

Sapienza – Università di Roma,
Dottorato di Ricerca in Ingegneria dell'Architettura e dell'Urbanistica.
Curriculum in Ingegneria Edile/Architettura, XXX Ciclo.
Anno accademico 2017/18

Metodologie progettuali digitali per l'ottimizzazione, il controllo e la gestione dei processi di realizzazione dell'architettura



Dottorando: arch. Francesco Livio Rossini

Supervisore: Prof. ing. Antonio Fioravanti

Sapienza – Università di Roma,
Dottorato di Ricerca in Ingegneria dell'Architettura e dell'Urbanistica.
Curriculum in Ingegneria Edile/Architettura, XXX Ciclo.
Anno accademico 2017/18

Metodologie progettuali digitali per
l'ottimizzazione, il controllo e la gestione
dei processi di realizzazione dell'architettura

Dottorando: arch. Francesco Livio Rossini

Supervisore: Prof. ing. Antonio Fioravanti

Indice

0. Le criticità della realizzazione del progetto di architettura nell'era digitale.....	1
1. Storia dei processi realizzativi dell'architettura: storia, problematiche e metodologie di ottimizzazione, controllo e gestione.....	7
1.1. Progetto e costruzione nell'evo antico.....	8
1.2. Gestione del processo edilizio nel tardo-antico: l'importanza della trasmissione della conoscenza	19
1.3. Il processo edilizio medioevale: la sfida tecnologica delle cattedrali e la definizione degli attori nel cantiere medioevale	24
1.4. Il Rinascimento. La gestione del processo come motore di innovazione nell'analisi di due opere iconiche: le cupole di Santa Maria del Fiore a Firenze e di San Pietro in Vaticano	32
1.5. Dall'Evo moderno alla Prima rivoluzione industriale	41
1.6. La nascita delle metodologie standardizzate di processo nella Seconda rivoluzione industriale	50
1.7. Dalla Terza alla Quarta rivoluzione industriale: verso la digitalizzazione del processo edilizio	54
1.8. Conclusioni.....	65
2. Metodologie di gestione e rappresentazione del processo edilizio	71
2.1. Strategie di gestione della complessità della realizzazione del progetto di architettura.....	72
2.2. Tecniche di gestione del tempo	81
2.2.1. Il diagramma di Gantt	83
2.2.2. Tecniche reticolari: CPM, PERT e ulteriori evoluzioni	85
2.3. Un nuovo approccio: la Costruzione Snella (<i>Lean Construction</i>).....	88
2.3.1. Location-Based Management: definire l'equilibrio della gestione del processo mediante la <i>Line of Balance</i> – LOB	100

2.3.2. Last-Planner system	108
2.4. Conclusioni	112
3. Processi realizzativi dell'architettura: la gestione del rischio nell'Era digitale	115
3.1. Ottimizzazione, controllo e gestione dei processi realizzativi: la modellazione informativa dell'edificio – BIM.....	119
3.2. Le dimensioni del BIM: la gestione del tempo (4D), dei costi (5D) e le frontiere del <i>nD</i>	124
3.3. Strumenti digitali per il controllo della qualità del processo	127
3.4. Il coordinamento della sicurezza	130
3.5. Conclusioni.....	137
4. Superamento dei limiti attuali mediante implementazione di metodologie e tecnologie ICT avanzate	143
4.1. Teoria e stato dell'arte della modellazione degli agenti in architettura	145
4.2. Il modello <i>Agent-BIM</i> per la previsione dei tempi e dei costi delle attività di cantiere	149
4.2.1. Sommario: strutturazione del processo generale di gestione degli agenti espresso in pseudo-codice	152
4.2.2. Definizione del luogo di lavoro <room>.....	154
4.2.3 Interazione tra il Sistema Multi-Agente e la <room>	157
4.4. Implementazione logica e operativa del modello <i>Agent-BIM</i>	167
4.5. Conclusioni.....	169
5.0. Casi-studio per la validazione e verifica del modello proposto: tre progetti realizzati.....	170
5.1. Chiesa <i>Santa Maria Assunta</i> a Roccasecca (anni '60): ristrutturazione totale per adeguamento architettonico, liturgico e impiantistico.....	173
5.1.1. Premessa: l'edilizia di culto nel contesto dell'espansione post-bellica dei tessuti urbani	176
5.1.2. Sperimentazione del metodo: caso 1, cantiere <i>non promiscuo</i>	177
5.1.3. Conclusioni.....	182

5.2. Chiesa <i>San Giovanni Battista</i> a Sant'Angelo in Theodice, Cassino (anni '50, progetto Prof. Nicolosi): adeguamento architettonico, liturgico, impiantistico e miglioramento sismico	185
5.2.1 Premessa: l'importanza del recupero delle strutture e della memoria storica dei luoghi della comunità.....	187
5.2.2 Sperimentazione del metodo: caso 2, <i>cantiere promiscuo</i>	189
5.2.3 Conclusioni.....	195
5.3. <i>Santuario Rupestre Sant'Angelo in Asprano</i> a Roccasecca (XI sec.), restauro degli affreschi alto-medievali	198
5.3.1 Premessa: lux ab petra.....	200
5.3.2 Sperimentazione del metodo: caso 3, cantiere <i>su bene culturale in condizioni logistiche estreme</i>	203
5.3.3 Conclusioni.....	209
6. Conclusioni: possibilità della metodologia sperimentata nell'ottimizzazione dei processi realizzativi.....	210
Bibliografia	214
Capitolo 0	214
Capitolo 1	215
Capitolo 2	219
Capitolo 3	222
Capitolo 4	227
Capitoli 5 e 6	229
Indice delle figure	230
Appendice	236
A.1. Caso studio n.1: Chiesa Santa Maria Assunta a Roccasecca (anni '60): ristrutturazione totale per adeguamento architettonico, liturgico e impiantistico. Cantiere non promiscuo.....	236

A.2. Caso studio n. 2: Chiesa <i>San Giovanni Battista</i> a Sant'Angelo in Theodice, Cassino (anni '50): adeguamento architettonico, liturgico, impiantistico e miglioramento sismico	240
A.3. Caso studio n. 3: <i>Santuario Rupestre Sant'Angelo in Asprano</i> a Roccasecca, restauro degli affreschi alto-medievali	244

0. Le criticità della realizzazione del progetto di architettura nell'era digitale

Il percorso che porta un progetto di architettura dalla propria ideazione al completamento dell'opera è un processo connotato da una elevata complessità, data sia dalla quantità di variabili presenti, sia dalla loro interdipendenza.

Tali condizioni implicano che il fattore decisivo per poter *progettare la costruzione dell'idea* è nella esplicitazione di queste variabili e interdipendenze che entrano in gioco, in direzione dell'ottimizzazione del livello di integrazione reciproca, tenendo fede alla necessità di mantenere una *visione* progettuale d'insieme.

Perciò, per salvaguardare l'idea generatrice dell'architettura e ottimizzare le risorse a disposizione per realizzarla, l'uomo di volta in volta ha adeguato le metodologie e tecniche in suo possesso alle mutate necessità e, ad un più alto livello cognitivo, si è ingegnato nella definizione della strategia operativa preferibile.

Lungo il cammino della storia perciò, al variare delle esigenze vi è stata una corrispondente evoluzione degli apparati tecnologici tale da incidere addirittura sulle aspettative e le abitudini delle società del tempo. Nel caso dell'arte difatti, si può rilevare quanto l'applicazione di metodologie abbia, di pari passo con l'accresciuta *conoscenza* dell'utente-progettista, cambiato la storia dell'arte stessa. In accordo con Antonino Saggio ne "Lo Strumento di Caravaggio" (2007) possiamo affermare che:

"Lo strumento di Caravaggio non è ausilio "tecnico", "trucco miracoloso" o "invenzione prodigiosa" (che consentirebbe in modalità semi-automatica la creazione della sua iper-realistica pittura), ma al contrario è un elemento di crisi, di difficoltà e di sfida che impone la nascita di una nuova visione".

Pertanto, questa tesi focalizza la ricerca sull'indagine delle nuove possibilità date dallo sviluppo delle *Information and Communication Technologies* – ICT per gestire i processi realizzativi dell'architettura, partendo dalla verifica dei limiti della pratica corrente per sperimentare metodologie innovative supportate da tecniche digitali, con l'obiettivo di cogliere quale *visione* sia adeguata allo spirito del nostro tempo. Difatti, in questo campo è evidente che le innovazioni nel settore dell'ICT non devono configurarsi come un percorso parallelo rispetto al dibattito sociale e culturale legato all'architettura, bensì è necessario che le diverse istanze si influenzino reciprocamente, come è successo per lo studio della prospettiva nelle opere citate dal Caravaggio e in quelle di Piero della Francesca, oppure

nell'implementazione degli strumenti digitali di modellazione geometrica attuata da Gehry (Pascual, 1998). Risulta chiaro quindi che, oltre all'aumento delle prestazioni degli strumenti tecnologici, è necessario adeguare le consuetudini, le metodologie, le conoscenze e le prospettive di un settore il quale, altrimenti, rischia di perdere l'occasione che il galoppante sviluppo del mondo digitale offre; altrimenti, lo stesso sviluppo impone un costante aggiornamento dei risultati raggiunti, evitando così il rischio di perdere posizioni dominanti e divenire, in breve tempo, obsoleti rispetto alle esigenze del settore (fig. 01).

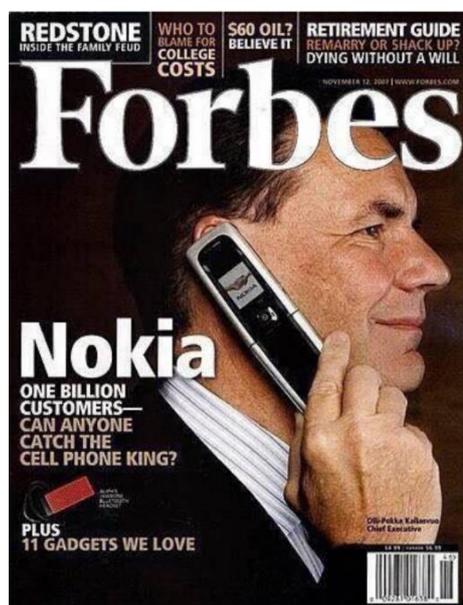


Figura 01. I risultati del mancato aggiornamento del paradigma: nel 2007, il mercato della telefonia cellulare era praticamente dominato dalla Nokia ®. A gennaio dello stesso anno Steve Jobs presentò l'iPhone ® che, nel giro di poco tempo, monopolizzerà le preferenze dell'utenza e diventerà il costante punto di riferimento del settore. *Forbes*, n. 12, Novembre 2007.

Non si sottovaluti inoltre, che i risultati dei dirompenti sviluppi tecnologici non riscuotono sempre riscontri positivi, se non adeguatamente introiettati nella cultura e nella coscienza dell'epoca: si pensi all'esempio dei *Google glass*™ che, a fronte di un concreto avanzamento nell'estensione delle possibilità informative virtuali nel contesto reale, ancora non possono usufruire né di una infrastruttura digitale stabile, né di una matura predisposizione culturale da parte dell'utenza. Tali fattori hanno decretato dunque l'insuccesso commerciale e l'uscita dal mercato di una tra le

tecnologie più promettenti degli ultimi anni, confermando così la consolidata prassi di affidarsi esclusivamente a metodologie conosciute e continuamente consolidate nella pratica, rispetto al percorrere nuove strade.

