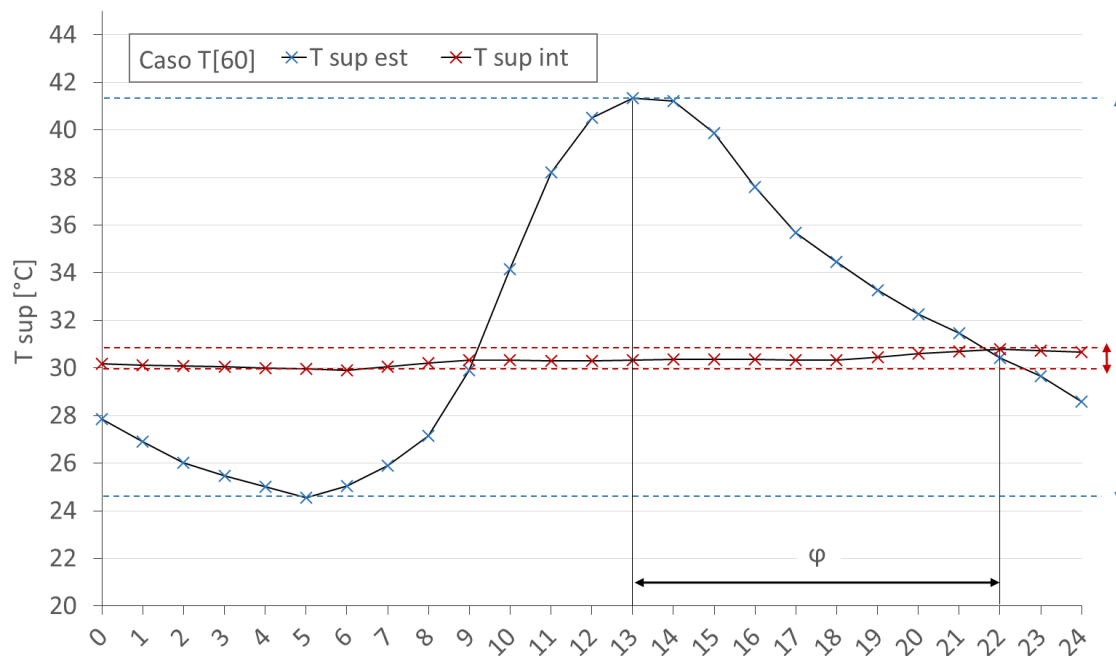


Fig. 73 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso T[60]

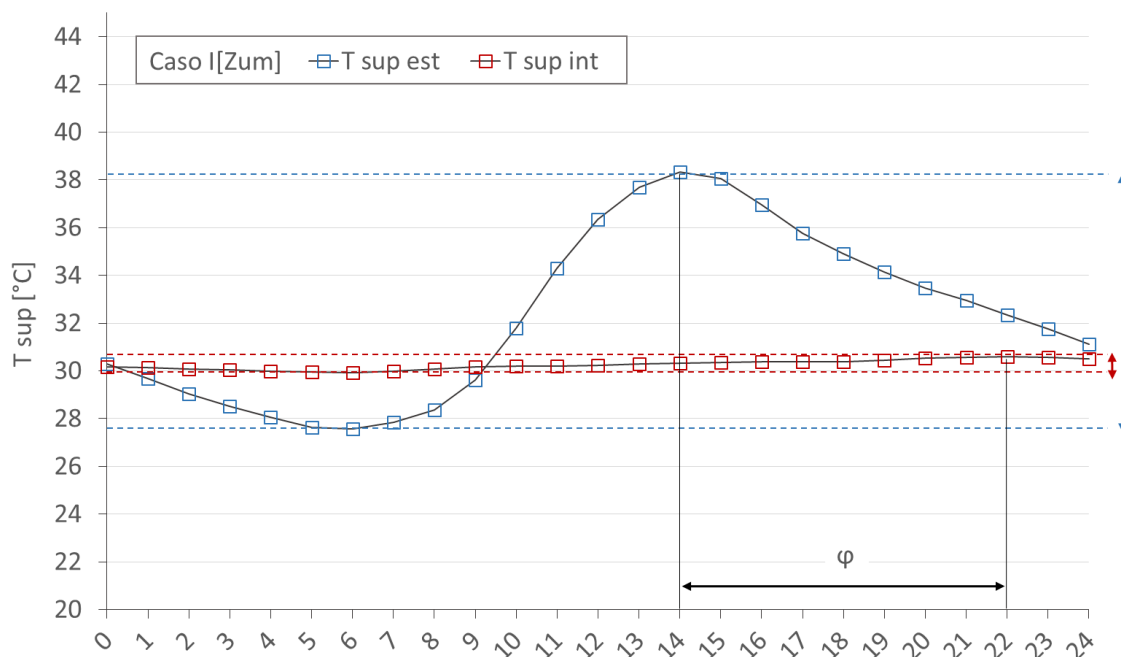


Fig. 74 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Zum]

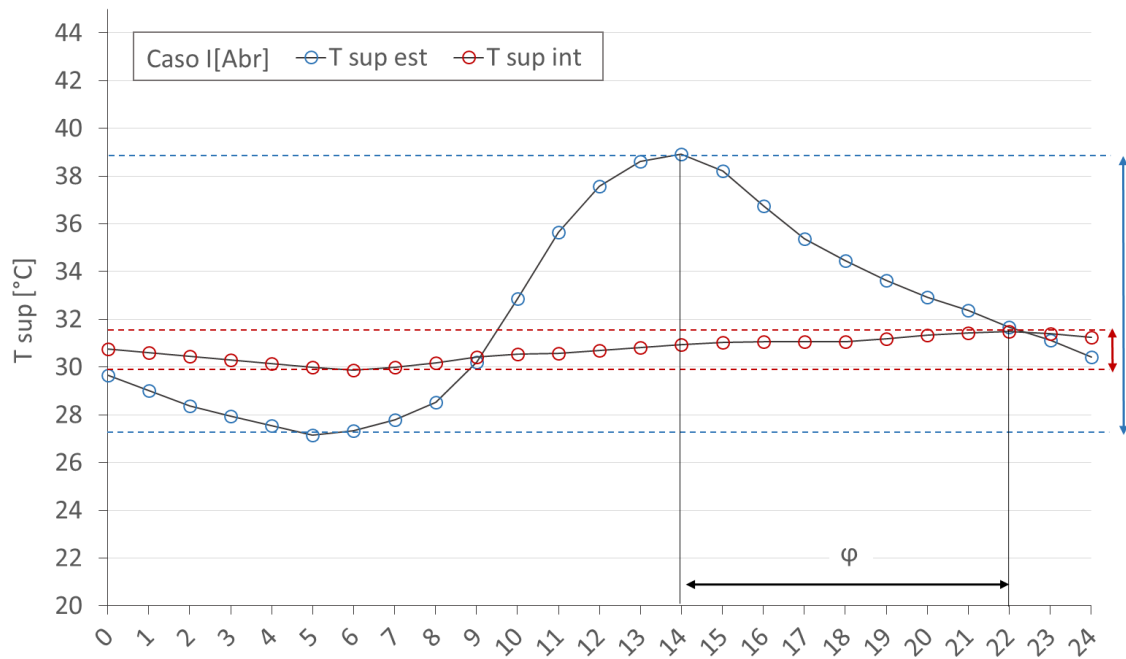


Fig. 75 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Abr]

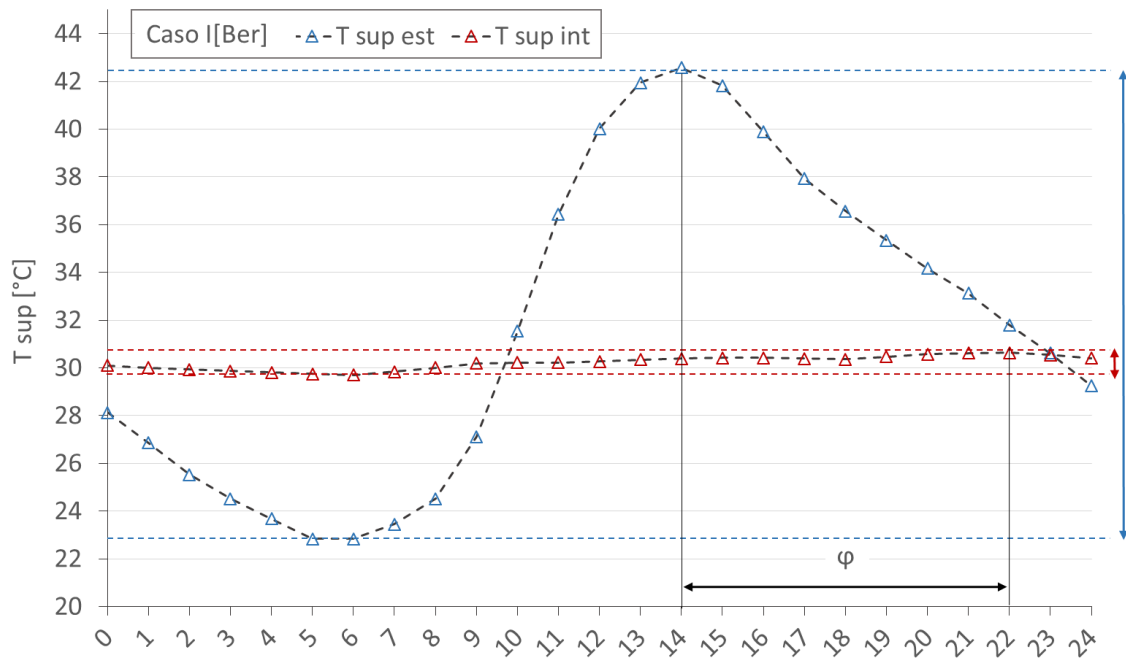


Fig. 76 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Ber]

	Caso T[60]	Caso I[Zum]	Caso I[Abr]	Caso I[Ber]
φ [h]	9	8	8	8
f [-]	0,05	0,06	0,14	0,05

Tabella. 7 Il tempo di ritardo (φ) e i valori di attenuazione (f) valutati per le pareti sud dei quattro casi di simulazione, considerando le massime temperature superficiali esterne ed interne raggiunte in un tipico giorno estivo (31 Luglio)

5.2.4. Conclusioni

L'analisi prestazionale dei tre involucri contemporanei a corpo multiplo in pietra massiva selezionati come casi di studio ha permesso di evidenziarne le potenzialità in rapporto alla tecnica tradizionale della muratura lapidea a corpo unico. Le soluzioni costruttive adottate nelle opere di Zumthor, Abril e Bernhard, infatti, permettono non solo di reinterpretare la cultura costruttiva tradizionale ma risultano anche sostenibili a livello ambientale. I risultati ottenuti dalle simulazioni eseguite sull'edificio residenziale di progetto mostrano, infatti, che essi presentano dei vantaggi in termini di consumi energetici per il riscaldamento ed il raffrescamento rispetto agli involucri tradizionali e che permettono di mantenere le temperature superficiali interne delle pareti più stabili rispetto a quelle esterne. Nella stagione invernale le soluzioni tecniche attuali consentono di superare le carenze prestazionali delle murature storiche in pietra connesse con le istanze di fruizione grazie alla loro inferiore trasmittanza termica. Inoltre, nonostante il cambiamento del principio costruttivo alla base della progettazione, mantengono le potenzialità prestazionali connesse con gli attributi di massività ed elevata inerzia termica delle soluzioni tradizionali a corpo unico poiché nella stagione estiva l'andamento delle temperature superficiali interne risulta attenuato e sfasato rispetto a quello delle temperature superficiali esterne. Gli svantaggi in termini di tempo di ritardo e valore di attenuazione risultano, infine, contenuti.

5.3. STUDIO DELLE PRESTAZIONI DI INVOLUCRI INNOVATIVI E TRADIZIONALI IN PIETRA MASSIVA IN DIVERSE CONDIZIONI CLIMATICHE

5.3.1. Metodologia

Per comprendere quanto i benefici energetici degli involucri lapidei innovativi rispetto a quelli tradizionali varino in condizioni climatiche differenti, le simulazioni eseguite nella città di Grosseto sono state ripetute modificando l'ubicazione dell'edificio di progetto. Sono stati scelti come contesti di studio le città di Bologna e di Catania poiché rappresentative di condizioni climatiche tipiche del territorio italiano e in generale dell'area dell'Europa meridionale e dell'area mediterranea (Aste, Angelotti, Buzzetti, 2009). Le due città, infatti, rientrano rispettivamente nelle zone climatiche E e B in base alla classificazione introdotta dal Decreto del presidente della Repubblica n. 412 del 26 agosto 1993 (tabella A e successive modifiche ed integrazioni) in merito al Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10.

I file climatici utilizzati durante le simulazioni eseguite con Design Builder sono relativi alle stazioni meteorologiche di riferimento delle tre città, ubicate presso gli aeroporti Corrado Baccarini di Grosseto, Bologna-Borgo Panigale e Catania-Fontanarossa (Tabella. 8). Le temperature annuali esterne che costituiscono i dati di input delle simulazioni effettuate nei tre contesti di studio sono state graficate su base oraria in Fig. 77.

	Grosseto	Bologna	Catania
Zona climatica	D	E	B
Gradi Giorno	1550	2259	833
File climatico	Grosseto	Bologna-Borgo Panigale	Catania-Fontanarossa

Tabella. 8 I tre contesti di studio scelti per le simulazioni dinamiche

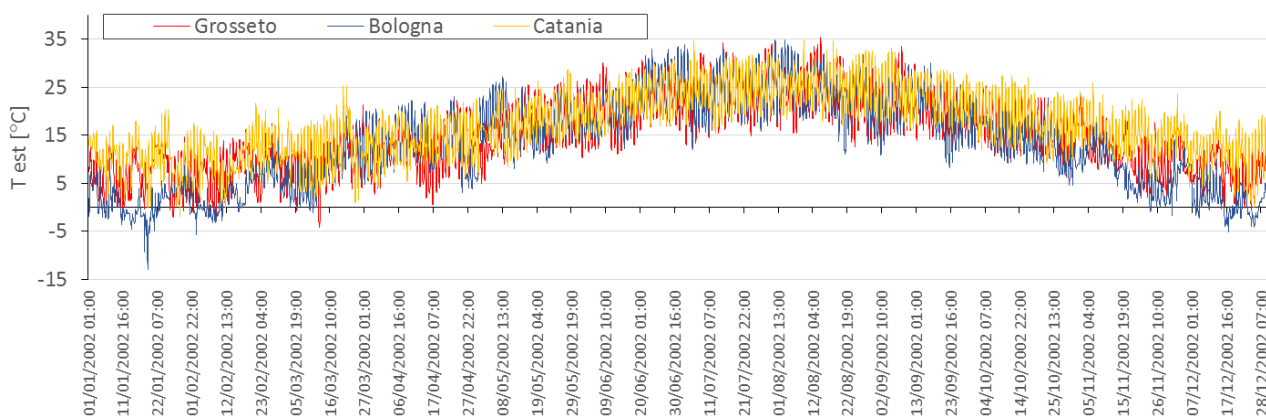


Fig. 77 Le temperature annuali esterne a bulbo secco, input delle simulazioni eseguite nei contesti di studio di Grosseto, Bologna e Catania, valutate su base oraria

Le città di Bologna e di Catania sono state scelte come contesti di studio anche in considerazione dell'importanza che i materiali lapidei hanno avuto storicamente nella definizione del loro aspetto (Rodolico, 1965). A Bologna nonostante siano prevalenti le costruzioni in laterizio, infatti, il gesso è stato impiegato come pietra da taglio dall'epoca romana fino a tutto il secolo XIII, soprattutto nei

muri di fondazione e nelle parti inferiori delle torri (Rodolico, 1965, p. 166, 168): le basi della Garisenda e delle torri dei Galluzzi, dei Prendiparte, degli Alberici e degli Azzoguidi sono rivestite, infatti, di conci parallelepipedi di selenite; le Case Isolani, Grassi e Serracchioli presentano basamenti di gesso che è stato utilizzato anche per i muri di Palazzo Ghisilardi, per gli archi della basilica di Santo Stefano e per le porte della Cinta dei Mille. Un'altra pietra molto usata nella città a partire dal Duecento fu l'arenaria locale, spesso in combinazione con i laterizi come testimoniano le colonne del Palazzo della Biava. L'uso di questa pietra divenne molto comune durante il 1400 sotto i Bentivoglio (Rodolico, 1965, pp. 168-169): fu impiegata nelle costruzioni laterizie per pilastri, colonne, capitelli, cornici, chiavi di volta ma anche per le facciate di alcuni edifici tra cui la chiesa della Madonna di Galliera e il Palazzo Bevilacqua. L'arenaria in alcuni casi fu sostituita da calcari veronesi e istriani, come nel basamento della chiesa di San Petronio, nel Palazzo Isolani e nella Casa Zucchini. La pietra locale e il calcare veronese continuarono ad essere utilizzati per motivi decorativi e architettonici anche nei secoli successivi come dimostrano il portico di San Bartolomeo, il Palazzo dal Monte, il Palazzo Malvezzi Campeggi, il Palazzo Fantuzzi e il Palazzo Bocchi (Rodolico, 1965, p. 170).

A Catania l'aspetto del patrimonio edilizio è determinato dalle pietre laviche compatte o scoriacee estratte localmente che sono state impiegate per realizzare conci per murature, pilastri, materiale cementante e da intonaco (Rodolico, 1965, pp. 470-472). Oltre alle pietre locali, tuttavia, sono stati impiegati anche calcari e tufi provenienti da Siracusa: spesso i diversi materiali venivano utilizzati in combinazione per ottenere effetti decorativi basati sulla differenza cromatica come nelle finestre della chiesa di Santa Maria del Gesù. Le pietre laviche vennero preferite nel Medioevo per la realizzazione di edifici monumentali come testimonia la chiesa di Sant'Agata. Furono, inoltre, costantemente utilizzate nei secoli successivi per le murature ordinarie. Nel XVIII secolo, invece, vennero usati soprattutto i calcari del Siracusano sia per i rivestimenti di facciata che per gli elementi architettonici e decorativi come mostrano il convento dei Benedettini, il Palazzo Biscari, il Palazzo Senatorio e il Palazzo Valle. Venne riproposta, inoltre, la commistione tra conci di pietra lavica e pietra di Siracusa come testimoniano il Priorato, la Porta Ferdinandea e la Casa Vaccarini (Rodolico, 1965, p. 476).

5.3.2. Risultati e discussione

5.3.2.1. Prestazioni degli involucri studiati nelle condizioni climatiche di Bologna

Dalle simulazioni eseguite ad impianti accesi è emerso che le tre soluzioni di involucro contemporanee (I[Zum], I[Abr], I[Ber]) risultano vantaggiose in termini di consumi energetici totali rispetto ai casi di riferimento T[40] e T[60] (Tabella. 9): rispetto al caso T[40] gli involucri innovativi studiati, infatti, consentono un risparmio energetico variabile tra il 41,4% e il 44,2%, molto superiore al risparmio calcolato per il caso T[60] pari al 12%.

	Caso T[40]	Caso T[60]	Caso I[Zum]	Caso I[Abr]	Caso I[Ber]
Energia totale [kWh]	18054,3	15895,7	10367,6	10575,9	10077,9
Risparmio rispetto al caso T[40] [%]	-	12,0	42,6	41,4	44,2

Tabella. 9 Energia totale consumata in un anno per i diversi casi di simulazione

Relativamente ai consumi per il riscaldamento (Fig. 78), le tre soluzioni contemporanee consentono un risparmio energetico considerevole rispetto ad entrambe le soluzioni tradizionali grazie alla loro

inferiore trasmittanza termica: le differenze percentuali rispetto al caso T[40], infatti, sono comprese tra il 57,7% e il 62,6%. Anche le differenze tra i consumi per il raffrescamento dei casi I[Zum], I[Abr], I[Ber] rispetto ai casi T[40] e T[60] sono significative soprattutto nel mese di Agosto (Fig. 79): il risparmio annuale rispetto al caso T[40], infatti, è variabile tra il 21% e il 25,9%. La prestazione migliore sia per la stagione estiva che per quella invernale si ottiene per il caso I[Ber].

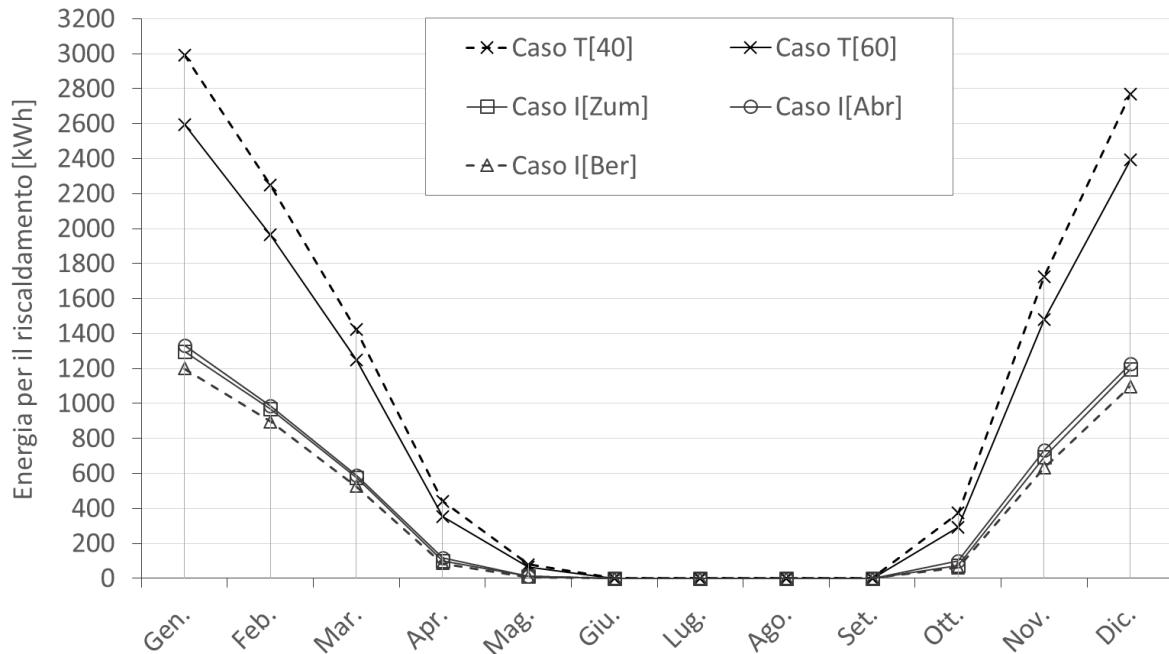


Fig. 78 Consumo energetico annuale per il riscaldamento

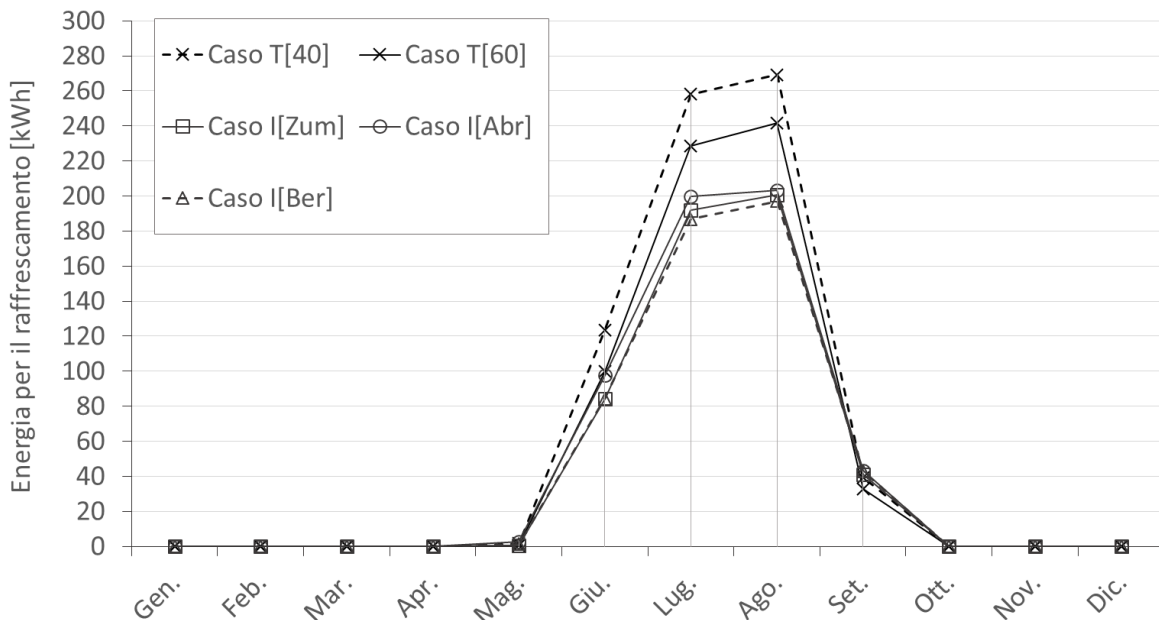


Fig. 79 Consumo energetico annuale per il raffrescamento

Relativamente agli scambi termici con l'ambiente esterno è emerso che gli involucri tradizionali cedono una quantità maggiore di calore rispetto agli involucri contemporanei a causa degli elevati valori di trasmittanza termica (Fig. 80).

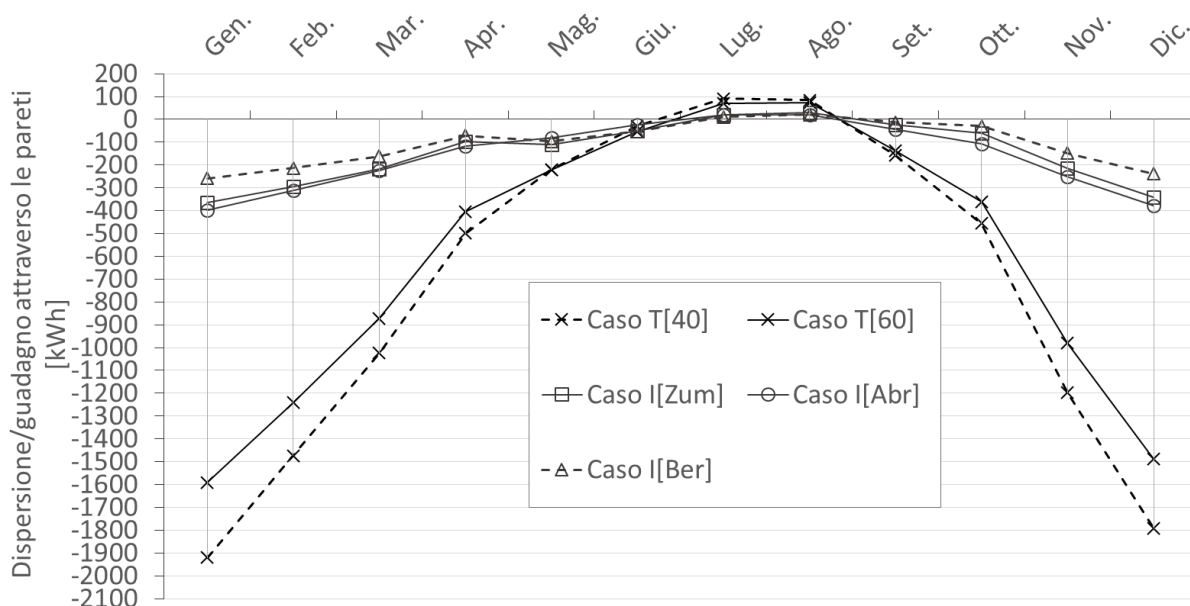


Fig. 80 Calore scambiato dalle pareti con l’ambiente esterno durante l’anno

Dalle simulazioni ad impianti spenti eseguite per i casi T[60], I[Zum], I[Abr] e I[Ber], è emerso che l’involucro basato sull’opera di Bernhard consente di ottenere all’interno dell’edificio il maggior livello di comfort termico in inverno (Fig. 81): le temperature operative calcolate in un tipico giorno invernale (12 Gennaio), infatti, risultano le più elevate. Invece, in estate il maggior livello di comfort si ottiene con l’involucro tradizionale T[60] (Fig. 81): le temperature operative calcolate in un tipico giorno estivo (31 Luglio), infatti, risultano le più contenute. Tra gli involucri contemporanei, quello basato sull’opera di Zumthor consente di ottenere la prestazione termica estiva migliore.

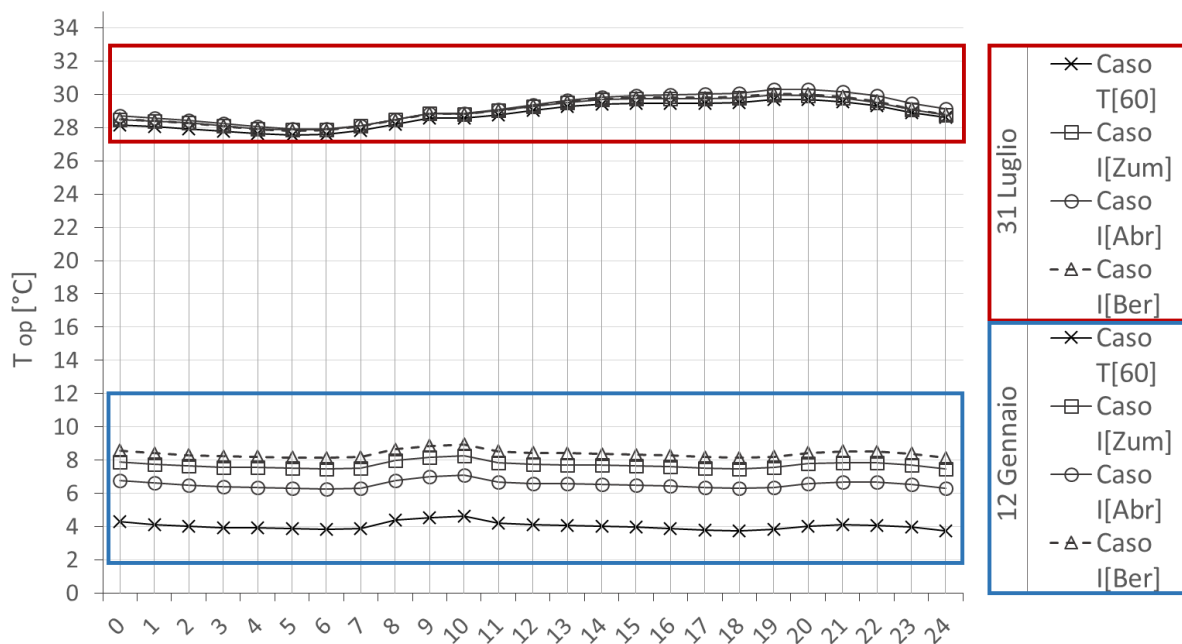


Fig. 81 Le temperature operative registrate all’interno dell’edificio nelle diverse ore di un tipico giorno invernale (12 Gennaio) e di un tipico giorno estivo (31 Luglio)

Per caratterizzare l'inerzia termica degli involucri studiati, sono stati valutati gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne raggiunte delle pareti sud dell'edificio nel medesimo giorno estivo scelto per lo studio delle temperature operative (31 Luglio). L'andamento delle temperature superficiali interne di tutti i casi di studio risulta attenuato e sfasato rispetto a quello delle temperature superficiali esterne, confermando i benefici di soluzioni massive sul comfort termico estivo (Fig. 82, Fig. 83, Fig. 84, Fig. 85).

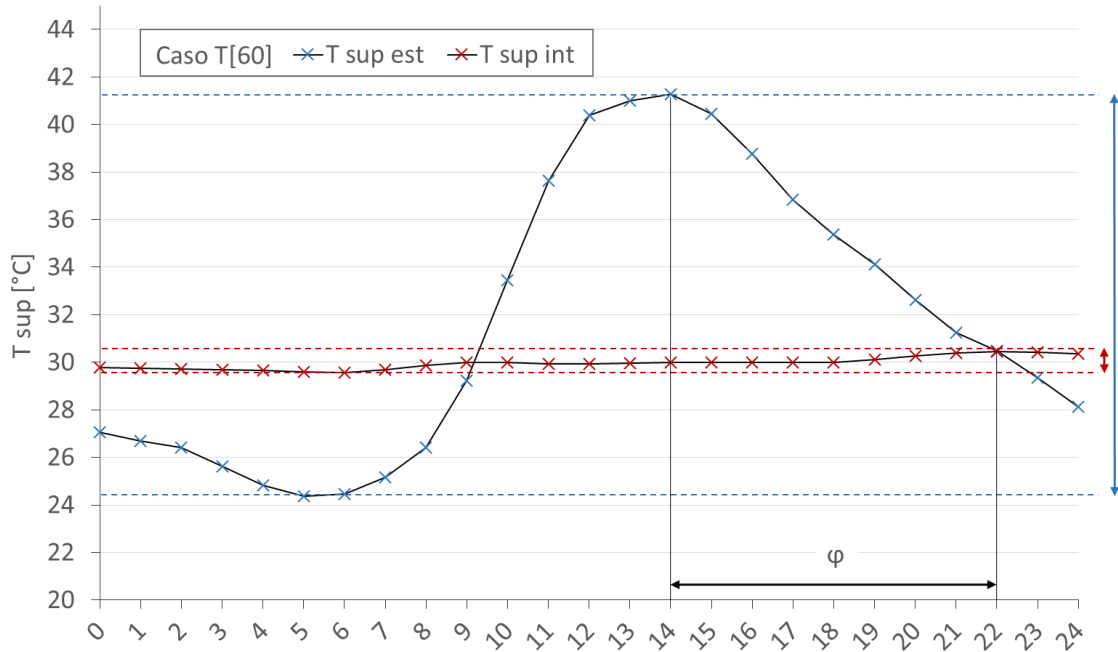


Fig. 82 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso T[60]

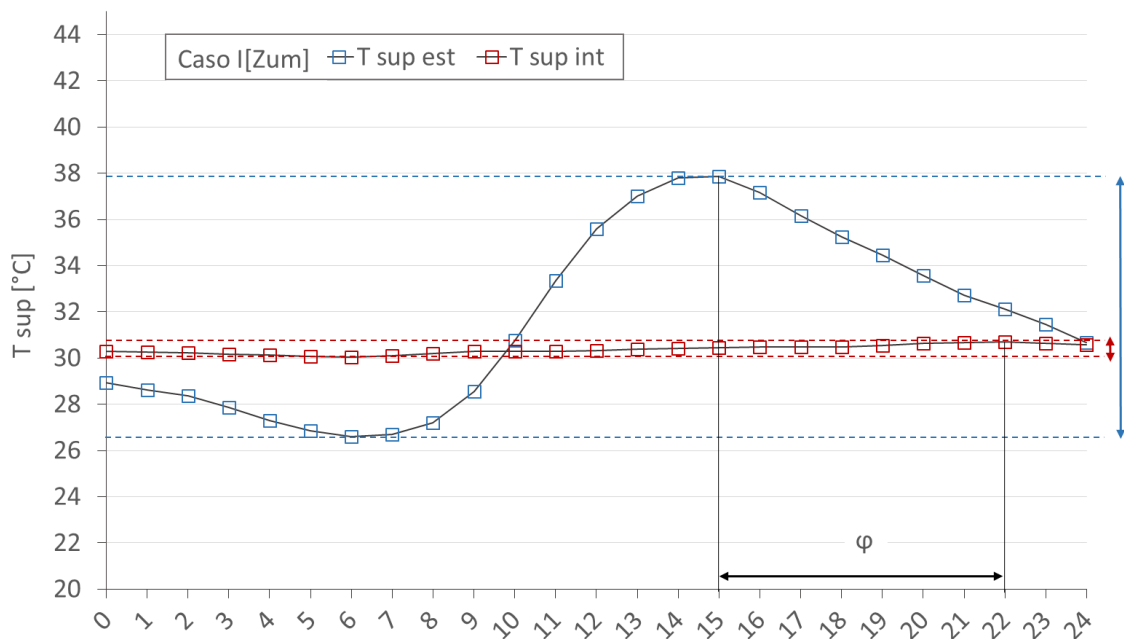


Fig. 83 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Zum]

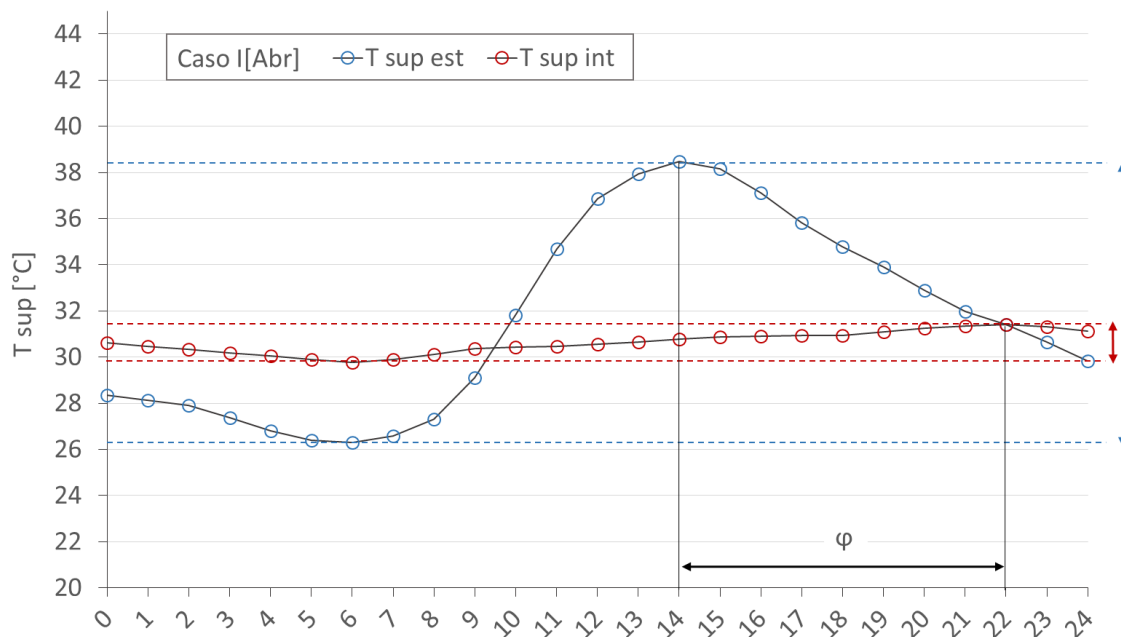


Fig. 84 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Abr]

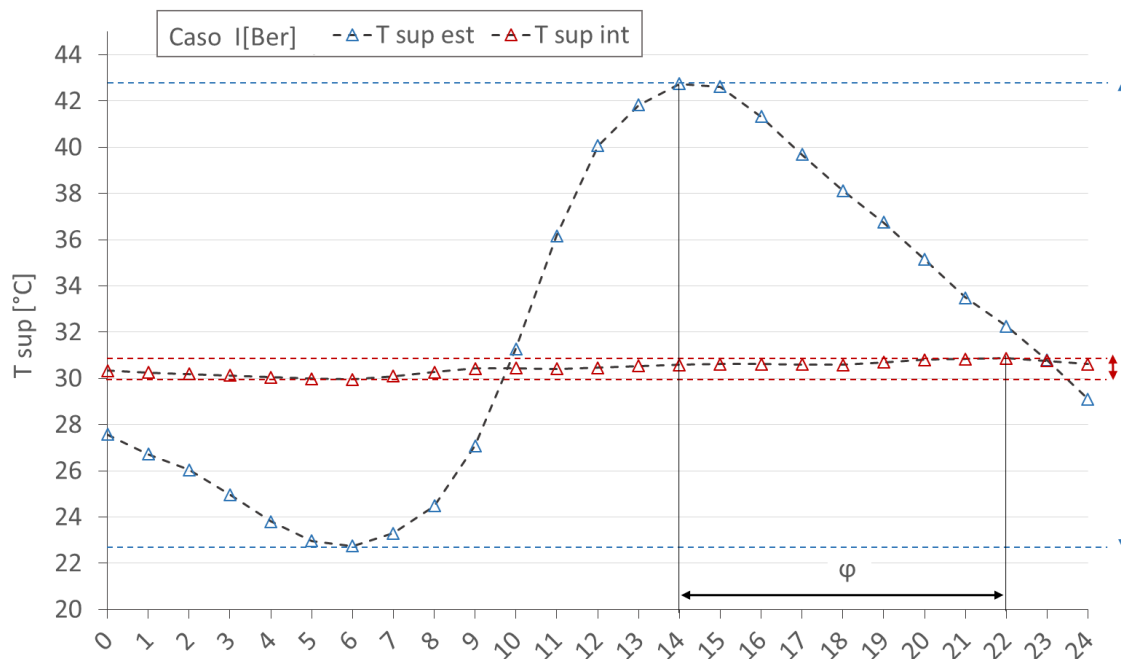


Fig. 85 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Ber]

Le soluzioni costruttive studiate consentono di ritardare di circa 8 ore il verificarsi del picco di temperatura superficiale interna ad eccezione del caso I[Zum] per cui è stato calcolato un tempo di

ritardo di 7 ore (Tabella. 10). In termini di valori di attenuazione, i casi T[60] e I[Ber] offrono la prestazione migliore consentendo di attenuare l'ampiezza dell'onda termica di 20 volte.

	Caso T[60]	Caso I[Zum]	Caso I[Abr]	Caso I[Ber]
φ [h]	8	7	8	8
f [-]	0,05	0,06	0,13	0,05

Tabella. 10 Il tempo di ritardo (φ) e i valori di attenuazione (f) valutati per le pareti sud dei quattro casi di simulazione, considerando le massime temperature superficiali esterne ed interne raggiunte in un tipico giorno estivo (31 Luglio)

5.3.2.2. Prestazioni degli involucri studiati nelle condizioni climatiche di Catania

Dalle simulazioni eseguite ad impianti accesi è emerso che le tre soluzioni di involucro contemporanee (I[Zum], I[Abr], I[Ber]) risultano vantaggiose in termini di consumi energetici totali rispetto ai casi di riferimento T[40] e T[60] (Tabella. 11): rispetto al caso T[40] gli involucri innovativi studiati, infatti, consentono un risparmio energetico variabile tra il 32,5% e il 34,1%, superiore al risparmio calcolato per il caso T[60] pari all'10,9%.

	Caso T[40]	Caso T[60]	Caso I[Zum]	Caso I[Abr]	Caso I[Ber]
Energia totale [kWh]	10692,8	9523,6	7117,4	7218,3	7043
Risparmio rispetto al caso T[40] [%]	-	10,9	33,4	32,5	34,1

Tabella. 11 Energia totale consumata in un anno per i diversi casi di simulazione

Relativamente ai consumi per il riscaldamento (Fig. 86), le tre soluzioni contemporanee consentono un risparmio energetico considerevole rispetto ad entrambe le soluzioni tradizionali grazie alla loro inferiore trasmittanza termica: le differenze percentuali rispetto al caso T[40], infatti, sono comprese tra il 66,6% e il 72,7%.

Anche le differenze tra i consumi per il raffrescamento dei casi I[Zum], I[Abr] e I[Ber] rispetto ai casi T[40] e T[60] sono significative soprattutto nel mese di Agosto (Fig. 87): il risparmio annuale rispetto al caso T[40], infatti, è variabile tra il 10,9% e il 14,2%.

La prestazione migliore sia per la stagione estiva che per quella invernale si ottiene per il caso I[Ber], caratterizzato dal valore più basso di trasmittanza termica.

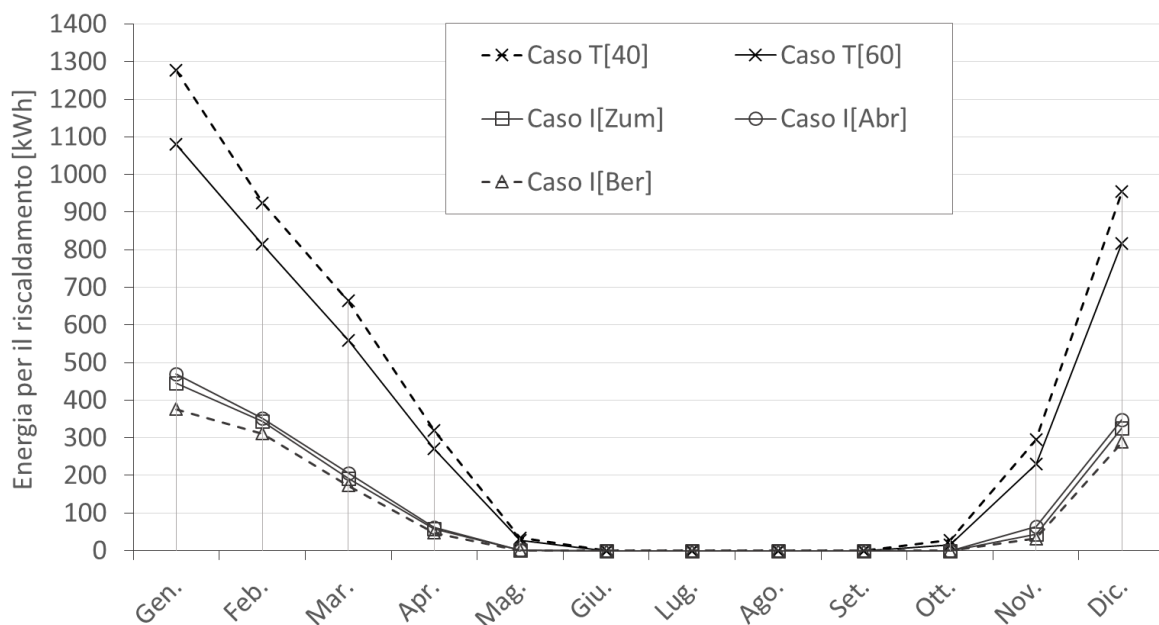


Fig. 86 Consumo energetico annuale per il riscaldamento

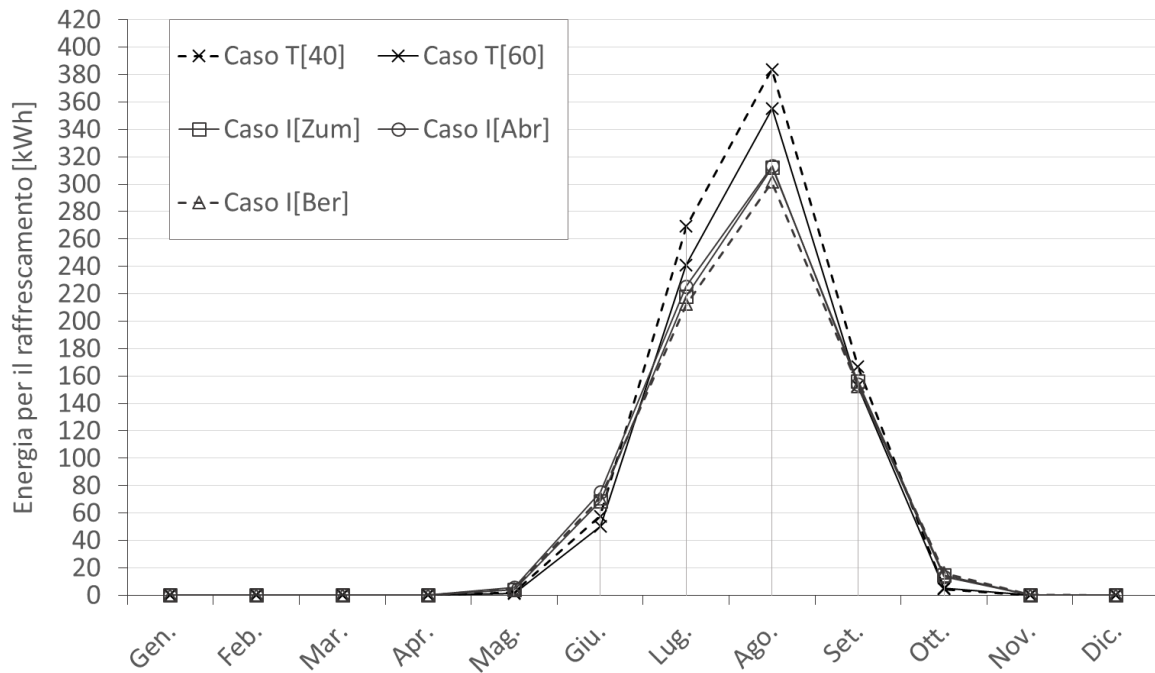


Fig. 87 Consumo energetico annuale per il raffrescamento

Relativamente agli scambi termici con l'ambiente esterno è emerso che gli involucri tradizionali cedono una quantità maggiore di calore rispetto agli involucri contemporanei a causa della mancanza di uno strato coibente (Fig. 88).

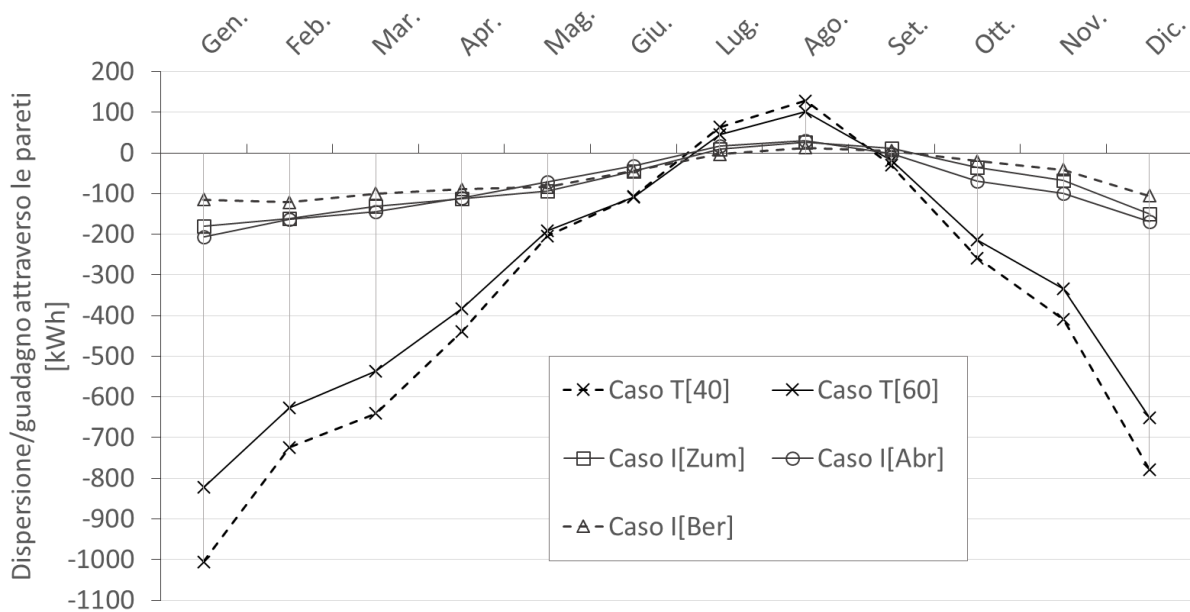


Fig. 88 Calore scambiato dalle pareti con l'ambiente esterno durante l'anno

Dalle simulazioni ad impianti spenti eseguite per i casi T[60], I[Zum], I[Abr], I[Ber], è emerso che l'involucro basato sull'opera di Bernhard consente di ottenere all'interno dell'edificio il maggior

livello di comfort termico in inverno: le temperature operative calcolate in un tipico giorno invernale (12 Gennaio), infatti, risultano le più elevate (Fig. 89). Invece, in estate il maggior livello di comfort si ottiene con l'involucro tradizionale T[60]: le temperature operative calcolate in un tipico giorno estivo (31 Luglio), infatti, risultano le più contenute (Fig. 89). Tra gli involucri contemporanei, quello basato sull'opera di Bernhard consente di ottenere la prestazione termica estiva migliore.

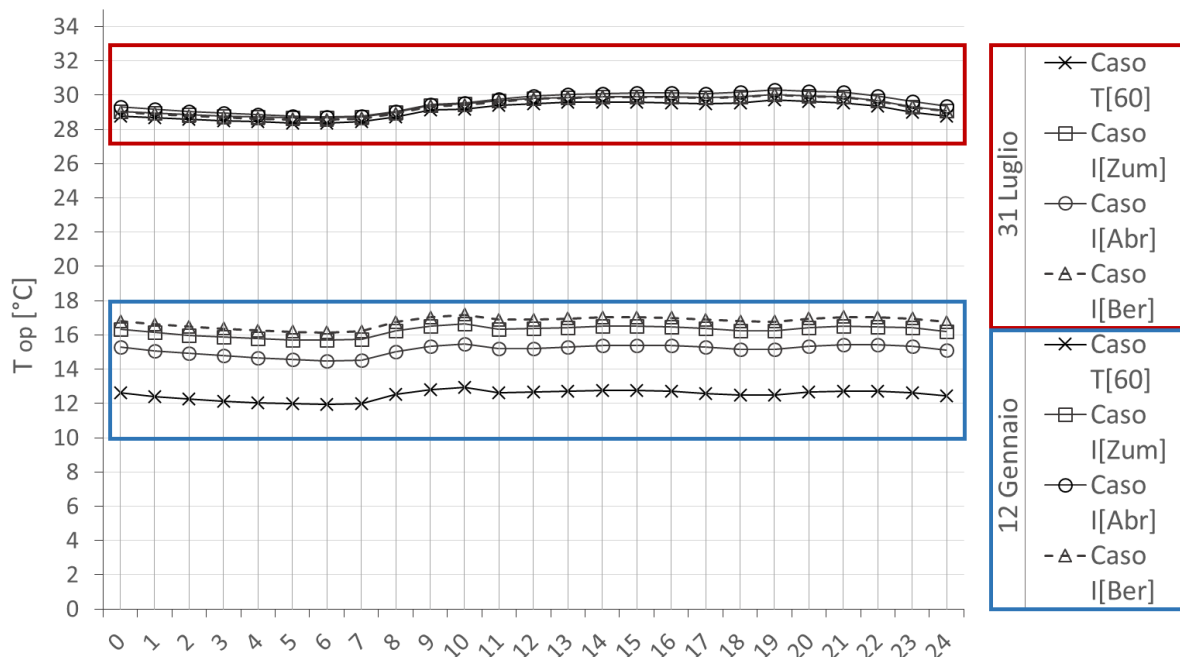


Fig. 89 Le temperature operative registrate all'interno dell'edificio nelle diverse ore di un tipico giorno invernale (12 Gennaio) e di un tipico giorno estivo (31 Luglio)

Per caratterizzare l'inerzia termica degli involucri studiati, sono stati valutati gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne raggiunte delle pareti sud dell'edificio nel medesimo giorno estivo scelto per lo studio delle temperature operative (31 Luglio). L'andamento delle temperature superficiali interne di tutti i casi di studio risulta attenuato e sfasato rispetto a quello delle temperature superficiali esterne, confermando i benefici di soluzioni massive sul comfort termico estivo (Fig. 90, Fig. 91, Fig. 92, Fig. 93). Lo sfasamento maggiore si registra per il caso di riferimento T[60] e per il caso I[Abr], che presentano entrambi un tempo di ritardo di 9 ore (Tabella. 12). Le altre due soluzioni costruttive innovative studiate consentono, invece, di ritardare di circa 8 ore il verificarsi del picco di temperatura superficiale interna (Tabella. 12). In termini di valori di attenuazione, il caso T[60] offre la prestazione migliore consentendo di attenuare l'ampiezza dell'onda termica di circa 33 volte. I casi innovativi I[Zum] e I[Ber] permettono di raggiungere valori di attenuazione di poco superiori mentre il caso I[Abr] risulta il più svantaggioso (Tabella. 12).

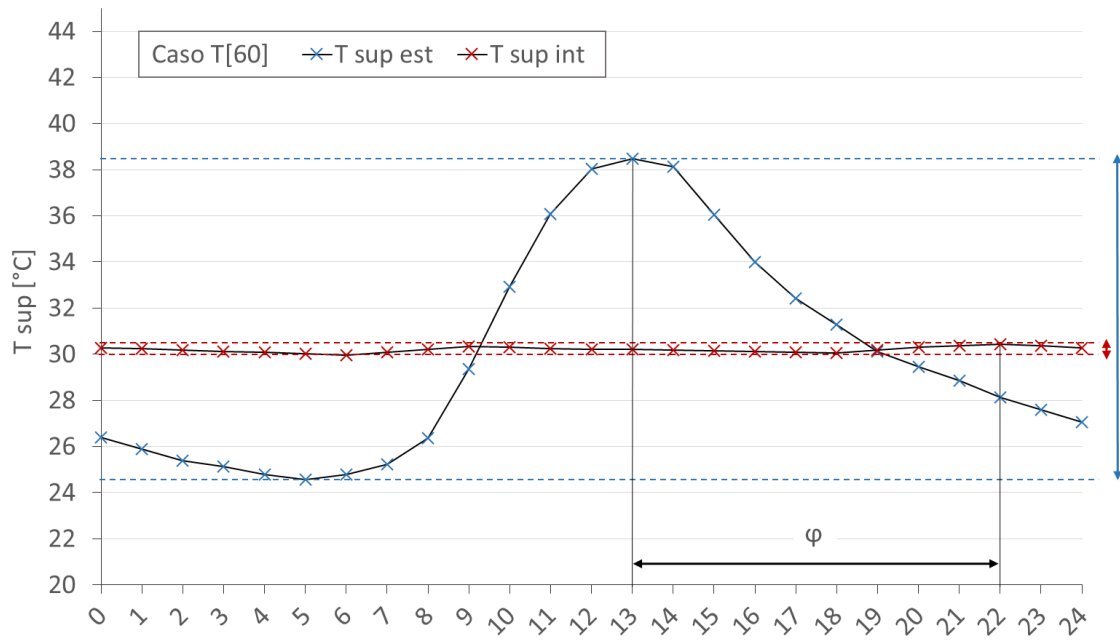


Fig. 90 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso T[60]

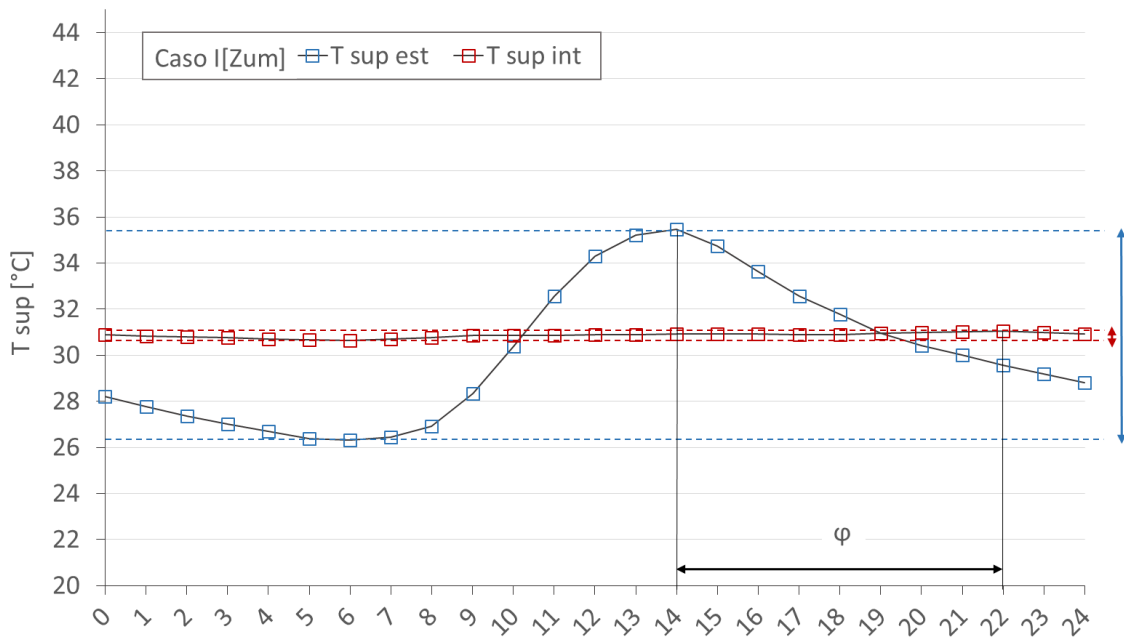


Fig. 91 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Zum]

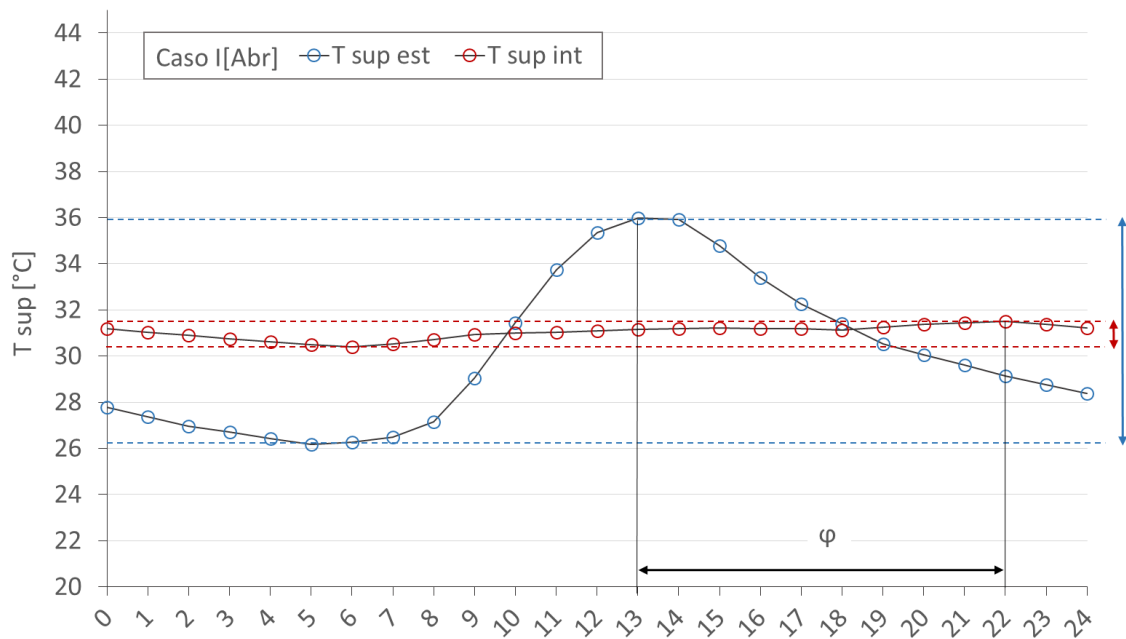


Fig. 92 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Abr]

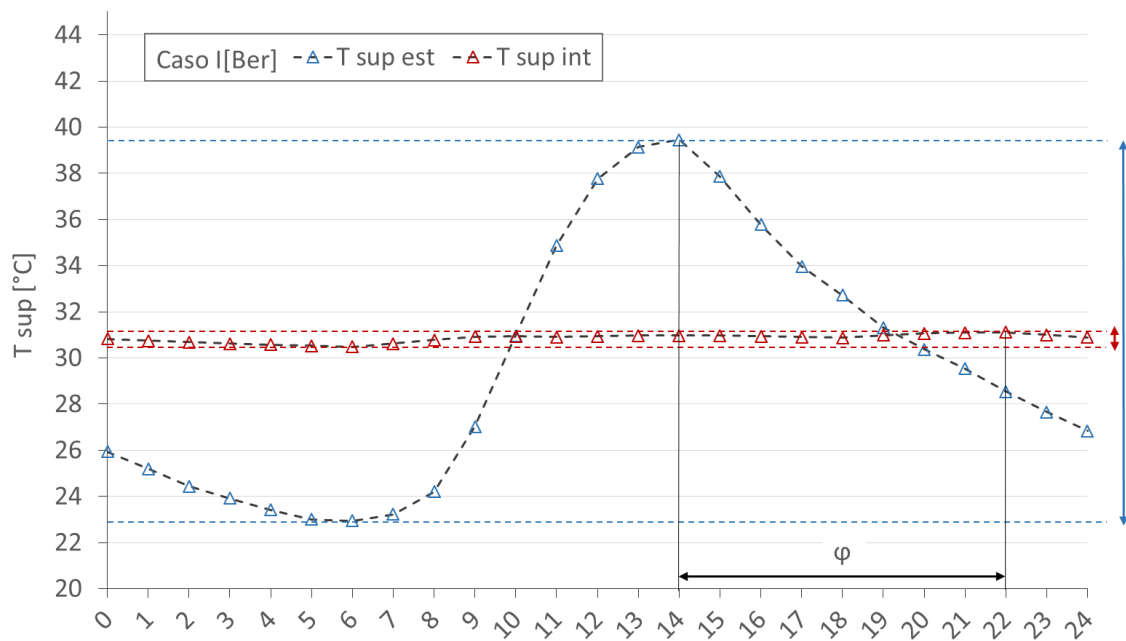


Fig. 93 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Ber]

	Caso T[60]	Caso I[Zum]	Caso I[Abr]	Caso I[Ber]
φ [h]	9	8	9	8
f [-]	0,03	0,04	0,11	0,04

Tabella. 12 Il tempo di ritardo (φ) e i valori di attenuazione (f) valutati per le pareti sud dei quattro casi di simulazione, considerando le massime temperature superficiali esterne ed interne raggiunte in un tipico giorno estivo (31 Luglio)

5.3.3. Raffronto tra i risultati ottenuti nei diversi contesti di studio

I risultati delle simulazioni eseguite nei tre diversi contesti di studio sono stati confrontati per valutare in quale area climatica i benefici delle soluzioni di involucro studiate risultassero maggiori.

Relativamente ai consumi energetici annuali per il riscaldamento (Tabella. 13, Fig. 94) è emerso che l'adozione di un involucro innovativo in pietra massiva risulta particolarmente vantaggiosa in contesti caratterizzati da un clima meno rigido: il risparmio percentuale calcolato sulla media dei consumi dei casi I[Zum], I[Abr] e I[Ber] rispetto alla media dei casi di riferimento T[40] e T[60], infatti, è maggiore per il contesto di studio di Catania, caratterizzato dal valore di gradi giorno inferiore e, quindi, da un periodo di riscaldamento meno prolungato e da temperature medie giornaliere più prossime alla temperatura fissata per l'ambiente interno (Tabella. 14).

Energia per il riscaldamento [kWh]			
	Grosseto	Bologna	Catania
Caso T[40]	8120,78	12049,22	4495,94
Caso T[60]	6997,92	10389,81	3815,74
Caso I[Zum]	3047,21	4916,32	1410,37
Caso I[Abr]	3178,95	5098,37	1499,97
Caso I[Ber]	2773,13	4508,85	1228,45

Tabella. 13 Consumi energetici annuali per il riscaldamento per i cinque casi di simulazione nei tre contesti di studio

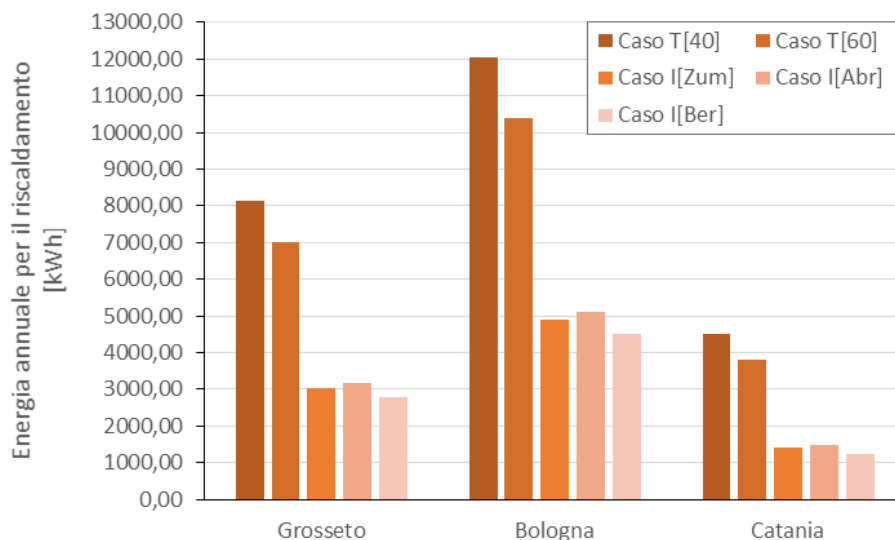


Fig. 94 Consumo energetico annuale per il riscaldamento calcolato per i tre contesti di studio

	Grosseto	Bologna	Catania
Energia per il riscaldamento, media casi T[40] - T[60] [kWh]	7559,4	11219,5	4155,8
Energia per il riscaldamento, media casi I[Zum] - I[Abr] - I[Ber] [kWh]	2999,8	4841,2	1379,6
Risparmio rispetto alla media casi T[40] - T[60] [%]	60,3	56,9	66,8

Tabella. 14 Medie dei consumi energetici annuali per il riscaldamento relative agli involucri tradizionali (casi T[40], T[60]) e agli involucri innovativi analizzati (casi I[Zum], I[Abr], I[Ber]), calcolate nei tre contesti di studio

Relativamente ai consumi energetici annuali per il raffrescamento (Tabella. 15, Fig. 95) è emerso che l'adozione di un involucro innovativo in pietra massiva risulta particolarmente vantaggiosa in contesti caratterizzati da un clima più rigido: il risparmio percentuale calcolato sulla media dei consumi dei casi I[Zum], I[Abr] e I[Ber] rispetto alla media dei consumi dei casi di riferimento T[40] e T[60], infatti, è maggiore per il contesto di studio di Bologna, caratterizzato dal valore di gradi giorno più elevato e, quindi, da un periodo di riscaldamento più lungo e da temperature medie giornaliere meno prossime alla temperatura fissata per l'ambiente interno (Tabella. 16).

Energia per il raffrescamento [kWh]			
	Grosseto	Bologna	Catania
Caso T[40]	457,02	691,87	883,59
Caso T[60]	405,49	603,74	805,67
Caso I[Zum]	406,72	518,29	774,09
Caso I[Abr]	424,09	546,63	787,36
Caso I[Ber]	403,68	512,71	758,19

Tabella. 15 Consumi energetici annuali per il raffrescamento per i cinque casi di simulazione nei tre contesti di studio

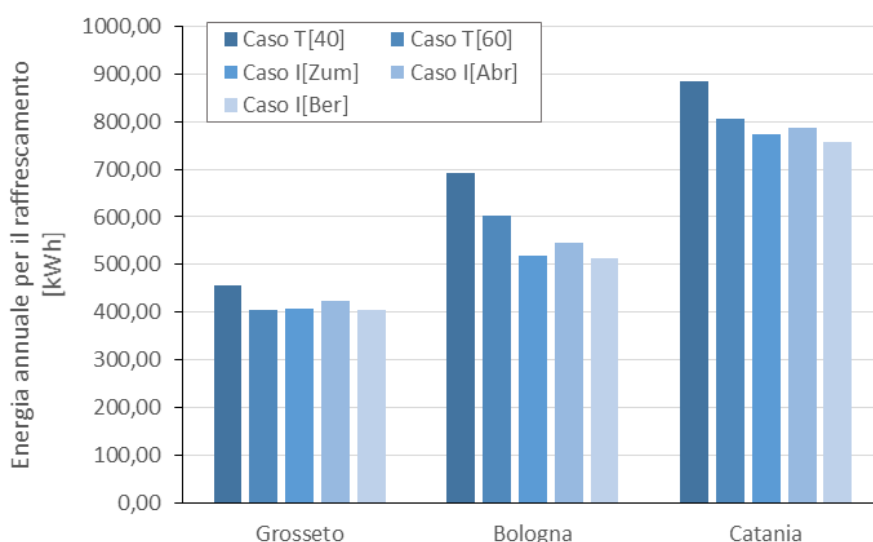


Fig. 95 Consumo energetico annuale per il raffrescamento calcolato per i tre contesti di studio

	Grosseto	Bologna	Catania
Energia per il raffrescamento, media casi T[40] - T[60] [kWh]	431,3	647,8	844,6
Energia per il raffrescamento, media casi I[Zum] - I[Abr] - I[Ber] [kWh]	411,5	525,9	773,2
Risparmio rispetto alla media casi T[40] - T[60] [%]	4,6	18,8	8,5

Tabella. 16 Medie dei consumi energetici annuali per il raffrescamento relative agli involucri tradizionali (casi T[40], T[60]) e agli involucri innovativi analizzati (casi I[Zum], I[Abr], I[Ber]), calcolate nei tre contesti di studio

In relazione alla prestazione ad impianti spenti, sono state confrontate le temperature operative giornaliere medie (Fig. 96, Fig. 97) calcolate per un tipico giorno invernale (12 Gennaio) e per un tipico giorno estivo (31 Luglio). È emerso che nel periodo freddo, i vantaggi connessi con l'impiego di involucri innovativi rispetto all'involucro tradizionale di riferimento sono maggiori per il contesto di studio di Bologna. Nella stagione calda, invece, le soluzioni innovative sono più vantaggiose del caso di riferimento solo nel clima di Grosseto. Tuttavia, per i contesti di Bologna e di Catania la differenza tra i valori della temperatura operativa giornaliera ottenuta per il caso T[60] e la media dei valori calcolati per i casi I[Zum], I[Abr] e I[Ber] è contenuta.

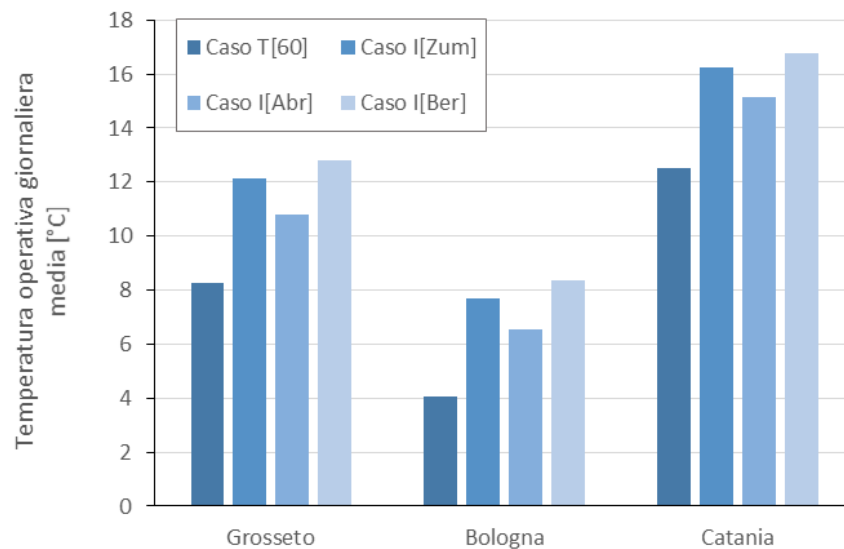


Fig. 96 Le temperature operative giornaliere medie dei diversi casi nei tre contesti di studio, valutate in un tipico giorno invernale (12 Gennaio)

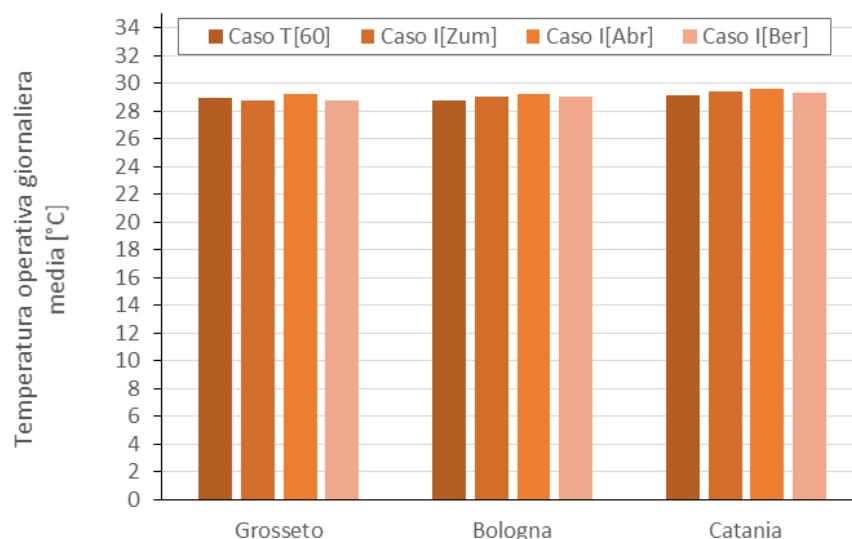


Fig. 97 Le temperature operative giornaliere medie dei diversi casi nei tre contesti di studio, valutate in un tipico giorno estivo (31 Luglio)

Inoltre, sono stati confrontati i valori di attenuazione (Tabella. 17, Fig. 98) e il tempo di ritardo (Tabella. 18, Fig. 99) calcolati per i casi T[60], I[Zum], I[Abr] e I[Ber] in un tipico giorno estivo (31 Luglio). È emerso che nel clima di Bologna il valore di attenuazione medio degli involucri innovativi studiati approssima meglio quello del caso di riferimento T[60]. Anche la differenza tra i valori del tempo di ritardo dell'involucro tradizionale e la media dei valori calcolati per i casi I[Zum], I[Abr] e I[Ber] è minore nel clima di Bologna.