Il mondo della progettazione non è immune da questi fenomeni di ritrosia verso l'innovazione: le procedure progettuali di largo uso infatti, ancora mostrano diverse carenze, quali lo scarso impiego di modelli informativi dell'edificio oppure la frammentazione della conoscenza secondo "compartimenti stagni" costituiti dai raggruppamenti progettuali che, ognuno per propria competenza, immagazzinano i propri metodi e risultati in "silos mentali" (Clausing, 1994), prediligendo quindi la suddivisione del lavoro in fasi specialistiche da verificare in maniera consequenziale-lineare. Questo comporta la presenza di tanti progetti parziali e settoriali paralleli verificati solamente all'interno del proprio dominio di appartenenza, non risultano integrati tra loro, nonostante gli attuali strumenti *Computer Aided Architectural Design* – CAAD. Infatti questi, nonostante le loro note potenzialità nel concretizzare un approccio progettuale collaborativo, non sono adeguatamente utilizzati in una visione di progettazione integrata (Carrara et Fioravanti, 2001), supportata dalle reti digitali.

Le tecniche di gestione del progetto complesso sono ormai ampiamente verificate e catalogate, secondo diverse categorie – sia operative che logiche – consolidate da anni. Partendo dalla posizione razionalista-scientista di stampo tardo ottocentesco, formalizzata dapprima da Rankine¹ e poi affinata e diffusa dalla scuola taylorista, il ragionamento tipico dell'ingegneria era inquadrato secondo il metodo *deduttivo* (dal postulato al teorema). Questo, infatti, è particolarmente evidente negli approcci puramente analitici: date le caratteristiche di un elemento e stabilite le relative condizioni al contorno, ne scaturiscono i comportamenti prevalenti.

D'altro canto, l'approccio *induttivo*, si basa sull'osservazione critica del mondo reale, al fine di estrapolarne la conoscenza empirica e dunque formalizzarle in regole di buona pratica; da qui quindi è possibile indurre concettualmente, adattando la base di conoscenza acquisita al caso specifico. Tali processi di adeguamento, guidati dall'esperienza del tecnico e dalla sua capacità di imprimere una visione strategica alla risoluzione del problema, permettono quindi di

¹ William John Macquorn Rankine (1820-1872): oltre agli importanti contributi nel campo della Meccanica e della Scienza delle costruzioni, è ricordato per i suoi approfondimenti nel campo della *teoria della gestione dei processi*, in anticipo di circa un secolo sui fondatori della Scienza dell'Organizzazione. Difatti, già a metà ottocento notava che "*l'uso delle leggi fisiche rende possibile prevedere accuratamente, attraverso la deduzione, il comportamento delle strutture o delle macchine, e questo rende quindi possibile individuare la soluzione migliore possibile, l'ottimo*" (cfr. Koskela et al, 2017).

raggiungere uno stato *soddisfacente* rispetto agli obiettivi del quadro esigenziale di riferimento.

Nella gestione della realizzazione dell'architettura questi due approcci sono stati declinati secondo le metodologie *push and pull*: la prima, si basa sulla spinta (*push*) della catena di produzione sulla base del rispetto di condizioni di partenza iniziali; la seconda invece, viene trainata (*pull*) a seconda delle condizioni e degli adeguamenti volta per volta raggiunti, basandosi quindi sull'osservazione del mondo reale e sulla previsione di come il processo si possa adeguare alle dinamiche condizioni al contorno.

Nella peculiarità del settore delle costruzioni la gestione della produzione *push-based* è stata applicata attraverso il Metodo del Percorso Critico (*Critical Path Method - CPM*) negli anni '60, di impronta chiaramente razionalista (Koskela et al. 2014). Nell'applicazione di questo metodo, il riferimento da seguire sono unicamente *le condizioni ideali ipotizzate* della linea produttiva, lasciando il minimo spazio alle complesse variabili date dal mondo reale che, invece, in un contesto così dinamico come il cantiere, divengono decisive per l'ottenimento del risultato.

Nella ricerca di metodologie di ottimizzazione del settore delle costruzioni, una strada percorsa da tempo è l'applicazione delle tecniche nate nell'ambito della manifattura dei veicoli, ovvero l'approccio snello (*lean manufacturing*).

Questo consiste nell'ottimizzare l'impiego delle risorse disponibili in un processo, minimizzando i tempi morti, il sottoimpiego di aree di lavoro e la sovrapproduzione localizzata. Queste sono le inefficienze che, di fatto, apportano inutili costi e inefficienze tali da far divenire sistematicamente ogni progetto una rincorsa verso l'ignoto.

Pertanto, il necessario approccio integrato al *project management* consente non solo un cambio delle modalità operative e gestionali di un processo realizzativo dell'architettura, ma addirittura un *approccio cognitivo diverso* capace di avvicinare le competenze degli attori con l'obiettivo di giungere ad una condizione soddisfacente rispetto ai requisiti di progetto e addivenire, alla *migliore* soluzione possibile in modo condiviso, (Froese, 2010). In questo contesto perciò, è necessario dotare gli attori del processo di strumenti "aggregatori" capaci di tenere sempre in collegamento le variabili progettuali e, quindi, la creazione di una conoscenza *digitale* formalizzata in modo esplicito, catalogando elementi impiegati in processi precedenti e, soprattutto le loro relazioni. Tale condizione, in questi anni, sembra sempre più a portata di mano (*fig. 02*).

A differenza della prima ondata del CAAD, dove la minore diffusione degli strumenti e delle reti di comunicazione dati metteva in secondo piano il problema della collaborazione e condivisione, nella seconda fase invece, a cavallo tra gli anni

'80 e '90, la presenza capillare degli strumenti digitali e la progressiva costruzione delle necessarie infrastrutture informatiche hanno determinato la possibilità di poter finalmente condividere piattaforme collaborative e aumentare la qualità dei lavori attraverso continui e reciproci scambi di conoscenza, seppur non formalizzati compiutamente.

Ora, nel pieno della *terza ondata* caratterizzata invece dall'adozione di tecnologie altamente efficaci nella definizione esatta di un componente e degli oggetti edilizi in generale quali il *Building Information Modeling* – BIM e da piattaforme di interoperabilità come l'*Industry Foundation Classes* – IFC, ove si arriva alla costruzione digitale del progetto (Fischer et Kunz, 2004).

Pertanto, la sfida consiste nell'andare *oltre* le potenzialità attuali attraverso la collaborazione, intesa come governo del flusso di informazioni e conoscenza tra gli attori, puntando, all'accrescimento reciproco della padronanza dei problemi progettuali e alla possibilità di interagire con modelli *simulativi*, capaci di prefigurare la realizzazione e il comportamento del progetto. Il vantaggio è quindi nel poter testare in anticipo sia le soluzioni progettuali, sia le possibilità costruttive, in una continua evoluzione del progetto digitale.

In tal modo, grazie all'anticipo con il quale è possibile definire le scelte e le loro conseguenze, si possono ottimizzare le risorse in gioco evitando, come purtroppo accade nella quasi totalità delle opere edili, varianti in corso d'opera con le note ricadute sia in termini di tempi che di costi, sia anche sulla qualità globale del processo di realizzazione dell'architettura.

La ricerca perciò non verte più sulla distinzione tra approcci induttivi o deduttivi, ma bensì su come sia possibile e necessario impiegare la potenza di calcolo disponibile per ottimizzare e gestire i processi, considerata l'attuale possibilità di disporre della potenza di calcolo digitale necessaria a gestire grandi moli di operazioni matematiche, dunque i processi di tecniche di Intelligenza Artificiale, e integrare le stesse nei processi di realizzazione dell'architettura.

Nello specifico di questa ricerca, l'integrazione avviene legando al modello informativo dell'edificio digitale (BIM) un ambiente-specchio² modellato da entità autonome intelligenti (*Autonomous Agent*). Tali agenti sono caratterizzati da un insieme regole da rispettare, relativi obiettivi da conseguire e, in relazione a questi,

² Inteso come il modello informativo virtuale dell'edificio ove, oltre alle geometrie e informazioni degli elementi, sono considerate anche le regole *relazionali* tra i vari oggetti quali la integrabilità tra diversi materiali e tecnologie, la propedeuticità di montaggio, la rispondenza dei sistemi alle diverse normative di settore (energetica, statica etc.)

mostrano un *comportamento*, ovvero le modalità con le quali, applicando i loro sistemi di regole a seguito di uno stimolo esterno, si tende a raggiungere un obiettivo. Gli agenti in questo caso rappresentano gli elementi contenuti nel modello informativo dell'edificio e i componenti esterni che influiscono su tali elementi edilizi; questi sono il contesto, inteso come l'organizzazione del cantiere scaturita dalle verifiche iterative di fattibilità e le risorse da impiegare, definite a loro volta secondo le mansioni e il grado di produttività che sono in grado di ottenere.

Ci si propone quindi di vedere con occhi nuovi come non vi sia più una netta separazione tra la fase progettuale e quella costruttiva, potendo contare su questi strumenti di supporto strategico progettuali in senso esteso del termine, applicabili in modo generale all'intero processo edilizio prefigurando accuratamente la ricaduta delle scelte in termini di realizzabilità: in sintesi, ci si orienta verso la formalizzazione di ambienti digitali capaci di *co-costruire* virtualmente, tenendo conto dei risvolti manutentivi legati alla fase gestionale, l'edificio ben prima dell'apertura dei lavori. In questo modo diventa più semplice e affidabile valutare preliminarmente in modo accurato la fattibilità, i tempi e i costi e, come primaria conseguenza, salvaguardare la spesso svilita qualità architettonica del progetto – come verificato in diverse esperienze complesse concluse negli ultimi anni³.



Figura 02. La crescita dell'efficienza del processo collaborativo nelle tre maggiori fasi evolutive della gestione dei processi.

³ Si prenda ad esempio il caso del *Roma Convention Center* (cd. "Nuvola di Fuksas") e della differenza tra costi, tempi e il risultato architettonico rispetto a quanto previsto in fase progettuale oppure il *Musée des Confluences* (Lione) e le relative vicissitudini tecniche ed economiche senza tralasciare, in ambito germanico, i casi dell'Opera di Dresda e dell'Aeroporto di Berlino.

1. Storia dei processi realizzativi dell'architettura: storia, problematiche e metodologie di ottimizzazione, controllo e gestione

Una tra le primordiali necessità dell'uomo è stato l'adeguamento del territorio alle proprie esigenze, attraverso la costruzione dello spazio antropizzato. Pertanto, l'evoluzione delle tecniche e delle metodologie impiegate per la realizzazione dell'architettura da sempre accompagnano lo sviluppo della cultura umana, arrivando perfino a caratterizzare aspetti sociali, culturali e storici delle popolazioni. A riprova dell'importanza attribuita all'edilizia infatti, si prenda in analisi il Codice di Hammurabi (XVII sec. a.C.): i contenuti delle incisioni di questa stele, ritenuti direttamente dettati dal dio della giustizia, trattano minuziosamente il tema delle costruzioni attribuendo, oltre ai compiti e le responsabilità per le parti, il relativo quadro sanzionatorio.

Nelle civiltà antiche quindi era prassi consolidata attribuire un'aura di sacralità al settore delle costruzioni: basti pensare alla frequenza e al dettaglio con cui, nella Bibbia, vengono descritte le costruzioni di antiche fortezze, città e templi, con abbondanza di – a volte minuziosi - dettagli tecnico-economici, come nel caso della costruzione del Tempio di Salomone (Re I, 6) oppure della Reggia (Re I, 7).

Nei fatti, l'importanza attribuita a questo settore produttivo, seppur svincolato da risvolti spirituali così elevati, dura fino ai nostri giorni. Nonostante le importanti difficoltà legate alla congiuntura economico-politica attuale infatti, particolarmente sfavorevole sia in termini di distribuzione della liquidità, sia per i particolari nervosismi che imperversano tra i diversi blocchi di potere che governano le maggiori risorse del pianeta, l'industria delle costruzioni risulta essere un settore di assoluto rilievo e importanza per lo sviluppo delle condizioni umane.

L'obiettivo del capitolo dunque è l'analisi, condotta attraverso l'illustrazione di complessi processi realizzativi del passato (remoto e prossimo), delle modalità di gestione del processo, delle problematiche riscontrate e delle relative strategie adottate, al fine di comprendere il senso dell'evoluzione delle metodologie gestionali e individuare le direzioni appropriate verso cui condurre l'innovazione nel settore delle costruzioni, nella rilettura *Computer Aided* propria della nostra epoca.

1.1. Progetto e costruzione nell'evo antico

È indubitabile che, nell'antichità, fossero utilizzate forme di Gestione del Processo edilizio capaci di gestire la complessità di opere di grande portata materiale e di lungo respiro temporale. Basti pensare all'impatto della costruzione delle piramidi che, oltre alla realizzazione dell'opera in sé, ha implicato la costruzione di una fitta rete infrastrutturale capace di soddisfare l'approvvigionamento del materiale in cantiere (Hussey-Pailos, Scott, 2005).

Inoltre, nelle aree limitrofe alla piana delle piramidi, successivi ritrovamenti archeologici hanno constatato che vi erano delle vere e proprie città destinate ai lavoratori e alle loro famiglie (Shaw, 2003), sul modello che poi sarà proprio della periferia delle città industrializzate ottocentesca di Dickensiana memoria⁴.

La distribuzione del lavoro era fortemente gerarchizzata come la società civile dell'epoca quindi, oltre ai "supervisori" che operavano direttamente per conto del faraone, (Barry, Kemp, 2006), vi erano degli artigiani e degli esperti "capo-mastri", con al seguito la loro cerchia di collaboratori e familiari.

Il livello più basso della catena produttiva, come la movimentazione dei materiali (*fig.03*) e la sagomatura delle erano perciò demandate a schiavi di biblica memoria (Es 1-8,11). Come attestato dai numerosi ritrovamenti archeologici, vi era già una forma primitiva di rappresentazione algoritmica delle attività, come dimostrano le incisioni rinvenute sulle tombe degli artigiani dove, per rendere riconoscibile l'identità del defunto, venivano rappresentate le sequenze delle sue attività lavorative terrene. Queste tombe, a riprova di quanto introdotto, si trovavano all'esterno delle aree di cantiere.

La grande opera edilizia e la sua dimensione costruttiva quindi, in questa fase della storia, è da intendersi come motore e centro di aggregazione del tessuto sociale impegnato a realizzare la dimora eterna del faraone, inteso come una divinità temporaneamente sulla terra.

⁴ Vi è una vasta letteratura sulla condizione sociale nelle "città satellite" dei complessi produttivi industriali. Si rimanda al confronto con la novella "*Oliver Twist or, The Parish Boy's Progress*" in quanto il fenomeno dello *slum* prese piede proprio nella Londra di inizio ottocento, periodo nel quale è ambientata l'opera.

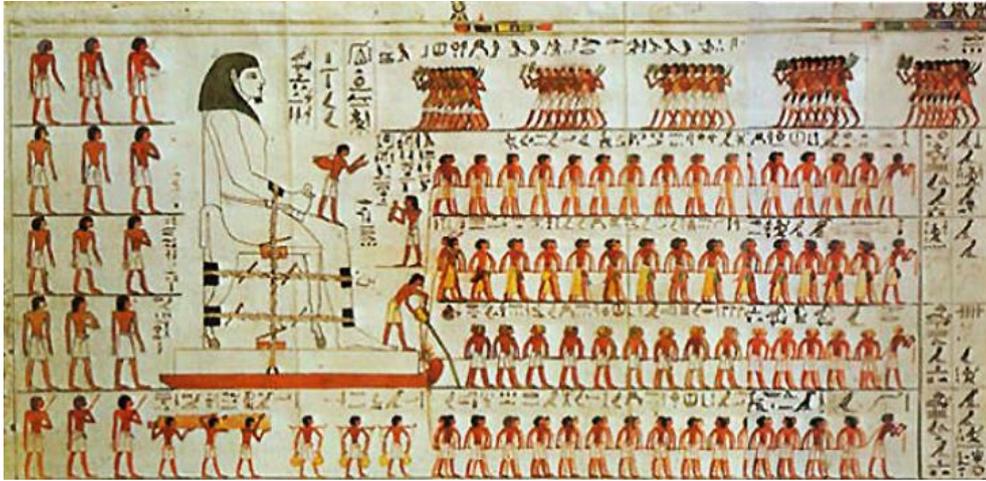


Figura 03. Illustrazione su papiro del trasporto di una statua mediante slitte trainate a fune. Si noti la suddivisione in squadre, a seconda della mansione (Stocks, 2003).

Il modello organizzativo del cantiere delle civiltà più antiche si basa essenzialmente su due elementi: la ripetizione di tipologie costruttive consolidate e l'impiego massiccio di personale fortemente gerarchizzato. Queste caratteristiche, prevedibilmente, sono molto vicine a quelle impiegate dalle specie animali che vivono secondo uno schema sociale.

Uno dei casi più interessanti in tal senso è quello delle termiti (*fig. 4a*): questi insetti difatti per soddisfare le loro esigenze biologiche, costruiscono nidi semi-ipogei connotati da un elevato tasso di complessità: queste costruzioni infatti, collegate tra loro da intricati cunicoli sotterranei, sono capaci di assicurare oscurità assoluta, ventilazione costante e ben definita, con un ben determinato rapporto di anidride carbonica e controllo dell'umidità: paragonando la stazza della termite alle loro opere edilizie, hanno poco da invidiare alle più estese e densamente popolate città umane contemporanee.

Nel caso delle api invece, è interessante constatare come la struttura del favo sia strettamente ottimizzata a seconda delle esigenze della comunità: le celle, di dimensioni strettamente sufficienti ad ospitare una larva e poi il miele, sono di forma esagonale (*fig. 4b*): questo perché tale forma geometrica permette una maggiore semplicità esecutiva, vista che è composta da pareti lisce e rettilinee, mentre assicura, a parità di volume, un minore impiego di materiale.

La domanda di fondo perciò è: quali sono i principi che indirizzano l'accuratissima progettazione e gestione di queste opere? La risposta è nel corredo genomico di questi esseri viventi. (Kapheim et al, 2015).

I genomi di questi insetti difatti sono capaci di riportare memoria delle azioni svolte, accumulando una "esperienza" basata su processi *trial and error*, ripetuti per miliardi di anni. Questi esperimenti inoltre, hanno verificato come, sempre per ottimizzare le energie naturali, l'evoluzione di questi insetti sia sempre di carattere collettivo e mai individuale, perché in un contesto del genere il *confronto* tra apparati cognitivi diversi potrebbe portare al blocco dei lavori e, conseguentemente, mettere a rischio la specie.



Figura 4a. termitaio negli Stati Uniti.
(Foto di A. Lessona).



Figura 4b. un favo di api europee.

I romani, come altre grandi civiltà del passato, si sono confrontati con imponenti progetti, sia di natura edile (città, palazzi, teatri, anfiteatri etc.) che di natura infrastrutturale, come le strade e gli acquedotti (Bozzoni et al., 2006), sovente rielaborando metodi e tecniche sviluppate precedentemente, come è successo per il caso dell'arco e dei *rostra*, tratti dal vicino mondo etrusco. Fortunatamente, nella civiltà latina la redazione di trattati scientifici era tradizione letteraria consolidata e, con le dovute attenzioni, può oggi rappresentare una ricca fonte di conoscenza per l'analisi dell'organizzazione dei processi dell'epoca. Oltre a Marco Vitruvio Pollione (80-15 a.C.) ovvero il più importante trattatista architettonico dell'epoca antica, per quanto riguarda l'indagine dei modelli gestionali della produzione edilizia

bisogna rispolverare l'opera di un autore minore che, sebbene di risonanza ben diversa rispetto al *De Architectura*, ci ha trasmesso l'unica opera di tema prettamente ingegneristico⁵ di epoca romana.

Il trattato *De Aquaeductu Urbis Romae*⁶ infatti, seppur trattando nello specifico della progettazione, costruzione e manutenzione delle maestose opere idrauliche a servizio dell'antica Roma, ci offre un dettagliato spaccato di come fosse organizzato il processo edilizio all'epoca della dinastia imperiale giulio-claudia⁷. Inoltre, si consideri l'autorevolezza della fonte: Sesto Giulio Frontino (ca 40 – 103/104 d.C.) infatti è stato sia *curator aquarum* che fondatore della città di *Deva Victrix*⁸ (Carrington, 2002) all'epoca dello scrittore il *castrum* più grande della Britannia. Ai fini della ricerca qui esposta, l'analisi di quest'opera è importante non tanto per descrivere le opere idrauliche di 2.000 anni fa, ma bensì per delineare le modalità di gestione delle risorse e di supporto ai processi decisionali per la gestione di opere complesse ai tempi di un impero che ha segnato, direttamente e indirettamente, la cultura di buona parte del mondo contemporaneo.

Tra gli aspetti più "contemporanei" di Frontino, possiamo individuare l'importanza data alla *collaborazione* nel progetto e nella realizzazione dell'opera, che si traduce quindi in una precisa organizzazione per metodi ed obiettivi da condividere con gli attori del processo. Considerando l'assenza, all'epoca, di normative o di linee guida a cui far riferimento, il *curator* definisce appalto per appalto le specifiche di prodotto, le modalità di approvvigionamento logistico di cantiere, le opere da dare in affidamento a ditte private e quelle, invece, da realizzare per conto del personale interno, per via della necessità di conservare la *conoscenza* necessaria per garantire la funzionalità dell'opera lungo l'intero ciclo di vita.

L'incipit dell'opera frontiniana dunque è una ampia digressione sull'importanza della collaborazione e della partecipazione del *team* ai processi decisionali⁹. L'autore

⁵ "...per tutta l'età ellenistica, che in termini di storia romana coincide con la media e la tarda età repubblicana, gli architetti romani godettero di una notevole reputazione per quelle che oggi considereremmo opere di ingegneria" (La Rocca, 1990).

⁶ L'opera si è conservata nel *Codex Cassinensis 361*, ed è oggi fruibile, sia in inglese che in latino, su [1] Si consideri che quest'opera è l'unica traccia documentale completa sulla gestione di un'opera complessa dell'antichità (Peachin, 2004).

⁷ Tacito, *Historiae*, IV, 39.

⁸ L'area archeologica della città si trova nell'attuale Chester (volgarizzazione di *Castrum*, accampamento), UK, 55 km a Sud rispetto la città di Liverpool.