Valori di attenuazione, f [-]			
	Grosseto	Bologna	Catania
Caso T[60]	0,05	0,05	0,03
Caso I[Zum]	0,06	0,06	0,04
Caso I[Abr]	0,14	0,13	0,11
Caso I[Ber]	0,05	0,05	0,04

Tabella. 17 I valori di attenuazione (f) valutati per le pareti sud dei quattro casi di simulazione nei tre contesti di studio, considerando le massime temperature superficiali esterne ed interne raggiunte in un tipico giorno estivo (31 Luglio)

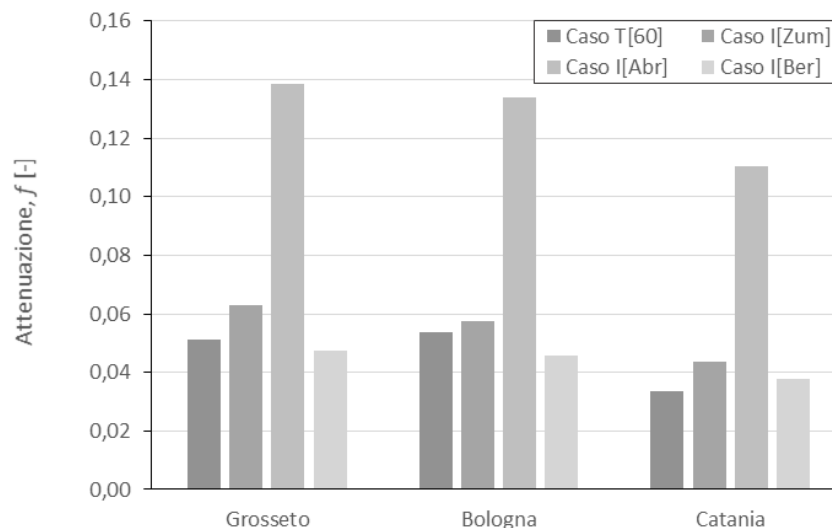


Fig. 98 I valori di attenuazione (f) dei diversi casi nei tre contesti di studio, valutati considerando le massime temperature superficiali esterne ed interne raggiunte in un tipico giorno estivo (31 Luglio)

Tempo di ritardo, ϕ [h]			
	Grosseto	Bologna	Catania
Caso T[60]	9	8	9
Caso I[Zum]	8	7	8
Caso I[Abr]	8	8	9
Caso I[Ber]	8	8	8

Tabella. 18 I valori del tempo di ritardo (ϕ) valutati per le pareti sud dei quattro casi di simulazione nei tre contesti di studio, considerando le massime temperature superficiali esterne ed interne raggiunte in un tipico giorno estivo (31 Luglio)

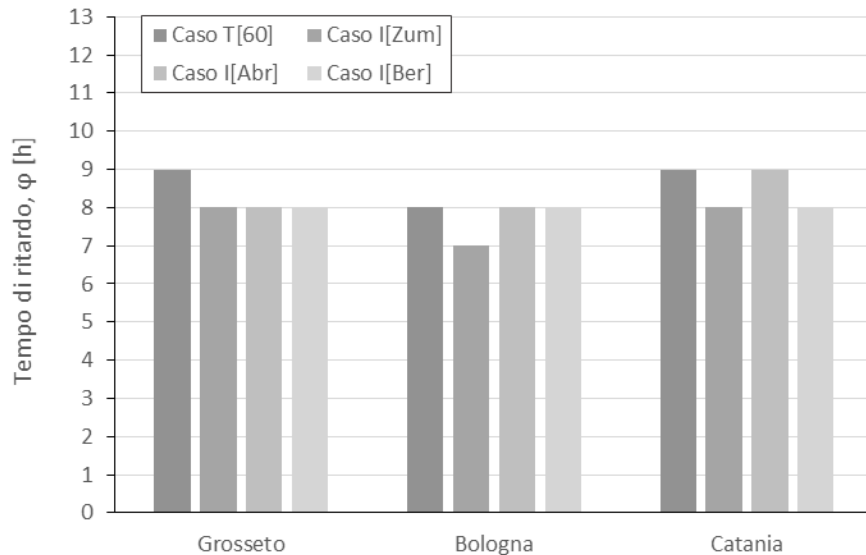


Fig. 99 I valori del tempo di ritardo φ valutati per le pareti sud dei quattro casi di simulazione nei tre contesti di studio, considerando le massime temperature superficiali esterne ed interne raggiunte in un tipico giorno estivo (31 Luglio)

5.3.4. Conclusioni

Dai risultati delle simulazioni, è emerso che gli involucri contemporanei in pietra massiva presentano vantaggi significativi in termini di consumi energetici per il riscaldamento ed il raffrescamento e permettono di mantenere le temperature superficiali interne delle pareti più stabili rispetto a quelle esterne in tutti i contesti di studio considerati, appartenenti a tre zone climatiche italiane diverse.

Relativamente ai consumi energetici annuali per il riscaldamento è emerso che l'adozione di un involucro innovativo in pietra massiva risulta particolarmente vantaggiosa in contesti caratterizzati da un clima meno rigido come quello di Catania. Relativamente ai consumi energetici annuali per il raffrescamento, invece, il risparmio percentuale maggiore calcolato sulla media dei consumi dei casi I[Zum], I[Abr] e I[Ber] rispetto alla media dei casi di riferimento T[40] e T[60], si verifica per il contesto di studio di Bologna.

Dalle simulazioni condotte ad impianti spenti, è emerso che nella stagione invernale gli involucri innovativi sono più performanti rispetto alle soluzioni costruttive tradizionali per tutte le zone climatiche considerate. Dalla valutazione delle temperature operative giornaliere medie raggiunte all'interno dell'edificio di progetto in un tipico giorno invernale, risulta che i vantaggi maggiori connessi con l'impiego di involucri innovativi rispetto all'involucro tradizionale di riferimento T[60], si ottengono per il contesto di studio di Bologna. Nella stagione calda, invece, la prestazione degli involucri tradizionali è migliore di quella delle soluzioni costruttive contemporanee nelle condizioni climatiche di Bologna e di Catania: la presenza dello strato isolante, infatti, determina il raggiungimento di temperature operative giornaliere medie leggermente più elevate. Tuttavia, nel clima di Grosseto i casi I[Zum], I[Abr] e I[Ber] in media hanno una prestazione migliore del caso T[60]. In relazione ai valori di attenuazione e del tempo di ritardo, gli involucri tradizionali risultano più vantaggiosi di quelli contemporanei. Il valore di attenuazione medio degli involucri innovativi studiati approssima meglio quello del caso di riferimento T[60] nel clima di Bologna. Anche la differenza tra i valori del tempo di ritardo dell'involucro tradizionale e la media dei valori calcolati per i casi I[Zum], I[Abr] e I[Ber] è minore nel clima di Bologna.

CAPITOLO 6

ANALISI DI INVOLUCRI EDILIZI A GABBIONI

6.1. ANALISI PRESTAZIONALE DI INVOLUCRI MULTISTRATO A GABBIONI

6.1.1. Involucri multistrato a gabbioni

6.1.1.1. Motivazioni

6.1.1.2. Caratteristiche correlate alla prestazione termico-energetica

6.1.2. Indicazioni per la progettazione di involucri a gabbioni in clima mediterraneo

6.1.2.1. Metodologia e definizione dei casi di studio

6.1.2.2. Valutazione della prestazione energetica

6.1.2.3. Valutazione della prestazione termica

6.1.2.4. Conclusioni e indicazioni progettuali

6.2. CARATTERI ARCHITETTONICI DI INVOLUCRI EDILIZI A GABBIONI

6.2.1. Texture del riempimento litico

6.2.2. Aspetti applicativi e costruttivi

6. ANALISI DI INVOLUCRI EDILIZI A GABBIONI

6.1. ANALISI PRESTAZIONALE DI INVOLUCRI MULTISTRATO A GABBIONI

6.1.1. Involucri multistrato a gabbioni

6.1.1.1. Motivazioni

Lo studio prestazionale condotto nel capitolo 5 ha evidenziato come involucri lapidei massivi innovativi sviluppati dalla cultura architettonica contemporanea consentano di progettare edifici con una buona prestazione termico-energetica. Si è scelto, pertanto, di approfondire l'analisi di una delle tipologie di involucro studiate per comprendere la relazione tra le caratteristiche dell'elemento costruttivo definibili in fase progettuale e la prestazione termico-energetica dell'edificio. Tra le differenti soluzioni costruttive innovative, sono stati selezionati gli involucri multistrato a gabbioni in considerazione di diversi fattori.

In primo luogo, la tecnica costruttiva dei gabbioni consente di recuperare scarti lapidei derivanti dalle attività di estrazione e di lavorazione eseguite rispettivamente in cava e nelle aziende di trasformazione: i frammenti lapidei di grandezza variabile classificati come “scarti solidi” (Karaca, Pekin, Deliormanlı, 2012; Rana et al., 2016) possono, infatti, essere utilizzati come riempimento di questi moduli in rete metallica. La tecnica dei gabbioni permette, inoltre, di riciclare materiali lapidei derivanti dalla demolizione di elementi costruttivi giunti al termine del proprio ciclo di vita. Il recupero e il riciclo nel settore delle costruzioni di materiale litico di scarto sono strategie essenziali per la riduzione dell'impatto ambientale del settore lapideo: consentono, infatti, di limitare il consumo di materiali naturali grezzi che rappresentano una risorsa non rinnovabile.

In secondo luogo, la tecnica dei gabbioni consente di realizzare involucri edilizi massivi e di sfruttarne l'elevata inerzia termica in un'ottica di progettazione passiva ai fini del miglioramento delle condizioni di comfort termico interno e della riduzione della domanda energetica dell'edificio. Nonostante queste potenzialità siano riconosciute dalla cultura architettonica contemporanea, le prestazioni termico-energetiche di involucro a gabbioni sono state poco studiate.

Infine, la tecnica dei gabbioni risulta applicabile a diverse tipologie edilizie: benché sia stata introdotta in architettura solo dagli anni Novanta del XX secolo, infatti, è stata impiegata da numerosi progettisti per edifici residenziali, per attrezzature e per edifici produttivi.

Tra gli esempi di edifici residenziali monofamiliari con involucro a gabbioni si ricordano la Haus 9x9 (Augsburg, 2002-2003) di Titus Bernhard, la House in the Landscape (Zawiercie, Polonia, 2013) progettata dallo Studio Kropka (Fig. 100), la Gabions House (Varna, Bulgaria, 2011) progettata dallo studio STARH (Fig. 101), la Shoreham Beach House (Shoreham-by-Sea, UK, 2014-2015) progettata dallo studio ABIR Architects, la Westcliff-Estate (Johannesburg, Sud Africa, 2002) progettata da studio MAS Architecture (Fig. 102), la casa Base Camp (Cle Elum Lake, Washington state, USA) progettata dallo studio Johnston Architects (Fig. 103) e la Villa a Garrigàs (Girona, Spagna) progettata dallo studio Boncompte & Font Arquitectes (Fig. 104).



Fig. 100 House in the Landscape
[Griffiths, 2014, su <https://www.dezeen.com>, foto Maciej Lulko]



Fig. 101 Gabions House
[<http://www.starh.bg>]



Fig. 102 Westcliff-Estate
[<http://www.studiomas.co.za>]



Fig. 103 Vista dell'esterno della residenza Base Camp
[<http://www.architecturelab.net>]



Fig. 104 Villa a Garrigàs
[<http://www.boncompte-font.com>]

Tra gli esempi di edifici residenziali plurifamiliari con involucro a gabbioni si ricordano gli alloggi Château-le-lez (Montpellier, Francia, 2000) progettati dallo studio Edouard François and Associates (Fig. 105), gli alloggi sociali Logements Les Galets (Pont-Audemer, Francia, 2003) progettati da Michel Guthmann e Bertrand Bonnier e le Sei Unità (Sesto San Giovanni, MI, Italia, 2015) progettate da Gino Guarnieri e Roberto Mascazzini (Fig. 106).



Fig. 105 Gli alloggi Château-le-lez
[Pousse, 2000, p. 73]



Fig. 106 Sei Unità
[Guarnieri, Mascazzini, su <http://www.theplan.it>]

Tra gli esempi di attrezzature con involucro a gabbioni si ricorda la Prayer room (Kwait City, Kwait, 2017) progettata da Ricardo Camacho ad Al Shaheed Park (Fig. 108), il Blackrock Police Training Centre (Bristol, UK, 2015) progettato dallo studio Haverstock (Fig. 107), l'orfanotrofio Falatow Jigiyaso (Dialakoroba, Mali, 2012) progettato da F8 Architecture (Fig. 109), il Conference Building dell'Earth Centre (Doncaster, UK, 2000-2002) progettato da Bill Dunster (Fig. 108) e la sede del Centro Ricerche Agronomiche di Reims (Reims, Francia, 1992-1996) progettata da Bertrand Bonnier.



Fig. 107 Blackrock Police Training Centre
[Mairs, 2015, su <https://www.dezeen.com>, foto Simon Kennedy]



Fig. 108 Il Conference Building dell'Earth Centre e la Prayer room di Kwait City
[Dernie, 2003, p. 53; <http://www.enviromeshgabions.co.uk>]



Fig. 109 Orfanotrofio Falatow Jigiyaso
[<https://www.architizer.com>]

Infine, come esempi di edifici produttivi si ricordano la cantina vinicola Dominus (Yountville, California, 1995-1997) di Herzog & de Meuron e il Nestlé Waters (Buxton, Derbyshire, 2012) dello studio inglese Fletcher-Rae (Fig. 110).



Fig. 110 Nestlé Waters
[<http://www.enviromeshgabions.co.uk>]

6.1.1.2. Caratteristiche correlate alla prestazione termico-energetica

La prestazione termico-energetica di un edificio è strettamente connessa alle caratteristiche degli elementi opachi che ne costituiscono l'involucro: i materiali da costruzione, infatti, trasmettono il calore in funzione di alcune proprietà intrinseche come la conducibilità termica interna, la densità e il colore e in funzione dello spessore di impiego. Per involucri a corpo multiplo, inoltre, è determinante anche la successione degli strati funzionali che li compongono.

Nella definizione di un involucro multistrato a gabbioni, le principali variabili da considerare ai fini della riduzione della domanda energetica dell'edificio e del miglioramento del comfort termico interno sono la stratigrafia complessiva di parete, lo spessore dei moduli costruttivi, la tipologia di pietra da impiegare per il riempimento e il volume dei vuoti tra i frammenti lapidei rispetto al volume totale del singolo modulo costruttivo.

La scelta degli strati funzionali da associare ad un rivestimento esterno a gabbioni deve consentire di raggiungere un livello di isolamento termico tale da rispettare le prescrizioni normative relative ai valori minimi della trasmittanza termica stazionaria. Deve, inoltre, garantire la tenuta all'aria

dell'involucro evitando flussi convettivi attraverso le discontinuità del riempimento litico: flussi convettivi d'aria attraverso l'involucro costituirebbero, infatti, perdite di calore nel periodo di riscaldamento e comporterebbero, quindi, l'aumento del fabbisogno energetico dell'edificio e la diminuzione del comfort termico interno degli occupanti. Infine, la posizione dello strato di isolamento termico nella stratigrafia di parete risulta determinante soprattutto ai fini di una buona prestazione termica nella stagione estiva: la localizzazione dello strato coibente sul lato interno della massa termica, infatti, tende a mantenere il calore all'interno dell'edificio con conseguente rischio di surriscaldamento dell'ambiente interno.

Lo spessore dei moduli a gabbioni influisce sulla trasmittanza termica stazionaria dell'involucro di progetto ma ne determina anche la massa superficiale e, quindi, il comportamento in regime dinamico: il modulo costruttivo risulta, infatti, tanto più resistente al passaggio di energia termica quanto maggiore è il suo spessore.

La scelta della tipologia di pietra influisce sulla prestazione energetica dell'involucro viste le differenze tra i litotipi naturali in termini di conducibilità termica interna, densità e cromatismo.

La conducibilità termica e la densità sono determinanti nella trasmissione del calore per conduzione: bassi valori di conducibilità ed elevati valori di densità garantiscono rispettivamente una minore dispersione del calore e una maggiore attitudine a ritardare e attenuare le variazioni di temperatura.

Il colore dei materiali lapidei è correlabile, invece, alla trasmissione di calore per irraggiamento. Le pietre naturali di colore chiaro, infatti, rientrano tra i cosiddetti "*cool materials*" o materiali freschi che per le loro caratteristiche intrinseche, rappresentano un'efficace strategia passiva per realizzare architetture sostenibili. Questi materiali, infatti, poiché sono caratterizzati da un'alta riflettanza solare e da un'elevata emissività termica, riflettono in ambiente gran parte della radiazione solare incidente e assorbono meno calore. I "*cool materials*" impiegati in involucri o coperture consentono, pertanto, di ridurre la temperatura superficiale e la temperatura dell'aria e di mitigare il fabbisogno energetico per il raffrescamento degli edifici. Diverse ricerche hanno sottolineato come l'impiego di materiali da costruzione capaci, come i "*cool materials*", di ridurre la crescente domanda energetica per il raffrescamento e le emissioni imputabili ai sistemi attivi per il raffrescamento, nonché di mitigare la severità del fenomeno dell'isola di calore urbana, sia di essenziale importanza (Pacheco-Torgal, 2014; Pisello et al., 2014; Rosso et al., 2014; Rosso et al., 2016b).

Le pietre naturali di colore scuro, invece, sono caratterizzate da un alto coefficiente di assorbimento: possono essere efficacemente impiegate, quindi, in pareti massive funzionanti come elementi di accumulo per aumentare l'assorbimento della radiazione solare e limitare il consumo energetico per il riscaldamento. Il calore accumulato dall'involucro massivo viene ceduto allo spazio interno con un ritardo di alcune ore consentendo di mantenere le temperature interne più stabili di quelle esterne.

Il volume dei vuoti tra i frammenti lapidei di riempimento dei moduli costruttivi, infine, determina l'indice di porosità del gabbione e, quindi, la maggiore o minore eterogeneità termica dello strato funzionale. L'indice di porosità del gabbione, dato dal rapporto percentuale tra il volume occupato dai vuoti e il volume totale del singolo modulo costruttivo, è correlato al valore di conducibilità termica equivalente da cui dipende la quantità di calore trasmessa. È legato anche alla massa del modulo costruttivo e ne condiziona, quindi, il comportamento in regime dinamico.

6.1.2. Indicazioni per la progettazione di involucri a gabbioni in clima mediterraneo

6.1.2.1. Metodologia e definizione dei casi di studio

L'analisi della prestazione termico-energetica di involucri a gabbioni, viene condotta sul medesimo edificio residenziale di progetto modellato nel capitolo 5. Vengono eseguite simulazioni dinamiche annuali attraverso il *software* Design Builder modificando la stratigrafia delle pareti perimetrali e il contesto geografico di riferimento.

Sono state analizzate due stratigrafie caratterizzate da una differente localizzazione dello strato di isolante termico in considerazione della sua influenza sul comportamento dinamico dell'involucro. La stratigrafia 1, che è stata utilizzata nell'edificio residenziale Haus 9x9 progettato da Titus Bernhard e che è stata già studiata nel capitolo 5, presenta, infatti, uno strato di polistirene posto sul lato esterno della struttura portante in calcestruzzo. La stratigrafia 2, invece, richiama la soluzione adottata nei Logements Les Gallets progettati da Michel Guthmann e Bertrand Bonnier, e presenta uno strato di isolamento sul lato interno della struttura portante in calcestruzzo. Gli spessori del setto portante in calcestruzzo e dello strato isolante sono stati scelti identici a quelli della stratigrafia 1 in modo che le due soluzioni di parete avessero trasmittanze termiche simili. Per le due stratigrafie sono stati definiti otto casi di simulazione sulla base di tre variabili di progetto rappresentate dallo spessore del gabbione, dal tipo di pietra di riempimento e dal rapporto tra volume dei vuoti, indicato con la sigla V_v , e il volume totale del modulo costruttivo, indicato con la sigla V_t (Tabella. 19).

STRATIGRAFIA 1 ²⁸		Basalto B	Calcere C
caso 1. Gabbioni Aria (0,03 m) Drenaggio (0,01 m) Polistirene (0,14 m) Guaina bituminosa (0,005 m) Calcestruzzo (0,22 m) Intonaco (0,015 m)	1.1. Sp. 0,1 m	1.1.B.1. $V_v/V_t=25\%$	1.1.C.1. $V_v/V_t=25\%$
		1.1.B.2. $V_v/V_t=40\%$	1.1.C.2. $V_v/V_t=40\%$
	1.2. Sp. 0,15 m	1.2.B.1. $V_v/V_t=25\%$	1.2.C.1. $V_v/V_t=25\%$
		1.2.B.2. $V_v/V_t=40\%$	1.2.C.2. $V_v/V_t=40\%$
STRATIGRAFIA 2		Basalto B	Calcere C
caso 2. Gabbioni Calcestruzzo (0,22 m) Aria (0,01 m) Polistirene (0,14 m) Cartongesso (0,0125 m)	2.1. Sp. 0,1 m	2.1.B.1. $V_v/V_t=25\%$	2.1.C.1. $V_v/V_t=25\%$
		2.1.B.2. $V_v/V_t=40\%$	2.1.C.2. $V_v/V_t=40\%$
	2.2. Sp. 0,15 m	2.2.B.1. $V_v/V_t=25\%$	2.2.C.1. $V_v/V_t=25\%$
		2.2.B.2. $V_v/V_t=40\%$	2.2.C.2. $V_v/V_t=40\%$

Tabella. 19 Casi di simulazione con indicazione della stratigrafia, dello spessore del gabbione, del tipo di pietra di riempimento e del rapporto tra il volume dei vuoti (V_v) e il volume totale del modulo costruttivo (V_t)

²⁸ Nella stratigrafia 1 è stato inserito uno strato di guaina bituminosa per tener conto del particolare sistema scelto per lo smaltimento delle acque meteoriche nell'edificio Haus 9x9 preso a riferimento (cfr. 4.3.3 e 6.2.2).

Gli spessori scelti, pari a 0,1 m e 0,15 m, sono confrontabili con quelli adottati negli edifici reali presi come riferimento per la definizione delle stratigrafie di parete: i gabbioni utilizzati da Bernhard, infatti hanno uno spessore di 0,12 m mentre la soluzione di parete definita da Guthmann e Bonnier presenta uno strato a riempimento litico di 0,15 m.

Le due tipologie di pietra considerate sono il basalto e il calcare. Sono state selezionate per il loro colore tendente rispettivamente al nero e al bianco e per i differenti valori di emissività e di assorbanza (Tabella. 20). I due litotipi, inoltre, rientrano tra i tipi di rocce adatti per la realizzazione dei gabbioni (Enviromesh 2007, 2017).

Proprietà dei litotipi selezionati					
Materiale	λ [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kg K]	Assorbanza [-]	Emissività [-]
Basalto	3,5	2850	1000	0,88	0,72
Calcare	1,5	2180	720	0,32	0,93

Tabella. 20 Principali proprietà delle due tipologie di pietra selezionate per l'analisi

I due indici di porosità del gabbione, infine, sono stati scelti in base ai valori definiti dalla specifica tecnica UNI EN 13383 e indicati nella letteratura tecnica consultata: i valori tipici di porosità indicati dalle fonti, infatti, sono variabili tra 0,3 e 0,4 mentre l'indice dei vuoti di gabbioni riempiti manualmente è pari a 0,25 (CIRIA, CUR, CETMEF, 2007; Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 2013; Neermal, 2012).

Per tenere conto della presenza dell'aria tra i frammenti lapidei di riempimento dei gabbioni e dei due diversi indici dei vuoti, è stato definito un metodo di modellazione semplificato²⁹ articolato in tre fasi. Nella prima fase viene definita all'interno del *software* Design Builder una parete fittizia di spessore corrispondente a quello del rivestimento a gabbioni, costituita da un singolo strato di materiale termicamente eterogeneo: il *software*, infatti, consente di specificare oltre al materiale costituente il singolo strato funzionale di parete, anche il tipo e la percentuale di un secondo materiale che lo rende termicamente non omogeneo. Come materiali costituenti le pareti fittizie sono stati indicati, pertanto, il calcare e il basalto resi termicamente eterogenei dalla presenza di una percentuale d'aria pari a 25% e 40%. Per ognuna di queste pareti, il *software* Design Builder consente di calcolare la trasmittanza termica (U_{eq}), la resistenza termica (R_{eq}) e la capacità termica interna (C) in presenza di strati termicamente eterogenei. Questi valori vengono utilizzati nella seconda fase del metodo di modellazione per ricavare indirettamente la conducibilità termica interna di un materiale equivalente termicamente omogeneo, la sua densità e il suo calore specifico. La conducibilità termica equivalente (λ_{eq}) viene calcolata attraverso l'equazione inversa della trasmittanza termica, assumendo i valori delle resistenze termiche superficiali esterna (R_{se}) ed interna (R_{si}) pari rispettivamente a 0,04 e 0,13 m²K/W e considerando uno spessore (s) pari a 0,1 o a 0,15 m (Equ. 1):

$$\lambda_{eq} = \frac{s}{\frac{1}{U_{eq}} - R_{se} - R_{si}} \quad \text{con} \quad R_{si} = 0,13 \left[\frac{m^2K}{W} \right] \quad \text{e} \quad R_{se} = 0,04 \left[\frac{m^2K}{W} \right] \quad (1)$$

²⁹ Lo stesso metodo è stato adottato anche nel capitolo 5 per la definizione delle pareti esterne con rivestimento a gabbioni del caso di simulazione I[Ber] considerando un indice dei vuoti pari al 30%.

Per calcolare la densità equivalente, sono stati valutati il volume occupato dalla pietra (V_p) e quello occupato dall'aria (V_a) in un gabbione di 1m x 1m e di spessore (s) pari a 0,1 m o a 0,15 m con un indice dei vuoti (i_v) pari a 25% o a 40% (Equ. 2, 3):

$$V_a = 1 \cdot 1 \cdot s \cdot i_v \quad (2)$$

$$V_p = 1 \cdot 1 \cdot s \cdot (1 - i_v) \quad (3)$$

La densità equivalente (ρ_{eq}) viene calcolata, quindi, attraverso le equazioni che legano volume, massa e densità dell'aria (V_a , m_a , ρ_a) e della pietra (V_p , m_p , ρ_p), assumendo un valore della densità dell'aria pari a 1,225 kg/m³ (Equ. 4-6):

$$m_a = \rho_a \cdot V_a \quad (4)$$

$$m_p = \rho_p \cdot V_p \quad (5)$$

$$\rho_{eq} = \frac{m_a + m_p}{V_a + V_p} \quad (6)$$

Il calore specifico a pressione costante (c_p), infine, viene calcolato attraverso l'equazione inversa della capacità termica interna (C) (Equ. 7):

$$c_p = \frac{C}{m_a + m_p} \quad (7)$$

Le proprietà equivalenti sono state calcolate per le otto tipologie di gabbioni studiate. Sono state utilizzate nella terza fase del metodo di modellazione, per definire nella libreria di Design Builder otto materiali equivalenti termicamente omogeni (Tabella. 21).

Proprietà equivalenti						
Materiale	U_{eq} [W/m ² K]	R_{eq} [m ² K/W]	C [kJ/m ² K]	λ_{eq} [W/mK]	ρ_{eq} [kg/m ³]	c_p [J/kg K]
1.B.1.	4,70	0,21	142,5	2,35	2137,81	666,57
1.B.2.	4,48	0,22	142,5	1,88	1710,49	833,09
2.B.1.	4,40	0,23	285	2,62	2137,81	888,76
2.B.2.	4,20	0,24	285	2,21	1710,49	1110,79
1.C.1.	3,99	0,25	78,48	1,24	1635,31	479,91
1.C.2.	3,85	0,26	78,48	1,11	1308,49	599,77
2.C.1.	3,57	0,28	156,96	1,36	1635,31	639,88
2.C.2.	3,49	0,29	156,96	1,28	1308,49	799,70

Tabella. 21 Proprietà calcolate nella seconda fase del metodo di modellazione e utilizzate per definire nella libreria di Design Builder otto materiali equivalenti termicamente omogeni

I materiali definiti sono stati assegnati come strato più esterno delle sedici tipologie di parete oggetto di studio. I valori di trasmittanza termica ottenuti per le chiusure verticali dei diversi casi di simulazione sono riassunti nella Tabella. 22 e nella Tabella. 23.

	1.1.B.1	1.1.B.2	1.2.B.1	1.2.B.2	1.1.C.1	1.1.C.2	1.2.C.1	1.2.C.2
U [W/m ² K]	0,208	0,208	0,208	0,207	0,207	0,206	0,206	0,205

Tabella. 22 Valori della trasmittanza termica delle pareti esterne degli otto casi di simulazione caratterizzati dalla stratigrafia 1

	2.1.B.1	2.1.B.2	2.2.B.1	2.2.B.2	2.1.C.1	2.1.C.2	2.2.C.1	2.2.C.2
U [W/m ² K]	0,212	0,211	0,211	0,211	0,21	0,21	0,209	0,208

Tabella. 23 Valori della trasmittanza termica delle pareti esterne degli otto casi di simulazione caratterizzati dalla stratigrafia 2

La modellazione eseguita secondo il metodo descritto non consente di simulare la reale prestazione di involucri a gabbioni. Infatti, si è assunto che ogni sezione delle chiusure verticali simulate abbia lo stesso comportamento senza considerare le differenze esistenti in termini di indice di porosità, localizzazione dei vuoti, dimensioni e proprietà dei frammenti lapidei: in un modulo costruttivo a gabbioni reale ciascuna sezione differisce dall'altra poiché il materiale di riempimento essendo di origine naturale non presenta caratteristiche intrinseche costanti e poiché i singoli frammenti lapidei tendono a disporsi secondo giaciture casuali sempre diverse. Il metodo semplificato di modellazione adottato, inoltre, non tiene conto dei processi di imbibizione della pietra che si verificano a seguito delle precipitazioni atmosferiche e che influiscono sulla prestazione termica: come in tutti i materiali da costruzione porosi, infatti, la conducibilità termica dei materiali lapidei è variabile in funzione del contenuto d'acqua nei pori (Minardo et al., 2016; Agliata et al., 2017). L'incidenza di questo fenomeno nei processi di scambio termico è stata trascurata assumendo valori costanti del coefficiente di conducibilità termica interna del basalto e del calcare e caratterizzando le chiusure verticali attraverso la trasmittanza termica. Infine, sono stati assunti per il riempimento lapideo dei gabbioni dei valori di emissività e di assorbanza pari a quelli del rispettivo litotipo senza considerare che per i materiali in forma granulare le proprietà termico-radiative risultano dipendenti dall'assortimento dimensionale: diverse ricerche sperimentali hanno dimostrato, in particolare, che l'albedo e la riflettanza di aggregati in pietra naturale aumentano al diminuire delle loro dimensioni influenzandone la prestazione termico-energetica (Castaldo, 2015; Pisello et al., 2014; Rosso et al., 2016b). In assenza di dati sperimentali, pertanto, il metodo consente una valutazione teorica speditiva e sufficientemente accurata della prestazione termico-energetica di involucri a gabbioni da cui possono essere tratte indicazioni per la progettazione.

La prestazione termico-energetica dei sedici casi di simulazione definiti è stata valutata negli stessi contesti di studio selezionati per l'analisi prestazionale eseguita nel capitolo 5, ovvero le città di Grosseto, di Bologna e di Catania in modo da poter trarre anche conclusioni riferibili, più in generale, ai contesti caratterizzati da un clima mediterraneo.

Le simulazioni sono state condotte ad impianti accesi per valutare il consumo energetico annuale per il riscaldamento e per il raffrescamento. L'analisi della prestazione energetica è stata corredata dallo studio della prestazione termica in modo da poter comprendere come le diverse variabili considerate incidono sulle condizioni di comfort termico interno e sulla trasmissione del calore attraverso le pareti

verticali. La prestazione termica dei sedici casi analizzati è stata studiata attraverso simulazioni dinamiche condotte ad impianti spenti in modo che i risultati ottenuti fossero influenzati esclusivamente dalle caratteristiche delle pareti. Sono state valutate le temperature operative medie per un tipico giorno invernale (12 Gennaio) e per un tipico giorno estivo (31 Luglio). Inoltre, nel medesimo giorno estivo, sono state valutate le temperature superficiali esterne ed interne massime delle pareti sud ($T_{max,est}^S$; $T_{max,int}^S$) in modo da calcolare i valori di attenuazione (f) e il tempo di ritardo (φ) e caratterizzare l'inerzia termica delle pareti (Equ. 8, 9):

$$f = \frac{A_{si}}{A_{se}} = \frac{T_{max,int}^S - T_{min,int}^S}{T_{max,est}^S - T_{min,est}^S} \quad (8)$$

$$\varphi = |t_2 - t_1| \quad \text{posto } T_{int}^S(t_1) = T_{max,int}^S \quad T_{est}^S(t_2) = T_{max,est}^S \quad (9)$$

6.1.2.2. Valutazione della prestazione energetica

Relativamente ai consumi energetici per il riscaldamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1, è emerso che nei tre contesti di studio l'impiego del basalto come pietra di riempimento dei gabbioni risulta più vantaggioso rispetto a quello del calcare (Tabella. 24, Fig. 111). Le proprietà termico-radiative del basalto, infatti, limitano la riflessione della radiazione solare incidente sull'involucro e ne favoriscono l'assorbimento riducendo conseguentemente il consumo energetico invernale. Nel contesto di Grosseto i casi con riempimento in basalto consentono in media un risparmio energetico di circa il 9% rispetto a quelli con riempimento in calcare. Nelle condizioni climatiche di Bologna e Catania, invece, il risparmio è pari rispettivamente a 6,5% e 15,8% (Tabella. 25).

Energia annuale per il riscaldamento [kWh]			
Stratigrafia 1	Grosseto	Bologna	Catania
1.1.B.1.	2645,46	4356,95	1127,19
1.1.B.2.	2643,85	4358,71	1133,46
1.2.B.1.	2603,20	4305,48	1123,69
1.2.B.2.	2602,01	4304,70	1109,08
1.1.C.1.	2905,16	4659,17	1337,19
1.1.C.2.	2902,43	4655,84	1355,92
1.2.C.1.	2861,83	4603,42	1311,73
1.2.C.2.	2860,07	4606,68	1329,55

Tabella. 24 Energia annuale per il riscaldamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1

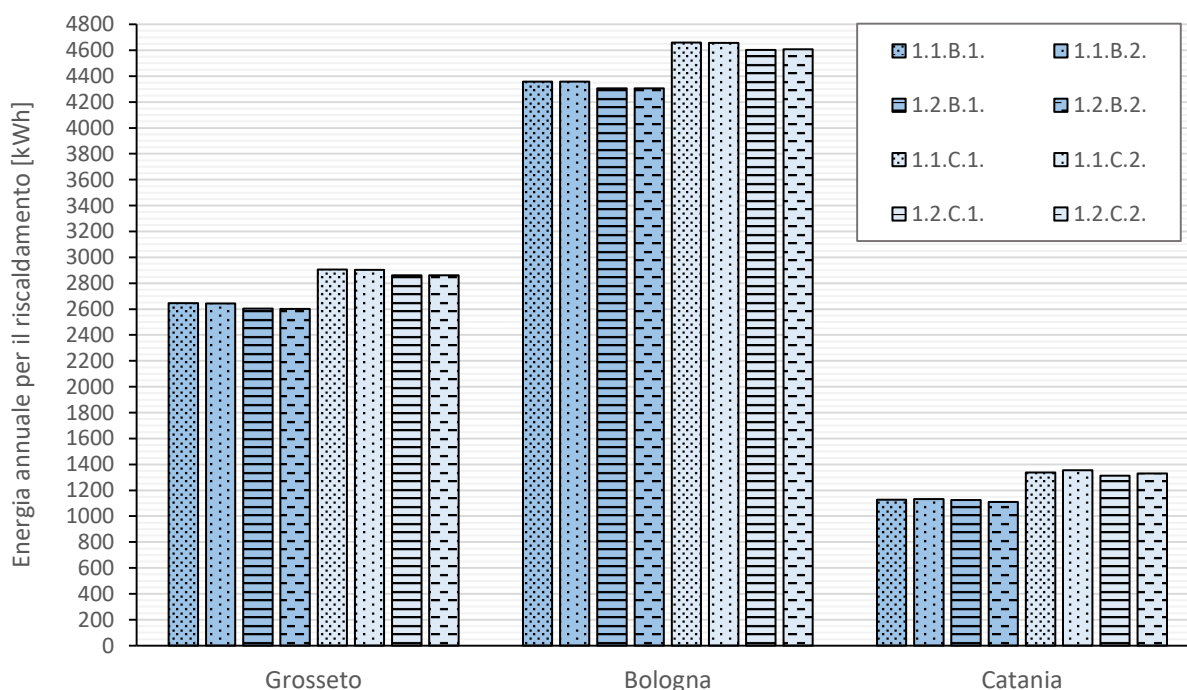


Fig. 111 Energia annuale per il riscaldamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1

	Grosseto	Bologna	Catania
Energia per il riscaldamento, media casi con riempimento in basalto [kWh]	2623,63	4331,46	1123,35
Energia per il riscaldamento, media casi con riempimento in calcare [kWh]	2882,37	4631,28	1333,60
Risparmio rispetto alla media casi con riempimento in calcare [%]	8,98	6,47	15,76

Tabella. 25 Medie dei consumi energetici annuali per il riscaldamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 con riempimento in basalto e in calcare

Anche per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2, è emerso che l'impiego del basalto risulta più vantaggioso rispetto a quello del calcare in tutti i contesti di studio (Tabella. 26, Fig. 112). Nel contesto di Grosseto i casi con riempimento in basalto consentono in media un risparmio energetico di circa 8,7% rispetto a quelli con riempimento in calcare. Nelle condizioni climatiche di Bologna e Catania, invece, il risparmio è pari rispettivamente a 6,3% e 14,9% (Tabella. 27).

Energia annuale per il riscaldamento [kWh]			
Stratigrafia 2	Grosseto	Bologna	Catania
2.1.B.1.	2690,77	4422,95	1194,19
2.1.B.2.	2689,52	4420,14	1193,98
2.2.B.1.	2657,97	4376,88	1176,13
2.2.B.2.	2658,85	4373,55	1175,93
2.1.C.1.	2946,50	4723,09	1402,77
2.1.C.2.	2944,97	4720,48	1401,50
2.2.C.1.	2915,23	4671,24	1383,11
2.2.C.2.	2914,55	4670,12	1383,43

Tabella. 26 Energia annuale per il riscaldamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2

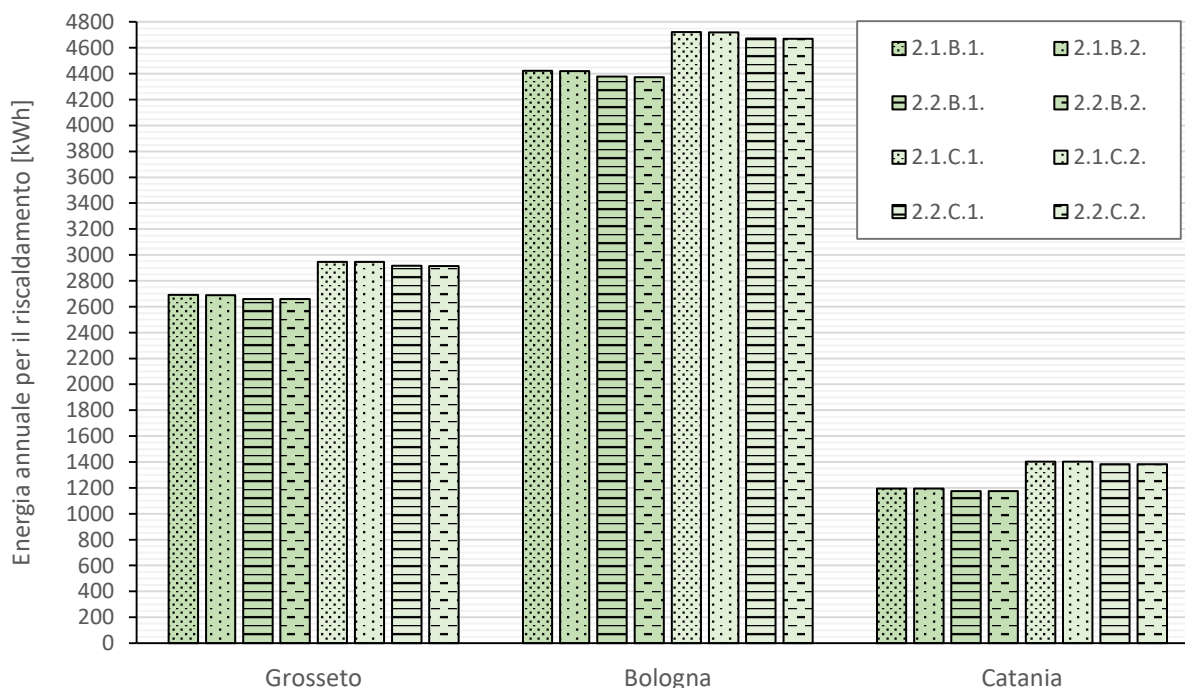


Fig. 112 Energia annuale per il riscaldamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2

	Grosseto	Bologna	Catania
Energia per il riscaldamento, media casi con riempimento in basalto [kWh]	2674,28	4398,38	1185,06
Energia per il riscaldamento, media casi con riempimento in calcare [kWh]	2930,31	4696,23	1392,70
Risparmio rispetto alla media casi con riempimento in calcare [%]	8,74	6,34	14,91

Tabella. 27 Medie dei consumi energetici annuali per il riscaldamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 con riempimento in basalto e in calcare

Complessivamente, i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 consentono in media un risparmio energetico rispetto a quelli caratterizzati dalla stratigrafia 2 pari a circa 1,4% per Bologna, 1,8% per Grosseto e 4,7% per Catania (Tabella. 28). Il caso 1.2.B.2. presenta la prestazione migliore in tutti i contesti climatici analizzati mentre il caso 2.1.C.1 risulta sempre essere il più svantaggioso. Per entrambe le soluzioni costruttive simulate, inoltre, l'aumento dello spessore del gabbione da 0,1 m a 0,15 m permette, a parità di tipo di pietra e di porosità, una riduzione del consumo energetico per il riscaldamento. Lo spessore del modulo costruttivo, inoltre, risulta influire più della porosità sulla prestazione invernale dell'involucro.