⁹ "per un dirigente, non c'è niente di vergognoso nello svolgere una attività che gli è stata affidata secondo le istruzioni degli assistenti. Eppure, questo è inevitabile ogni volta che una

difatti, pone alla base di tutto il processo la *conoscenza*, dato che il responsabile del processo deve, in pratica, delegare le lavorazioni fisiche da svolgere al personale cadetto nella gerarchia di cantiere. Ogni organizzazione di lavoratori a sua volta, avrà in carico di sovrintendere alla gerarchia interna del personale fino al livello più basso della catena che, all'epoca, era rappresentato dagli schiavi e dagli animali da soma¹⁰. Il secondo aspetto riguarda sia un livello morale che, parimenti, un livello tecnico/pratico: l'attività del *curator* infatti non deve iniziare e finire con la costruzione dell'opera, ma bensì essere una attività continua e interdipendente con la salute e la sicurezza di tutta la città: il *project manager* dunque, ora come allora, è chiamato a garantire gli standard qualitativi richiesti per l'uso dell'ambiente antropizzato, non solo con interventi di costruzione massiccia, ma anche con tutta quella serie di interventi *manutentivi*, anche quotidiani¹¹. Altro aspetto determinante per il successo di un processo edilizio erano senza dubbio i tempi di esecuzione. La motivazione, come sempre, deve tenere conto di diverse sfaccettature, di cui ne analizzeremo sinteticamente due:

1. Vincolo temporale di utilità: un'opera è utile ed ha una sua redditività se realizzata nell'arco del periodo di tempo necessario a permetterle di soddisfare le esigenze per le quali è stata concepita. Concretamente, i ritardi nelle costruzioni possono rendere l'edificio inutile, in quanto nel frattempo potrebbe essere cambiato il quadro esigenziale sulla base del quale è iniziato il processo (si veda, ad esempio, il caso dei forti di Roma (E. Cajano, 2006). Anche l'assenza stessa della struttura in itinere può innescare soluzioni alternative, che rimpiazzano l'utilità del bene in corso di realizzazione. Si consideri, sempre a Roma, il caso dello SDO: teorizzato e inserito per decenni nella pianificazione urbana, viene in gran parte soppiantato con la Delib. Cons. Comunale di Roma Capitale n.18 del 12/02/2008, con l'approvazione del nuovo PRG. Questo, infatti, prevede tutt'ora la distribuzione di Poli Direzionali in maniera diffusa e non centralizzata in un solo quadrante della città;
2. Vincolo temporale di finanziabilità: a partire dall'epoca tardo-repubblicana (II-I sec. a.C.) si assiste a una centralizzazione dello stile e delle tecniche

persona inesperta nella materia debba ricorrere alla conoscenza pratica dei subordinati [...] loro sono, nei fatti, le mani e gli strumenti di chi dirige. (Frontino, *De Aquis*, Pref. 2).

¹⁰ Si noti come la disciplina corrente sulla salute e sicurezza nei luoghi di lavoro dia molta importanza all'organigramma di cantiere rimarcando il concetto della responsabilizzazione delle figure impegnate in un processo.

¹¹ "mi è stato affidato il ruolo di *curator aquarum*, un incarico che non riguarda solo i beni ma anche la salute e la sicurezza della città" (Front., *De Aq.*, pref. 1).

costruttive nei territori romanizzati. Prima difatti, per la natura “federalista” della repubblica (Cantarella, Guidorizzi, 1998) e per la grande attenzione alla preservazione dei caratteri localistici dell’architettura romana, sentita come parte del rispetto del *mos maiorum*, si conservavano ampi tratti di indipendenza stilistico-costruttiva nei terreni assoggettati. La nascita dei personalismi del I sec a.C., portò quindi alla realizzazione di opere civili e edili che rappresentavano il potere e le capacità gestionali del promotore. Basti citare, ad esempio, la costruzione del Teatro di Pompeo (J. B. Ward-Perkins, 2008) che fu possibile grazie ad un cavillo amministrativo¹² e alla perfetta armonizzazione tra maestranze e le ingenti risorse economiche messe a disposizione visto che, non si dimentichi, questo processo avvenne nel cuore della città più densamente popolata del mondo antico in un tempo praticamente record, visto che la possibilità di realizzare un edificio era legata strettamente alle vicende personali del promotore (e le fortune personali, all’epoca, erano molto instabili e transitorie).

Nel caso specifico degli acquedotti di frontino, il compito iniziale del promotore dell’opera (l’imperatore) era la costruzione del team operativo, capeggiato dal *curator* che, come detto, era responsabile di tutte le decisioni prese, ed era penalmente perseguibile per eventuali danni correlati all’esercizio delle sue funzioni. Vista la gravosità dell’incarico e la necessità di delegare a sua volta diverse mansioni, la filosofia operativa di Frontino si basa sull’operare con “*una testa e molte mani*” al fine di omogeneizzare l’operatività delle decisioni, che venivano prese però con accordi comuni, al fine della responsabilizzazione di tutti gli anelli della catena. Questo discorso di “circolarità” delle informazioni da condividere e delle responsabilità era, ovviamente, sia tra maestranze e *curator*, che tra questi e l’imperatore che, per controllare il procedere dei diversi processi e valutare l’operato delle diverse organizzazioni, si serviva di un consiglio ristretto, il “*consilium principis*” (Crook, 1975). Una volta stabilito l’ordine imperiale sulle priorità delle opere da iniziare, si procedeva con la selezione delle imprese affidatarie dei lavori (Eck, 2003). Per le manutenzioni quotidiane, le lavorazioni in economia e le emergenze legate alla continuità del servizio, il *curator* era dotato di un nutrito numero di personale interno (schiavi personali acquisiti dall’Imperatore) per le lavorazioni in economia e per le emergenze manutentive. La motivazione risiedeva

¹² Venne dichiarato che la cavea teatrale era invece la scalinata di accesso al podio rialzato del tempio dedicato a Venere vincitrice.

nelle diverse esigenze in termini di gestione della conoscenza: difatti, mentre la realizzazione dell'opera è un evento episodico "limitato" nel tempo e nei contenuti (progetto), per quanto riguarda la gestione del bene nel tempo era preferibile impiegare personale dotato della conoscenza *globale* del bene, del servizio da erogare e delle procedure preferite dal *curator* per il coordinamento interno che, essendo costituito dal personale schiavizzato ("fisso"), era continuamente migliorato dalle progressive esperienze lavorative collettive.

A livello di *procurement* dunque, il *curator* era responsabile della scelta delle imprese, del coordinamento di queste con le attività del personale interno e sul rispetto degli obiettivi prefissati, in totale sintonia con gli indirizzi correnti (Creuza Borges de aràjo, et al. 2017). Pertanto, elaborando una tabella comparativa tra le pratiche gestionali di Frontino (*tab. 01*) e le pratiche attuali, emerge che la maggiore differenza tra le tecniche di gestione del processo di allora e le attuali risiede fondamentalmente nella disponibilità di evoluti strumenti di calcolo informatico, e nella maggiore attenzione sulla dignità e salvaguardia della vita umana nelle fasi di costruzione.

Tabella n. 01: paragone tra esempi dedotti dalle pratiche frontiniane e la sintesi delle pratiche correnti.

Frontino	Contemporaneità	Confronto
1) Capitali		
I capitali necessari alla costruzione erano gestiti privatamente dall'imperatore , che attingeva o dal patrimonio personale o da bottini di guerra. In alcune circostanze si procedeva con contribuzione cittadina	Le forme di finanziamento sono molteplici : totalmente pubblico, con partenariato pubblico-privato, totalmente privato con o senza agevolazioni fiscali da parte del pubblico. I finanziamenti spesso dipendono dal flusso di cassa previsto dall'opera.	La maggiore differenza è nella trasparenza e rendicontabilità delle spese effettuate. Anche nel privato (parlando di opere complesse) siamo di fronte sostanzialmente a organizzazioni dotate di consigli di amministrazione, di revisori dei conti , di istituti bancari che devono procedere con la realizzazione di specifici piani di finanziamento. Il modello della decisione " <i>de imperio</i> ", legata esclusivamente alla visione

		politica della personalità di riferimento dunque, è cambiato.
Frontino	Contemporaneità	Confronto
2) Processo decisionale		
<p>Il flusso delle decisioni segue una ben distinta gerarchia: queste partono dall'imperatore, che determina gli obiettivi e il budget; il <i>curator</i> recepisce ed appronta una squadra interna per le lavorazioni continuative e bandisce gli appalti esterni per la realizzazione di opere specifiche. Il <i>curator</i> dispone di una serie di tecnici di riferimento a suo supporto.</p>	<p>Nella pratica corrente si tende a frammentare il percorso decisionale in specialismi consulenziali per poi ricondurre il giudizio definitivo ad un team di gestione coordinata del progetto (<i>Program Management Office</i>).</p>	<p>Seppure la complessità delle opere contemporanee tenda a discretizzare gli apporti dei consulenti in tante parti quanti sono i dominî di conoscenza, possiamo equiparare gli specialisti contemporanei agli "esperti" (coloro che avevano conoscenza pratica del problema) di cui si circondava Frontino.</p>
3) Realizzazione delle opere		
<p>I lavori di realizzazione delle opere venivano affidati ad imprese esterne. Nonostante fosse prevista una valutazione comparativa dei prezzi, i criteri di scelta erano prevalentemente basati sullo <i>intuitu personae</i> e sui rapporti di reciproco clientelismo tra l'imperatore e il titolare della ditta. Come l'affidamento era basato su criteri di carattere personale, anche le sanzioni in caso di problematiche di cantiere ricadevano nella sfera familiare dell'imprenditore: sono documentati casi, difatti, in cui le "colpe" dei</p>	<p>L'affidamento dei lavori, soprattutto nel caso di capitali pubblici, è normato da numerose leggi e direttive a tutela della qualità dell'opera, del contrasto dei fenomeni corruttivi e a favore della concorrenza tra diversi operatori economici. Sono previsti affidamenti diretti, secondo il principio di rotazione, solo per opere sotto una determinata soglia di costo, stabilita a livello di comunità europea. In caso di dispute le risoluzioni sono di carattere giudiziario, mentre è al vaglio la</p>	<p>In tal senso è cambiato profondamente il rapporto tra il cittadino e la pubblica amm.ne: difatti, da una dimensione di sudditanza verso un potere sovraordinato, in quest'epoca il cittadino è più partecipe ai processi produttivi. Inoltre, rispetto all'antichità, le diverse conquiste sociali ottenute dalla Rivoluzione francese in poi hanno permesso una maggiore mobilità tra classi sociali, dando la possibilità a molte più persone di poter fare impresa.</p>

padri sono ricadute sulle generazioni successive.	possibilità di aggiungere, ai criteri di valutazione per l'affidamento di un incarico, degli indici di valutazione relativi alla frequenza con cui l'impresa proponente impugna ricorsi contro la pubblica amm.ne.	
Frontino	Contemporaneità	Confronto
4) Manutenzione e Gestione dell'opera		
<p>I lavori di manutenzione ordinaria e la gestione operativa erano seguiti da personale interno alla struttura del <i>curator</i>. Questa struttura era composta prettamente da schiafi di proprietà dell'imperatore, legati alle vicende dell'opera alla quale erano stati assegnati. Oltre all'economicità dell'operazione, il vantaggio dato dall'impiego di manodopera schiavizzata è la garanzia di un ricambio graduale e costante del personale, preservando perciò la conoscenza maturata all'interno del gruppo.</p>	<p>La maggior parte delle strutture organizzate tende a esternalizzare quanto possibile le attività, per evitare costi fissi di gestione. Per custodire la conoscenza vengono impiegati database specifici per il <i>facility management</i> gestiti da un capo-manutenzione interno alla struttura che costituisce l'anello di giunzione tra la conoscenza dell'immobile e le imprese esterne. In caso di organizzazioni mono-scopo (es. gestori linea elettrica, trasporti, gas etc.) la tendenza è invertita, in quanto è necessario garantire la continuità del servizio. La schiavitù come intesa nelle epoche antiche è presente solo in contesti sociali marginali, ma anche per lavori di pregio in aree "ricche" del pianeta si possono riscontrare condizioni di</p>	<p>La decisione se concedere o meno opere all'esterno della organizzazione dipendono, nel caso di lavori pubblici, da dettagliate norme sugli appalti (<i>cf.</i> D. Lgs. 50/2016). Nel caso di lavori privati vi è comunque una sequenza organizzata di fasi di pre-qualificazione delle imprese, di valutazione delle offerte, di richiesta di opere migliorative e di ribasso economico. Anche in questo caso, la differenza è nella minore discrezionalità di chi è a capo del processo direzionale.</p>

	lavoro paragonabili alla schiavitù antica (Schirollo, 1979)	
Frontino	Contemporaneità	Confronto
5) Gestione della conoscenza		
<p>Il tema della gestione della conoscenza al tempo di Frontino aveva delle modalità particolari: all'interno della cerchia militare era ampiamente condivisa in quanto le procedure costruttive erano parte indispensabile del sapere di un legionario. All'esterno però, nel variegato mondo dell'artigianato, lo scambio di conoscenza avveniva con le modalità dell'apprendimento per esperienza diretta (cd. "<i>learning by doing</i>") racchiuso nel patrimonio familiare o del "clan" di riferimento. A livello progettuale-organizzativo, nell'antichità vi era una consolidata attività trattatistica. Probabilmente è un caso che ci siano pervenuti solo gli scritti di Frontino.</p>	<p>"La collaborazione è stata viva e centrale nella progettazione tradizionale, almeno fintanto che il progetto è stato realizzato attraverso incontri e discussioni dirette tra i vari progettisti specialisti, che in tal modo avevano la possibilità di spiegarsi e di farsi capire vicendevolmente" (Carrara et. al., 2014). Con l'avvento di metodologie innovative di modellazione informativa dell'edificio, considerandone i limiti oggetto di interessanti filoni di ricerca, si può confidare in una rinnovata centralità della collaborazione, grazie a tecniche di Intelligenza Artificiale capace di affiancare l'uomo in una "simbiosi operativa" (Carrara et. al., 2014).</p>	<p>La gestione della conoscenza diventa centrale nell'ottimizzazione dei processi realizzativi, soprattutto in vista di una progressiva automazione sia dei processi decisionali, che per i contestuali/successivi processi produttivi.</p>

Frontino	Contemporaneità	Confronto
6) Quadro sanzionatorio		
<p>Sebbene le pene fossero molto aspre, e i rapporti tra attori erano di natura personale-fiduciaria, i fenomeni corruttivi erano all'ordine del giorno. Basti pensare alle vicende narrate nelle famose <i>Saturae</i> di D. G. Giovenale (II sec. dC.).</p>	<p>La corruzione è un fenomeno di matrice economica e culturale molto diffuso, arginato da sempre maggiore impegno nell'aggiornamento legislativo e nelle azioni investigative.</p>	<p>Tralasciando le specifiche vicende locali, il fenomeno corruttivo e le cause che lo determinano non sono cambiati nel corso dei secoli. Sono state però riposte molte aspettative nella digitalizzazione della catena degli appalti e delle forniture dove, grazie al contributo dell'informatica, i criteri selettivi dovrebbero essere sempre più slegati dal fattore umano, più facilmente influenzabile da fattori esterni (Bolpagni, 2013)</p>

Realisticamente parlando, considerando anche importanti studi sulla *review* della letteratura del settore (Knotten et al., 2015) è rilevabile come nel XXI secolo vi sia stata una accelerazione sulla graficizzazione delle modalità di gestione delle risorse ma, tendenzialmente, il processo che portava alla realizzazione e alla manutenzione di un'opera complessa sia rimasto, fondamentalmente, molto simile, tenendo sempre conto delle differenze socio-culturali quali la schiavitù, le punizioni corporali etc.

1.2. Gestione del processo edilizio nel tardo-antico: l'importanza della trasmissione della conoscenza

La destituzione dell'imperatore romano d'occidente ha rappresentato l'evento-chiave di un fenomeno che andava avanti da decenni: difatti, lo smembramento delle istituzioni romane, le rilevanti trasformazioni dei costumi – si consideri la diffusione del cristianesimo - e la “barbarizzazione” della società¹³, contribuirono gradualmente alla dissoluzione di un potere ormai millenario in favore degli influssi di popolazioni di origine germanica che, finora, avevano avuto un ruolo marginale nelle dinamiche socio-politiche del mondo.

Nel mondo dell'edilizia, l'indebolimento e la successiva fine dell'impero comportarono diversi cambiamenti, ad esempio:

- Riduzione delle grandi opere infrastrutturali, sia per motivi economici (crisi e mancanza di bottini militari) che per motivi politici (instabilità);
- Riduzione dell'uso dei conglomerati cementizi in favore di materiali di diretta derivazione naturale, quali legni e pietre;
- Disgregazione dell'apparato amministrativo romano, che grazie alla sua minuziosa gerarchizzazione era, per l'epoca, un modello efficiente di gestione delle commesse.

Perciò, mentre nei territori del decaduto impero romano d'occidente l'incuria e le devastazioni delle milizie rimaneggiavano le grandi opere dell'antichità, una certa stabilità politica ed evoluzione tecnologica permettevano all'imperatore romano d'oriente Giustiniano¹⁴, di commissionare un rilevante numero di restauri ed edifici, realizzati in tempi molto brevi e con alterne fortune, come nel caso della Basilica di Santa Sofia di Costantinopoli (*fig. 05*).

Procopio¹⁵ (*De Aed., I*), nello stilare encomiasticamente l'opera dell'imperatore, ci tramanda le fasi processuali della (ri) costruzione dell'edificio di culto, visto che il

¹³ Si prenda ad esempio la vita del *magister militum* Stilicone, barbaro romanizzato che combatté i suoi “affini” germanici e venne ucciso dai romani a seguito di una ribellione contro i *foederati*, ovvero i combattenti germanici assoldati dai romani per difendere i confini.

¹⁴ *Giustiniano I* (482-565) è stato una figura di spicco nella definizione della cultura dell'occidente: al suo periodo di governo infatti, si devono importanti opere di carattere edile e civile, prevalentemente svolte a Costantinopoli e, in campo giuridico, la riforma del codice che tutt'oggi delinea l'ossatura dell'ordinamento civilistico del diritto latino.

¹⁵ *Procopio di Cesarea* (490-565), storico bizantino, in qualità di consigliere di Belisario, partecipò a diverse campagne militari e, conseguentemente, ai processi costruttivi di tutte le opere infrastrutturali necessarie alla logistica bellica. Queste esperienze sono documentate

sedime era precedentemente occupato dall'antica chiesa di epoca paleocristiana, distrutta a seguito di un incendio.

È interessante notare come l'imperatore abbia scelto, per una costruzione così ardita e avveniristica, la consulenza personalità poliedriche quali Antemio di Tralle (Kleiner e Mamiya, 2008), architetto, matematico e studioso di meccanica e ottica (O'Connor, Robertson, 1999), e Isidoro di Mileto il Vecchio, ingegnere, fisico e matematico nonché editore delle opere di Archimede (Romanelli, 1933).

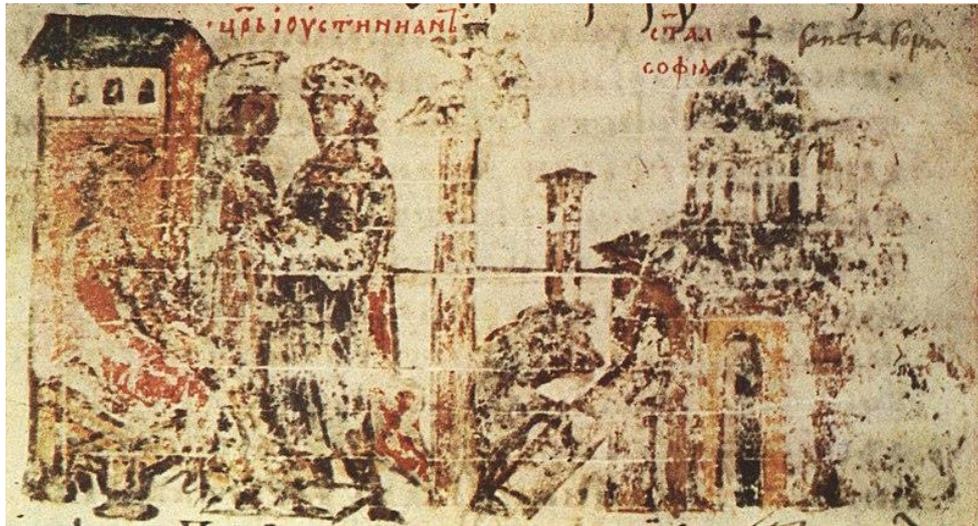


Figura 05. Cantiere della "Hagia Sophia". Miniatura n. 38 del codice "Cronaca di Manasse", XIV secolo.

Nonostante il crollo della volta durante il cantiere, il processo costruttivo durò circa sei anni, (Pr., *De Aed.*, V), e vi presero parte più di 10.000 persone, in condizioni critiche, dovute anche all'affollamento della città che, all'epoca, era senza dubbio la più florida del mondo.

Pochi anni dopo il completamento dell'opera, inaugurata allo stato di "rustico", la grandiosa volta su pennacchi iniziò a manifestare cedimenti e meccanismi locali (Squor, 2016), tali da far intervenire dopo pochi anni Isidoro di Mileto il giovane, nipote del tecnico precedente.

nel trattato "*De Aedificiis*" Nel primo capitolo è stato possibile dedurre delle informazioni sulla gestione di questi importanti processi edificatori.

Nel frattempo, venne completato l'apparato decorativo interno (*fig. 06*) e iniziato l'esterno (*fig. 07*), con tutta una serie di opere accessorie: nei secoli inoltre, sempre per consolidare la statica delle volte che destavano persistenti preoccupazioni, furono fatte tutta una serie di opere ingegneristiche che non evitarono, però, danni a seguito di sismi.



Figura 06. Sezione longitudinale della Basilica “Hagia Sophia” prima dell’adeguamento a moschea. Acquerello del 1926, da “Roger Hayward Papers”.

In questo caso è interessante osservare come vi siano tantissimi punti di contatto con la realtà contemporanea, ovvero:

- La continua ricerca di soluzioni tecnologiche innovative, si consideri che in questo caso vi il primo impiego di pennacchi di collegamento strutturale tra la volta e le mura poligonali di scarico a terra del peso (Kleiner, 2016);
- La necessità di dotarsi di tecnici specialisti capaci quindi di governare la complessità tecnologica dell'opera senza trascurare l'istanza estetico-funzionale della stessa;
- Tempi di esecuzione limitati sia per non bloccare il centro cittadino per troppo tempo, sia per entrare nella fase di redditività il prima possibile. Nel caso della Basilica, il guadagno fu duplice: riaprire al culto l'edificio precedente e il tornaconto in termini di gloria personale dell'imperatore;
- Necessità di produzione fuori opera per assicurarsi le migliori forniture dell'epoca, l'imperatore fece giungere a Costantinopoli elementi - anche importanti come le colonne e i pulvini in marmo pregiato - direttamente dai territori d'origine (anche a spese di città più antiche come Roma), per poi assemblare il pezzo definitivo in cantiere.