	Grosseto	Bologna	Catania
Energia per il riscaldamento, media casi stratigrafia 1 [kWh]	2753,00	4481,37	1228,47
Energia per il riscaldamento, media casi stratigrafia 2 [kWh]	2802,30	4547,31	1288,88
Risparmio rispetto alla media casi stratigrafia 2 [%]	1,76	1,45	4,69

Tabella. 28 Medie dei consumi energetici annuali per il riscaldamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 e 2

Relativamente ai consumi energetici per il raffrescamento, invece, è emerso che per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 l'impiego del calcare come pietra di riempimento dei gabbioni risulta più vantaggioso rispetto a quello del basalto in tutti i contesti climatici di analisi (Tabella. 29, Fig. 113). Le proprietà termico-radiative del calcare, infatti, favoriscono la riflessione della radiazione solare incidente sull'involucro e ne limitano l'assorbimento con conseguente minore carico per l'impianto di raffrescamento. Nel contesto di Grosseto i casi con riempimento in calcare consentono in media un risparmio energetico di circa il 22,5% rispetto a quelli con riempimento in basalto. Nelle condizioni climatiche di Bologna e Catania, invece, il risparmio è pari rispettivamente a 22,6% e 16,8% (Tabella. 30).

Energia annuale per il raffrescamento [kWh]			
Stratigrafia 1	Grosseto	Bologna	Catania
1.1.B.1.	462,67	592,70	840,06
1.1.B.2.	458,41	594,76	839,06
1.2.B.1.	466,66	593,82	845,80
1.2.B.2.	467,49	592,27	848,72
1.1.C.1.	361,66	458,71	701,18
1.1.C.2.	357,81	460,43	700,93
1.2.C.1.	360,30	458,62	702,54
1.2.C.2.	357,59	459,59	701,16

Tabella. 29 Energia annuale per il raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1

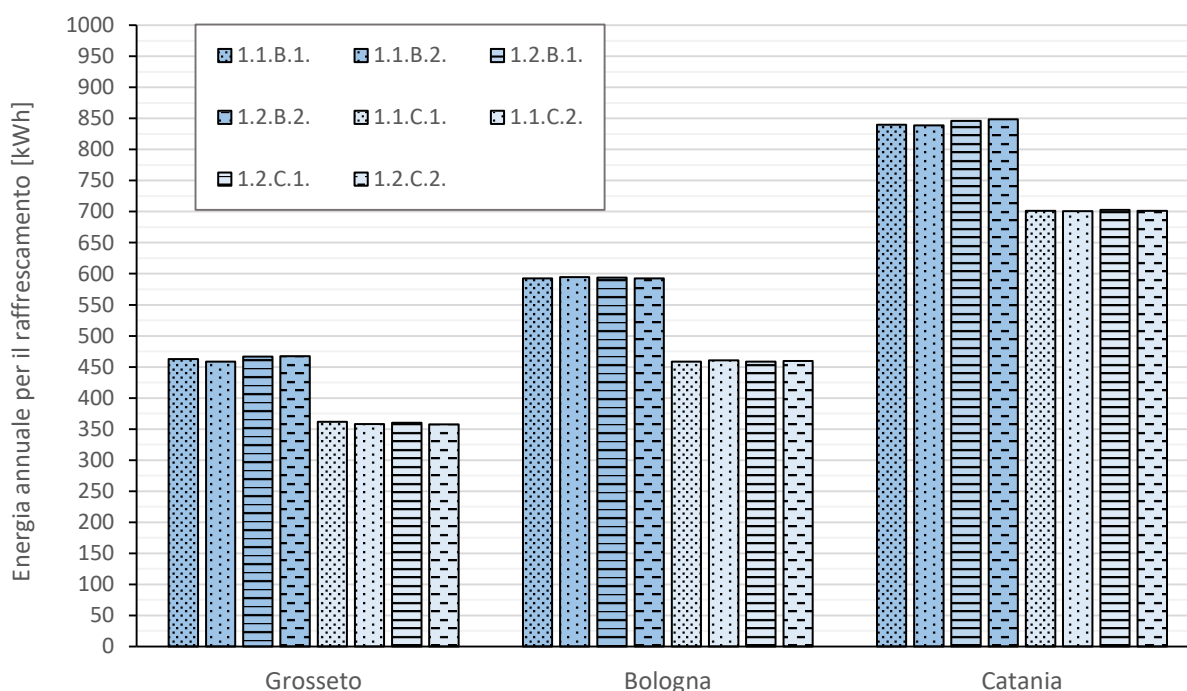


Fig. 113 Energia annuale per il raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1

	Grosseto	Bologna	Catania
Energia per il raffrescamento, media casi con riempimento in calcare [kWh]	359,34	459,34	701,45
Energia per il raffrescamento, media casi con riempimento in basalto [kWh]	463,81	593,39	843,41
Risparmio rispetto alla media casi con riempimento in basalto [%]	22,52	22,59	16,83

Tabella. 30 Medie dei consumi energetici annuali per il raffrescamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 con riempimento in basalto e in calcare

Anche per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2, è emerso che l'impiego del calcare risulta più vantaggioso rispetto a quello del basalto in tutti i contesti di studio (Tabella. 31, Fig. 114). Nel contesto di Grosseto i casi con riempimento in calcare consentono in media un risparmio energetico

di circa il 21,3% rispetto a quelli con riempimento in basalto. Nelle condizioni climatiche di Bologna e Catania, invece, il risparmio è pari rispettivamente a 22,1% e 16,8% (Tabella. 32).

Energia annuale per il raffrescamento [kWh]			
Stratigrafia 2	Grosseto	Bologna	Catania
2.1.B.1.	501,01	632,28	878,13
2.1.B.2.	503,01	635,83	878,44
2.2.B.1.	496,52	627,77	872,37
2.2.B.2.	498,13	629,97	864,70
2.1.C.1.	396,47	495,33	732,06
2.1.C.2.	396,14	494,45	731,42
2.2.C.1.	389,49	491,21	721,74
2.2.C.2.	390,33	486,88	722,45

Tabella. 31 Energia annuale per il raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2

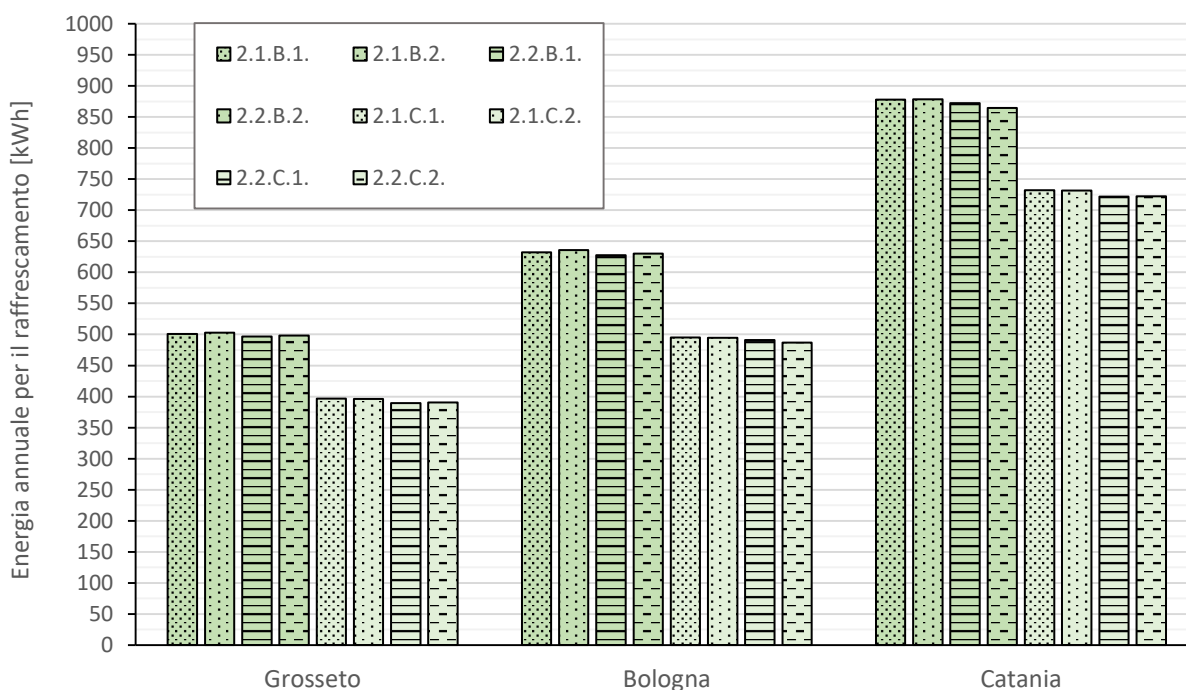


Fig. 114 Energia annuale per il raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2

	Grosseto	Bologna	Catania
Energia per il raffrescamento, media casi con riempimento in calcare [kWh]	393,11	491,97	726,92
Energia per il raffrescamento, media casi con riempimento in basalto [kWh]	499,67	631,46	873,41
Risparmio rispetto alla media casi con riempimento in basalto [%]	21,33	22,09	16,77

Tabella. 32 Medie dei consumi energetici annuali per il raffrescamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 con riempimento in basalto e in calcare

Complessivamente, i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 consentono in media un risparmio energetico rispetto a quelli caratterizzati dalla stratigrafia 2 pari a 3,5% per Catania, 6,3% per Bologna e 7,8% per Grosseto (Tabella. 33). Il caso 2.1.B.2 risulta essere il più svantaggio in tutti i contesti climatici di analisi mentre i casi 1.1.C.2., 1.2.C.1. e 1.2.C.2. presentano la prestazione migliore rispettivamente a Catania, Bologna e Grosseto.

	Grosseto	Bologna	Catania
Energia per il raffrescamento, media casi stratigrafia 1 [kWh]	411,57	526,36	772,43
Energia per il raffrescamento, media casi stratigrafia 2 [kWh]	446,39	561,72	800,17
Risparmio rispetto alla media casi stratigrafia 2 [%]	7,80	6,29	3,47

Tabella. 33 Medie dei consumi energetici annuali per il riscaldamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 e 2

Relativamente al consumo energetico totale per riscaldamento e raffrescamento, è emerso che nei tre contesti di studio l'impiego del basalto per il riempimento dei gabbioni risulta globalmente più vantaggioso rispetto a quello del calcare per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 (Tabella. 34, Fig. 115). In tutte le condizioni climatiche studiate, infatti, il fabbisogno per il riscaldamento è superiore a quello per il raffrescamento e influisce in modo determinante sulla prestazione energetica annuale. Pertanto, il materiale lapideo che garantisce minori consumi nella stagione invernale consente di ottenere anche maggiori vantaggi su tutto l'arco dell'anno. Nel contesto di Grosseto i casi con riempimento in basalto consentono in media un risparmio energetico di circa il 4,8% rispetto a quelli con riempimento in calcare. Nelle condizioni climatiche di Bologna e Catania, invece, il risparmio è pari rispettivamente a 3,3% e 3,4% (Tabella. 35).

Energia annuale per riscaldamento e raffrescamento [kWh]			
Stratigrafia 1	Grosseto	Bologna	Catania
1.1.B.1.	3108,13	4949,66	1967,25
1.1.B.2.	3102,26	4953,47	1972,51
1.2.B.1.	3069,86	4899,29	1969,50
1.2.B.2.	3069,50	4896,97	1957,80
1.1.C.1.	3266,83	5117,87	2038,37
1.1.C.2.	3260,24	5116,27	2056,84
1.2.C.1.	3222,13	5062,04	2014,27
1.2.C.2.	3217,67	5066,27	2030,71

Tabella. 34 Energia annuale totale per riscaldamento e raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1

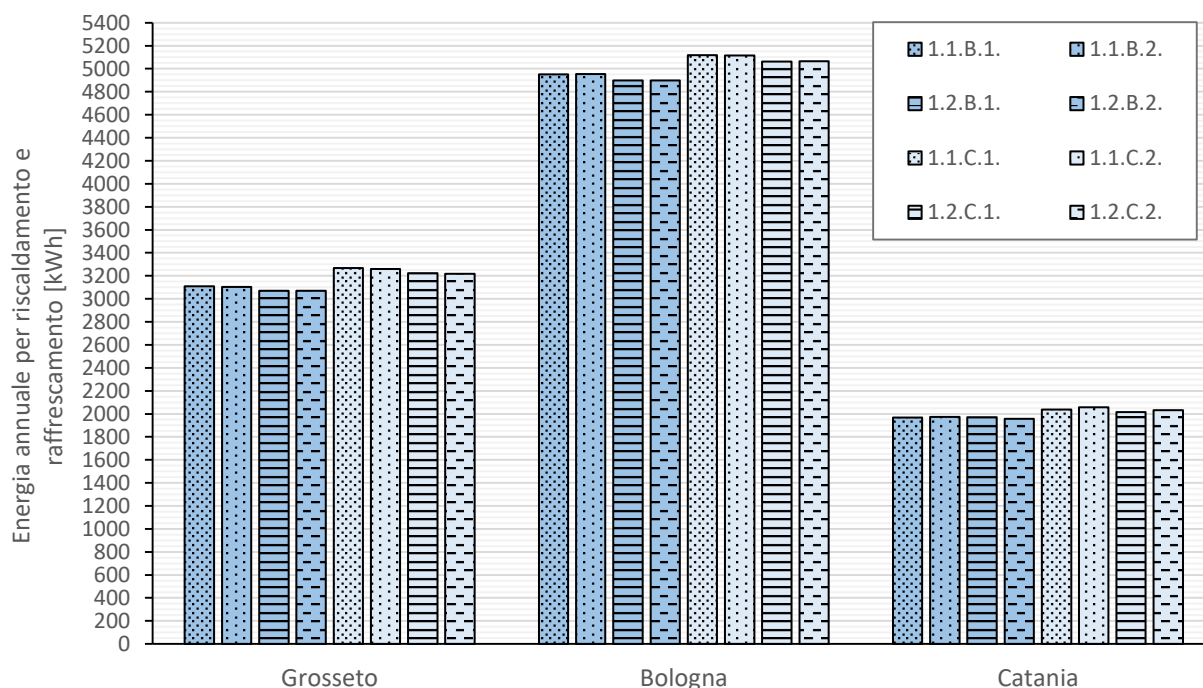


Fig. 115 Energia annuale totale per riscaldamento e raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1

	Grosseto	Bologna	Catania
Energia per riscaldamento e raffrescamento, media casi con riempimento in basalto [kWh]	3087,44	4924,85	1966,76
Energia per riscaldamento e raffrescamento, media casi con riempimento in calcare [kWh]	3241,71	5090,61	2035,05
Risparmio rispetto alla media casi con riempimento in calcare [%]	4,76	3,26	3,36

Tabella. 35 Medie dei consumi energetici annuali per riscaldamento e raffrescamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 con riempimento in basalto e in calcare

Anche per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2, è emerso che l'impiego del basalto risulta più vantaggioso rispetto a quello del calcare in tutti e tre i contesti di studio (Tabella. 36, Fig. 116). Nel contesto di Grosseto i casi con riempimento in basalto consentono in media un risparmio energetico di circa il 4,5% rispetto a quelli con riempimento in calcare. Nelle condizioni climatiche di Bologna e Catania, invece, il risparmio è pari rispettivamente a 3,1 % e 2,9% (Tabella. 37).

Energia annuale per riscaldamento e raffrescamento [kWh]			
Stratigrafia 2	Grosseto	Bologna	Catania
2.1.B.1.	3191,78	5055,24	2072,32
2.1.B.2.	3192,52	5055,97	2072,42
2.2.B.1.	3154,49	5004,65	2048,50
2.2.B.2.	3156,98	5003,52	2040,63
2.1.C.1.	3342,97	5218,43	2134,83
2.1.C.2.	3341,12	5214,93	2132,92
2.2.C.1.	3304,72	5162,45	2104,85
2.2.C.2.	3304,87	5157,00	2105,88

Tabella. 36 Energia annuale totale per riscaldamento e raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2

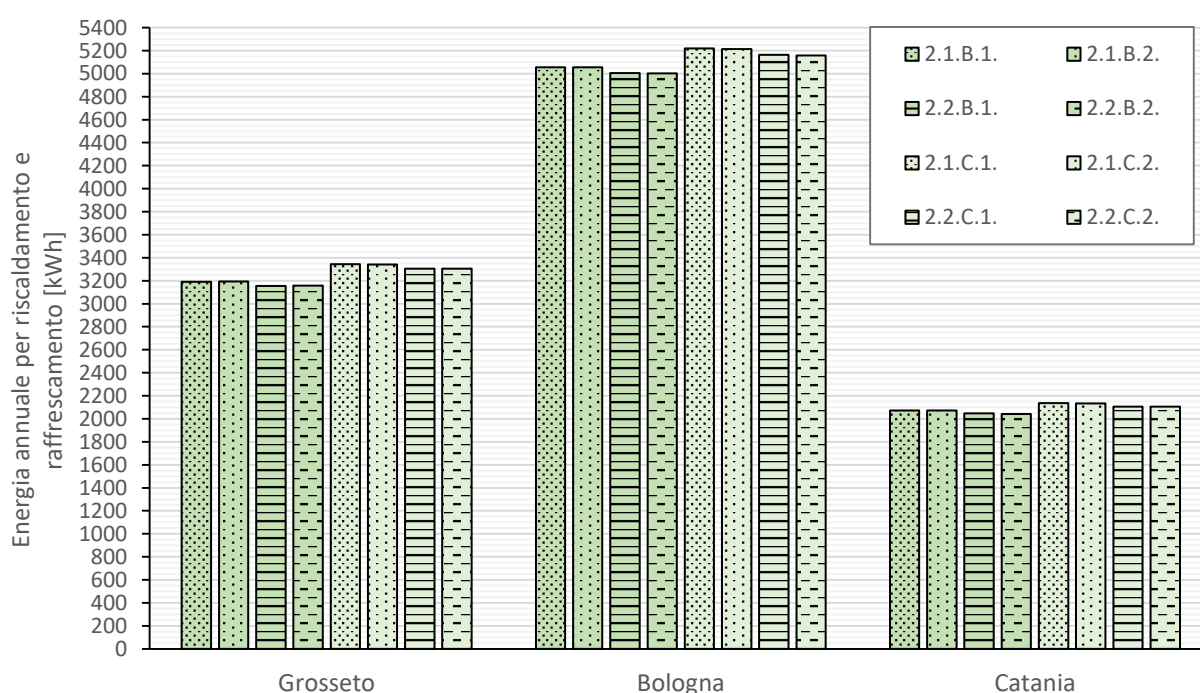


Fig. 116 Energia annuale totale per riscaldamento e raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2

	Grosseto	Bologna	Catania
Energia per riscaldamento e raffrescamento, media casi con riempimento in basalto [kWh]	3173,94	5029,84	2058,47
Energia per riscaldamento e raffrescamento, media casi con riempimento in calcare [kWh]	3323,42	5188,20	2119,62
Risparmio rispetto alla media casi con riempimento in calcare [%]	4,50	3,05	2,89

Tabella. 37 Medie dei consumi energetici annuali per riscaldamento e raffrescamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 con riempimento in basalto e in calcare

Complessivamente, i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 rispetto a quelli caratterizzati dalla stratigrafia 2 consentono in media un risparmio energetico pari a 2% per Bologna, 2,6% per Grosseto e 4,2% per Catania (Tabella. 38) Il caso 1.2.B.2. presenta la prestazione migliore in tutti i contesti climatici analizzati mentre il caso 2.1.C.1 risulta sempre essere il più svantaggioso conformemente con quanto emerso dall'analisi dei consumi invernali.

	Grosseto	Bologna	Catania
Energia per riscaldamento e raffrescamento, media casi stratigrafia 1 [kWh]	3164,58	5007,73	2000,91
Energia per riscaldamento e raffrescamento, media casi stratigrafia 2 [kWh]	3248,68	5109,02	2089,04
Risparmio rispetto alla media casi stratigrafia 2 [%]	2,59	1,98	4,22

Tabella. 38 Medie dei consumi energetici annuali per riscaldamento e raffrescamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 e 2

Dall'analisi dei risultati ottenuti nelle condizioni climatiche di Grosseto (Fig. 117), è emerso che a parità di tipo di pietra di riempimento la stratigrafia 1 risulta più performante della stratigrafia 2: la posizione dell'isolante sul lato interno della massa termica, infatti, tende a trattenere il calore all'interno dell'edificio e a surriscaldare l'ambiente interno nella stagione estiva con conseguente maggiore carico per l'impianto di raffrescamento. Tuttavia, i casi caratterizzati da riempimento in basalto ed isolante più interno hanno una prestazione migliore di quelli con riempimento in calcare ed isolante più esterno vista la maggiore incidenza del riscaldamento sul consumo totale per la climatizzazione. Per entrambe le soluzioni costruttive simulate l'aumento dello spessore del gabbione da 0,1 m a 0,15 m permette, a parità di tipo di pietra e di porosità, una riduzione del consumo energetico per riscaldamento e raffrescamento. Lo spessore del modulo costruttivo, inoltre, risulta influire più della porosità sulla prestazione globale dell'involucro.

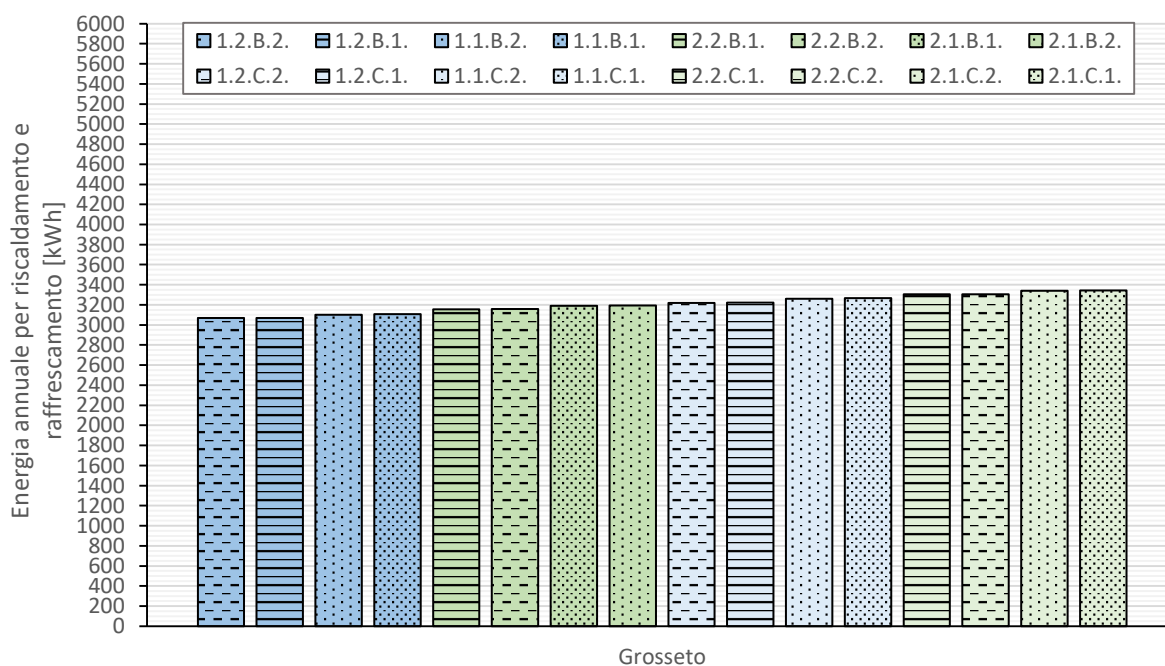


Fig. 117 Energia annuale totale per riscaldamento e raffrescamento nel contesto di Grosseto

Anche nelle condizioni climatiche di Bologna, a parità di tipo di pietra di riempimento la stratigrafia con l'isolante più esterno risulta più performante della stratigrafia con l'isolante più interno (Fig. 118). I casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 e riempimento in basalto, tuttavia, hanno una prestazione migliore di quelli con la stratigrafia 1 e riempimento in calcare a causa della maggiore incidenza del riscaldamento sul consumo totale per la climatizzazione. Il fattore che a parità di tipo di pietra e di stratigrafia incide maggiormente sul fabbisogno energetico globale è, anche in questo contesto, lo spessore.

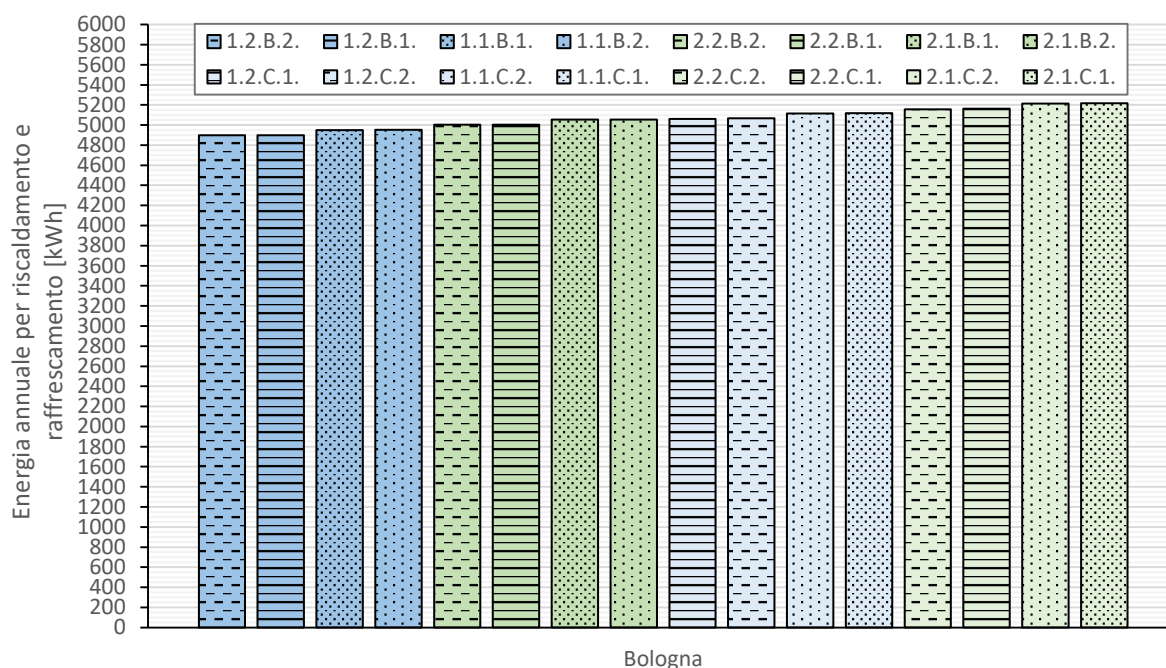


Fig. 118 Energia annuale totale per riscaldamento e raffrescamento nel contesto di Bologna

Nelle condizioni climatiche di Catania, i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 con riempimento in basalto risultano essere i più vantaggiosi ma, contrariamente agli altri due contesti di analisi, anche tre casi con riempimento in calcare ed isolante più esterno (1.2.C.1., 1.2.C.2., 1.1.C.1.) hanno una prestazione migliore dei casi con la stratigrafia 2 (Fig. 119). In questo contesto di studio, infatti, il consumo per il riscaldamento pur essendo maggiore di quello per il raffrescamento è più contenuto rispetto a quello calcolato per Bologna e Grosseto e rappresenta una quota inferiore del consumo energetico annuale per la climatizzazione. I benefici del calcare relativi alla prestazione estiva associati a quelli derivanti dalla localizzazione esterna dell'isolante, consentono, pertanto, di ridurre in modo determinante l'energia consumata nel corso dell'anno con risparmi energetici maggiori di quelli consentiti dall'utilizzo di riempimento in basalto e isolante interno.

L'aumento dello spessore del gabbione da 0,1 m a 0,15 m permette, a parità di tipo di pietra e di porosità, una riduzione del consumo energetico totale per riscaldamento e raffrescamento ad eccezione dei casi 1.1.B.1 e 1.2.B.1..

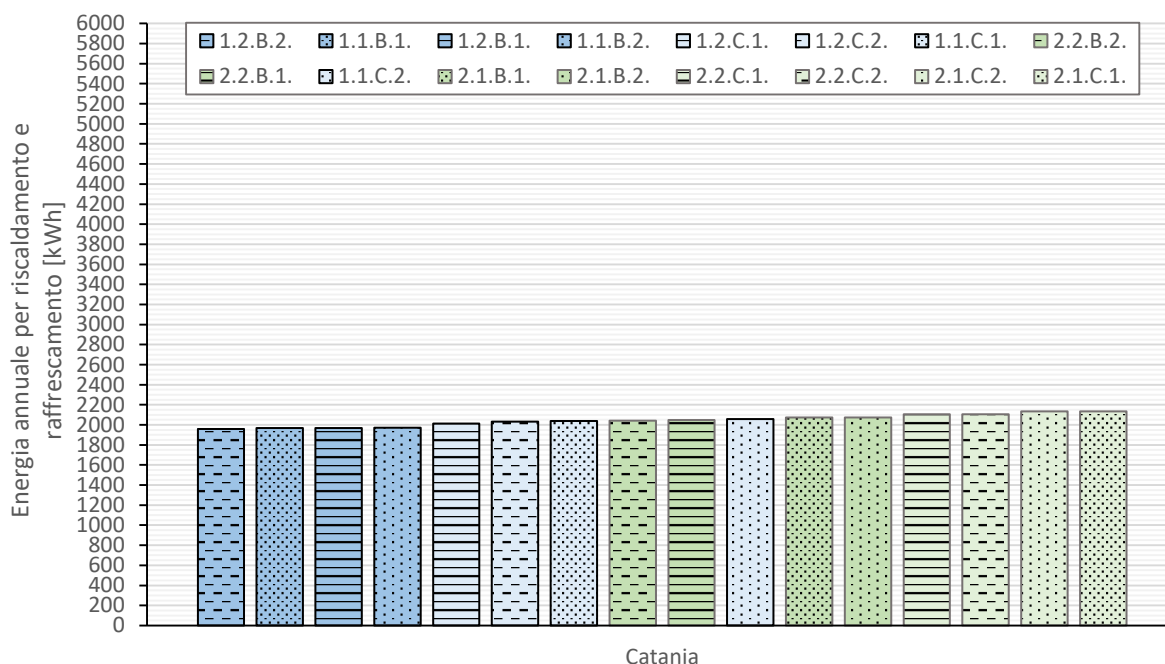


Fig. 119 Energia annuale totale per riscaldamento e raffrescamento nel contesto di Catania

6.1.2.3. Valutazione della prestazione termica

Dalle simulazioni dinamiche condotte ad impianti spenti per analizzare la prestazione termica in un tipico giorno invernale (12 Gennaio), è emerso che per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 l’impiego del basalto come pietra di riempimento dei gabbioni risulta più vantaggioso rispetto a quello del calcare in tutti i contesti climatici di studio (Tabella. 39, Fig. 120). Le temperature operative giornaliere medie, infatti, risultano più elevate grazie alla maggiore assorbanza del basalto. Nel contesto di Grosseto i casi con riempimento in basalto consentono in media un aumento della temperatura di circa il 3,7% rispetto a quelli con riempimento in calcare. Nelle condizioni climatiche di Bologna e Catania, invece, l’aumento è pari rispettivamente a 6% e 1,5% (Tabella. 40).

Temperatura operativa media in un tipico giorno invernale (12 Gennaio)			
[°C]			
Stratigrafia 1	Grosseto	Bologna	Catania
1.1.B.1.	13,101	8,643	16,880
1.1.B.2.	13,105	8,646	16,883
1.2.B.1.	13,161	8,689	16,918
1.2.B.2.	13,166	8,692	16,920
1.1.C.1.	12,635	8,156	16,633
1.1.C.2.	12,639	8,159	16,636
1.2.C.1.	12,686	8,199	16,664
1.2.C.2.	12,689	8,201	16,666

Tabella. 39 Temperature operative medie in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1

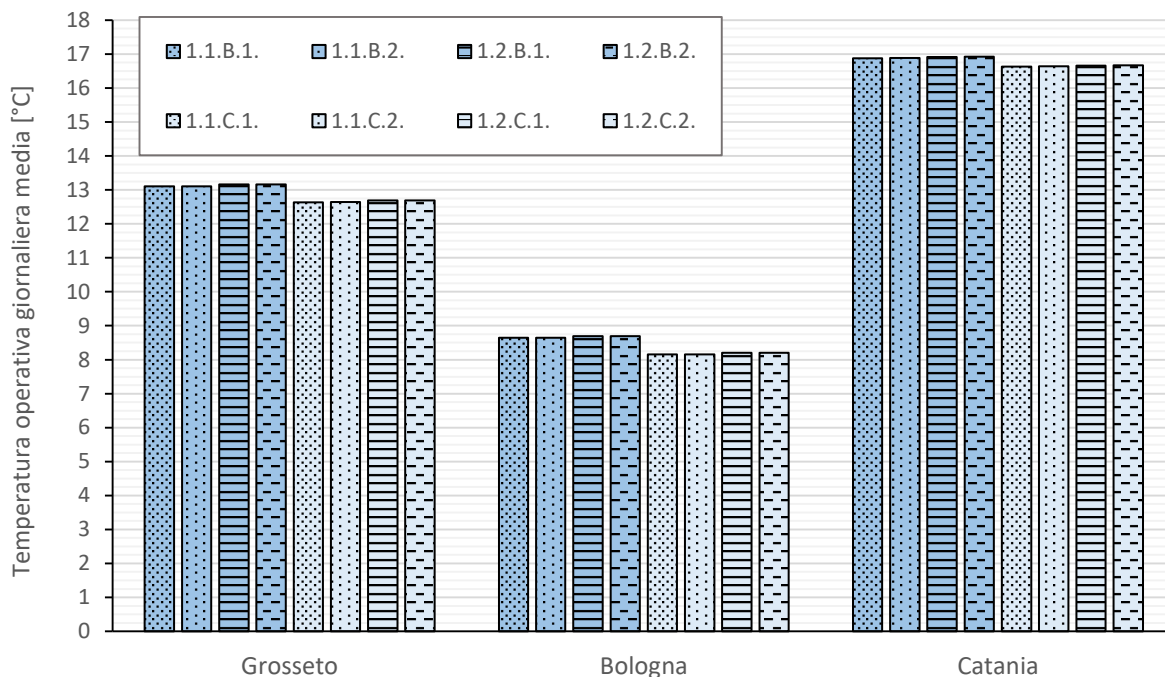


Fig. 120 Temperature operative medie in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1

	Grosseto	Bologna	Catania
Temperatura operativa giornaliera media, media casi con riempimento in basalto [°C]	13,13	8,67	16,90
Temperatura operativa giornaliera media, media casi con riempimento in calcare [°C]	12,66	8,18	16,65
Aumento rispetto alla media casi con riempimento in calcare [%]	3,72	5,98	1,50

Tabella. 40 Medie delle temperature operative di un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 con riempimento in basalto e in calcare

Anche per la stratigrafia 2, i casi con riempimento in basalto consentono il raggiungimento di un miglior livello di comfort termico interno in tutti i contesti climatici di studio (Tabella. 41, Fig. 121). Nel contesto di Grosseto i casi con riempimento in basalto consentono in media un aumento della temperatura di circa il 3,8% rispetto a quelli con riempimento in calcare. Nelle condizioni climatiche di Bologna e Catania, invece, l'aumento è pari rispettivamente a 7,2% e 1,9% (Tabella. 42).

Temperatura operativa media in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) [°C]			
Stratigrafia 2	Grosseto	Bologna	Catania
2.1.B.1.	11,392	7,211	15,659
2.1.B.2.	11,397	7,216	15,663
2.2.B.1.	11,435	7,250	15,687
2.2.B.2.	11,441	7,255	15,691
2.1.C.1.	10,977	6,725	15,366
2.1.C.2.	10,983	6,730	15,371
2.2.C.1.	11,022	6,760	15,399
2.2.C.2.	11,026	6,764	15,403

Tabella. 41 Temperature operative medie in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2

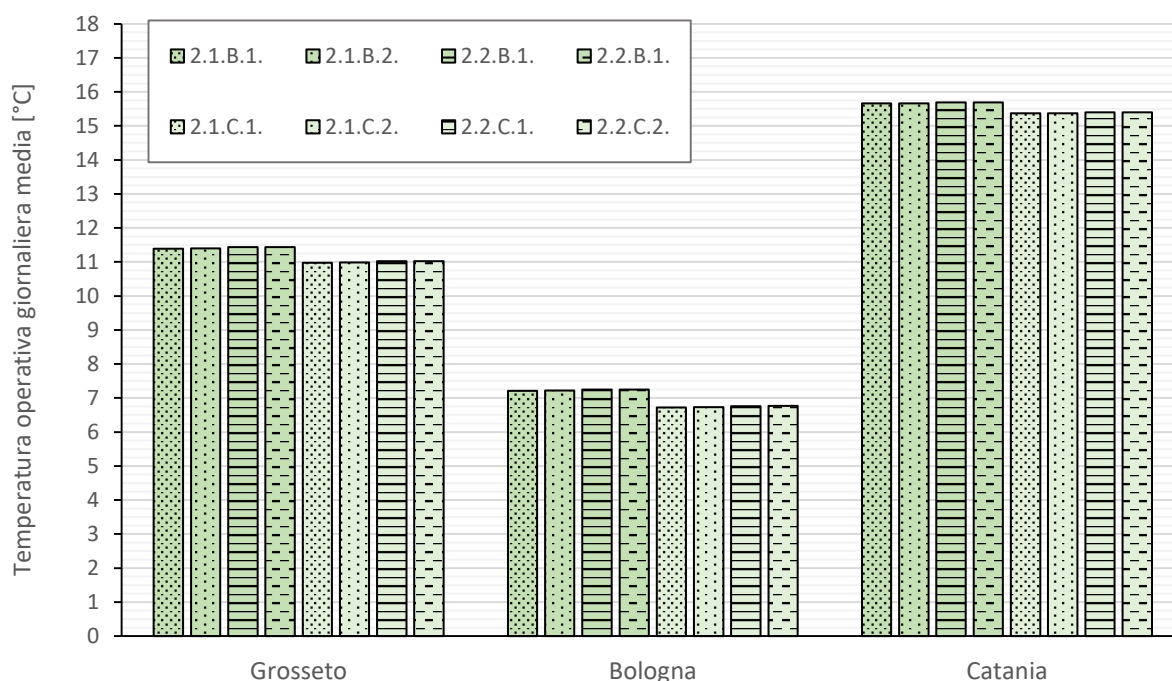


Fig. 121 Temperature operative medie in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2

	Grosseto	Bologna	Catania
Temperatura operativa giornaliera media, media casi con riempimento in basalto [°C]	11,42	7,23	15,67
Temperatura operativa giornaliera media, media casi con riempimento in calcare [°C]	11,00	6,74	15,38
Aumento rispetto alla media casi con riempimento in calcare [%]	3,77	7,24	1,89

Tabella. 42 Medie delle temperature operative di un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 con riempimento in basalto e in calcare

Complessivamente, i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 rispetto a quelli caratterizzati dalla stratigrafia 2 consentono in media un aumento della temperatura operativa giornaliera media pari a 8% per Catania, 15,1% per Grosseto e 20,5% per Bologna (Tabella. 43). Il caso 1.2.B.2. presenta i benefici maggiori in tutti i contesti climatici analizzati mentre il caso 2.1.C.1 risulta sempre essere il più svantaggioso. Inoltre, a parità di tipo di pietra, l'aumento della porosità incide meno di quello dello spessore sul miglioramento della prestazione termica della soluzione di parete.

	Grosseto	Bologna	Catania
Temperatura operativa giornaliera media, media casi con stratigrafia 1 [°C]	12,90	8,42	16,77
Temperatura operativa giornaliera media, media casi con stratigrafia 2 [°C]	11,21	6,99	15,53
Aumento rispetto alla media casi con stratigrafia 2 [%]	15,06	20,53	8,02

Tabella. 43 Medie delle temperature operative di un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 e 2

Dall'analisi dei risultati ottenuti nelle condizioni climatiche di Grosseto (Fig. 122), è emerso che la stratigrafia 1 risulta più performante della stratigrafia 2. A parità di stratigrafia e di tipo di pietra di riempimento l'aumento dello spessore del gabbione e della porosità consentono di raggiungere temperature operative medie più elevate in quanto riducono la trasmittanza termica delle pareti verticali esterne.

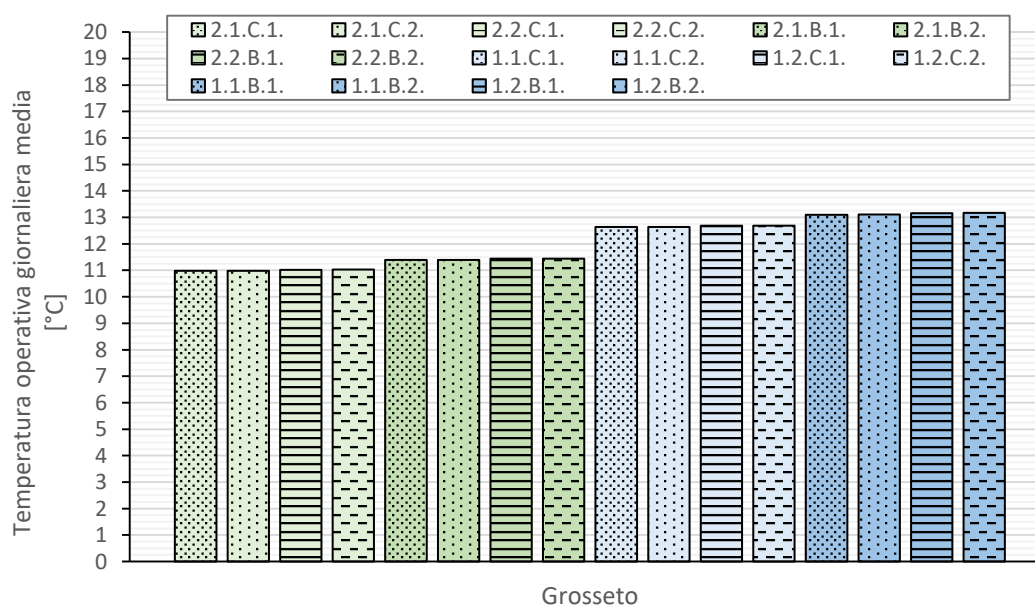


Fig. 122 Temperature operative medie in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per il contesto di Grosseto

Gli stessi risultati sono emersi per le condizioni climatiche di Bologna e di Catania anche se le temperature operative medie raggiunte risultano rispettivamente più basse e più alte rispetto a quelle ottenute nel contesto di Grosseto (Fig. 123, Fig. 124).

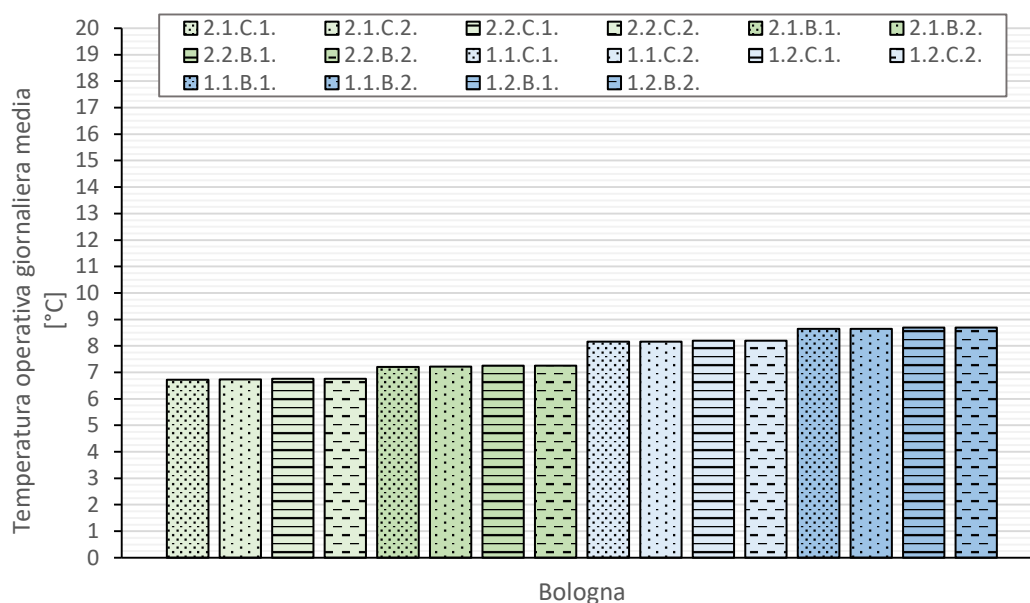


Fig. 123 Temperature operative medie in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per il contesto di Bologna

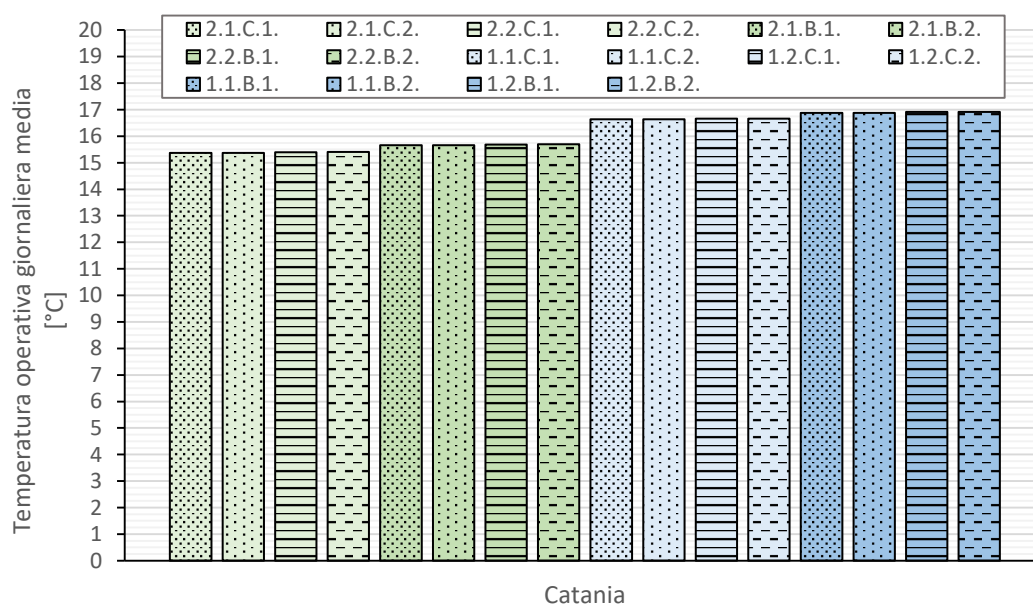


Fig. 124 Temperature operative medie in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per il contesto di Catania

Dalle simulazioni dinamiche condotte ad impianti spenti per analizzare la prestazione termica in un tipico giorno estivo (31 Luglio), invece, è emerso che per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 l'impiego del calcare come riempimento dei gabbioni risulta più vantaggioso rispetto a quello del basalto in tutti i contesti climatici di studio (Tabella. 44, Fig. 125). Le temperature operative giornaliere medie, infatti, risultano più contenute grazie alla minore assorbanza del calcare. Nel contesto di Grosseto i casi con riempimento in calcare consentono in media una diminuzione della temperatura di circa il 2,2% rispetto a quelli con riempimento in basalto. Nelle condizioni climatiche di Bologna e Catania, invece, la diminuzione è pari rispettivamente a 2,5% e 1,8% (Tabella. 45).

Temperatura operativa media in un tipico giorno estivo (31 Luglio) [°C]			
Stratigrafia 1	Grosseto	Bologna	Catania
1.1.B.1.	29,071	29,411	29,636
1.1.B.2.	29,073	29,413	29,638
1.2.B.1.	29,146	29,452	29,701
1.2.B.2.	29,144	29,452	29,699
1.1.C.1.	28,437	28,683	29,104
1.1.C.2.	28,439	28,684	29,105
1.2.C.1.	28,478	28,704	29,134
1.2.C.2.	28,479	28,705	29,134

Tabella. 44 Temperature operative medie in un tipico giorno estivo (31 Luglio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1

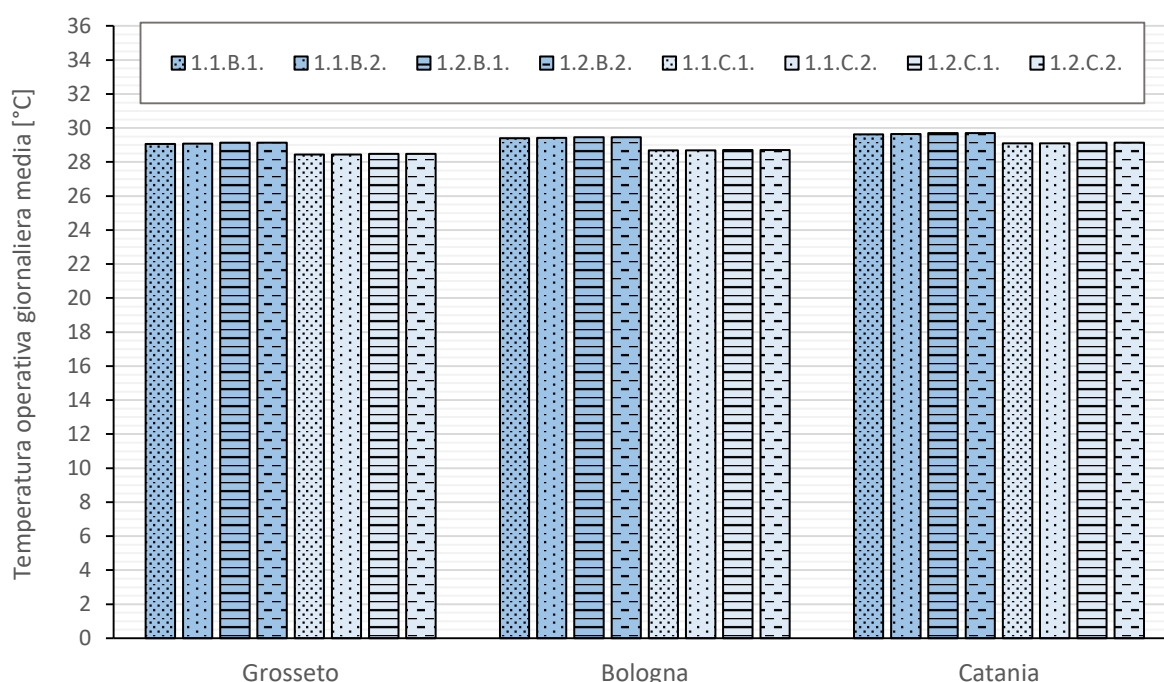


Fig. 125 Temperature operative medie in un tipico giorno estivo (31 Luglio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1

	Grosseto	Bologna	Catania
Temperatura operativa giornaliera media, media casi con riempimento in calcare [°C]	28,46	28,69	29,12
Temperatura operativa giornaliera media, media casi con riempimento in basalto [°C]	29,11	29,43	29,67
Diminuzione rispetto alla media casi con riempimento in basalto [%]	2,23	2,51	1,85

Tabella. 45 Medie delle temperature operative di un tipico giorno estivo (31 Luglio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 con riempimento in basalto e in calcare

Anche per la stratigrafia 2, i casi con riempimento in calcare consentono il raggiungimento di un miglior livello di comfort termico interno in tutti i contesti di studio (Tabella. 46, Fig. 126). Nel clima di Grosseto i casi con riempimento in calcare consentono in media una diminuzione della temperatura

di circa il 2,3% rispetto a quelli con riempimento in basalto. Nei contesti di Bologna e Catania, invece, la diminuzione è pari rispettivamente a 2,5% e 1,9% (Tabella. 47).

Temperatura operativa media in un tipico giorno estivo (31 Luglio) [°C]			
Stratigrafia 2	Grosseto	Bologna	Catania
2.1.B.1.	29,658	29,722	29,968
2.1.B.2.	29,649	29,720	29,963
2.2.B.1.	29,662	29,730	29,988
2.2.B.2.	29,652	29,728	29,982
2.1.C.1.	28,970	28,975	29,414
2.1.C.2.	28,965	28,974	29,412
2.2.C.1.	28,956	28,973	29,413
2.2.C.2.	28,952	28,973	29,411

Tabella. 46 Temperature operative medie in un tipico giorno estivo (31 Luglio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2

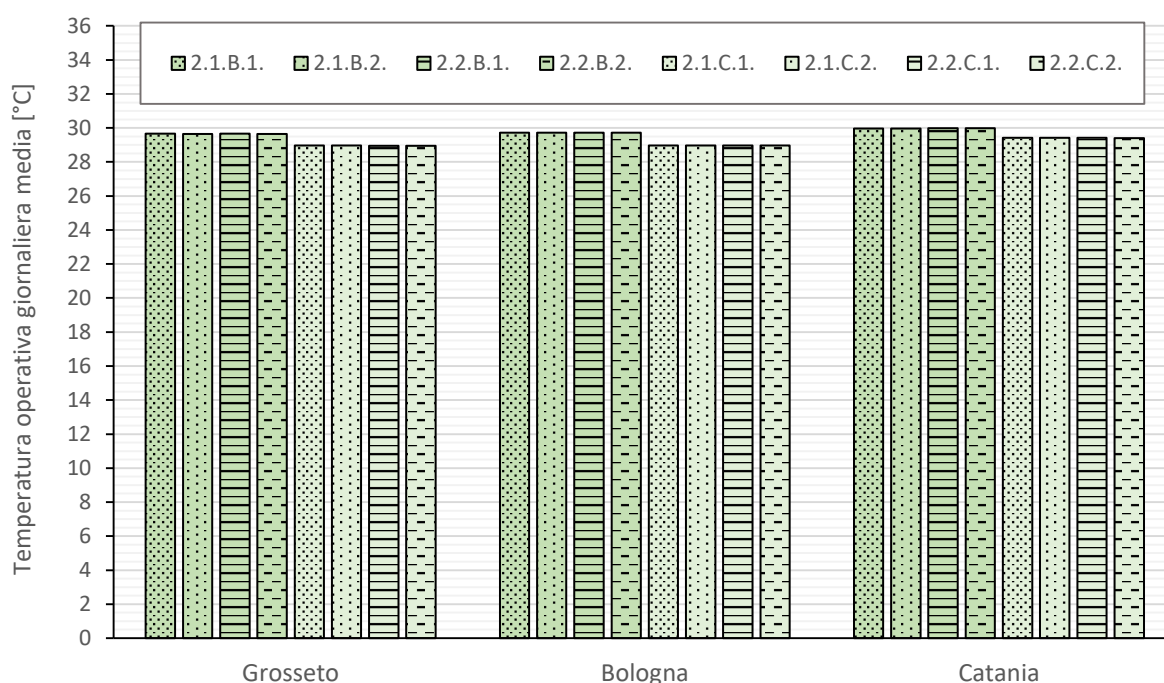


Fig. 126 Temperature operative medie in un tipico giorno estivo (31 Luglio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2

	Grosseto	Bologna	Catania
Temperatura operativa giornaliera media, media casi con riempimento in calcare [°C]	28,96	28,97	29,41
Temperatura operativa giornaliera media, media casi con riempimento in basalto [°C]	29,66	29,72	29,98
Diminuzione rispetto alla media casi con riempimento in basalto [%]	2,34	2,53	1,88

Tabella. 47 Medie delle temperature operative di un tipico giorno estivo (31 Luglio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 con riempimento in basalto e in calcare

Complessivamente, i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 rispetto a quelli caratterizzati dalla stratigrafia 2 consentono in media una diminuzione della temperatura operativa giornaliera media pari a circa l'1% per Catania e Bologna e l'1,8% per Grosseto (Tabella. 48). Il caso 1.1.C.1. presenta la prestazione termica migliore in tutti i contesti climatici analizzati mentre il caso 2.2.B.1. risulta sempre essere il più svantaggioso.

	Grosseto	Bologna	Catania
Temperatura operativa giornaliera media, media casi con stratigrafia 1 [°C]	28,78	29,06	29,39
Temperatura operativa giornaliera media, media casi con stratigrafia 2 [°C]	29,31	29,35	29,69
Diminuzione rispetto alla media casi con stratigrafia 2 [%]	1,79	0,98	1,01

Tabella. 48 Medie delle temperature operative di un tipico giorno estivo (31 Luglio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 e 2

Dall'analisi dei risultati ottenuti nelle condizioni climatiche di Grosseto, è emerso che a parità di tipo di pietra la stratigrafia 1 risulta più performante della stratigrafia 2 (Fig. 127). L'aumento dello spessore per tutti i casi con isolante esterno, però, risulta svantaggioso anche se le differenze tra le temperature operative medie registrate a parità di tipo di pietra e porosità, sono molto contenute variando tra 0,04 °C e 0,08 °C.

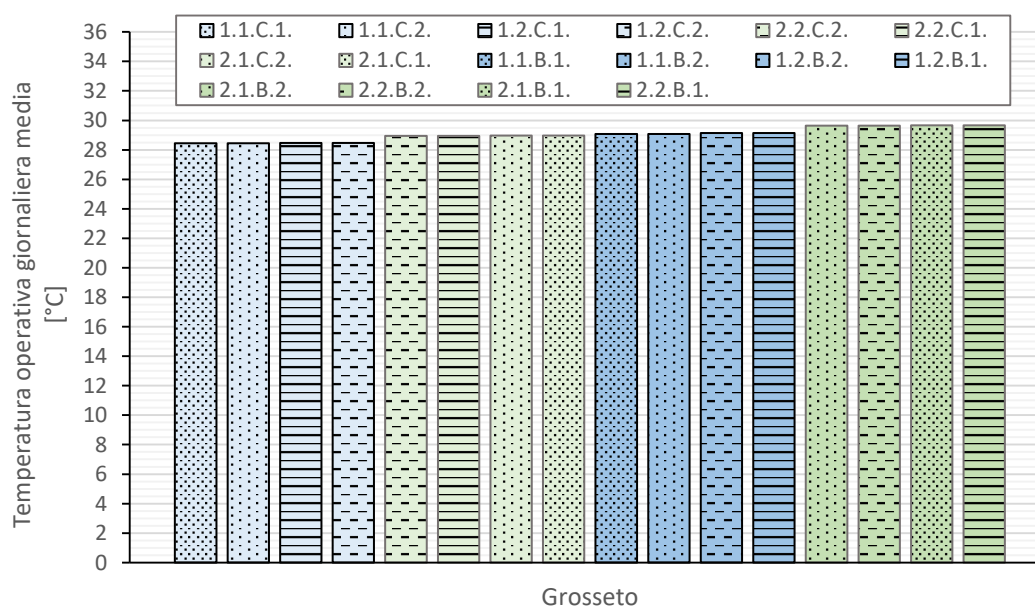


Fig. 127 Temperature operative medie in un tipico giorno estivo (31 Luglio) per il contesto di Grosseto

Anche nelle condizioni climatiche di Bologna, è emerso che a parità di tipo di pietra la stratigrafia 1 consente di raggiungere livelli di comfort termico migliori rispetto alla stratigrafia 2 (Fig. 128). L'aumento dello spessore per tutti i casi con isolante esterno risulta, inoltre, svantaggioso anche se le differenze tra le temperature operative medie registrate a parità di tipo di pietra e porosità, sono molto contenute variando tra 0,02 °C e 0,04 °C.

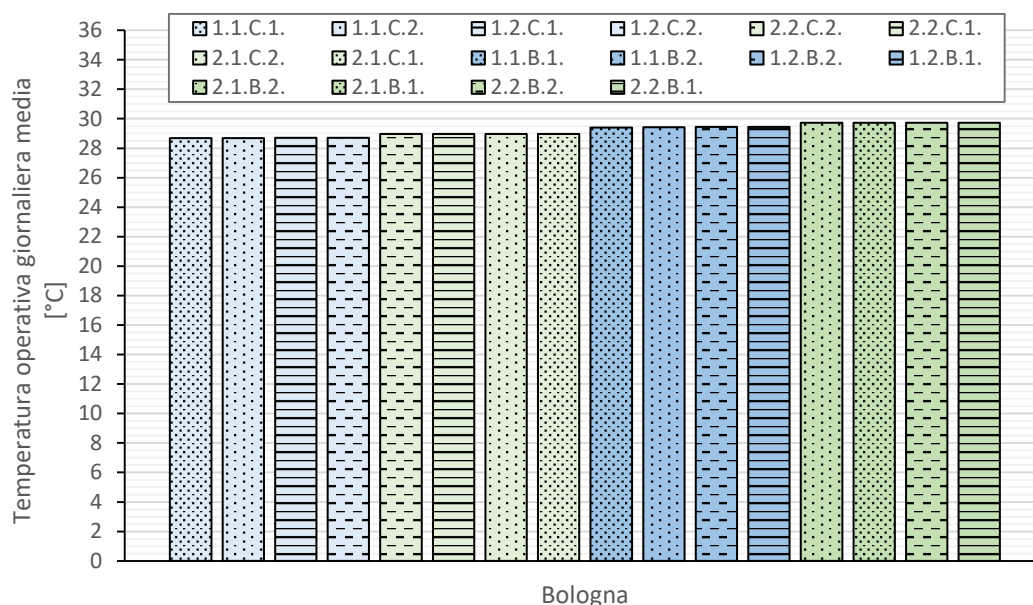


Fig. 128 Temperature operative medie in un tipico giorno estivo (31 Luglio) per il contesto di Bologna

Gli stessi risultati si rilevano per le condizioni climatiche di Catania (Fig. 129): l'aumento dello spessore per tutti i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 risulta, infatti, svantaggioso e le differenze tra le temperature operative medie registrate a parità di tipo di pietra e porosità, variano tra 0,03 °C e 0,06 °C.

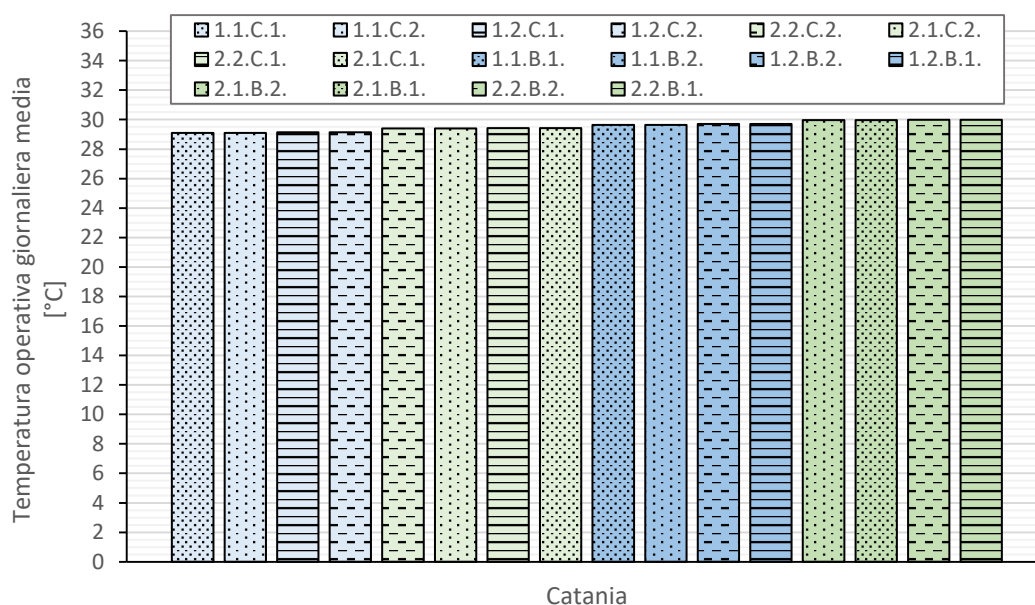


Fig. 129 Temperature operative medie in un tipico giorno estivo (31 Luglio) per il contesto di Catania

Nel medesimo giorno estivo scelto per lo studio delle temperature operative (31 Luglio), sono state valutate anche le temperature superficiali esterne ed interne raggiunte delle pareti sud dell'edificio in modo da caratterizzare l'inerzia termica degli involucri studiati.

Con riferimento alla stratigrafia 1, la prestazione migliore in termini di valori di attenuazione si registra per i casi con riempimento in basalto in tutti i contesti climatici (Tabella. 49, Fig. 130): questi

casi, infatti, consentono in media una diminuzione del valore di attenuazione sempre superiore al 20% rispetto a quelli con riempimento in calcare (Tabella. 50). L'aumento dello spessore del gabbione determina sempre un peggioramento del valore di attenuazione mentre il cambiamento di porosità dello stesso influisce poco a parità di spessore e tipo di pietra.

Il tempo di ritardo non risulta influenzato dai cambiamenti del materiale litico di riempimento, dello spessore del gabbione e della porosità dello stesso nelle condizioni climatiche di Grosseto e di Catania (Tabella. 49). Invece, dalle simulazioni condotte per Bologna è emerso che i casi con riempimento in calcare consentono di ritardare di 7 ore il verificarsi del picco di temperatura superficiale interna, con uno svantaggio di 1 ora rispetto ai casi 1.1.B.1., 1.1.B.2. e 1.2.B.2. con riempimento in basalto (Tabella. 49). In questo contesto i casi con riempimento in basalto consentono in media un aumento del tempo di ritardo pari al 10,7% rispetto ai casi con riempimento in calcare (Tabella. 50).

Valori di attenuazione e tempo di ritardo						
Stratigrafia 1	Grosseto		Bologna		Catania	
	$f[-]$	φ [h]	$f[-]$	φ [h]	$f[-]$	φ [h]
1.1.B.1.	0,0355	8	0,0333	8	0,0262	8
1.1.B.2.	0,0356	8	0,0334	8	0,0263	8
1.2.B.1.	0,0517	8	0,0477	7	0,0361	8
1.2.B.2.	0,0507	8	0,0468	8	0,0356	8
1.1.C.1.	0,0499	8	0,0503	7	0,0460	8
1.1.C.2.	0,0500	8	0,0504	7	0,0462	8
1.2.C.1.	0,0641	8	0,0624	7	0,0561	8
1.2.C.2.	0,0639	8	0,0622	7	0,0560	8

Tabella. 49 Valori di attenuazione e tempo di ritardo delle pareti sud dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1, calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio)

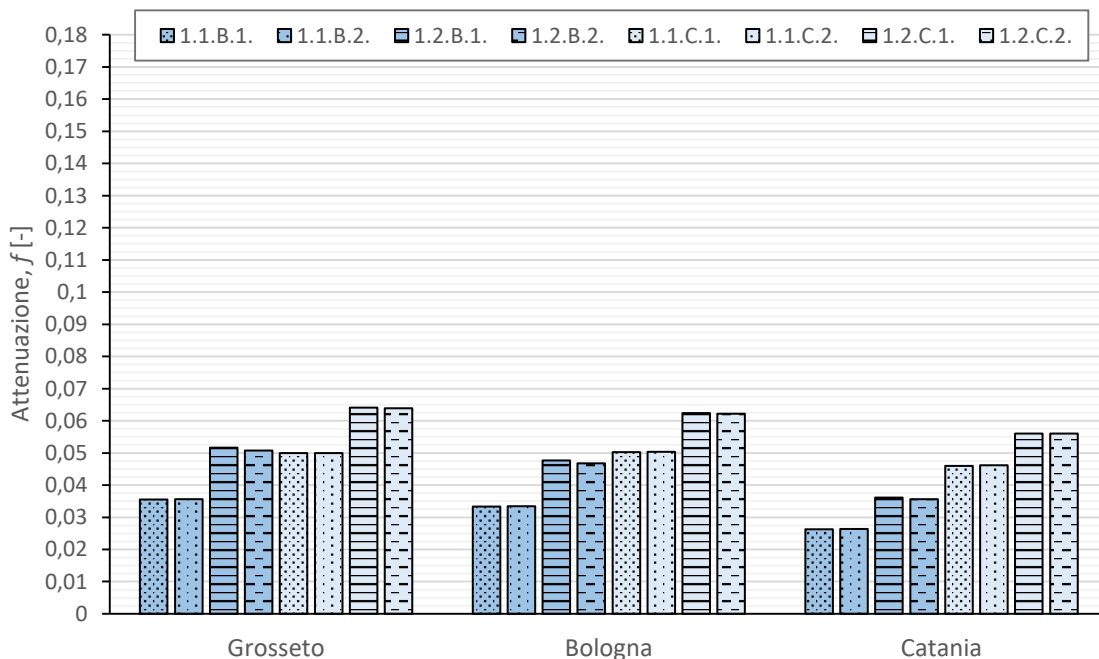


Fig. 130 Valori di attenuazione delle pareti sud dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1, calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio)

	Grosseto	Bologna	Catania
Valori di attenuazione, media casi con riempimento in basalto [-]	0,04	0,04	0,03
Valori di attenuazione, media casi con riempimento in calcare [-]	0,06	0,06	0,05
Diminuzione rispetto alla media casi con riempimento in calcare [%]	23,87	28,45	39,17
Tempo di ritardo, media casi con riempimento in basalto [h]	8,00	7,75	8,00
Tempo di ritardo, media casi con riempimento in calcare [h]	8,00	7,00	8,00
Aumento rispetto alla media casi con riempimento in calcare [%]	-	10,71	-

Tabella. 50 Medie dei valori di attenuazione e del tempo di ritardo delle pareti sud dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 con riempimento in basalto e in calcare, calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio)

Anche per la stratigrafia 2, la prestazione migliore in termini di valori di attenuazione si registra per i casi con riempimento in basalto in tutti i contesti climatici (Tabella. 51, Fig. 131): questi casi, infatti, consentono in media una diminuzione del valore di attenuazione sempre superiore al 20% rispetto a quelli con riempimento in calcare (Tabella. 52). Come per la stratigrafia 1, l'aumento dello spessore del gabbione è svantaggioso a parità di porosità e tipo di pietra. L'aumento della porosità, invece, determina sempre un miglioramento dei valori di attenuazione.

Il tempo di ritardo è più elevato per i casi 2.1.B.1. e 2.1.B.2. nel contesto di Grosseto (Tabella. 51). Nelle condizioni climatiche di Bologna è stato calcolato per tutti i casi un ritardo di 8 ore ad eccezione del caso 2.2.C.1. che risulta il più svantaggioso (Tabella. 51). Per questi due contesti i casi con riempimento in basalto consentono in media un aumento del tempo di ritardo pari 6,2% e 3,2% rispetto a casi con riempimento in calcare (Tabella. 52). Nel contesto di Catania, invece, è stato calcolato per tutti i casi un ritardo di 9 ore ad eccezione dei casi 2.2.B.1. e 2.2.B.2. per i quali il verificarsi del picco di temperatura superficiale interna è ritardato di 8 ore (Tabella. 51). Inoltre, i casi con riempimento in basalto in media hanno un tempo di ritardo inferiore a quelli con riempimento in calcare (Tabella. 52).

Valori di attenuazione e tempo di ritardo						
Stratigrafia 2	Grosseto		Bologna		Catania	
	f [-]	φ [h]	f [-]	φ [h]	f [-]	φ [h]
2.1.B.1.	0,1209	9	0,1153	8	0,0940	9
2.1.B.2.	0,1148	9	0,1110	8	0,0898	9
2.2.B.1.	0,1348	8	0,1272	8	0,1031	8
2.2.B.2.	0,1289	8	0,1218	8	0,0989	8
2.1.C.1.	0,1635	8	0,1677	8	0,1582	9
2.1.C.2.	0,1597	8	0,1637	8	0,1546	9
2.2.C.1.	0,1652	8	0,1692	7	0,1601	9
2.2.C.2.	0,1629	8	0,1671	8	0,1580	9

Tabella. 51 Valori di attenuazione e tempo di ritardo delle pareti sud dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 2, calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio)

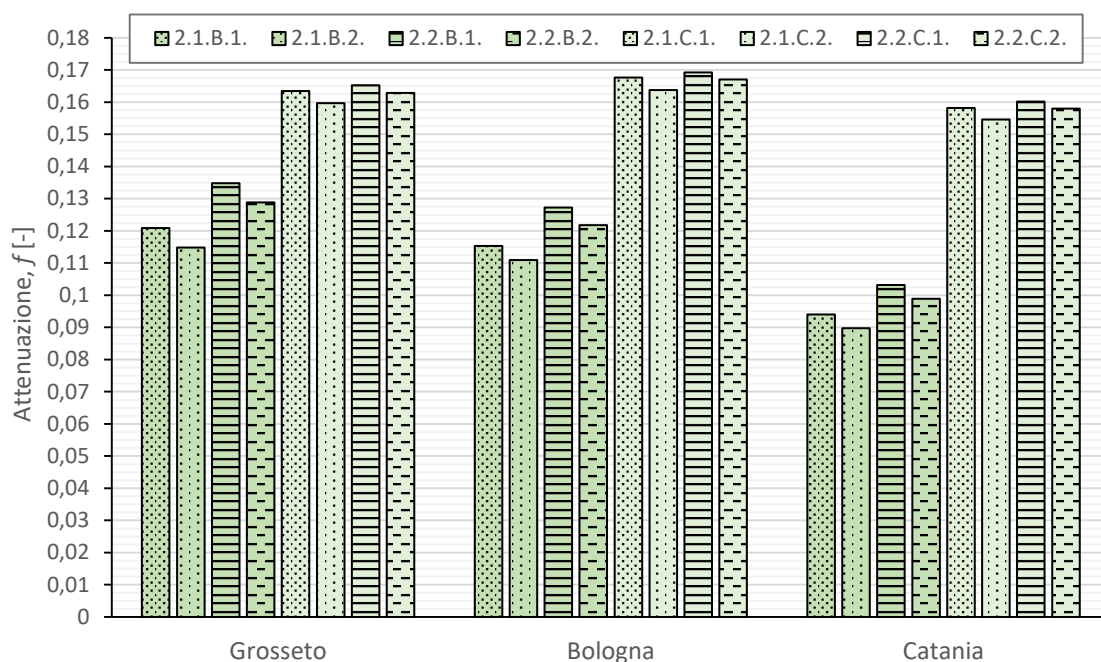


Fig. 131 Valori di attenuazione delle pareti sud dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 2, calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio)

	Grosseto	Bologna	Catania
Valori di attenuazione, media casi con riempimento in basalto [-]	0,12	0,12	0,10
Valori di attenuazione, media casi con riempimento in calcare [-]	0,16	0,17	0,16
Diminuzione rispetto alla media casi con riempimento in calcare [%]	23,32	28,81	38,85
Tempo di ritardo, media casi con riempimento in basalto [h]	8,50	8,00	8,50
Tempo di ritardo, media casi con riempimento in calcare [h]	8,00	7,75	9,00
Aumento rispetto alla media casi con riempimento in calcare [%]	6,25	3,23	-5,56

Tabella. 52 Medie dei valori di attenuazione e del tempo di ritardo delle pareti sud dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 con riempimento in basalto e in calcare, calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio)

Complessivamente, i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 rispetto a quelli caratterizzati dalla stratigrafia 2 consentono in media una diminuzione del valore di attenuazione sempre superiore al 65% nelle condizioni climatiche di Grosseto, Bologna e Catania (Tabella. 53). Tuttavia, i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 sono più vantaggiosi in termini di tempo di ritardo con un aumento sempre superiore al 6% rispetto ai casi con isolante più esterno (Tabella. 53). Il caso 1.1.B.1. presenta

i benefici maggiori in termini di valore di attenuazione per tutti i contesti analizzati mentre il caso 2.2.C.1. risulta sempre essere il più svantaggioso (Fig. 132, Fig. 133, Fig. 134). Nel contesto di Bologna, il caso 1.1.B.1. è il più vantaggioso considerando anche i valori del tempo di ritardo (Tabella. 49). Invece, nei contesti di Grosseto e di Catania questo caso non presenta il valore massimo del tempo di ritardo che si registra per i casi 2.1.B.1 e 2.1.B.2. (Tabella. 51).