Come, per giunta, vi furono delle problematiche altrettanto analoghe a quanto avviene nella contemporaneità:

- Tempistiche non rispettate: il cantiere infatti venne completato decenni dopo con la finitura degli esterni, il completamento di successive opere strutturali e il ricchissimo rivestimento interno in marmi policromi e mosaici (Barsanti, 1994);
- Problemi successivi legati a posa inadeguata dei materiali e tecnologie ancora immature: difatti, oltre ai crolli avvenuti durante il cantiere, la cupola ebbe seri problemi anche dopo, come documentato dalla successiva attività di consolidamento coordinata da Isidoro di Mileto il Giovane. Le cause sono da individuare nella scorretta posa dei mattoni e delle malte (e della inadeguata posologia dei leganti delle stesse) e del mancato rispetto degli adeguati tempi di asciugatura, dovuti alla fretta dell'imperatore di inaugurare l'opera. Nei successivi eventi sismici vi furono estesi crolli (Janin, 1950) che resero necessari ulteriori interventi; a tal riguardo, recenti ricerche di carattere diagnostico non distruttivo, hanno rilevato la presenza di elementi filamentosi metallici all'interno dei successivi impasti cementizi di riparazione, che lasciano supporre una successiva armatura e ricucitura delle lesioni della calotta (Hidaka et al., 2008).



Figura 07. Basilica di Santa Sofia "Ayasofia", Istanbul (TK).

1.3. Il processo edilizio medioevale: la sfida tecnologica delle cattedrali e la definizione degli attori nel cantiere medioevale

A seguito della disgregazione dell'apparato amministrativo romano d'occidente, vi furono diversi secoli di instabilità politica e di continue lotte per la riconfigurazione delle potenze territoriali. Dopo lo spartiacque dell'anno mille però, vi fu una ripresa costante verso l'innovazione tecnologica sia per motivi militari (le crociate), che per motivi politici (la costruzione di imponenti luoghi di culto).

Questi difatti, oltre ad assolvere al compito di accogliere la comunità dei fedeli, erano una chiara rappresentazione lapidea del potere e, pertanto, rappresentavano dei processi edilizi di assoluta importanza e complessità.

Inoltre, la cattedrale andava ad assolvere molti di quelli che oggi potremmo definire "servizi di pubblica utilità". Il campanile, ad esempio, scandiva il passare del tempo e la necessità di adunare la cittadinanza per i momenti politici della vita comunitaria o per gestire le emergenze, mentre gli spazi esterni incanalavano le vivaci attività del commercio della città medioevale, con delle precise assegnazioni di spazio per ogni loggia esterna.

La cattedrale andava a costituire, oltre che un riferimento territoriale, anche un vero e proprio valore economico dato che i traffici di una città erano valutati anche in funzione della grandezza e preziosità di questa tipologia di edifici, quasi fosse una "garanzia di solvibilità"¹⁶.

La committenza delle opere quindi era prevalentemente ecclesiastica, con ulteriori sostegni economici dati dal potere temporale e dell'alta borghesia cittadina. Il successo del processo perciò, era legato ai rapporti tra questi attori: si consideri ad esempio che a Reims, nel 1233, l'estromissione dei cittadini dalle scelte architettonico-economiche del Vescovo e del suo Capitolo portarono alla rivolta cittadina con blocco del cantiere e assedio del palazzo vescovile (Brush et al., 1995). Altro aspetto da non sottovalutare era l'impatto economico generato dai traffici legati ai pellegrinaggi, che muovevano migliaia di persone verso mete sacre in lunghi viaggi che potevano durare mesi.

¹⁶ Vi sono comunque pareri discordanti sulla "redditività urbana" che avrebbero avuto le cattedrali medioevali. Una scuola di pensiero ritiene che questi investimenti abbiano costituito – per secoli – un volano per l'economia cittadina; l'altra parte invece, che queste realizzazioni abbiano tolto risorse allo sviluppo economico del territorio, avvantaggiando aree vicine che non sostenevano cantieri del genere (es. le città fiamminghe e italiane del XIII sec.).

La città di Chartres, nel Nord della Francia, era da secoli mèta di pellegrinaggi legati alla venerazione del “velo della Vergine¹⁷”, tappa francese del cammino di Santiago oltre che fiorente centro commerciale: la valutazione di questi elementi e la circostanza “favorevole” di un incendio che distrusse il precedente edificio di culto, rese necessario l’avvio della costruzione di una nuova cattedrale, che durò dal 1194 al 1260. (fig. 08).

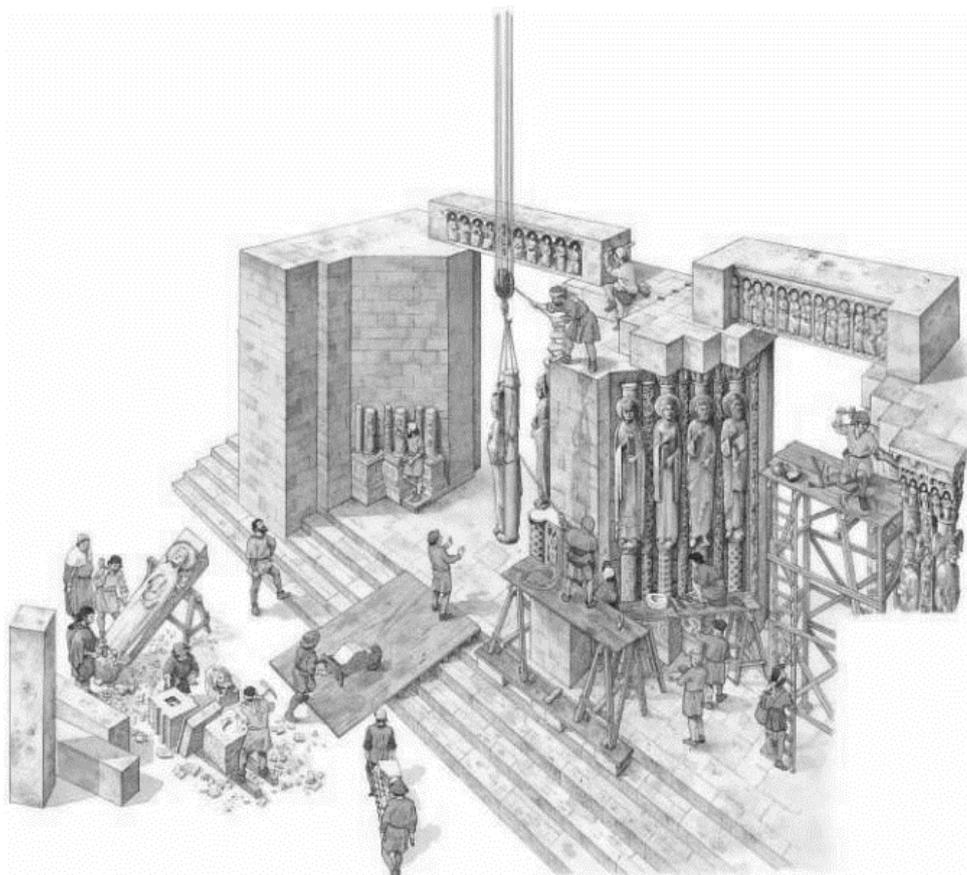


Fig. 08) Cantiere della Cattedrale di Chartres (Guidici et al., 2017).

¹⁷ La reliquia consiste in un lacerto del Velo indossato da Maria nel giorno dell’Annunciazione.

Considerando le possibilità tecnologiche dell'epoca e la durata dei cantieri di edifici analoghi, è interessante approfondire le motivazioni che hanno permesso una "rapida" chiusura delle lavorazioni nonostante, come riportato dalle fonti, ci furono tutta una serie di fermo-attività dovuti a problemi finanziari¹⁸. Per soddisfare, nonostante il ritardo accumulato, le esigenze estetico-liturgiche e semplificare i processi costruttivi per finire in tempi ragionevoli, vennero fatte tutta una serie di scelte – come la rinuncia alla cupola – che, nei secoli, vennero ripresi anche in cantieri analoghi diventando una "regola" del linguaggio gotico. La formula chartriana (abolizione delle gallerie, ingrandimento del cleristorio, campata rettangolare quadripartita, pilastro incantonato etc.), difatti ebbe un successo immediato, perché rispondeva in modo semplice e convincente all'esigenza di razionalizzare i processi costruttivi oltre ad attribuire all'edificio una grandiosità inedita conforme alle ambizioni dei costruttori e dei committenti (Bonelli et. al, 2007). Inoltre, uno dei fattori determinanti del successo processuale è stata la *continuità* degli intenti progettuali e della conoscenza delle maestranze, che erano tutti rigorosamente abitanti della città e del contado circostante.

A dispetto di quanto si possa supporre osservando la fastosa decorazione, l'impianto di progetto non è mai cambiato durante il cantiere: analizzando i palinsesti murari difatti, è possibile osservare come i conci siano molto simili e posati con la medesima tecnica, a riprova di come questo cantiere medievale, con tutte le difficoltà del caso, era fortemente indirizzato verso una "prefabbricazione ante litteram" di fondo che, comunque, nonostante l'uniformità dimensionale dei conci, permetteva la personalizzazione capillare degli elementi più rilevanti (es. pulvini, strombature delle facciate, vetrate, etc.). Per la definizione di questa figura, decisiva nella gestione della complessità di queste imponenti opere, si prenda come riferimento l'opera di Gervasio di Canterbury (ca. 1140-1210) "*Tractatus de combustione et reparatione Cantuariensis ecclesiae*" (Kidson, 1995), dove l'autore descrive minuziosamente i danni riportati dall'incendio del coro della cattedrale di Canterbury e le successive fasi di costruzione, con minuziosi approfondimenti dal punto di vista tecnico-realizzativo. Per le finalità della presente ricerca, è interessante approfondire come, per l'epoca, era inquadrata la figura dell'architetto, e di come questa si andava ad interfacciare con la committenza, con gli altri *maestri costruttori* al fine dell'ottimizzazione, controllo e gestione dell'organizzazione del cantiere. Afferma Gervasio, in riferimento all'ingaggio di Guglielmo di Sens "giunse poi tra gli altri

¹⁸ Si stima che il cantiere sia stato interrotto per 5 volte in 66 anni (John, 1990).