	Grosseto	Bologna	Catania
Valori di attenuazione, media casi con stratigrafia 1 [-]	0,05	0,05	0,04
Valori di attenuazione, media casi con stratigrafia 2 [-]	0,14	0,14	0,13
Diminuzione rispetto alla media casi con stratigrafia 2 [%]	65,11	66,19	67,69
Tempo di ritardo, media casi con stratigrafia 2 [h]	8,25	7,88	8,75
Tempo di ritardo, media casi con stratigrafia 1 [h]	8,00	7,38	8,00
Aumento rispetto alla media dei casi con stratigrafia 1 [%]	6,13	6,78	9,38

Tabella. 53 Medie dei valori di attenuazione e del tempo di ritardo delle pareti sud dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 e 2, calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio)

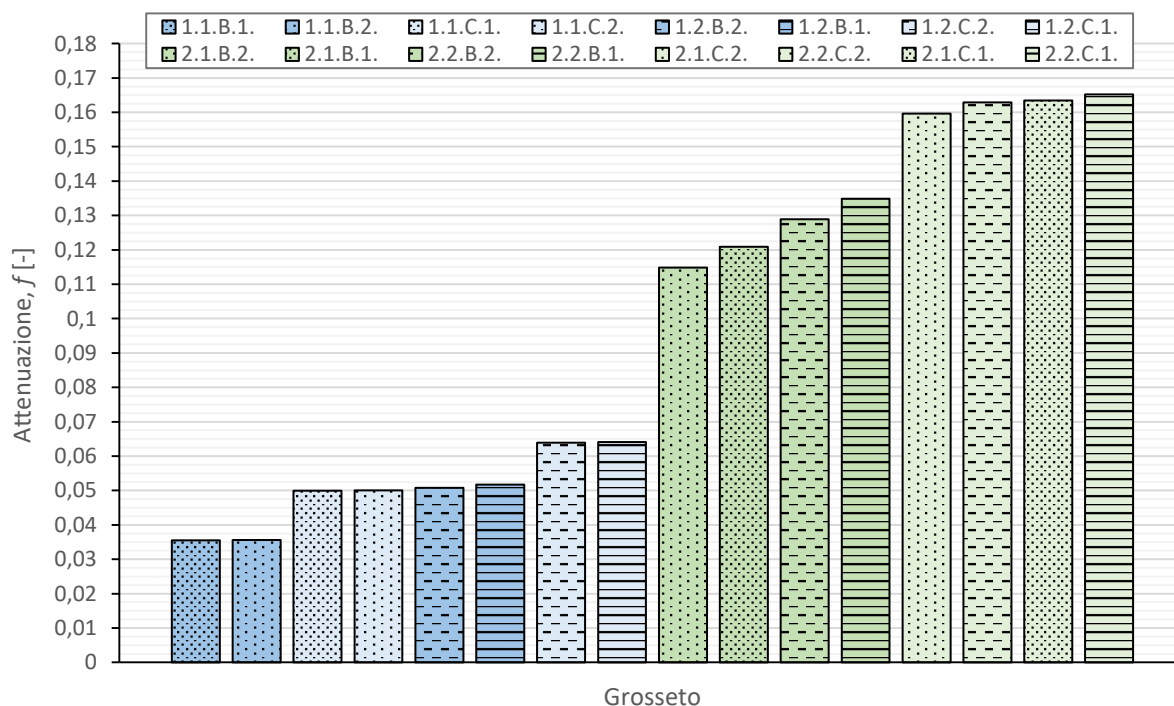


Fig. 132 Valori di attenuazione delle pareti sud calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio) nel contesto di Grosseto

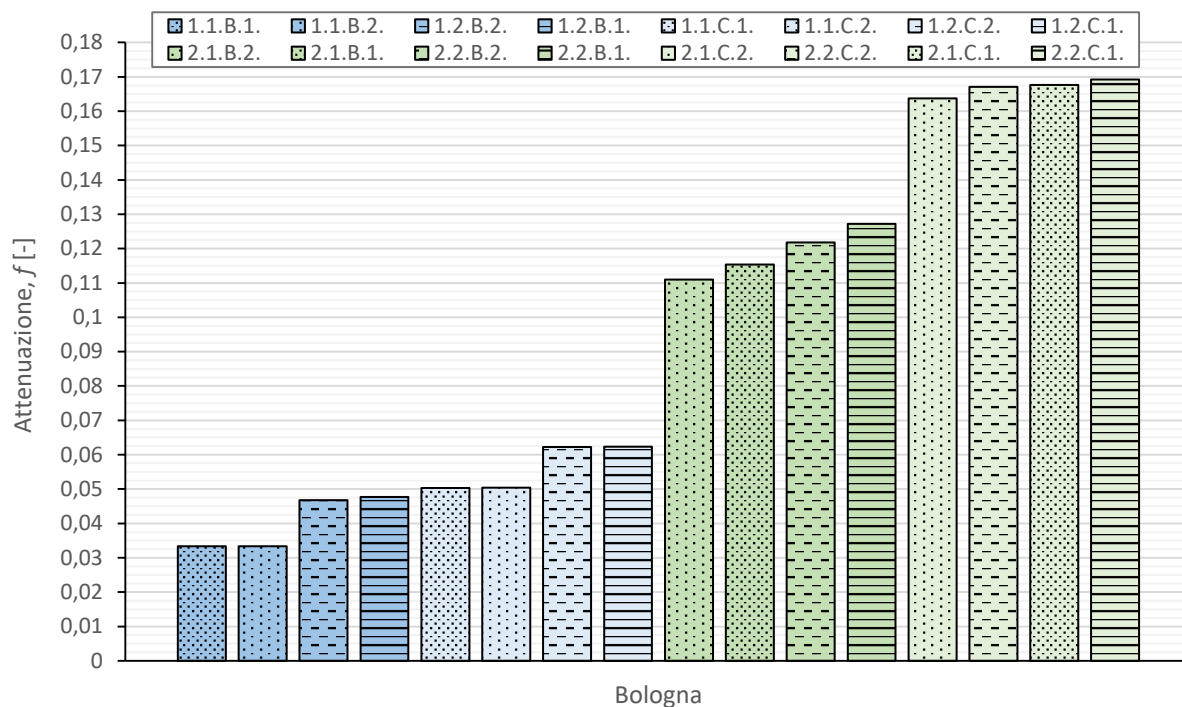


Fig. 133 Valori di attenuazione delle pareti sud calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio) nel contesto di Bologna

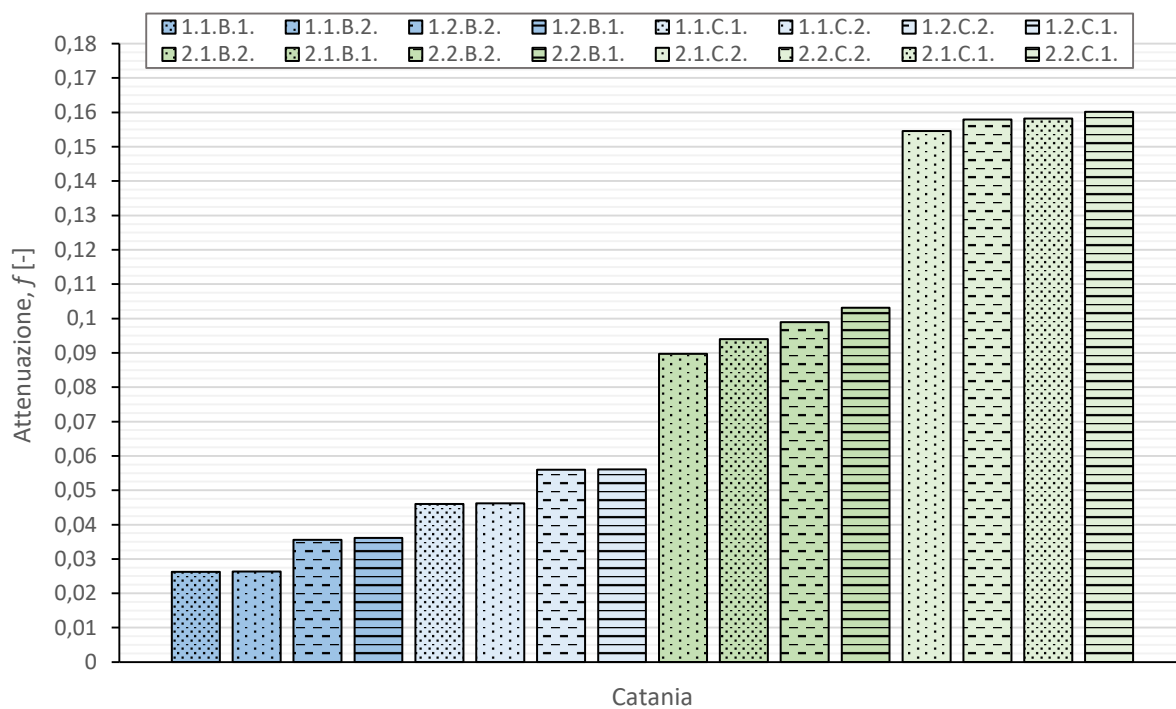


Fig. 134 Valori di attenuazione delle pareti sud calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio) nel contesto di Catania

6.1.2.4. Conclusioni e indicazioni progettuali

Il confronto tra i risultati delle simulazioni dinamiche condotte per i diversi casi di studio ha permesso di valutare l'influenza di quattro variabili progettuali sulla prestazione termico-energetica di involucri multistrato a gabbioni nel clima mediterraneo: le variabili analizzate sono la stratigrafia di parete in termini di posizione esterna o interna dello strato isolante, il tipo di pietra di riempimento dei gabbioni, il loro spessore e la loro porosità. Lo studio è stato condotto nei contesti di Grosseto, Bologna e Catania appartenenti a tre zone climatiche italiane diverse e rappresentative di condizioni climatiche tipiche del territorio nazionale e in generale dell'area dell'Europa meridionale e dell'area mediterranea. Sono emerse tendenze comuni ai tre contesti climatici per le diverse variabili sia in relazione alla prestazione energetica che alla prestazione termica. Inoltre, sono state individuate le variabili che influiscono maggiormente sulla prestazione dell'involucro.

Relativamente ai consumi energetici per il riscaldamento, è emerso che a parità di stratigrafia l'impiego del calcare come pietra di riempimento dei gabbioni risulta più vantaggioso rispetto a quello del basalto in tutti i contesti di studio. La stratigrafia con isolante più esterno risulta essere la più performante: complessivamente, infatti, i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 consentono in media un risparmio energetico significativo rispetto a quelli caratterizzati dalla stratigrafia con isolante interno. L'aumento dello spessore del gabbione da 0,1 m a 0,15 m permette a parità di stratigrafia, tipo di pietra e porosità, una riduzione del consumo energetico per il riscaldamento. La porosità è il fattore che incide meno sulla prestazione invernale dell'involucro.

I risultati relativi alla prestazione energetica nella stagione fredda sono stati confermati da quelli relativi alla prestazione termica ottenuti dalle simulazioni ad impianti spenti per un tipico giorno invernale (12 Gennaio). I casi con riempimento in basalto consentono, infatti, il raggiungimento di un miglior livello di comfort termico interno in tutti i contesti climatici di studio. Inoltre, complessivamente, i casi caratterizzati dalla stratigrafia con isolante esterno consentono in media un aumento della temperatura operativa giornaliera media rispetto a quelli caratterizzati dalla stratigrafia con isolante interno. Infine, a parità di stratigrafia e di tipo di pietra di riempimento, l'aumento dello spessore del gabbione e della porosità incidono positivamente sulla prestazione termica dell'involucro.

Relativamente ai consumi energetici per il raffrescamento, invece, è emerso che a parità di stratigrafia l'impiego del calcare come pietra di riempimento dei gabbioni risulta più vantaggioso rispetto a quello del basalto in tutti i contesti di analisi. Tuttavia, analogamente a quanto emerso in relazione ai consumi per il riscaldamento, la stratigrafia con isolante più esterno risulta complessivamente più performante di quella con isolante più interno.

I risultati relativi alla prestazione energetica nella stagione calda sono stati confermati da quelli relativi alla prestazione termica ottenuti dalle simulazioni ad impianti spenti per un tipico giorno estivo (31 Luglio). A parità di stratigrafia i casi con riempimento in calcare consentono di raggiungere temperature operative giornaliere medie più contenute in tutti i contesti climatici di studio. Tuttavia, la prestazione migliore in termini di valori di attenuazione si registra per i casi con riempimento in basalto. Complessivamente, i casi caratterizzati dalla stratigrafia con isolante esterno consentono in media una diminuzione della temperatura operativa giornaliera media e del valore di attenuazione rispetto a quelli caratterizzati dalla stratigrafia con isolante interno che, però, è più performante in termini di tempo di ritardo. L'aumento dello spessore del gabbione determina sempre un peggioramento del valore di attenuazione.

Relativamente al consumo energetico totale per il riscaldamento e il raffrescamento, infine, è emerso che nei tre contesti di studio l'impiego del basalto per il riempimento dei gabbioni risulta globalmente più vantaggioso rispetto a quello del calcare per entrambe le stratigrafie analizzate. La stratigrafia con isolante più esterno, inoltre, risulta complessivamente più performante di quella con isolante più interno.

Vista la maggiore incidenza dei consumi per il riscaldamento rispetto a quelli per il raffrescamento sul consumo energetico annuale per la climatizzazione nei contesti caratterizzati dal clima mediterraneo, quindi, dovrebbero essere privilegiate, in fase di progettazione di involucri multistrato a gabbioni, soluzioni costruttive con isolante posto all'esterno e riempimento in materiali lapidei di colore scuro e ad alta densità.

Le indicazioni progettuali derivate dallo studio condotto, per tutte le variabili analizzate, sono sintetizzate in tabelle relative ai contesti climatici di Grosseto (Tabella. 54, Tabella. 55), Bologna (Tabella. 56, Tabella. 57) e Catania (Tabella. 58, Tabella. 59): sono stati contrassegnati con un segno “+” i valori delle variabili che mediamente influiscono positivamente sulla prestazione energetica o termica in esame e con un segno “-” quelli che in media risultano svantaggiosi. Le indicazioni comuni a tutti i contesti sono evidenziate dallo sfondo colorato delle celle delle tabelle.

Indicazioni progettuali per il clima di Grosseto – prestazione energetica				
		Riscaldamento	Raffrescamento	Riscaldamento e raffrescamento
Stratigrafia	Isolante esterno	+	+	+
	Isolante interno	-	-	-
Pietra di riempimento	Colore scuro	+	-	+
	Colore chiaro	-	+	-
Spessore del gabbione	0,15 m	+	+	+
	0,1 m	-	-	-
Porosità del gabbione	40%	+	+	+
	25%	-	-	-

Tabella. 54 Indicazioni progettuali per il clima di Grosseto basate sulla correlazione tra valori delle variabili analizzate e prestazione energetica

Indicazioni progettuali per il clima di Grosseto – prestazione termica					
		$T_{op, invernale}$	$T_{op, estiva}$	f_{estiva}	φ_{estivo}
Stratigrafia	Isolante esterno	+	+	+	-
	Isolante interno	-	-	-	+
Pietra di riempimento	Colore scuro	+	-	+	+
	Colore chiaro	-	+	-	-
Spessore del gabbione	0,15 m	+	-	-	-
	0,1 m	-	+	+	+
Porosità del gabbione	40%	+	+	+	
	25%	-	-	-	

Tabella. 55 Indicazioni progettuali per il clima di Grosseto basate sulla correlazione tra valori delle variabili analizzate e prestazione termica

Indicazioni progettuali per il clima di Bologna – prestazione energetica

		Riscaldamento	Raffrescamento	Riscaldamento e raffrescamento
Stratigrafia	Isolante esterno	+	+	+
	Isolante interno	-	-	-
Pietra di riempimento	Colore scuro	+	-	+
	Colore chiaro	-	+	-
Spessore del gabbione	0,15 m	+	+	+
	0,1 m	-	-	-
Porosità del gabbione	40%	+	-	+
	25%	-	+	-

Tabella. 56 Indicazioni progettuali per il clima di Bologna basate sulla correlazione tra valori delle variabili analizzate e prestazione energetica

Indicazioni progettuali per il clima di Bologna – prestazione termica

		$T_{op, \text{ invernale}}$	$T_{op, \text{ estiva}}$	$f_{\text{ estiva}}$	$\varphi_{\text{ estivo}}$
Stratigrafia	Isolante esterno	+	+	+	-
	Isolante interno	-	-	-	+
Pietra di riempimento	Colore scuro	+	-	+	+
	Colore chiaro	-	+	-	-
Spessore del gabbione	0,15 m	+	-	-	-
	0,1 m	-	+	+	+
Porosità del gabbione	40%	+	+	+	+
	25%	-	-	-	-

Tabella. 57 Indicazioni progettuali per il clima di Bologna basate sulla correlazione tra valori delle variabili analizzate e prestazione termica

Indicazioni progettuali per il clima di Catania – prestazione energetica

		Riscaldamento	Raffrescamento	Riscaldamento e raffrescamento
Stratigrafia	Isolante esterno	+	+	+
	Isolante interno	-	-	-
Pietra di riempimento	Colore scuro	+	-	+
	Colore chiaro	-	+	-
Spessore del gabbione	0,15 m	+	+	+
	0,1 m	-	-	-
Porosità del gabbione	40%	-	+	-
	25%	+	-	+

Tabella. 58 Indicazioni progettuali per il clima di Catania basate sulla correlazione tra valori delle variabili analizzate e prestazione energetica

Indicazioni progettuali per il clima di Catania – prestazione termica					
		$T_{op, invernale}$	$T_{op, estiva}$	f_{estiva}	φ_{estivo}
Stratigrafia	Isolante esterno	+	+	+	-
	Isolante interno	-	-	-	+
Pietra di riempimento	Colore scuro	+	-	+	+
	Colore chiaro	-	+	-	-
Spessore del gabbione	0,15 m	+	-	-	-
	0,1 m	-	+	+	+
Porosità del gabbione	40%	+	+	+	
	25%	-	-	-	

Tabella. 59 Indicazioni progettuali per il clima di Catania basate sulla correlazione tra valori delle variabili analizzate e prestazione termica

6.2. CARATTERI ARCHITETTONICI DI INVOLUCRI EDILIZI A GABBIONI

6.2.1. Texture del riempimento litico

Il carattere architettonico di un involucro edilizio a gabbioni è strettamente legato alla *texture* del riempimento litico dei moduli costruttivi percepibile attraverso la rete metallica. Si possono, infatti, ottenere esiti estetici differenti al variare della forma, della dimensione e della disposizione degli elementi lapidei utilizzati, come mostrato anche dai campionari di aziende specializzate nella produzione di gabbioni (Enviromesh, 2017; <https://www.hy-tengabions.com>). Le diverse *texture* del riempimento litico dei moduli costruttivi sembrano conferire a questa tecnica costruttiva contemporanea una dignità intrinseca quasi inconsapevole poiché richiamano l'aspetto di diverse tipologie di muratura lapidea irregolare tradizionale e ne reinterpretano le valenze espressive³⁰.

Una delle possibili strategie progettuali si basa sull'impiego di scampoli lapidei irregolari ovvero di elementi che non hanno una dimensione prevalente rispetto alle altre due e che sono caratterizzati da superfici grezze (Fig. 135). Questi elementi vengono disposti a creare un disegno tessiturale in cui non si riconoscono ricorsi orizzontali continui né allineamenti verticali o obliqui. L'assortimento dimensionale consente di ottenere *texture* più o meno chiuse con conseguenti effetti chiaroscurali più o meno accentuati.

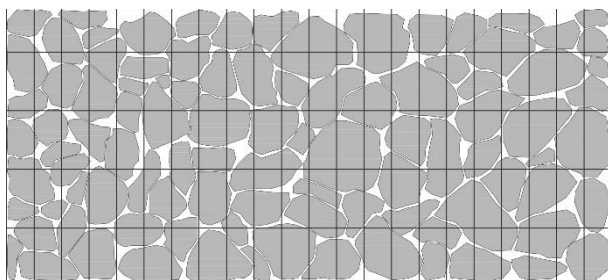


Fig. 135 *Texture* ad elementi lapidei irregolari

Il riferimento figurativo per i gabbioni con riempimento in scampoli lapidei irregolari può essere individuato nell'*opus incertum*, il più antico tipo di paramento romano per muri con nucleo in *opus caementicium*. Gli elementi lapidei che erano impiegati per questa tipologia di paramento, infatti, erano di forma irregolare e di dimensioni differenti ed erano disposti senza definire una “trama geometrica”, senza “una continuità di allineamento (..) orizzontale, (..) verticale, (..) obliqua” (Acocella, 2006b). La forma degli scampoli dipendeva dalla frantumazione naturale della roccia o dalla conformazione del banco di estrazione.

³⁰ L'importanza della tradizionale tecnica costruttiva della muratura a secco è stata recentemente riconosciuta anche dall'UNESCO: “L'Arte dei muretti a secco”, infatti, è stata iscritta dall'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Educazione, la Scienza e la Cultura, “nella lista degli elementi immateriali dichiarati Patrimonio dell'umanità” (Nadotti, 2018). La candidatura è stata presentata, oltre che dalla Croazia, da Cipro, dalla Francia, dalla Grecia, dalla Slovenia, dalla Spagna e dalla Svizzera, anche dall'Italia, dove i muri a secco sono molto diffusi “sia per fini abitativi che per scopi collegati all'agricoltura”, soprattutto in Costiera amalfitana, a Pantelleria, alle Cinque Terre, nel Salento e nella Valle d'Itria (Nadotti, 2018). Nella motivazione dell'UNESCO viene sottolineato come i muri a secco siano sempre realizzati “in perfetta armonia con l'ambiente” e come la tecnica costruttiva esemplifichi “una relazione armoniosa fra l'uomo e la natura” (Nadotti, 2018). Viene evidenziato, inoltre, il ruolo essenziale di queste strutture “nella prevenzione delle slavine, delle alluvioni, delle valanghe, nel combattere l'erosione e la desertificazione delle terre”, nel miglioramento della biodiversità e nella creazione delle “migliori condizioni microclimatiche per l'agricoltura” (Nadotti, 2018).

L'*opus incertum* fu introdotto a Roma nel II secolo a.C. e rimase in uso fino al II secolo d.C. anche se il periodo di maggior impiego è individuabile nell'età di Silla (I secolo a.C.) (Marta, 1990, p. 30). Tra gli esempi architettonici caratterizzati da questo tipo di paramento vi sono il Foro di Alba Fucens (Massa d'Albe, AQ), il Santuario della Fortuna Primigenia a Palestrina (II secolo a.C.) e le sostruzioni del Tempio di Giove Anxur a Terracina (I secolo a.C.) (Fig. 136, Fig. 137.)

I gabbioni con riempimento in scampoli lapidei irregolari richiamano anche i muri in pietre grezze (Fig. 138), un tipo di apparecchiatura muraria irregolare tipico della cultura costruttiva tradizionale realizzato con pietrame informe e dimensionalmente eterogeneo (Acocella 2004, 2012).



Fig. 136 Murature del Foro di Alba Fucens e del Santuario della Fortuna Primigenia di Palestrina [http://www.flickr.com, foto Roger Ulrich; https://it.wikipedia.org, foto Zanner]



Fig. 137 Viste delle murature delle sostruzioni del Tempio di Giove Anxur [foto Silvia Mariani]



Fig. 138 Apparecchiatura muraria irregolare in pietre grezze [Acocella, 2012, su http://www.architetturadi pietra.it]

Nella cultura architettonica contemporanea gabbioni con riempimento a scampoli lapidei irregolari sono stati impiegati sia in tipologie residenziali che in edifici per servizi. Titus Bernhard e lo Studio

Kropka sono tra i progettisti che hanno impiegato questa strategia progettuale in edifici residenziali. Il primo ha utilizzato nella Haus 9x9 (Augsburg, Germania, 2002-2003) gabbioni riempiti in elementi irregolari di pietra dolomite di dimensioni abbastanza omogenee (Fig. 139). Lo studio polacco, invece, ha impiegato frammenti di calcare locale per definire il rivestimento delle pareti dell'House in the Landscape (Zawiercie, Polonia, 2013) (Fig. 140). Tra gli esempi di edifici per servizi in cui sono stati impiegati gabbioni dalla *texture* irregolare vi è il London Regatta Centre (Londra, UK, 1999) progettato dallo studio Ian Ritchie Architects (Fig. 141).



Fig. 139 Dettaglio del prospetto della Haus 9x9
[Redazionale, 2003b, p. 1277]



Fig. 140 Dettaglio del prospetto della House in the Landscape
[Kropka Studio, 2014, su <https://www.archdaily.com>, foto Maciej Lulko]



Fig. 141 Il muro a gabbioni della sede del circolo del London Regatta Centre
[Dernie, 2003, p. 76]

Una seconda strategia progettuale per la realizzazione del riempimento di moduli a gabbioni consiste nell'impiegare ciottoli ovvero elementi caratterizzati da una forma arrotondata e da superfici lisce e levigate (Fig. 142). I ciottoli vengono disposti a creare un disegno tessiturale in cui non si riconoscono ricorsi orizzontali continui né allineamenti verticali o obliqui. Questi elementi derivando da frammenti irregolari di rocce diverse, arrotondati e levigati per l'azione erosiva meccanica conseguente a processi di trascinamento da parte di una corrente d'acqua, si prestano alla definizione di *texture* policrome.

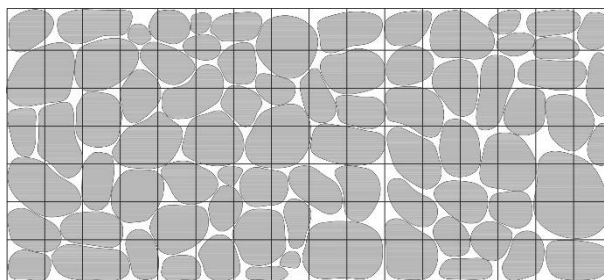


Fig. 142 *Texture* ad elementi lapidei arrotondati

Il riferimento figurativo per i gabbioni con questo tipo di riempimento può essere individuato nei muri di ciottoli, molto diffusi in Italia nell'epoca premoderna, in particolare nelle città padane e nei territori pedemontani (Acocella 2004, 2012). Benché la forma arrotondata e le superfici lisce dei ciottoli rendessero difficile il loro efficace impiego nelle murature, infatti, sono state sviluppate diverse modalità esecutive al fine di rendere questi elementi “adatti alla logica della costruzione muraria” (Acocella 2004, 2012). Una delle modalità esecutive prevede l'impiego di grossi ciottoli che devono essere preventivamente suddivisi in modo da definire almeno una faccia scabra e migliorare l'aderenza alla malta. Un'altra modalità esecutiva applicabile per la realizzazione di una muratura con ciottoli di piccole dimensioni e dalla forma ovoidale schiacciata, invece, prevede la posa a filari in *opus spicatum*, ovvero a filari che risultano reciprocamente ruotati di 90° (Acocella 2004, 2012): in questo caso i filari sono costituiti da ciottoli disposti in modo tale che gli assi longitudinali dei ciottoli risultino paralleli e orientati a 45° (Fig. 143).



Fig. 143 Muro di ciottoli

[Acocella, 2012, su <http://www.architetturadipietra.it>]

Nella cultura architettonica contemporanea gabbioni con riempimento di ciottoli sono stati impiegati dallo studio ABIR Architects per rivestire le pareti del piano inferiore della Shoreham Beach House (Shoreham-by-Sea, UK, 2014-2015) (Fig. 144). I ciottoli impiegati sono di colori diversi poiché sono stati dragati da un canale locale. La scelta della tecnica costruttiva e del materiale ha consentito ai progettisti di integrare l'opera nel contesto di progetto: il riempimento litico dei gabbioni, infatti, richiama i ciottoli della spiaggia su cui si affaccia l'edificio.

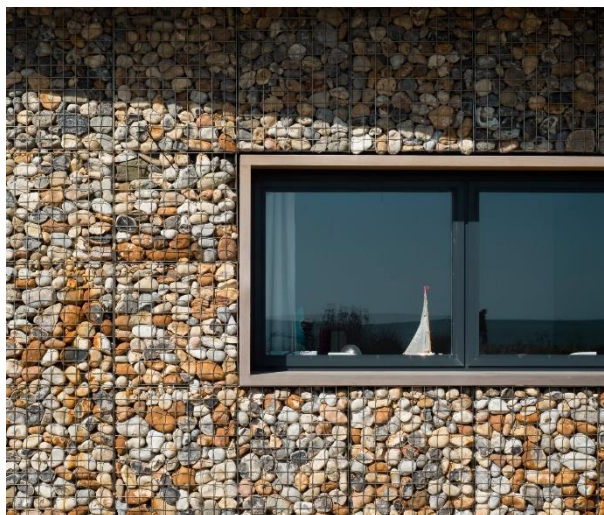


Fig. 144 Dettaglio del prospetto della Shoreham Beach House
[Griffiths, 2016, su <https://www.dezeen.com>, foto Jim Stephenson]

Una terza strategia progettuale consiste nell'impiego di elementi lastriformi o sbozzati ovvero con una dimensione prevalente rispetto alle altre due o una forma vagamente parallelepipedica (Fig. 145). Questi elementi vengono disposti a creare un disegno tessiturale stratigrafico in cui si riconoscono allineamenti orizzontali continui anche se i filari risultano di altezza variabile.

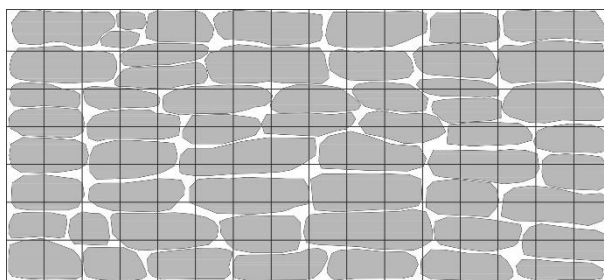


Fig. 145 *Texture* ad elementi lapidei sbozzati

Il riferimento figurativo per i gabbioni con questo tipo di riempimento può essere individuato nei muri in pietre “sbozzate” o “stratificate” (Acocella 2004, 2012), che rappresentano una tipologia molto diffusa di muri irregolari tradizionali (Fig. 146, Fig. 147). Queste apparecchiature murarie sono realizzate impiegando pietre regolarizzate ovvero caratterizzate da almeno due facce sostanzialmente piane. La configurazione regolare degli elementi litici deriva da “condizioni naturali di sedimentazione geologica” (Acocella 2004, 2012) o viene ottenuta tramite lavorazioni artificiali: elementi lastriformi possono derivare, infatti, da rocce scistose ovvero tendenti a sfaldarsi secondo

piani paralleli come alcuni gneiss e ardesie e devono essere posati mantenendo una giacitura parallela al piano di stratificazione; elementi pressoché parallelepipedi, invece, possono essere ottenuti con un'operazione di sbazzatura e vengono posati definendo ricorsi piani.

Questo tipo di apparecchiature murarie è stato molto impiegato per la realizzazione di muri di terrazzamento (Fig. 148).



Fig. 146 Apparecchiatura muraria ad elementi sbazzati
[Acocella, 2004, p. 103]



Fig. 147 Muro ad elementi stratificati
[Acocella, 2012, su <http://www.architetturadi pietra.it>]



Fig. 148 Muro di terrazzamento a Brenzone sul Garda (VR, Italia)
[<http://www.brenzonetrekking.eu>]

Nella cultura architettonica contemporanea gabbioni con riempimento in elementi vagamente parallelepipedi disposti secondo un disegno tessiturale in cui si riconoscono allineamenti orizzontali sono stati impiegati dallo studio Haverstock (Londra) per rivestire le pareti libere del Blackrock Police Training Centre (Bristol, UK, 2015) (Fig. 149). La scelta della tecnica costruttiva e del materiale ha consentito ai progettisti di integrare l'edificio nel sito di una cava dismessa e di farlo percepire come parte del paesaggio (Mairs, 2015).

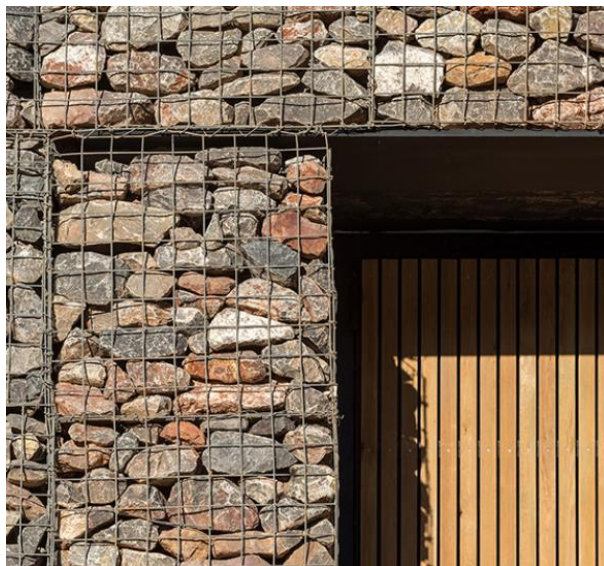


Fig. 149 Blackrock Police Training Centre
[<http://www.haverstock.com>, foto Simon Kennedy]

La strategia progettuale basata sulla definizione di *texture* stratigrafiche, oltre ad avere una valenza espressiva, ha anche delle potenzialità ambientali connesse con il recupero degli scarti del settore lapideo: consentirebbe, infatti, di valorizzare la tipologia di scarti solidi denominata palladiane (Fig. 150). Questi sottoprodotti delle operazioni di trasformazione effettuate nelle aziende di lavorazione della pietra (Rana et al., 2016; Karaca, Pekin, Deliormanlı, 2012), infatti, presentano una configurazione lastriforme e potrebbero, quindi, essere efficacemente impiegati per caratterizzare involucri edilizi a gabbioni con questo tipo di *texture*.



Fig. 150 Palladiane
[Karaca, Pekin, Deliormanlı, 2012, p. 2361]

6.2.2. Aspetti applicativi e costruttivi

Gli involucri multistrato a gabbioni si prestano alla progettazione di edifici che richiamano le costruzioni storiche in muratura lapidea irregolare e che, al contempo, fanno riferimento al linguaggio architettonico attuale. Dall'analisi dei casi di studio è emerso, infatti, che i gabbioni sono impiegati in combinazione con aperture vetrate di grandi dimensioni, disposte negli angoli del volume o impaginate in modo irregolare: la leggerezza e trasparenza delle aperture contrastano con il carattere massivo e materico di questo tipo di involucri contribuendo a sottolinearne la distanza rispetto alle pareti tradizionali in pietra; l'impaginato irregolare rende evidente, invece, che a differenza del passato la pietra non è usata con funzione strutturale. In alcuni casi il vetro viene impiegato per smaterializzare i piani superiori di un edificio a più livelli mentre i moduli costruttivi a riempimento litico sono utilizzati per la parte basamentale ad esprimere un senso di radicamento e di "pesantezza", come nella Shoreham Beach House progettata dallo studio ABIR Architects (Fig. 151).



Fig. 151 Vista dell'esterno della Shoreham Beach House e dettaglio del prospetto
[<http://www.abir.co.uk>; Griffiths, 2016, su <https://www.dezeen.com>, foto Jim Stephenson]

Altre strategie progettuali che consentono di evitare approcci storicistici e di definire il carattere espressivo innovativo degli edifici con involucro a gabbioni, sono basate sull'adozione di finiture esterne realizzate in altri materiali come legno e metallo: alcune tra le possibili strategie consistono nell'impiegare questi materiali per suddividere in campiture una facciata a gabbioni o per caratterizzare la copertura o volumi secondari dell'edificio. Nel caso dello Château-le-lez Housing progettato dallo studio Edouard François and Associates, ad esempio, il legno viene impiegato per definire le pareti che delimitano le logge a cielo aperto degli appartamenti, volumi cubici addossati alla facciata dell'edificio o collegati alle abitazioni attraverso passerelle sovrelevate (Fig. 152). Nella villa a Garrigàs progettata dallo studio Boncompte & Font Arquitectes, invece, il legno viene usato per rivestire un volume disposto trasversalmente rispetto al corpo principale dell'edificio caratterizzato nella sua fascia superiore da un rivestimento a gabbioni (Pagliari, 2006).



Fig. 152 Vista dell'esterno dell'edificio Château-le-lez e vista dall'alto di una delle logge
[Redazionale, 2007, p. 71; Pousse, 2000, p. 74]

Vista la particolare natura degli involucri a gabbioni, la definizione di un equilibrio tra il carattere espressivo tradizionale e contemporaneo degli edifici appare possibile solo a patto di definire soluzioni costruttive specifiche, non immediatamente mutuabili da quelle tipiche di altri tipi di rivestimenti. La pesantezza dei moduli costruttivi e il carattere sciolto del materiale litico di riempimento impongono, infatti, la progettazione di adeguati sistemi di supporto in corrispondenza delle aperture e dell'attacco a terra. Inoltre, qualora l'obiettivo progettuale sia la definizione di un volume scultoreo, è essenziale definire soluzioni che mantengano la continuità del rivestimento litico nel nodo di raccordo con la copertura ma anche la complanarità dello stesso con le aperture o con rivestimenti in altri materiali. Un altro aspetto da considerare nella progettazione è lo smaltimento delle acque meteoriche vista la natura permeabile dei moduli a gabbioni: il problema costruttivo impone lo sviluppo di soluzioni innovative soprattutto qualora si voglia mantenere la pulizia formale del volume dell'edificio.

Per presentare alcune soluzioni costruttive specificatamente sviluppate per la risoluzione di problemi connessi con lo smaltimento dell'acqua piovana e con l'inserimento di aperture vetrate o di altri materiali di rivestimento di facciata o di copertura, si è scelto di fare riferimento a quattro casi di studio analizzati nel capitolo 4: vengono illustrate le soluzioni tecniche adottate nell'Haus 9x9 di Titus Bernhard, nelle Sei Unità di Gino Guarnieri e Roberto Mascazzini, nell'House in the Landscape dello Studio Kropka e nei Logements les Galets di Bertrand Bonnier e Michel Guthmann.

Nell'edificio residenziale Haus 9x9 progettato da Bernhard, la soluzione costruttiva sviluppata per l'involucro è stata studiata per consentire lo smaltimento delle acque meteoriche senza alterare l'immagine scultorea del volume: la stratigrafia delle pareti verticali e della copertura, infatti, comprende uno strato di drenaggio di 1 cm e una guaina bituminosa di 5 mm che consentono di far defluire l'acqua piovana dal tetto fino ad un tubo di raccolta interrato, senza utilizzare grondaie e pluviali (Fig. 153).

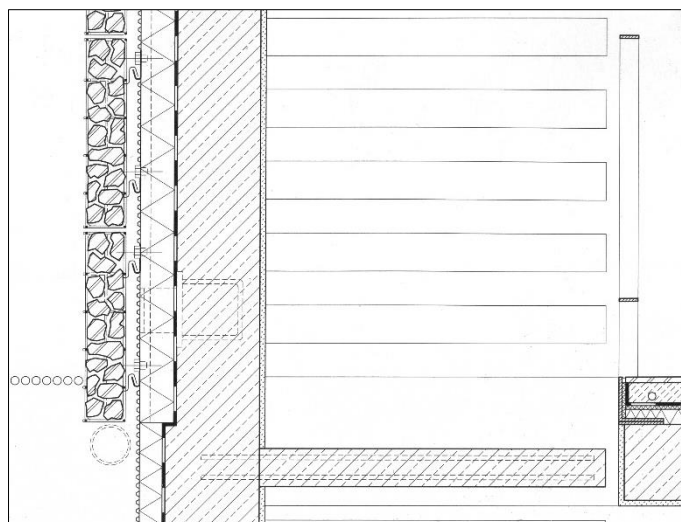


Fig. 153 Dettaglio costruttivo della sezione verticale dell'edificio Haus 9x9, che illustra la soluzione adottata per realizzare un rivestimento continuo funzionale allo smaltimento delle acque meteoriche [Redazionale, 2003b, p. 1276]

In copertura, tuttavia, sono stati utilizzati elementi sagomati in acciaio inossidabile per canalizzare le acque meteoriche in corrispondenza delle aperture vetrate zenitali collegate con le finestre presenti sulle pareti verticali (Fig. 155): su questi elementi di spessore pari a 15 mm, è stata risolta la guaina impermeabile in modo da evitare infiltrazioni nella porzione della copertura a contatto con il controtelaio delle finestre. La continuità del rivestimento è stata garantita impiegando moduli a gabbioni di dimensioni più piccole fissati ad angolari in acciaio 100/100 mm collegati ad angolari 140/70 mm saldati a piastre di ancoraggio 200/150 mm (Redazionale, 2003b). L'utilizzo di elementi lignei alti circa 20 cm in funzione di controtelai ha permesso di realizzare la complanarità tra le aperture e il rivestimento litico. Questa soluzione, insieme alla scelta di infissi in legno di quercia che si armonizzano cromaticamente con il riempimento litico in pietra dolomite, contribuisce a limitare l'impatto visivo della discontinuità creata dalla superficie vetrata. Le stesse soluzioni costruttive sono state adottate in corrispondenza delle aperture opache rivestite in legno di quercia (Fig. 154).