artigiani un certo Guglielmo di Sens, uomo assai operoso e abile nella lavorazione del legno e della pietra”¹⁹. A ulteriore conferma che la dimensione teorica, progettuale e tecnico-pratica erano condensate all’interno di un’unica personalità, si consideri la definizione data da Tommaso d’Aquino (1225-1274) nella *Summa contra gentiles* dove parla dell’architetto quale “*governatore di arti*”²⁰ con un certo distacco rispetto al precedente modello bizantino, che prediligeva progettisti con uno spiccatissimo senso teoretico che, nei fatti, li teneva ben lontani dalla dimensione dell’artigianato e della gestione delle fasi realizzative dell’opera. La padronanza delle tecniche realizzative è determinante nella formazione dell’architetto medioevale, proprio perché lo strumento di rappresentazione progettuale dell’epoca era, tendenzialmente, il modello (o sagome) al vero “*formas ad lapides formandos*”, considerato che la prefabbricazione del pezzo per un successivo assemblaggio ultimo in cantiere è sempre stata una ambizione dell’uomo-costruttore. La produzione di questi pezzi “standardizzati” comunque, avveniva in condizioni legate alla congiuntura del momento, non potendo garantire (come si nota dall’analisi dei palinsesti murari) la totale similarità tra i conci. La “serializzazione” inoltre presuppone riferimenti progettuali affidabili: per gli elementi costruttivi di maggiore

¹⁹ “*advenerat autem inter alios artifices quidam Senonensis Willielmus nomine, vir admodum strenuus, in ligno et lapide artifex subtilissimus*” (R. Recht, 2000)

²⁰ “ §2 *Multitudinis usus, quem in rebus nominandis sequendum Philosophus censet, communiter obtinuit ut sapientes dicantur qui res directe ordinant et eas bene gubernant. Unde inter alia quae homines de sapiente concipiunt, a Philosopho ponitur quod sapientis est ordinare.*

Omnium autem ordinatorum ad finem, gubernationis et ordinis regulam ex fine sumi necesse est: tunc enim unaquaeque res optime disponitur cum ad suum finem convenienter ordinatur; finis enim est bonum uniuscuiusque. Unde videmus in artibus unam alterius esse gubernativam et quasi principem, ad quam pertinet eius finis: sicut medicinalis ars pigmentariae principatur et eam ordinat, propter hoc quod sanitas, circa quam medicinalis versatur, finis est omnium pigmentorum, quae arte pigmentaria conficiuntur. Et simile apparet in arte gubernatoria respectu navifactivae; et in militari respectu equestris et omnis bellici apparatus.

Quae quidem artes aliis principantes architectonicae nominantur, quasi principales artes: unde et earum artifices, qui architectores vocantur, nomen sibi vindicant sapientum.”

“§ 3 *Quia vero praedicti artifices, singularium quarundam rerum fines pertractantes, ad finem universalem omnium non pertingunt, dicuntur quidem sapientes huius vel illius rei, secundum quem modum dicitur 1 Cor. 3,10, ut sapiens architectus, fundamentum posui; nomen autem simpliciter sapientis illi soli reservatur cuius consideratio circa finem universi versatur, qui item est universitatis principium; unde secundum Philosophum, sapientis est causas altissimas considerare.*”. (S. Thom. Aquinatis, *Summa Contra Gentiles*, Lib. I, Cap. I, § 2-3).

impegno (es. i trafori delle finestre e dei rosoni), gli architetti rappresentavano con grande cura i necessari modelli, per incisione o mediante graffiti, generalmente nel rapporto 1:1. Questi erano localizzati sulle pareti degli stessi edifici o su superfici appositamente predisposte in un locale annesso al cantiere²¹, come testimoniato da numerosi ritrovamenti; la pianta dell'edificio, invece, veniva tracciata direttamente sul terreno, con l'aiuto di picchetti e di corde. Non si conservano, per questo periodo, veri e propri disegni in scala ridotta, che pure dovettero essere impiegati nelle fasi di studio del progetto e che, insieme a modelli in cera o in gesso e forse in legno (*fig. 09*) che, presumibilmente, erano il mezzo preferenziale per rappresentare ai committenti l'immagine della futura costruzione, anche se sono pervenuti fino ai nostri tempi articolate rappresentazioni su base cartacea come, ad esempio, l'opera di Villard de Honnecourt (*fig. 010*).



Figura 09. L'Abate Desiderio²² (1027-1087) presenta il modello della erigenda chiesa di S. Angelo in Formis. Pittura muraria nella chiesa.

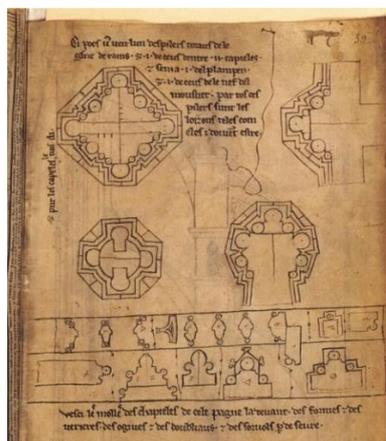


Figura 10. Sezioni tipologiche di pilastri polistili. "Livre de portraiture", Villard de Honnecourt, XIII sec. (Erlande-B. et al. 1988).

²¹ in area britannica note come "tracing-house", *cfr.* Coldstream, N, 1991. *Medieval Craftsmen: Masons and Sculptors*, London: British Museum Press.

²² D. fu uno dei più energici committenti nello scenario del medioevo italiano: come Abate di Montecassino promosse una campagna di opere edilizie a scala territoriale, con la fondazione di diversi avamposti difensivi, la costruzione di nuovi edifici di culto e il restauro del patrimonio esistente, a partire dalla ricostruzione della celebre abbazia. In chiave politica, impose un nuovo stile architettonico nella "Terra Sancti Benedicti", a cavallo tra l'imponenza latino-carolingia e il moderno stile bizantino, cristallizzando le trasformazioni linguistiche in atto sul territorio (*cfr. placiti cassinesi*) in un nuovo bilinguismo architettonico (Carbonara, 1974).

Altra importante novità del cantiere medievale è la risoluzione di un problema che, se vogliamo, è di stretta attualità: ovvero la prosecuzione dell'uso di un edificio sia durante le opere di costruzione che nelle manutenzioni ordinarie e ampliamenti. Era difatti di uso comune iniziare la costruzione delle cattedrali dal coro, in modo tale da poter terminare per prima la parte dell'edificio che concentra gli elementi liturgici fondamentali e, conseguentemente, procedere per campate successive

Questo processo avveniva coprendo la crociera tra la navata centrale e le navate laterali con solai in legno i quali travi e assi, oltre a garantire la copertura dagli agenti atmosferici, servivano a garantire una certa continuità nella trasmissione delle forze tra le pareti e gli archi di imposta delle costruende volte.

A riguardo, si noti come i tecnici dell'epoca si ingegnavano nel risolvere le criticità date dalla complessità di questi cantieri: mirabili macchine per il sollevamento dei materiali, la posa dei conci e tutta la realizzazione delle strutture a servizio del cantiere (mense, aree per la produzione dei componenti, dormitorî etc.) erano il risultato di progetti specifici adeguati minuziosamente al cantiere in corso, costituendo un vero "progetto nel progetto".

Nonostante la presenza pervasiva del *maestro costruttore*, questo non era l'unica figura professionale presente nel cantiere medievale (Bonelli et. al, 2007) visto che, nel processo decisionale, al suo fianco operavano gerarchicamente tutta una serie di figure: molto spesso, difatti, le fonti riportano di come il committente sia molto presente nelle fasi progettuali e costruttive arrivando ad avere, molto spesso, la paternità delle scelte architettoniche. Si veda, a tale esempio, l'incidenza che ebbe l'Abate Suger (*fig. 11*) nella progettazione del nuovo coro della cattedrale di St. Denis a Parigi che, storiograficamente, è riconosciuta come tra i primi esempi dell'architettura gotica. Mentre nei processi promossi dagli ordini monastici vi era una esatta corrispondenza tra finanziatori e committenti, non era così nel caso di sedi vescovili: qui difatti vi era una serie di organi di pianificazione e controllo che rispondevano sia all'autorità religiosa promotrice dell'opera che al potere politico dell'epoca e al tessuto dei finanziatori privati: per questo, nelle aree francofone vi era di prassi un *capitolo*, nominato dalla diocesi, che controllava l'operato del Vescovo. Questi, inoltre, spesso nominavano (all'esterno o all'interno dello stesso organo) un amministratore o addirittura un organismo autonomo (*opera o fabrica ecclesiae*) che rappresenta giuridicamente un comitato che organizza le risorse e

controlla/rendiconta lo sviluppo dei lavori. In Italia invece, questi comitati²³ erano costituiti dalle magistrature urbane o dalle corporazioni delle arti e mestieri.

Il maestro costruttore quindi deve essere considerato come un anello di giunzione (*tab. 02*) tra la catena decisionale, di cui abbiamo visto la complessità, e la conoscenza legata alla catena produttiva, che coinvolgeva maestranze con competenze molto diverse tra loro, la catena delle forniture e il tessuto produttivo che si sviluppava intorno a queste opere (*fig. 12*).

Dal punto di vista dell'innovazione tecnologica, si può paragonare l'epoca delle cattedrali all'epoca delle scoperte geografiche e della corsa allo spazio, ovvero a quelle fasi dello sviluppo della tecnologia tale che il raggiungimento di un obiettivo "utopistico" contribuiva allo sviluppo di metodi, tecnologie e tecniche utilissime alla vita quotidiana.

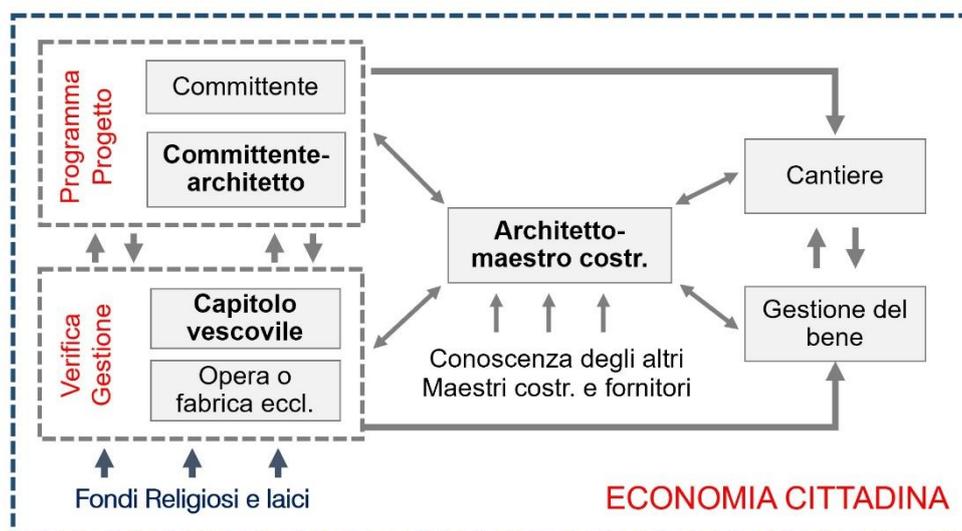


Tabella n. 02. Processi decisionali dell'opera complessa
In epoca medievale.

²³ tutt'ora esistente la "Veneranda Fabbrica del Duomo di Milano" persona giuridica iscritta al Registro della prefettura di Milano, istituita nel 1387 dall'allora signore della città Gian Galeazzo Visconti. Il comitato è attualmente composto da sette membri in carica per un triennio: due nominati dall'Ordinario Diocesano e cinque dal Ministero degli Interni, su parere dell'Arcivescovo.