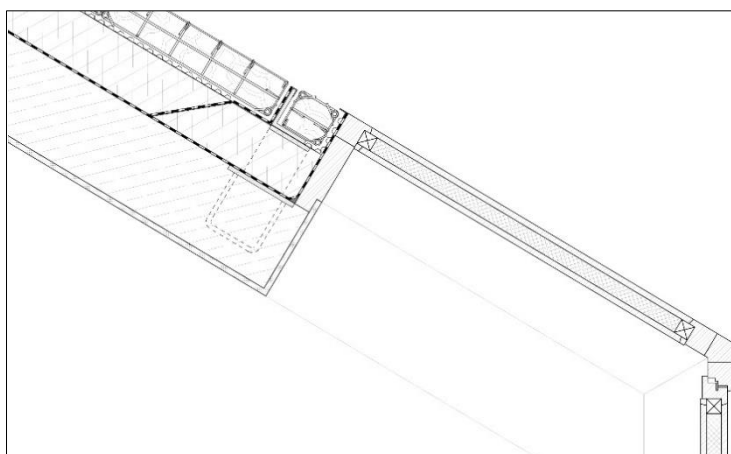


Fig. 154 Dettaglio costruttivo della sezione verticale dell'edificio Haus 9x9, che illustra la soluzione adottata per l'inserimento di aperture opache zenitali rivestite in legno di quercia [courtesy of Titus Berhard]

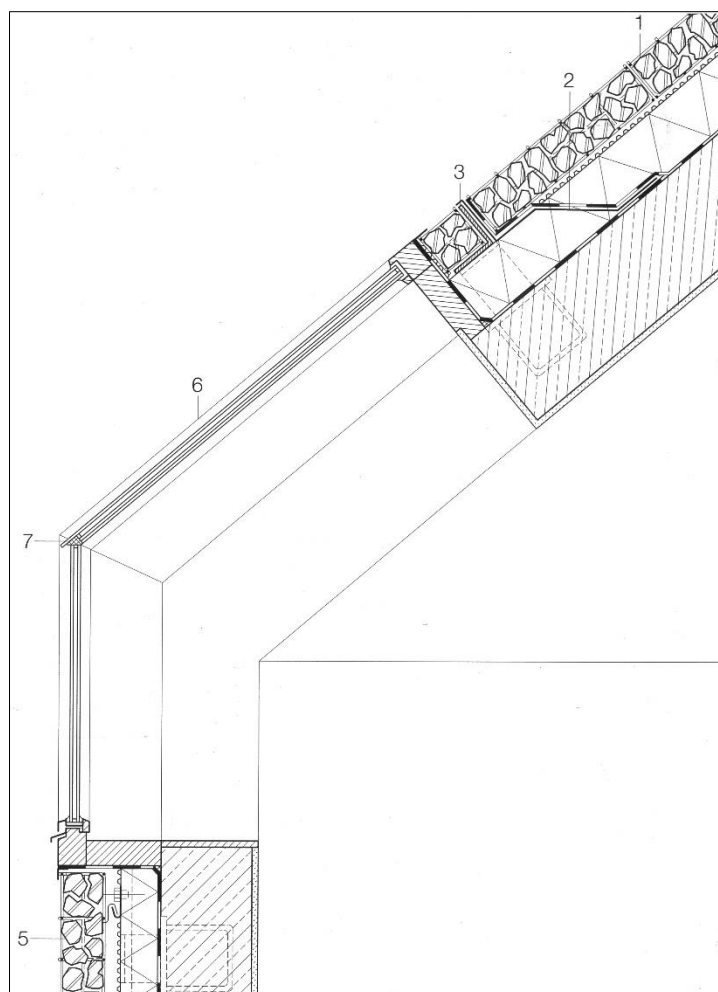


Fig. 155 Dettaglio costruttivo della sezione verticale dell'edificio Haus 9x9, che illustra la soluzione adottata per l'inserimento di aperture vetrate zenitali collegate con le finestre presenti sulle pareti verticali

[Redazionale, 2003b, p. 1276]

Nell'edificio residenziale Sei Unità progettato da Gino Guarnieri e Roberto Mascazzini, la soluzione costruttiva sviluppata per l'involucro è stata studiata anche per consentire lo smaltimento delle acque meteoriche: i progettisti hanno definito, infatti, un sistema basato sull'impiego di fogli di lamiera grecata che oltre a contenere i frammenti litici e laterizi che compongono il rivestimento delle pareti verticali e della copertura, consente il deflusso dell'acqua piovana. In copertura i fogli di lamiera in acciaio inossidabile sono sostenuti da listelli in legno di sezione 8 x 8 cm, collegati a loro volta alle travi di legno dell'orditura primaria (Fig. 156 a). A questi listelli sono fissati dei profili a L in acciaio inox forato che trattengono in posizione il frantumato di rivestimento e permettono lo scorrimento dell'acqua nella direzione di massima pendenza. Superata la linea di gronda, le acque meteoriche scorrono lungo i fogli di lamiera grecata che trattengono il frantumato di rivestimento delle pareti verticali. Il nodo inferiore della facciata è risolto attraverso l'utilizzo di una piastra di acciaio inox che sostiene il frantumato e convoglia le acque meteoriche in un canale di raccolta posto a livello del piano di capestio esterno alle abitazioni (Fig. 156 b). L'innovativa tecnica costruttiva ha permesso di mantenere la pulizia formale del volume evitando l'inserimento di pluviali.

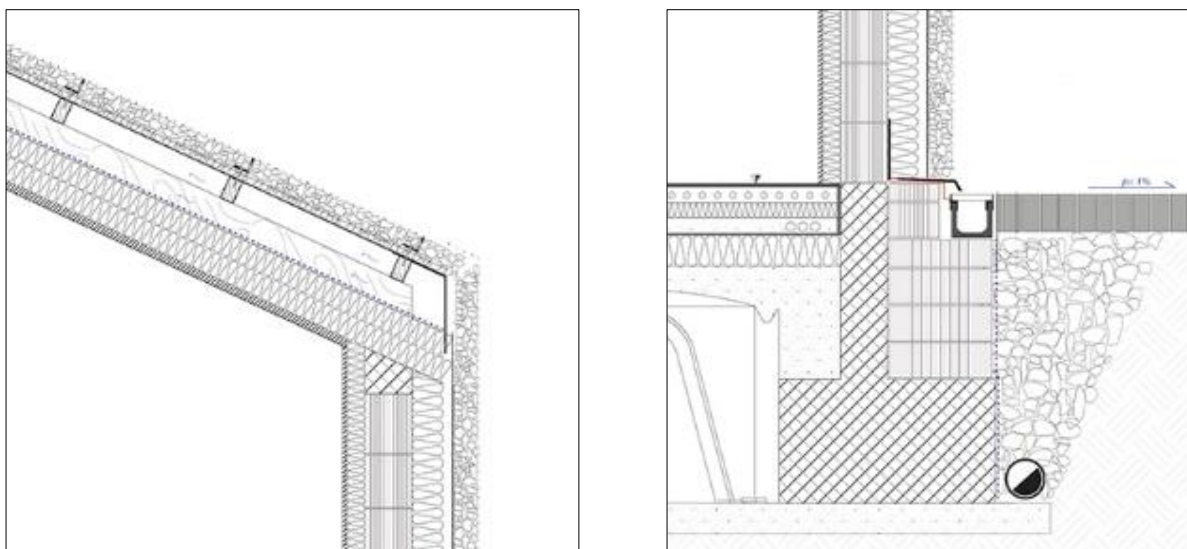


Fig. 156 a-b Dettagli costruttivi che illustrano la soluzione adottata nell'edificio Sei Unità per realizzare un rivestimento continuo funzionale anche allo smaltimento delle acque meteoriche [courtesy of Studio Roberto Mascazzini Architetto]

Guarnieri e Mascazzini hanno anche studiato una soluzione costruttiva che consente l'accostamento di un rivestimento a gabbioni con un rivestimento metallico. Hanno sviluppato, infatti, un sistema basato sull'impiego di listelli di legno che consente di articolare i prospetti principali dell'edificio residenziale secondo un'alternanza di fasce complanari con finitura in rame o in frantumato. I listelli lignei sostengono dei pannelli in compensato marino di 2 cm di spessore rivestiti in lamiera di rame 8/10 aggraffata e permettono di creare un'intercapedine areata di 6 cm tra il rivestimento metallico e lo strato di polistirene estruso che isola esternamente le tamponature in laterizio porizzato (Fig. 157). Le porzioni delle facciate rivestite in rame contengono anche il sistema degli oscuranti delle aperture degli alloggi realizzato con scuri tamburati con rivestimento in rame e sistema meccanizzato di movimentazione. Le finestre sono arretrate rispetto al piano di facciata: il controtelaio a cui sono collegati i serramenti in alluminio, infatti, è posto in corrispondenza dello strato di polistirene estruso che isola internamente le tamponature in laterizio (Fig. 157). I lucernari presenti in copertura sono posti, invece, allo stesso livello del rivestimento esterno dell'involucro.

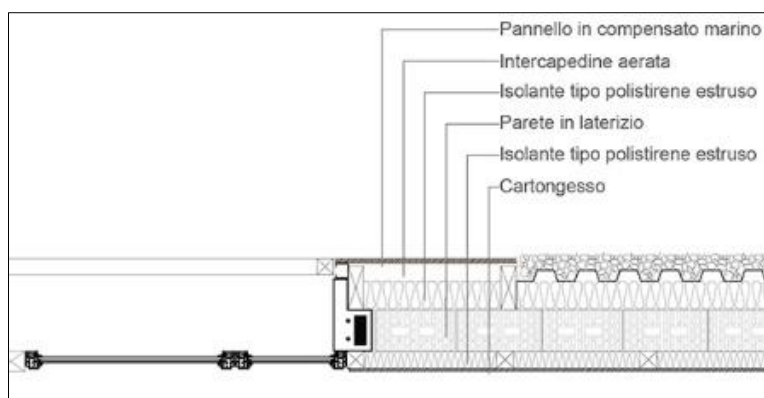


Fig. 157 Dettaglio costruttivo che illustra la soluzione adottata nell'edificio Sei Unità per alternare il rivestimento in frantumato lapideo-laterizio con il rivestimento in rame [courtesy of Studio Roberto Mascazzini Architetto]

Nell'edificio residenziale House in the Landscape progettato dallo Studio Kropka, la soluzione costruttiva sviluppata per l'accostamento del rivestimento a gabbioni delle pareti con il rivestimento metallico della copertura è stata studiata per consentire lo smaltimento delle acque meteoriche e il mantenimento della pulizia formale del volume. Il rivestimento in fogli di zinco-titanio della copertura, infatti, è stato interrotto pochi centimetri prima della linea di gronda per inserire un canale di scolo che, però, non è visibile nel prospetto: la continuità visiva del rivestimento metallico è stata ripristinata inserendo una scossalina sagomata che risolve il nodo di connessione tra tetto e parete verticale (Fig. 158 a). Lungo le linee di bordo, invece, il rivestimento in gabbioni è direttamente a contatto con il rivestimento della copertura: il tavolato di 2,4 cm di spessore che supporta i fogli in zinco-titanio aggraffati, infatti, è stato progettato in modo da proteggere i moduli costruttivi a riempimento litico (Fig. 158 b). Il tavolato è sostenuto da controlistelli lignei posti in corrispondenza delle travi per creare un'intercapedine d'aria per la ventilazione.

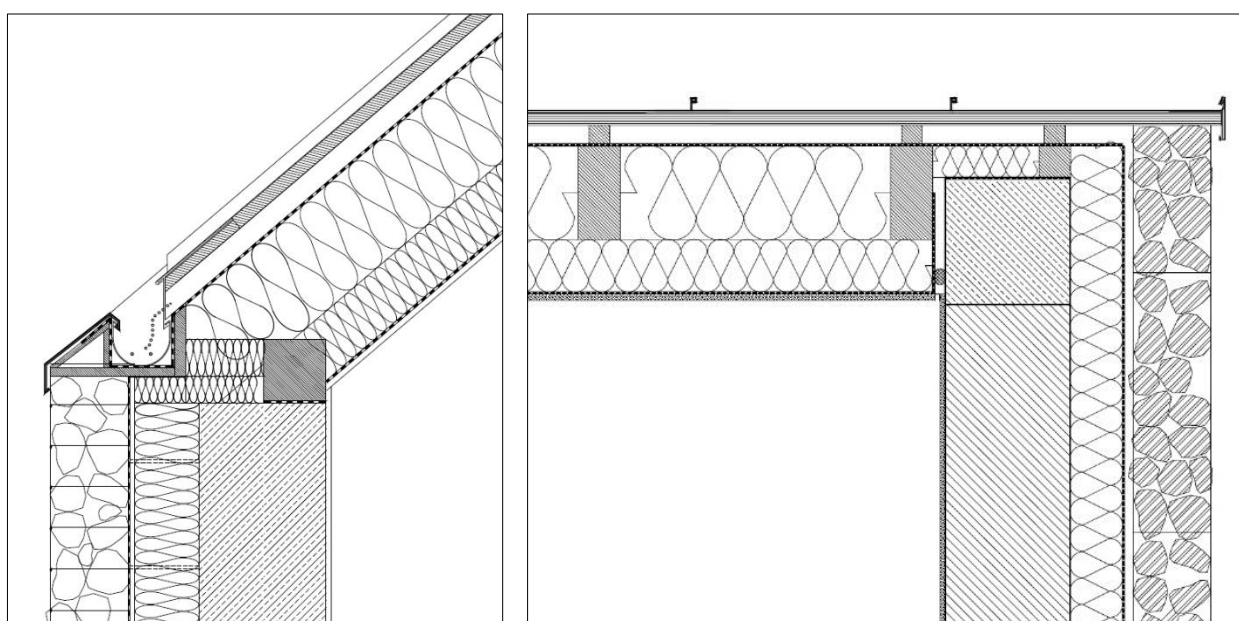


Fig. 158 a-b Dettagli costruttivi delle sezioni verticali dell'edificio House in the Landscape, che illustrano la soluzione adottata per lo smaltimento delle acque meteoriche e l'accostamento dei rivestimenti in gabbioni ed in metallo

[courtesy of Kropka Studio]

La soluzione studiata dallo Studio Kropka per l'inserimento di aperture vetrate nelle pareti con rivestimento a gabbioni, infine, si basa sull'uso di elementi di supporto metallici sagomati a scarpa e di profilati ad L fissati alla parete strutturale retrostante: gli elementi a scarpa fungono da architrave per il sostegno dei moduli costruttivi mentre i profili a L sono predisposti per il montaggio del telaio fisso dei serramenti in metallo nero delle finestre (Fig. 159). La scelta del colore degli infissi contribuisce a marcare la discontinuità rappresentata dalle superfici trasparenti.

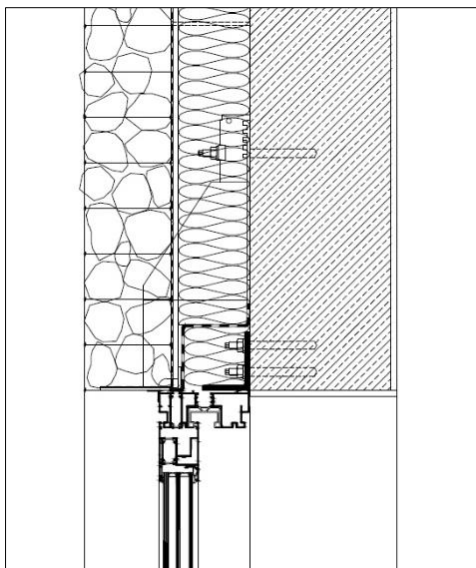


Fig. 159 Dettaglio costruttivo che illustra la soluzione adottata nell'House in the Landscape per l'inserimento di un'apertura vetrata nella parete con rivestimento a gabbioni
[courtesy of Kropka Studio]

Nell'edificio residenziale Logements Les Galets, progettato da Bertrand Bonnier e Michel Guthmann, la soluzione costruttiva sviluppata per l'inserimento di aperture vetrate nelle pareti con rivestimento lapideo si basa sull'impiego di elementi metallici sagomati a L connessi con la struttura portante in calcestruzzo armato (Fig. 160): questi elementi consentono, infatti, di sostenere i ciottoli contenuti tra la rete metallica e il setto retrostante e di realizzare una disposizione irregolare delle aperture che denuncia la natura non strutturale della pietra. Le finestre, infatti, non sono verticalmente allineate e risultano arretrate rispetto al filo del rivestimento litico. Il distacco tra i due piani è sottolineato dalla scelta di intonacare le pozioni del setto in calcestruzzo che incorniciano le superfici trasparenti e di utilizzare oscuranti e infissi di colore bianco.

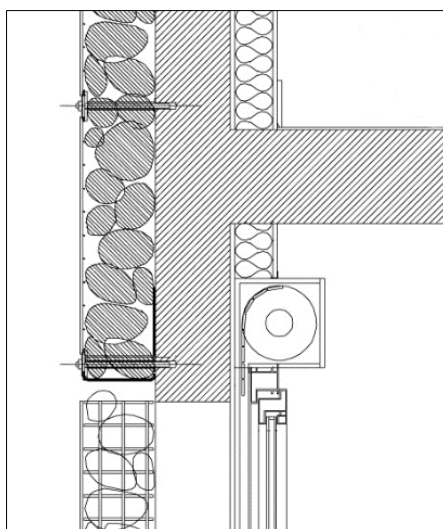


Fig. 160 Dettaglio costruttivo che illustra la soluzione adottata nell'edificio Logements Les Galets per l'inserimento di un'apertura vetrata nella parete con rivestimento litico
[courtesy of Michel Guthmann]

CAPITOLO 7

CONCLUSIONI

7.1. RISULTATI

7.2. POSSIBILI SVILUPPI E APPROFONDIMENTI DELLA RICERCA

7. CONCLUSIONI

7.1. RISULTATI

Il lavoro di ricerca è stato sviluppato a partire dall'analisi delle architetture in pietra di rilievo nazionale ed internazionale progettate negli ultimi anni: è emerso che i materiali lapidei, che con la diffusione del calcestruzzo e dell'acciaio erano stati utilizzati prevalentemente per elementi sottili di rivestimento, sono tornati ad essere impiegati in spessori rilevanti, per definire involucri edilizi o elementi strutturali. Da questa analisi preliminare, è emersa l'esigenza di esaminare le tipologie e le caratteristiche dei materiali lapidei impiegabili nella progettazione, di comprendere quali siano le innovazioni che hanno contribuito al rinnovamento del linguaggio architettonico e di analizzare i caratteri delle tecniche costruttive attualmente impiegate per realizzare involucri edilizi ed elementi strutturali. La trattazione di queste tematiche è stata svolta nei primi quattro capitoli.

L'analisi condotta nel capitolo 1 ha evidenziato la varietà delle pietre naturali e le differenze "genetiche e prestazionali" tra rocce magmatiche, sedimentarie e metamorfiche. Ha fatto emergere come la conoscenza approfondita delle caratteristiche e delle proprietà dei materiali lapidei naturali sia necessaria per operare scelte progettuali consapevoli ed impiegare le diverse tipologie di pietra in modo corretto in quanto consente di valorizzarne le potenzialità e di ridurre il manifestarsi di fenomeni di degrado. Lo studio ha permesso anche di sintetizzare le conoscenze di base relative ai materiali lapidei artificiali distinguendo i calcestruzzi ottenuti da scarti di lavorazione o di estrazione della pietra naturale dai lapidei agglomerati a matrice cementizia o resinosa. È emerso che questi materiali possono consentire di riprodurre i caratteri dei litotipi naturali per favorire l'integrazione dell'opera di progetto nel contesto. Ulteriori potenzialità risiedono nella garanzia dell'omogeneità delle caratteristiche e delle proprietà e nella possibilità di ottenere prestazioni superiori rispetto ai litotipi di origine. I materiali artificiali qualora siano realizzati con scarti lapidei presentano, inoltre, benefici ambientali: il recupero degli scarti, infatti, riduce i problemi legati al loro smaltimento, limita il consumo di materiali naturali grezzi che rappresentano una risorsa non rinnovabile e diminuisce le emissioni di anidride carbonica connesse con la produzione di cemento.

L'analisi condotta nei capitoli 2 e 3 ha consentito di comprendere i vincoli posti dai processi di lavorazione dei materiali lapidei alla progettazione e di individuare alcuni dei fattori che hanno reso possibile la riscoperta della pietra massiva. Ha fatto emergere come la conoscenza delle tecniche di lavorazione applicabili per realizzare prodotti lapidei sia essenziale per la comprensione della varietà dei possibili esiti architettonici e la selezione del tipo di attrezzatura o trattamento più adatti al materiale impiegato. Lo studio ha permesso anche di evidenziare come le tecniche tradizionali di lavorazione impiegate nel settore lapideo siano state profondamente innovate consentendo di realizzare prodotti lapidei di forma complessa con tempi e costi di fabbricazione ridotti, impiegando in modo efficiente il materiale o recuperando gli scarti. È emerso che l'innovazione più importante per la realizzazione di prodotti lapidei è legata all'introduzione dei sistemi integrati CAD/CAM/CNC che hanno consentito di rimuovere molte delle limitazioni al progetto di architetture in pietra e hanno reso possibili nuovi linguaggi basati sull'attualizzazione di elementi tecnici tradizionali in conci. Un'ulteriore evoluzione delle potenzialità delle macchine a controllo numerico è rappresentata dalla stampa 3D che sta assumendo maggiore importanza nel settore lapideo con riferimento a materiali artificiali innovativi ottenuti da scarti o progettati per avere prestazioni superiori ai litotipi di origine.

È emerso, infine, che le tecnologie digitali hanno messo a disposizione dei progettisti nuovi metodi e strumenti per la modellazione computazionale e per il *form-finding* che hanno consentito di estendere le potenzialità della tradizionale tecnica stereotomica: il passaggio dalla stereotomia alla stereotomia digitale legata a *software* di progettazione parametrica ed a metodi di *form-finding* basati su modelli digitali come il *Thrust Network Analysis* o il *Particle Spring System*, infatti, ha ampliato le possibilità di ricerca formale dei progettisti e ha reso possibile l'attualizzazione di strutture ad arco o a volta in conci di pietra.

L'analisi condotta nel capitolo 4 ha evidenziato come la riscoperta della pietra massiva nella cultura architettonica contemporanea sia avvenuta attraverso il recupero e l'attualizzazione della tecnica costruttiva tradizionale della muratura e la diffusione di tecniche innovative come quella della pietra armata e dei gabbioni. Dalla schedatura di casi di studio, è emerso come il rinnovamento del linguaggio architettonico sia legato anche al riconoscimento delle potenzialità della pietra massiva, connesse a valori espressivi e di sostenibilità economica e ambientale. L'uso massivo della pietra naturale, infatti, è motivato non solo dall'esigenza di integrarsi con il paesaggio, reinterpretare la cultura costruttiva tradizionale ed esprimere l'identità locale ma anche dalla possibilità di realizzare con costi e tempi di costruzione contenuti elementi tecnici durevoli, dotati di elevata inerzia termica, facilmente riciclabili o ottenuti attraverso il recupero o il riciclo di materiale lapideo di scarto. Le strategie individuate per limitare i costi e i tempi di produzione e messa in opera di elementi tecnici in pietra massiva comprendono il coordinamento del progetto con le tipiche dimensioni dei blocchi estratti e l'adozione di tecniche di montaggio meccanizzate, l'impiego di blocchi che presentano imperfezioni o difetti di taglio scartati dal processo di fabbricazione di lastre sottili da rivestimento e pavimentazione o l'utilizzo di frammenti lapidei ottenuti dalla demolizione di edifici o dal recupero di scarti di estrazione o di lavorazione.

L'analisi delle soluzioni tecniche adottate negli edifici selezionati come casi di studio e l'illustrazione sintetica dell'evoluzione storica delle tecniche costruttive della muratura, della pietra armata e dei gabbioni, inoltre, hanno permesso di evidenziare i caratteri di mutazione tecnologica dell'architettura in pietra. In relazione agli involucri edilizi, è emerso che la cultura architettonica contemporanea ha sviluppato soluzioni costruttive innovative rispetto al passato dal punto di vista tecnico, prestazionale e/o linguistico. Dal punto di vista tecnico-prestazionale, la maggior parte degli involucri lapidei contemporanei si distingue dai sistemi murari tipici delle costruzioni storiche dal momento che il carattere massivo delle soluzioni tecniche non è più connesso con l'adozione del principio del corpo unico: mentre storicamente l'impiego della pietra in spessori rilevanti era motivato dalla necessità di assolvere con un singolo strato funzionale sia a compiti di resistenza statica che di comfort ambientale, attualmente il materiale lapideo costituisce lo strato più esterno di pacchetti di chiusura compositi progettati secondo il principio del corpo multiplo e costituiti, quindi, anche da altri materiali con funzioni distinte e complementari. Il cambiamento del principio costruttivo alla base della progettazione ha consentito di superare alcune delle carenze prestazionali degli involucri tradizionali connesse con le istanze di fruizione: i sistemi murari storici, infatti, pur garantendo una buona prestazione termico-energetica nella stagione estiva grazie all'elevata inerzia termica del materiale, presentano delle carenze nella stagione invernale legate al loro insufficiente potere isolante. Nelle soluzioni contemporanee l'abbinamento della pietra ad altri strati funzionali, tra cui mattoni ed isolanti termici, permette di ridurre il consumo energetico per il riscaldamento e di garantire adeguati livelli di comfort termico nella stagione fredda.

Tuttavia, dal momento che il principio del corpo multiplo non è impiegato per realizzare involucri leggeri come nelle tendenze progettuali architettoniche attualmente maggioritarie, le soluzioni contemporanee consentono di mantenere gli attributi di durabilità e inerzia termica dei sistemi murari storici. L'elevato spessore dello strato litico esterno aumentando la massa dell'involucro, infatti, attenua le escursioni termiche e risulta meno sensibile all'azione aggressiva degli agenti atmosferici rispetto ai rivestimenti in lastre di pietra sottili. Dal punto di vista linguistico, inoltre, le soluzioni contemporanee mantenendo il carattere massivo degli involucri lapidei tradizionali, consentono di valorizzarne le potenzialità espressive: richiamando la cultura costruttiva lapidea del passato, infatti, favoriscono l'integrazione dei nuovi edifici nel paesaggio naturale o urbano ed esprimono l'identità locale. Anche dal punto di vista linguistico, però, le soluzioni contemporanee analizzate nel capitolo presentano degli elementi di innovatività: le valenze espressive della cultura costruttiva lapidea tradizionale, infatti, vengono reinterpretate attraverso strategie progettuali che facendo riferimento al linguaggio architettonico contemporaneo consentono di evitare approcci storicistici. Una delle strategie attualmente utilizzate dai progettisti per definire un equilibrio tra il linguaggio architettonico tradizionale e contemporaneo degli edifici con involucri in pietra massiva, è legata all'impiego di finestre a nastro, vetrate a tutt'altezza o aperture poste agli angoli del volume: la leggerezza e la trasparenza delle aperture vetrate contrasta, infatti, con il carattere massivo degli involucri in pietra e con la profondità e la continuità delle pareti esterne lapidee tradizionali. In alcuni esempi il contrasto è sottolineato dall'uso di architravi e infissi metallici con colori discordanti rispetto al cromatismo dell'involucro litico. In altri casi, l'impaginato irregolare delle finestre rivela che, diversamente dal passato, la pietra non ha funzione portante. L'uso di altri materiali moderni come il calcestruzzo o l'acciaio è un'altra delle strategie progettuali adottate per far riferimento al linguaggio architettonico contemporaneo in edifici in pietra: il carattere materico e massivo delle pareti lapidee, infatti, viene sottolineato dal contrasto con la linearità di supporti in calcestruzzo o con il carattere concettuale di volumi concretizi intonacati di bianco; in altri casi strutture metalliche sono usate per suddividere in campiture una facciata lapidea o caratterizzare altre parti dell'edificio.

Lo studio condotto nel capitolo 4 in relazione agli involucri innovativi in pietra massiva realizzati con le tecniche costruttive della muratura e dei gabbioni è stato approfondito nella seconda parte della tesi. Nel capitolo 5 sono state indagate le potenzialità prestazionali connesse con l'elevata inerzia termica di questo tipo di involucri in considerazione della necessità riconosciuta a livello internazionale di progettare edifici energeticamente efficienti e dell'importanza di questa proprietà ai fini della riduzione del consumo energetico e del miglioramento del comfort termico interno degli edifici. L'analisi ha consentito di quantificare i benefici termico-energetici di involucri lapidei massivi contemporanei progettati secondo il principio del corpo multiplo, rispetto ad involucri lapidei tradizionali progettati secondo il principio del corpo unico, dimostrando che le soluzioni tecniche attuali mantengono le potenzialità prestazionali connesse con gli attributi di massività ed elevata inerzia termica delle murature storiche nonostante il cambiamento del principio costruttivo alla base della progettazione. Lo studio è stato condotto attraverso simulazioni dinamiche annuali eseguite con il *software* Design Builder confrontando le prestazioni termico-energetiche di murature tradizionali con quelle delle soluzioni innovative di involucro adottate nelle opere di Zumthor, Abril e Bernhard analizzate nel capitolo 4. La ripetizione delle simulazioni nei contesti di riferimento di Grosseto, Bologna e Catania, rappresentativi di tre diverse condizioni climatiche tipiche del territorio nazionale, ha permesso di verificare che i vantaggi prestazionali delle soluzioni costruttive contemporanee

rispetto a quelle tradizionali non sono relativi ad una specifica zona climatica. È emerso, infatti, che le tre soluzioni consentono una riduzione significativa dei consumi energetici per il riscaldamento e il raffrescamento in tutti i contesti di riferimento con vantaggi più o meno accentuati a seconda della zona climatica: il risparmio percentuale calcolato sulla media dei consumi per il riscaldamento dei casi caratterizzati dagli involucri contemporanei rispetto alla media dei casi caratterizzati da murature tradizionali, infatti, varia tra il 57% e il 67%; il risparmio percentuale calcolato sulla media dei consumi per il raffrescamento, invece, è variabile tra il 5% e il 19%. È emerso, inoltre, che gli involucri contemporanei garantiscono un miglioramento del comfort termico interno nella stagione invernale in tutti i contesti di studio. In estate, tuttavia, la presenza dello strato isolante nella stratigrafia delle chiusure verticali analizzate determina nei contesti di Bologna e Catania il raggiungimento di temperature operative mediamente più elevate rispetto agli involucri tradizionali a corpo unico. In tutti i contesti di studio l'andamento delle temperature superficiali interne risulta comunque attenuato e sfasato rispetto a quello delle temperature superficiali esterne confermando i benefici delle soluzioni massive sul comfort termico estivo. Tuttavia, in relazione al valore di attenuazione e al tempo di ritardo, gli involucri contemporanei risultano meno vantaggiosi di quelli tradizionali anche se gli svantaggi sono contenuti.

La terza parte del lavoro di ricerca, infine, ha approfondito lo studio degli involucri multistrato a gabbioni dal punto di vista della prestazione termico-energetica e dei caratteri architettonici. Nonostante siano considerati un'applicazione povera per la relativa semplicità di produzione, i gabbioni presentano in realtà numerose implicazioni a livello prestazionale, costruttivo ed espressivo. Per valorizzarne le potenzialità connesse con i valori di sostenibilità ambientale ed ottenere l'esito estetico desiderato, in fase di progettazione devono essere tenute in considerazione diverse variabili e devono essere risolti specifici problemi costruttivi.

L'analisi condotta nel capitolo 6 attraverso simulazioni dinamiche annuali ha consentito di valutare l'influenza di quattro variabili progettuali sulla prestazione termico-energetica di involucri a gabbioni nel clima mediterraneo: le variabili analizzate sono la stratigrafia di parete in termini di posizione interna o esterna dell'isolante termico, lo spessore dei moduli costruttivi, la tipologia di pietra da impiegare per il riempimento e il volume dei vuoti tra i frammenti lapidei rispetto al volume totale del singolo modulo. È emerso che le variabili che influiscono maggiormente sulla prestazione dell'involucro sono la tipologia di pietra di riempimento e il tipo di stratigrafia. Tra i due litotipi considerati nello studio caratterizzati da differenti valori di densità, emissività ed assorbanza, il basalto risulta più vantaggioso del calcare in termini di consumi energetici per il riscaldamento, garantisce un miglior livello di comfort termico interno nella stagione invernale e consente di attenuare e sfasare più efficacemente l'onda termica nella stagione estiva. Tra le due soluzioni di parete considerate che richiamano quelle adottate nelle opere di Bernhard e Guthmann analizzate nel capitolo 4, la stratigrafia con isolante più esterno risulta più performante di quella con isolante interno sia rispetto alla prestazione energetica che rispetto alla prestazione termica. Solo in relazione al tempo di ritardo, risulta più svantaggiosa della stratigrafia con isolante più interno. La ripetizione delle simulazioni nei contesti di riferimento di Grosseto, Bologna e Catania ha permesso di delineare delle indicazioni progettuali utili per valutare, nelle diverse condizioni climatiche, l'appropriatezza delle scelte compiute in fase di progettazione dell'involucro al fine di minimizzare la domanda energetica per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici e migliorare le condizioni di comfort termico interno. È emerso che nei contesti caratterizzati dal clima mediterraneo, data la maggiore incidenza

dei consumi per il riscaldamento rispetto a quelli per il raffrescamento sul consumo energetico annuale per la climatizzazione, il materiale lapideo che garantisce minori consumi nella stagione invernale consente di ottenere anche maggiori vantaggi su tutto l'arco dell'anno. In fase di progettazione di involucri multistrato a gabbioni, quindi, dovrebbero essere privilegiate soluzioni costruttive con isolante posto all'esterno e riempimento in materiali lapidei di colore scuro e ad alta densità.

L'analisi condotta nel capitolo 6 attraverso il riferimento ad architetture contemporanee e l'individuazione di analogie figurative con opere e manufatti realizzati con tecniche costruttive tradizionali, infine, ha evidenziato che i gabbioni per la varietà della forma, della dimensione, dei colori e della disposizione degli elementi lapidei di riempimento e l'accostamento con altri materiali costituenti l'involucro edilizio, consentono di ottenere molteplici esiti architettonici. È emerso, in particolare, che gli involucri a gabbioni si prestano alla progettazione di edifici che richiamano le costruzioni storiche e che al contempo fanno riferimento al linguaggio architettonico attuale. Le *texture* del riempimento litico dei moduli costruttivi, infatti, reinterpretano le valenze espressive di diverse tipologie di muratura lapidea irregolare tradizionale. Sono state individuate tre principali strategie progettuali che hanno come riferimenti figurativi l'*opus incertum* romano e i muri in pietre grezze, i muri di ciottoli diffusi in età premoderna e i muri in pietre sbozzate o stratificate: la prima strategia, infatti, è legata all'impiego di elementi lapidei irregolari disposti a creare un disegno tessiturale privo di allineamenti, la seconda si basa sull'impiego di ciottoli arrotondati e levigati mentre la terza consiste nell'impiego di elementi lastriformi o sbozzati disposti a creare un disegno tessiturale stratigrafico in cui si riconoscono allineamenti orizzontali continui. L'accostamento con altri materiali quali vetro e metallo, invece, contribuisce a evidenziare il carattere espressivo innovativo degli edifici caratterizzati da involucri a gabbioni. Per la particolare natura di questo tipo di involucri, connessa alla pesantezza dei moduli costruttivi e al carattere sciolto del materiale litico di riempimento, tuttavia, la definizione di un equilibrio tra il carattere espressivo tradizionale e contemporaneo appare possibile solo a patto di definire soluzioni costruttive specifiche che risolvano i problemi connessi con l'inserimento di aperture vetrate o di altri materiali di rivestimento e con lo smaltimento dell'acqua piovana. La particolarità delle soluzioni tecniche necessarie per risolvere questi problemi costruttivi è stata illustrata con riferimento alle opere di Bernhard, di Guarnieri e Mascazzini, dello Studio Kropka e di Bonnier e Guthmann analizzate nel capitolo 4.

In definitiva, il lavoro di ricerca ha evidenziato come l'impiego della pietra in spessori rilevanti non costituisca una nostalgica reazione al rinnovamento ma rappresenti un'opportunità per valorizzare nel progetto di architettura le potenzialità espressive e prestazionali del più antico dei materiali costruttivi.

7.2. POSSIBILI SVILUPPI E APPROFONDIMENTI DELLA RICERCA

Il lavoro di ricerca condotto presenta diverse possibilità di sviluppo e approfondimento futuri, in particolare in relazione allo studio esposto nei capitoli 5 e 6.

L'analisi delle prestazioni termico-energetiche degli involucri lapidei massivi presentata nel capitolo 5 non ha considerato le implicazioni economiche connesse con la riduzione dei consumi energetici consentita dalle soluzioni costruttive contemporanee esaminate. Un ulteriore sviluppo dello studio condotto, quindi, potrebbe includere un'analisi economica per valutare e comparare i costi di gestione e di realizzazione di edifici con involucri lapidei massivi tradizionali e contemporanei e quantificare in che misura la riduzione dei consumi energetici per il riscaldamento e il raffrescamento consentita dalle soluzioni attuali di involucro esaminate si traduca in un effettivo risparmio economico. Nella valutazione dovrebbero essere considerati, in particolare, tutti i fattori che incidono sul costo di realizzazione di un involucro lapideo massivo tra cui il tipo di pietra, la disponibilità del materiale nell'area limitrofa al sito di costruzione e la possibilità di recuperare o riciclare materiali di scarto.

L'analisi della prestazione termico-energetica di involucri a gabbioni sviluppata nel capitolo 6, invece, è stata condotta attraverso simulazioni dinamiche senza effettuare una caratterizzazione sperimentale delle due tipologie di pietra considerate: sono stati assunti, infatti, dei valori di letteratura per la densità, la conducibilità termica interna e il calore specifico a pressione costante del basalto e del calcare. La pietra, tuttavia, essendo un materiale naturale, presenta una notevole variabilità delle proprietà caratteristiche anche all'interno della stessa cava. Pertanto, il lavoro svolto potrebbe essere approfondito attraverso l'analisi sperimentale di un numero significativo di campioni di pietra derivanti dalla stessa cava: la determinazione in laboratorio delle proprietà caratteristiche consentirebbe di definire il rispettivo range di variazione, di ripetere le simulazioni con i dati misurati sperimentalmente e di comprendere in che modo cambi la prestazione termico-energetica degli involucri analizzati.

Nelle simulazioni condotte nel lavoro di tesi, inoltre, sono stati assunti per il riempimento lapideo dei gabbioni dei valori di emissività e di assorbanza pari a quelli del rispettivo litotipo senza considerare che per i materiali in forma granulare le proprietà termico-radiative risultano dipendenti dall'assortimento dimensionale: diverse ricerche sperimentali hanno dimostrato, in particolare, che l'albedo e la riflettanza di aggregati in pietra naturale aumentano al diminuire delle loro dimensioni influenzandone la prestazione termico-energetica (Castaldo, 2015; Pisello et al., 2014; Rosso et al., 2016b). Il lavoro di ricerca condotto, pertanto, potrebbe essere sviluppato misurando queste proprietà su campi di prova ricoperti da frammenti lapidei a diversa granulometria.

Il metodo semplificato di modellazione adottato nello studio della prestazione termico-energetica degli involucri a gabbioni, infine, non tiene conto dei processi di imbibizione della pietra a seguito delle precipitazioni atmosferiche. Un approfondimento del lavoro svolto attraverso misurazioni sperimentali eseguite su un modulo costruttivo a gabbioni potrebbe consentire di valutare anche l'incidenza di questo fenomeno nei processi di scambio termico.

GLOSSARIO

ALGORITMO: “insieme di regole formalmente e rigorosamente ben definite che costituisce il procedimento mediante il quale si perviene alla risoluzione di un problema dopo un numero finito di passi” (Grimaldi, 1998, p. 564).

ASSI: in relazione ad una macchina utensile a CNC gli assi costituiscono “le direzioni e i versi di spostamento o rotazione delle sue parti mobili e servono per individuare le posizioni e i movimenti dell’utensile rispetto al pezzo” da lavorare (Grimaldi, 1998, p. 33).

GRADI GIORNO: parametro convenzionale rappresentativo delle condizioni climatiche di una località, utilizzato per stimare il fabbisogno energetico necessario per mantenere gli ambienti ad una temperatura prefissata (D. Lgs. 29/12/2006, n. 311).

LASTRA: semilavorato avente una delle “dimensioni generatrici del solido” inferiore rispetto alle altre due; in base allo spessore (s) si distinguono “lastre sottili ($s < 20\text{mm}$), lastre ($20\text{mm} \leq s \leq 80\text{mm}$) e lastre spesse ($s > 80\text{mm}$)” (Acocella, 2004, p. 604).

LISTELLO: “elemento semilavorato a configurazione parallelepipedica in cui la lunghezza assume una dimensione notevolmente maggiore dello spessore e della larghezza” (Acocella, 2004, p. 605).

MASSA SUPERFICIALE: “massa per unità di superficie della parete opaca compresa la malta dei giunti esclusi gli intonaci”, misurata in kg/m^2 (D. Lgs. 329/12/2006, n. 311).

MASSELLO: “elemento semilavorato a configurazione volumetrica parallelepipedica non lastriforme”, ovvero caratterizzato da uno spessore confrontabile con le altre due dimensioni dell’elemento, che può essere prodotto attraverso diverse modalità di trasformazione (Acocella, 2004, p. 605).

PROGETTAZIONE PARAMETRICA: “progettazione basata sull’adozione di parametri” (Fallacara, Minenna, 2014, p. 37).

PIETRA: termine generico utilizzato per indicare materiale roccioso naturale lavorato per rispondere alle necessità dell’uomo ovvero per essere impiegato nelle costruzioni o per altri scopi (Blanco, 1999, p. 166; Winkler, 1994, p. 1).

ROCCIA: “aggregato di minerali che forma masse cristalline o amorfe (..) aventi la medesima composizione, struttura e origine” (Blanco, 1999, p. 197).

SCISTOSITÀ: caratteristica di alcune rocce metamorfiche che presentano una struttura caratterizzata da una “disposizione preferenziale isorientata dei singoli componenti cristallini” (Blanco, 1999, p. 109).

STEREOTOMIA: “arte del taglio delle pietre per la costruzione edilizia” (Fallacara, Ferrero, Minenna, 2015, p. XVIII)³¹ ovvero “disciplina teorica sul taglio corretto della pietra portante” basata sulla geometria descrittiva (Fallacara, Ferrero, Minenna, 2015, p. 4)³².

TOPOLOGIA: studio delle “proprietà degli enti geometrici che non variano quando questi vengono sottoposti a una deformazione continua cioè ad una “trasformazione” della figura, per cui non sono consentiti strappi o lacerazioni” (Fallacara, 2007, p. 84). Dal punto di vista topologico, “l’unico concetto d’equivalenza fra le figure” è “quello della continuità” (Fallacara, Minenna, 2014, p. 23)³³.

TRASFORMAZIONE TOPOLOGICA O OMEOMORFISMO: trasformazione a seguito della quale si realizza una “corrispondenza biunivoca tra una superficie piana ed una spaziale. Una trasformazione topologica (..) di una figura A in un’altra A’ è determinata da una corrispondenza p-p’ tra punti p di A e i punti p’ di A’ (biunivoca e continua)” (Fallacara, Ferrero, Minenna, 2015, p. 11)³⁴.

TRASMITTANZA TERMICA PERIODICA: “parametro che valuta la capacità di una parete opaca di sfasare e attenuare il flusso termico che la attraversa nell’arco delle 24 ore” (DPR 2/4/2009, n. 59).

³¹ Fallacara G (2015) *Tre paradossi della stereotomia come risorsa di innovazione teorico/pratica per l’architettura odierna in pietra da taglio*. In: Fallacara G, Ferrero M, Minenna V. Nuovi Sistemi Voltati Stereotomici: Progetto, Calcolo e Costruzione. Maglie (LE): Edizioni Gioffreda, XVII-XIX.

³² Ferrero M, Rosso F (2015) *Progettazione tecnica e calcolo statico dei sistemi voltati in pietra da taglio*. In: Fallacara G, Ferrero M, Minenna V. Nuovi Sistemi Voltati Stereotomici: Progetto, Calcolo e Costruzione. Maglie (LE): Edizioni Gioffreda, 2-8.

³³ Fallacara G (2014) *Stereotomia e rappresentazione del mondo*. In: Fallacara G, Minenna V. Stereotomic Design. Maglie (LE): Edizioni Gioffreda, 17-25.

³⁴ Fallacara G (2015) *Stereotomia e topologia: un metodo universale per la progettazione di spazi voltati stereotomici*. In: Fallacara G, Ferrero M, Minenna V. Nuovi Sistemi Voltati Stereotomici: Progetto, Calcolo e Costruzione. Maglie (LE): Edizioni Gioffreda, 10-20.

BIBLIOGRAFIA

Libri

- Acocella A (2004) *L'architettura di pietra. Antichi e nuovi magisteri costruttivi*. Firenze: Lucense-Alinea.
- Alaimo G, Enea D (2014) *La qualità tecnologica utile di prodotti edilizi innovativi*. Milano: Maggioli Editore.
- Benvenuto E (1981) *La scienza delle costruzioni e il suo sviluppo storico*. Firenze: Sansoni.
- Blanco G (1999) *Dizionario dell'architettura di pietra*. Roma: Carocci.
- Boeri A (1996) *Pietre naturali nelle costruzioni. Requisiti-Criteri Progettuali-Applicazione-Prestazioni*. Milano: HOEPLI.
- Brown A (2001) *The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture: Peter Rice*. Londra: Thomas Telford Publishing.
- D'Amato Guerrieri C, a cura di. (2006) *Città di Pietra. L'altra modernità. Architetture stereotomiche*. Venezia: Marsilio.
- Dernie D (2003) *New stone architecture*. Londra: Laurence King.
- Di Sivo M (2004) *Atlante della Pietra*. Torino: UTET.
- Fallacara G (2007) *Verso una progettazione stereotomica. Nozioni di Stereotomia, Stereotomia digitale e trasformazioni topologiche: ragionamenti intorno alla costruzione della forma*. Roma: ARACNE editrice.
- Fallacara G, Etlin R, Tamboréro L (2008) *Plated Stereotomy. Stone Vaults for the Modern World*. Roma: ARACNE editrice.
- Fallacara G (2012) *Stereotomia Ri-composta. Evoluzione di una disciplina che insegna a costruire lo spazio*. Roma: ARACNE editrice.
- Fallacara G, Minenna V (2014) *Stereotomic Design*. Maglie (LE): Edizioni Gioffreda.
- Fallacara G, Ferrero M, Minenna V (2015) *Nuovi Sistemi Voltati Stereotomici: Progetto, Calcolo e Costruzione*. Maglie (LE): Edizioni Gioffreda.
- Girasante F, Potenza D (2006) *Dalla pietra all'architettura*. Foggia: Claudio Grenzi Editore.
- Grimaldi F (1998) *CNC. Macchine Utensili a controllo numerico*. Milano: Ulrico Hoepli Editore.
- Hegger M, Auch-Schwelk V, Fuchs M, Rosenkranz T (2006) *Atlante dei Materiali*. Torino: UTET.
- Hugues T, Steiger L, Weber J (2007) *Pietra naturale*. Torino: UTET-SCIENZE TECNICHE.

- Lenci R (2018) *L'enigma dell'opera poligonale con blocchi concavi e il rilievo della mura di Amelia*. Roma: Gangemi Editore.
- Mack G (1997) *Herzog & de Meuron 1978-1988*. In: Herzog & de Meuron: das Gesamtwerk. Basilea/Boston/Berlino: Birkhauser.
- Mäckler C (2004) *Material Stone. Constructions and Technologies for Contemporary Architecture*. Berlino: Birkhäuser-Publishers for Architecture.
- Marta R (1990) *Architettura Romana. Tecniche costruttive e forme architettoniche del mondo romano*. Roma: Edizioni Kappa.
- Menicali U (1992) *I materiali dell'edilizia storica: tecnologia e impiego dei materiali tradizionali*. Roma: NIS.
- Pongratz C R, Perbellini M R (2009) *Cyber Stone. Innovazioni digitali sulla pietra*. Roma: Edilstampa.
- Potenza D (2005) *La pietra armata. Concezione e costruzione della Chiesa di Padre Pio*. Foggia: Claudio Grenzi Editore.
- Primavori P (1997) *I materiali lapidei ornamentali. Marmi, Graniti e Pietre*. Pisa: ETS.
- Rondelet G (2004a) *Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare. Volume I. Tomo I – Conoscenza di Materiali*. Roma: Editrice Librerie Dedalo. Ripr. facs. della prima traduzione italiana, a cura di Basilio Soresina, Mantova 1832, della sesta ed. originale, ristampata, riveduta e corretta da Guglielmo Pepe a Napoli nel 1840.
- Rondelet G (2004b) *Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare. Volume II. Tomo II. Parte prima: Costruzioni in pietra – Stereotomia. Parte seconda: Strutture murali*. Roma: Editrice Librerie Dedalo. Ripr. facs. della prima traduzione italiana, a cura di Basilio Soresina, Mantova 1832, della sesta ed. originale, ristampata, riveduta e corretta da Guglielmo Pepe a Napoli nel 1840.
- Rodolico F (1965) *Le pietre delle città d'Italia*. Firenze: Le Monnier.
- Tassone P (2000) *Agglomerati lapidei. Produzione industriale – Caratteristiche – Prestazioni*. Milano: Ulrico Hoepli Editore.
- Tedeschi A (2014) *AAD_ Algorithms-aided design-parametric strategies using Grasshopper®*. Brienza (Pz): Le Penseur Publisher.
- Winkler E M (1994) *Stone in Architecture. Properties. Durability*. Berlino: Springer-Verlag.

Articoli e documentazione tecnica

- Materiali lapidei
 - Pietre naturali

Benavente D, del Cura M G, Fort R, Ordóñez S (2004) *Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength*. Engineering Geology, 74, 113-127.

Cantisani E, Garzonio C A, Ricci M, Vettori S (2013) *Relationships between the petrographical, physical and mechanical properties of some Italian sandstones*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 60, 321-332.

Cardani G, Meda A (1999) *Flexural strength and notch sensitivity in natural building stones: Carrara and Dionysos marble*. Construction and Building Materials, 13, 393-403.

Delalieux F, Cardell-Fernandez C, Torfs K, Vleugels G, Van Grieken R (2002) *Damage functions and mechanism equations derived from limestone weathering in field exposure*. Water, Air, and Soil Pollution, 139, 75-94.

Di Benedetto C, Cappelletti P, Favaro M, Graziano S F, Langella A, Calcaterra D, Colella A (2015) *Porosity as key factor in the durability of two historical building stones: Neapolitan Yellow Tuff and Vicenza Stone*. Engineering Geology, 193, 310-319.

Franzoni E, Sassoni E (2011) *Correlation between microstructural characteristics and weight loss of natural stones exposed to simulated acid rain*. Science of the Total Environment, 412-413, 278-285.

Gil-Martín L M, González-López M J, Grindlay A, Segura-Naya A, Aschheim M A, Hernández-Montes E (2012) *Toward the production of future heritage structures: Considering durability in building performance and sustainability – A philosophical and historical overview*. International Journal of Sustainable Built Environment, 1, 269-273.

Gussoni M (2015a) *Indagine congiunturale sul settore lapideo italiano. Anno 2014*. Internazionale Marmi e Macchine Carrara S.p.A.

Gussoni M (2015b) *Stone Sector 2015. Bilancio e prospettive del commercio internazionale dei prodotti lapidei. Annual Report and Prospects for the International Stone Trade*. Internazionale Marmi e Macchine Carrara S.p.A.

Gussoni M (2016) *Stone Sector 2016. Bilancio e prospettive del commercio internazionale dei prodotti lapidei. Annual Report and Prospects for the International Stone Trade*. Internazionale Marmi e Macchine Carrara S.p.A.

Jamshidi A, Reza Nikudel M, Khomehchiyan M (2013) *Predicting the long-term durability of building stones against freeze–thaw using a decay function model*. Cold Regions Science and Technology, 92, 29-36.

Karaca Z, Pekin A, Deliormanlı A H (2012) *Classification of dimension stone wastes*. Environmental Science and Pollution Research, 19, 2354-2362.

Kourkoulis S K, Ganniari-Papageorgiou E (2010) *Experimental study of the size- and shape-effects of natural building stones*. Construction and Building Materials, 24, 803-810.

Kucera V (2007) *EU 5FP RTD Project - Model for multi-pollutant impact and assessment of threshold levels for cultural heritage*. Publishable final report, Swedish Corrosion Institute.

Lan T T N, Nishimura R, Tsujino Y, Satoh Y, Thoa N T P, Yokoi M, Maeda Y (2005) *The effects of air pollution and climatic factors on atmospheric corrosion of marble under field exposure*. Corrosion Science, 47, 1023-1038.

Martínez-Martínez J, Benavente D, Gomez-Heras M, Marco-Castaño L, García-del-Cura M Á (2013) *Non-linear decay of building stones during freeze–thaw weathering processes*. Construction and Building Materials, 38, 443-454.

Ozguven A, Ozcelikb Y (2014) *Effects of high temperature on physico-mechanical properties of Turkish natural building stones*. Engineering Geology, 183, 127-136.

Rosso F, Jin W, Pisello A L, Ferrero M, Ghandehari M (2016a) *Translucent marbles for building envelope applications: Weathering effects on surface lightness and finishing when exposed to simulated acid rain*. Construction and Building Materials, 108, 146-153.

Silva A, de Brito J, Gaspar P L (2012) *Application of the factor method to maintenance decision support for stone cladding*. Automation in Construction, 22, 165-174.

Urosevic M, Sebastián-Pardo E, Cardell C (2010) *Rough and polished travertine building stone decay evaluated by a marine aerosol ageing test*. Construction and Building Materials, 24, 1438-1448.

Vázquez P, Alonso F J, Carrizo L, Molina E, Cultrone G, Blanco M, Zamora I (2013) *Evaluation of the petrophysical properties of sedimentary building stones in order to establish quality criteria*. Construction and Building Materials, 41, 868-878.

Yu S, Oguchi C T (2010) *Role of pore size distribution in salt uptake, damage, and predicting salt susceptibility of eight types of Japanese building stones*. Engineering Geology, 115, 226-236.

- Materiali lapidei artificiali

Almeida N, Branco F, Santos J R (2007) *Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures*. Building and Environment, 42, 810-819.

Dal Buono V (2007) *Pietre agglomerate tra natura e artificio*. Disponibile all'indirizzo: <http://www.architetturadi pietra.it>. Ultimo accesso: 18/05/2016

Dal Buono V (2012) *Pietre d'artificio*. Disponibile all'indirizzo: <http://www.architetturadi pietra.it>. Ultimo accesso: 18/05/2016

dos Santos J P L, Rosa L G, Amaral P M (2011) *Temperature effects on mechanical behaviour of engineered stones*. Construction and Building Materials, 25, 171-174.

Galetakis M, Soultana A (2016) *A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector*. Construction and Building Materials, 102, 769-781.

Sardinha M, de Brito J, Rodrigues R (2016) *Durability properties of structural concrete containing very fine aggregates of marble sludge*. Construction and Building Materials, 119, 45-52.

Stefanidou M, Pacht V, Papayianni I (2015) *Design and testing of artificial stone for the restoration of stone elements in monuments and historic buildings*. Construction and Building Materials, 93, 957-965.

Rana A, Kalla P, Verma H K, Mohnot J K (2016) *Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review*. Journal of Cleaner Production, 135, 312-331.

Rodrigues R, de Brito J, Sardinha M (2015) *Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge*. Construction and Building Materials, 77, 349-356.

- Metodi e strumenti di realizzazione e di progettazione
 - Sistemi innovativi di realizzazione

Beltrametti L, Gasparre A (2014) *La stampa 3D come nuova sfida tecnologica al lavoro manifatturiero*. In: Atti del XXVI Convegno annuale di Sinergie “Manifattura: quale futuro?”, Università degli studi di Cassino e del Lazio Meridionale, 197-213.

Chiellino G (2010) *Ecco D-shape il plotter che stampa la pietra in 3D*. Il sole 24 ore, 17 luglio. Disponibile all’indirizzo: <https://www.ilsole24ore.com>. Ultimo accesso: 14/02/2016

Dini E (2015) *UnaCasaTuttaDiUnPezzo*. Disponibile all’indirizzo: <https://www.d-shape.com>. Ultimo accesso: 12/11/2015

Esposito Corcione C, Palumbo E, Masciullo A, Montagna F, Torricelli M C (2018) *Fused Deposition Modeling (FDM): An innovative technique aimed at reusing Lecce stone waste for industrial design and building applications*. Construction and Building Materials, 158, 276-284.

Pignatelli F (2013) *L’evoluzione della stampa 3D e le sue applicazioni in campo museale*. SCIRES-IT (SCientific RESearch and Information Technology - Ricerca Scientifica e Tecnologie dell’Informazione), 3(2), 143-158.

Rippmann M, Block P (2011a) *Digital Stereotomy: Voussoir geometry for freeform masonry-like vaults informed by structural and fabrication constraints*. In: Proceedings of the IABSE-IASS Symposium 2011, London, UK.

Rippmann M, Block P (2011b) *New Design and Fabrication Methods for Freeform Stone Vaults Based on Ruled Surfaces*. In: Gengnagel C, Kilian A, Palz N, Scheurer F. (eds) Computational Design Modeling: Proceedings of the Design Modeling Symposium Berlin 2011, Springer Berlin Heidelberg, 181-189.

Rippmann M, Block P (2012) *Rethinking structural masonry: unreinforced, stone-cut shells*. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials, 166(6), 378-389.

Rippmann M, Curry J, Escobedo D, Block P (2013) *Optimising Stone-Cutting Strategies for Freeform Masonry Vaults*. In: Obrębski J B, Tarczewski R (eds.) Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2013, “BEYOND THE LIMITS OF MAN”, 1-7.

Tassinari A (2014) *D-shape, la stampante 3D italiana che stampa pietra in qualsiasi dimensione*. Disponibile all'indirizzo: <https://www.stampa3dforum.it>. Ultimo accesso: 14/02/2016

- Topologia

Dyskin A V, Estrin Y, Kanel-Belov A J, Pasternak E (2001) *A new concept in design of materials and structures: assemblies of interlocked tetrahedron-shaped elements*. *Scripta materialia*, 44, 2689-2694.

Estrin Y, Dyskin A V, Pasternak E (2011) *Topological interlocking as a material design concept*. *Materials Science and Engineering C*, 31, 1189-1194.

- Metodi di form-finding e analisi strutturale

Block P, Ochsendorf J (2007) *Thrust Network Analysis: A new methodology for three-dimensional equilibrium*. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 48(3), 167-173.

Block P, Van Mele T, Rippmann M (2015) *Structural Stone Surfaces – New Compression Shells Inspired by the Past*. *AD Architectural Design*, 85(5), 74-79.

Brocato M, Mondardini L (2012) *A new type of stone dome based on Abeille's bond*. *International Journal of Solids and Structures*, 49, 1786-1801.

Brocato M, Mondardini L (2015) *Parametric analysis of structures from flat vaults to reciprocal grids*. *International Journal of Solids and Structures*, 54, 50-65.

Clifford B (2013) *Thicker Funicular: Particle-Spring Systems for Variable-Depth Form-Responding Compression-Only Structures*. *International Conference on Structures and Architecture*.

Frearson A (2016) *Armadillo Vault is a pioneering stone structure that supports itself without any glue*. Disponibile all'indirizzo: <https://www.dezeen.com>. Ultimo accesso: 8/07/2016

Kilian A, Ochsendorf J (2005) *Particle-spring Systems for Structural form finding*. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 46(2), 77-84.

Lachauer L, Rippmann M, Block P (2010) *Form Finding to Fabrication: A digital design process for masonry vaults*. In: *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*.

Rippmann M, Lachauer L, Block P (2012) *Interactive Vault Design*. International Journal of Space Structures, 27(4), 219-230.

- Tecniche costruttive e linguaggi progettuali contemporanei

- Muratura

Acocella A (2006a) *Bagni termali a Vals di Peter Zumthor (1994-1996)*. Disponibile all'indirizzo: <http://www.architetturadi Pietra.it>. Ultimo accesso: 22/05/2016

Acocella A (2006b) *Opus incertum*. Disponibile all'indirizzo: <http://www.architetturadi Pietra.it>. Ultimo accesso: 15/10/2017

Acocella A (2012) *Tipi di muri irregolari*. Disponibile all'indirizzo: <http://www.architetturadi Pietra.it>. Ultimo accesso: 15/10/2017

Angelillo A (2017) *Eduardo Souto de Moura - Casa nel Bom Jesus, Dadim, Braga, Portogallo*. Disponibile all'indirizzo: <http://www.architetturadi Pietra.it>. Ultimo accesso: 12/07/2017

Argenti M (2018) *Vatican Chapels. Al posto di un padiglione*. In: Dalla 16. Biennale di Architettura. Rassegna di Architettura e Urbanistica, 155, 21-30.

Corvino E (2014) *Materiale-digitale: l'evoluzione della pietra nell'era informatica*. Disponibile all'indirizzo: <https://enricacorvino.wordpress.com>. Ultimo accesso: 3/05/2016

Frearson A (2018) *Vatican City presents woodland chapels built by architects including Foster, Souto de Moura and Flores & Prats*. Disponibile all'indirizzo: <https://www.dezeen.com>. Ultimo accesso: 14/01/2019

Jensen & Skodvin Architects (2011) *Mortensrud church*. Disponibile all'indirizzo: <https://www.archdaily.com>. Ultimo accesso: 7/06/2016

Nadotti C (2018) *Unesco, muretti a secco patrimonio dell'Umanità*. La Repubblica, 28 novembre. Disponibile all'indirizzo: <https://www.repubblica.it>. Ultimo accesso: 14/01/2019

Norberg-Schulz C (2012) *Raffaele Cavadini. Nuove infrastrutture comunali. Iragna, Canton Ticino, Svizzera*. Disponibile all'indirizzo: <http://www.architetturadi Pietra.it>. Ultimo accesso: 6/06/2016

Pavan V (2013) *Antón García-Abril - Scuola di Alti Studi Musicali della Galizia Santiago de Compostela, Spagna, 1999-2003*. Disponibile all'indirizzo: <http://www.architetturadi pietra.it>. Ultimo accesso: 7/09/2017

Redazionale (1997a) *Le Terme di Vals*. Casabella, 648, 56-75.

Redazionale (1999a) *Deposito di vini a Vauvert*. Detail, 6, 969-971.

Redazionale (1999b) *Edifici comunali presso Iragna, Svizzera*. Detail, 6, 973-976.

Redazionale (2003a) *Mortensrud-Kirche in Oslo*. Detail, 11, 1264-1266.

Ricci G (2018) *Architettura vaticana. Un'isola e le sue undici cappelle*. Disponibile all'indirizzo: <https://www.domusweb.it>. Ultimo accesso: 14/01/2019

Turrini D (2009) *Architetture contemporanee in pietra strutturale*. Disponibile all'indirizzo: <http://www.architetturadi pietra.it>. Ultimo accesso: 4/12/2015

Zaera A (1993) *Stone House*. In: Herzog & de Meuron_1983-1993. El Croquis, 60, 66-69.

Zerbi S (2009) *Costruzione in pietra massiccia in Svizzera*. Disponibile all'indirizzo: <http://www.architetturadi pietra.it>. Ultimo accesso: 18/05/2016

Zerbi S (2010) *La pietra "pretagliata" e la ricostruzione in Francia dopo la Seconda Guerra Mondiale*. Disponibile all'indirizzo: <http://www.architetturadi pietra.it>. Ultimo accesso: 8/06/2016

- Pietra armata

Donati M C (2001) *Il nuovo Parlamento inglese*. Modulo, 268, 40-48.

Metalssi O O, Douthe C, Presepi M, Mondardini L, Brocato M (2013) *Experimental study on reinforced stone beams*. Engineering Structures, 54, 1-8.

Paschini L (2000) *Architetti per la metropolitana di Londra*. Casabella, 678, 64-83.

Pedreschi R (2013) *A feasibility study of post-tensioned stone for cladding*. Construction and Building Materials, 43, 225-232.

Turrini D (2007a) *Portcullis House. Nuova sede per il parlamento britannico*. Disponibile all'indirizzo: <http://www.architetturadi pietra.it>. Ultimo accesso: 29/05/2016

Turrini D (2009) *Architetture contemporanee in pietra strutturale*. Disponibile all'indirizzo: <http://www.architetturadi Pietra.it>. Ultimo accesso: 4/12/2015

Ye Y, Guo Z, Liu Y, Wang L (2014) *Flexural behavior of stone beams reinforced with prestressed NSM CFRP bars*. *Construction and Building Materials*, 54, 466-476.

▪ Gabbioni

Astbury J (2017) *ABIR's Shoreham house is clad with pebbles colour-matched to the beach*. Disponibile all'indirizzo: <https://www.architectsjournal.co.uk>. Ultimo accesso: 8/01/2018

Betsky A (1998) *Azienda Vinicola Dominus, Yountville, California*. *Domus*, 803, 8-17.

CIRIA, CUR, CETMEF (2007) *The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)* London: C683, CIRIA.

Conti L, Barbari M, Monti M (2016) *Design of Sustainable Agricultural Buildings. A Case Study of a Wine Cellar in Tuscany, Italy*. *Buildings*, 6(17), 1-8.

Cumo F, Astiaso Garcia D, Stefanini V, Tiberi M (2015) *Technologies and strategies to design sustainable tourist accommodations in areas of high environmental value not connected to the electricity grid*. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 10(1), 20-28.

Enviromesh (2007) *Designing with Gabions. A reference guide for Architectural Gabion Cladding and Free Standing Walls*. Disponibile all'indirizzo: <http://www.enviromeshgabions.com>. Ultimo accesso: 22/05/2018

Enviromesh (2017) *A design guide for building cladding & freestanding walls_ volume 2*. In: Enviromesh design guide series. Disponibile all'indirizzo: <http://www.enviromeshgabions.co.uk>. Ultimo accesso: 22/05/2018

Enviromesh *Enviromesh. Specialist in the design and supply of all welded & woven gabion systems*. Disponibile all'indirizzo: <http://www.enviromeshgabions.com>. Ultimo accesso: 22/05/2018

Guarnieri G, Mascazzini R *Sei Unità*. Disponibile all'indirizzo: <https://www.theplan.it>. Ultimo accesso: 18/10/2017

Griffiths A (2014) *House in the Landscape by Kropka Studio features walls built from rock-filled cages*. Disponibile all'indirizzo: <https://www.dezeen.com>. Ultimo accesso: 8/01/2018

Griffiths A (2016) *Shoreham Beach House by ABIR Architects features gabion walls filled with beach pebbles*. Disponibile all'indirizzo: <https://www.dezeen.com>. Ultimo accesso: 8/01/2018

Kropka Studio (2014) *House in the Landscape*. Disponibile all'indirizzo: <https://www.archdaily.com>. Ultimo accesso: 15/10/2017

Mairs J (2015) *Haverstock uses stone-filled cages to disguise police shooting range in disused quarry*. Disponibile all'indirizzo: <https://www.dezeen.com>. Ultimo accesso: 15/10/2017

Milano P (2010) *Environmental assessment (LCA) as guide parameter in choosing eco-efficient materials*. In: CESB10 Central Europe towards Sustainable Building from Theory to practice. Disponibile all'indirizzo: <http://www.cesb.cz>. Ultimo accesso: 29/05/2018

Neermal M (2012) *The use of gabions in hydraulic applications*. Civil Engineering, 37-39. Disponibile all'indirizzo: http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/civil_engineering. Ultimo accesso: 30/05/2018

Pagliari F (2006) *Villa a Garrigàs – Girona, Spagna. Boncompte & Font Architectes*. The Plan, 16, 54-63.

Pousse J F (2000) *Around the rock. Logements, Montpellier*. Techniques & Architecture, 448, 72-75.

Redazionale (1997b) *Dominus Winery in Napa valley*. In: Herzog & de Meuron_1993-1997. El Croquis, 84, 182-191.

Redazionale (2003b) *Wohnhaus in Stadtbergen*. Detail, 11, 1274-1277.

Redazionale (2007) *Edouard Francois. Complesso di appartamenti a Montpellier*. L'industria delle costruzioni, 397, 70-75.

Redazionale (2016) *Sei case nel fienile*. Disponibile all'indirizzo: <https://www.domusweb.it>. Ultimo accesso: 18/10/2017

Redazionale (2017) *Shoreham Beachside Home, Shoreham by Sea*. Disponibile all'indirizzo: <https://www.ribaj.com>. Ultimo accesso: 15/10/2017

Turrini D (2007b) *Architetture di gabbioni*. Disponibile all'indirizzo: <http://www.architetturadi Pietra.it>. Ultimo accesso: 5/06/2016

- Rivestimenti sottili

Acocella A, Turrini D (2006) *Sulle ali di Perseo (II parte)*. Disponibile all'indirizzo: <http://www.architetturadi Pietra.it>. Ultimo accesso: 14/01/2019

Breun R (2012) *Neue Staatsgalerie / a lesson from the past*. Disponibile all'indirizzo: <https://www.e-architect.co.uk>. Ultimo accesso: 14/01/2019

Kroll A (2011) *AD Classics: Neue Staatsgalerie / James Stirling*. Disponibile all'indirizzo: <https://www.archdaily.com>. Ultimo accesso: 14/01/2019

Lelli G (2009) *Uffici del Presidente, Berlino (1995-1998) di Gruber + Kleine – Kraneburg*. Disponibile all'indirizzo: <http://www.architetturadi Pietra.it>. Ultimo accesso: 14/01/2019

Souza E (2017) *Centro Galego de Arte Contemporânea, de Álvaro Siza, pelas lentes de Fernando Guerra*. Disponibile all'indirizzo: <https://www.archdaily.com.br>. Ultimo accesso: 14/01/2019

Turrini D (2011) *Nient'altro che materia e spazio. Architetture litiche di Aires Mateus & Associados*. Disponibile all'indirizzo: <http://www.architetturadi Pietra.it>. Ultimo accesso: 14/01/2019

- Studio della prestazione termico-energetica

Agliata R, Greco R, Mollo L, Catalano E, Minardo A, Zeni L (2017) *Test preliminari per l'uso del DTS attivo nella misura non invasiva dell'umidità del tufo*. In: Bernardini G, Di Giuseppe E, a cura di. *Colloqui.AT.e 2017. DEMOLITION OR RECONSTRUCTION?*. Monfalcone (Gorizia): Edicom edizioni.

Asan H (2006) *Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials*. *Building and Environment*, 41, 615-620.

Aste N, Angelotti A, Buzzetti M (2009) *The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings*. *Energy and Buildings*, 41, 1181-1187.

Aste N, Leonforte F, Manfren M, Mazzon M (2015) *Thermal inertia and energy efficiency – Parametric simulation assessment on a calibrated case study*. *Applied Energy*, 145, 111-123.

Castaldo V L (2015) *Thermal-energy analysis of natural ‘cool’ stone aggregates as passive cooling and global warming mitigation technique*. *Urban Climate*, 14, 301-314.

Crawley D B, Hand J W, Kummert M, Griffith B T (2008) *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*. *Building and Environment*, 43, 661-673.

De Berardinis P, Rotilio M, Marchionni C, Friedman A (2014) *Improving the energy-efficiency of historic masonry buildings. A case study: A minor centre in the Abruzzo region, Italy*. *Energy and Buildings*, 80, 415-423.

DesignBuilder, *DesignBuilder EnergyPlus Simulation Documentation, 2008-2011*.

Di Perna C, Stazi F, Casalena A U, D’Orazio M (2011) *Influence of the internal inertia of the building envelope on summertime comfort in buildings with high internal heat loads*. *Energy and Buildings*, 43, 200-206.

Evola G, Marletta L, Costanzo V, Caruso G (2015) *Different Strategies for Improving Summer Thermal Comfort in Heavyweight Traditional Buildings*. *Energy Procedia*, 78, 3228-3233.

Gagliano A, Patania F, Nocera F, Signorello C (2014) *Assessment of the dynamic thermal performance of massive buildings*. *Energy and Buildings*, 72, 361-370.

Kontoleon K J, Theodosiou T G, Tsikaloudaki K G (2013) *The influence of concrete density and conductivity on walls’ thermal inertia parameters under a variety of masonry and insulation placements*. *Applied Energy*, 112, 325-337.

Martín S, Mazarrón F R, Cañas I (2010) *Study of thermal environment inside rural houses of Navapalos (Spain): The advantages of reuse buildings of high thermal inertia*. *Construction and Building Materials*, 24, 666-676.

Martucci A (2016) *Simulazione delle prestazioni energetiche in regime dinamico_Introduzione a EnergyPlus*. Disponibile all’indirizzo: <https://issuu.com>. Ultimo accesso: 22/11/2016

Minardo A, Catalano E, Zeni L, Agliata R, Greco R, Mollo L (2016) *Measurement of moisture content in masonry materials by active distributed optical fiber sensors*. In: *Proceedings of the 18th Italian National Conference on Photonic Technologies (Fotonica 2016)*, IET, 1-3.

Pacheco-Torgal F (2014) *Eco-efficient construction and building materials research under the EU Framework Programme Horizon 2020*. *Construction and Building Materials*, 51, 151-162.

Pisello A L, Pignatta G, Castaldo V L, Cotana F (2014) *Experimental Analysis of Natural Gravel Covering as Cool Roofing and Cool Pavement*. Sustainability, 6, 4706-4722.

Rosso F, Pisello A L, Cotana F, Ferrero M (2014) *Integrated Thermal-Energy Analysis of Innovative Translucent White Marble for Building Envelope Application*. Sustainability, 6, 5439-5462.

Rosso F, Pisello A L, Cotana F, Ferrero M (2016b) *On the thermal and visual pedestrians' perception about cool natural stones for urban paving: A field survey in summer conditions*. Building and Environment, 107, 198-214.

Salata F, Golasi I, Domestico U, Banditelli M, Lo Basso G, Nastasi B, de Lieto Vollaro A (2017) *Heading towards the nZEB through CHP+HP systems. A comparison between retrofit solutions able to increase the energy performance for the heating and domestic hot water production in residential buildings*. Energy Conversion and Management, 138, 61-76.

Stazi F, Angeletti F, di Perna C (2012) *Traditional Houses with Stone Walls in Temperate Climates: The Impact of Various Insulation Strategies*. In: Almusaed A, eds. Effective Thermal Insulation - The Operative Factor of a Passive Building Model. Intech, 45-60. Disponibile all'indirizzo: <http://www.intechopen.com>. Ultimo accesso: 11/12/2016

Stazi F, Vegliò A, Di Perna C, Munafò P (2013) *Experimental comparison between 3 different traditional wall constructions and dynamic simulations to identify optimal thermal insulation strategies*. Energy and Buildings, 60, 429-441.

Stazi F, Bonfigli C, Tomassoni E, Di Perna C, Munafò P (2015) *The effect of high thermal insulation on high thermal mass: Is the dynamic behaviour of traditional envelopes in Mediterranean climates still possible?*. Energy and Buildings, 88, 367-383.

Stéphan E, Cantin R, Caucheteux A, Tasca-Guernouti S, Michel P (2014) *Experimental assessment of thermal inertia in insulated and non-insulated old limestone buildings*. Building and Environment, 80, 241-248.

Ulgen K (2002) *Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor*. Energy and Buildings 34, 273-278.

Normative

Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (2013) *Linee Guida per la certificazione di idoneità tecnica all'impiego e l'utilizzo di prodotti in rete metallica a doppia torsione*. Disponibile all'indirizzo: cslp.mit.gov.it. Ultimo accesso: 29/05/2018

Decreto legislativo 29/12/2006, n. 311. Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico in edilizia. Disponibile all'indirizzo: <http://www.gazzettaufficiale.it>. Ultimo accesso: 22/09/2017

Decreto Ministeriale 26/6/2009. Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici. Disponibile all'indirizzo: <http://www.gazzettaufficiale.it>. Ultimo accesso: 22/09/2017

DPR 2/4/2009, n. 59. Regolamento di attuazione dell'art.4, comma 1, lettere a) e b) del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia. Disponibile all'indirizzo: <http://www.gazzettaufficiale.it>. Ultimo accesso: 22/09/2017

UNI EN ISO 13786. Prestazione termica dei componenti per edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di Calcolo.

SITOGRAFIA

<https://www.abir.co.uk>

<https://www.archdaily.com>

<https://www.archi-guide.com>

<http://www.architetturadi Pietra.it>

<https://www.architizer.com>

<http://www.atelierfallacara.it>

<http://www.botta.ch>

<http://www.block.arch.ethz.ch>

<https://www.boncompte-font.com>

<https://www.campobaeza.com>

<http://www.desamanera.com>

<http://www.d-shape.com>

<https://www.dezeen.com>

<http://www.enviromeshgabions.co.uk>

<http://www.f8architecture.com>

<https://www.gmp-architekten.com>

<https://www.haverstock.com>

<https://www.herzogdemeuron.com>
<https://www.hopkins.co.uk>
<http://www.hy-ten.co.uk>
<http://www.ianritchiearchitects.co.uk>
<http://www.jeannouvel.com>
<https://www.johnstonarchitects.com>
<https://www.maccaferri.com>
<https://www.mateo-arquitectura.com>
<https://www.maxdudler.de>
<https://www.mg-au.fr>
<https://www.ortner-ortner.com>
<http://www.sancho-madrideos.com>
<https://www.starh.bg>
<https://www.studiomax.co.za>
<https://www.theplan.it>
<https://www.titusbernhardarchitekten.com>