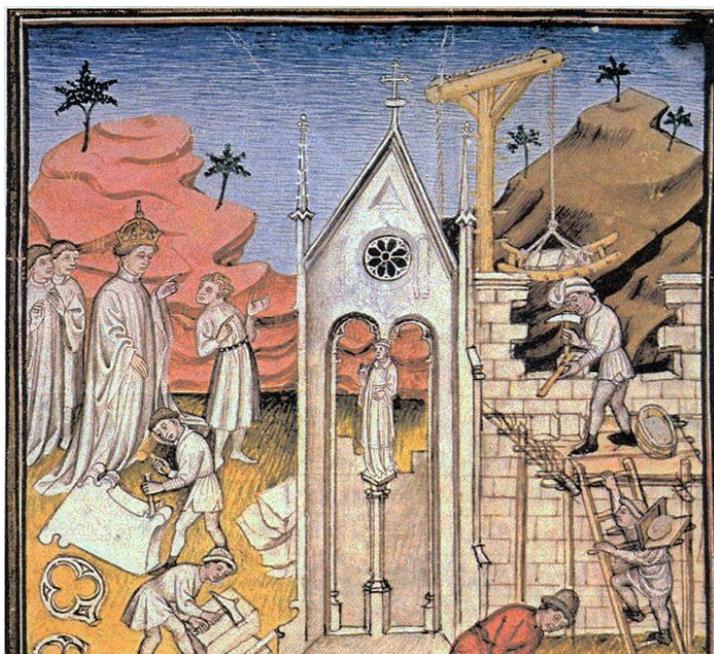


Figura 11. Il Re di Francia Luigi VI e l'abate Suger (1080-1151) in visita al cantiere del coro di St. Denis, Parigi, XII sec.

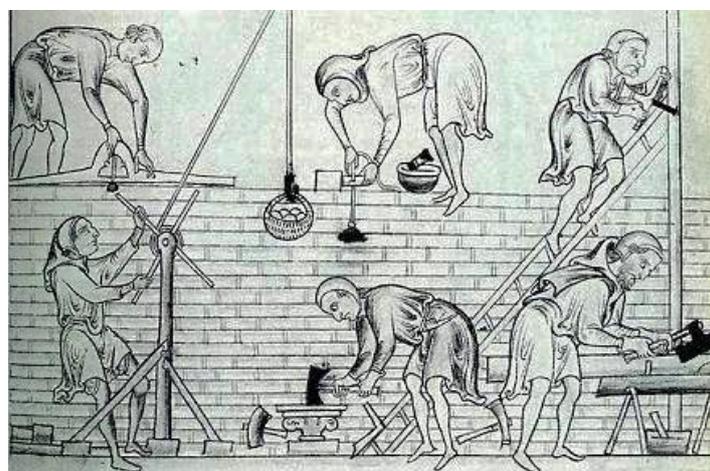


Figura 12. La costruzione di una apparecchiatura muraria medievale. Da "La vita di S. Albano", Trinity College, Dublino, XII sec.

1.4. Il Rinascimento. La gestione del processo come motore di innovazione nell'analisi di due opere iconiche: le cupole di Santa Maria del Fiore a Firenze e di San Pietro in Vaticano

Le premesse per l'avanzamento delle conoscenze umanistiche e tecniche rinascimentali derivano da un costante progresso scientifico maturato verso la fine dei cosiddetti "secoli bui". La ripresa delle rotte commerciali del bacino del mediterraneo a seguito delle crociate, consentì il proficuo contatto con civiltà tecnologicamente avanzate²⁴; inoltre, nel basso medioevo vigeva una relativa stabilità politica data dalla minore intensità di conflitti distruttivi, mentre poteva prendere piede (solo grazie alla "medievale" attività degli amanuensi) la nuova temperie culturale *antropocentrica*, basata sulla riscoperta dei classici greci e latini.

Pertanto, per meglio comprendere l'impatto di questi elementi sociologici sull'organizzazione del cantiere, si prendono in analisi due opere: la prima riguarda Firenze, città culla del rinascimento e motore economico di rilievo europeo; la seconda invece è a Roma ovvero il centro del potere ecclesiastico e delle diplomazie dell'epoca.

Il potere di Firenze e delle città toscane in genere, nasce dalla progressiva importanza assunta dal sistema bancario nel tessuto economico dell'epoca. Questo fenomeno perciò, legato alle grandi capacità artistiche delle botteghe fiorentine e allo "storico" commercio di tessuti, portò delle risorse economiche importanti, che diedero il via a diversi cantieri di opere pubbliche e private di assoluto rilievo storico e artistico come, ad esempio, lo Spedale degli Innocenti.

Grazie a queste congiunture favorevoli, si diede inizio all'ambizioso progetto per la sostituzione della storica Cattedrale di Firenze (Santa Reparata), con una nuova imponente costruzione che doveva, anche a chilometri di distanza, raffigurare la potenza e la ricchezza della città che allora si proponeva come rinnovatrice dei fasti e dei costumi romani, in opposizione alle signorie "nordiche" (come i Visconti a Milano) legate culturalmente alle popolazioni germaniche mitteleuropee.

²⁴ Si consideri la figura di Marco Polo (1254-1324) che, come tanti mercanti europei, entrò in costante contatto con civiltà avanzate quali quelle orientali, oppure la vivacità del mondo islamico-persiano nel campo delle scienze matematiche e tecniche. Non si trascuri il fatto che la cupola del mausoleo di Olijetu (Soltaniyeh, Iran) simile per tecnica e dimensioni alla cupola del Brunelleschi, è stata realizzata più di un secolo prima.

Il progetto originario, a cura di Arnolfo di Cambio (1232-1240) prevedeva la costruzione di un edificio di dimensioni talmente maggiori rispetto alla chiesa esistente, che fu possibile iniziare lo spiccato delle mura dall'esterno di questa, che venne tenuta aperta al culto durante tutte le prime fasi lavorative.

In quest'epoca viene ad assumere particolare importanza la *progettazione del cantiere*, ovvero lo studio delle fasi lavorative necessarie al compimento dell'intento progettuale, delle risorse materiali e immateriali da impiegare, delle attrezzature e delle interferenze che possono intercorrere tra raggio di azione delle macchine, il personale e la continuazione dell'uso dell'edificio in corso di ampliamento/sostituzione.

La prima interruzione di questo cantiere avvenne in occasione della morte, avvenuta in un intervallo di tempo relativamente ristretto, di tutti i principali attori dell'opera, a riprova di come – per quanto tecnologicamente evoluto – il processo era ancora strettamente legato alle vicende personali e alla *conoscenza implicita* delle figure della catena decisionale, in questo caso autorità religiose e signoria.

Dopo una breve ripresa dei lavori, concentrati perlopiù sul campanile (costruito su disegni di Giotto) vi fu un'altra lunga sospensione data dall'arrivo della peste nera (1348), che ebbe delle ricadute non indifferenti sulla società dell'epoca. La devastazione lasciata dall'imperversare del morbo però ebbe dei risvolti “positivi” per quanto concerne lo sviluppo tecnologico: difatti, visto che la peste aveva praticamente dimezzato il numero della forza-lavoro disponibile, la paga dei lavoratori crebbe, aumentando dunque anche la necessità di sviluppare macchine e ottimizzare processi, in maniera tale da poter contenere i costi dei prodotti²⁵. Anche per questo motivo l'architettura del rinascimento fu, oltre che una riscoperta del canone classico e della *regola*²⁶ un'epoca di profonda *ingegnerizzazione* volta all'ottimizzazione dei processi produttivi mediante l'impiego di macchine, progettate dagli architetti stessi, o l'impiego di tecniche costruttive capaci di ridurre i tempi di posa, garantendo al contempo prestazioni di assoluto riguardo. Per questi motivi, il cantiere di Santa Maria del Fiore - e in particolar modo la cupola - possono essere efficacemente esplicativi della realtà dell'epoca.

Dal punto di vista della programmazione, si assiste ad un fenomeno relativamente “nuovo” nel campo dell'affidamento degli incarichi. Difatti, nella

²⁵ Si prenda a riferimento l'invenzione della stampa a caratteri mobili, economicamente conveniente dato l'aumento del costo del lavoro degli amanuensi (Campisi, 2014).

²⁶ Come per esempio nei trattati dell'Alberti (1404-1472), dove uno dei temi centrali è la definizione della *regola* per stabilire le corrette proporzioni e armonia tra le parti di un'opera.

Firenze rinascimentale era diffusa la pratica del concorso, che prevedeva la partecipazione dei più importanti tecnici dell'epoca: risale a questo periodo infatti la definizione della figura dell'*architetto-autore*, quale personalità di spicco nella società coeva, con tanto di biografie e di riconoscimenti pubblici. Questi concorsi si svolgevano sotto forma di presentazione di modelli esplicativi della valenza estetico-funzionale dell'edificio, ed erano corredati da relazioni che ne descrivevano tecniche e processi produttivi.

Nel caso della cupola, il concorso venne vinto da Brunelleschi e Ghiberti: l'ultimo fu estromesso dallo stesso Brunelleschi nelle prime fasi di realizzazione, grazie ad un espediente che gli permise di governare questo processo in prima persona, cosa che fece con continuità e dedizione per i successivi anni. È interessante, notare come, in questa occasione, nei termini contrattuali non venga invocata soltanto la *regola d'arte* ma vi sia un "*disposto*" che ricalca fedelmente i 12 punti elencati nella relazione tecnica preliminare del Brunelleschi (Di Pasquale, 2002). Considerando anche il fatto che l'autore non ha lasciato scritti, possiamo considerare la gestione della conoscenza di questo cantiere impostata in modo piramidale dal progettista/direttore lavori, che ne detiene cripticamente i principi²⁷ alle nutrite fila di lavoratori (se ne stima una presenza media di 300 unità su tutti i 18 anni della costruzione) e di artigiani coinvolti che, a loro volta, custodivano gelosamente i loro processi all'interno di strette cerchie familiari. Come era consuetudine per l'epoca, l'architetto curò personalmente l'ideazione e la costruzione di *machinae* per il trasporto delle maestranze e dei materiali: difatti, uno dei primi problemi da affrontare, oltre la complessità tecnico-strutturale del tema, fu l'organizzazione del cantiere. Costruire un edificio del genere senza l'uso di centine (impossibili da apprestare date le dimensioni del tamburo e la quota di imposta della volta) obbligava il trasporto di materiale pesante (i blocchi di arenaria delle costolonature hanno un peso di circa 800 kg) ad altezze superiori ai 50 metri (*fig. 13 e 14*).

Dal punto di vista dell'ottimizzazione dei tempi, l'architetto ricorse a metodologie di risparmio specifiche rispetto alle esigenze di cantiere quali la cura dell'ergonomia delle operazioni (per esempio, tutti i dettagli tecnici erano studiati per l'integrazione con gli apprestamenti e le macchine di cantiere), e la realizzazione di piattaforme necessarie a far sì che il lavoratore avesse sempre il materiale a portata di mano e lavorare in posizione eretta. Si consideri inoltre che la metodologia di

²⁷ Ancora oggi il dibattito sulle modalità costruttive e sui principi statici impiegati è tutt'ora in corso.

apparecchiatura muraria era assolutamente insolita per l'epoca, con l'ulteriore complicazione data dal fatto che le malte rinascimentali, dimentiche delle miscele pozzolaniche latine, presentavano tempi di presa più lunghi (Baluganti, 2009). Ad ogni modo, dai documenti dell'epoca è possibile dedurre una progressione del cantiere di 30 centimetri in altezza al mese, con una produttività media giornaliera di circa 400 mattoni da ogni lavoratore. Le macchine invece, garantivano un sollevamento di un "pieno carico" (ca.800 kg) ogni mezz'ora, per un dislivello da superare di circa 50 metri.

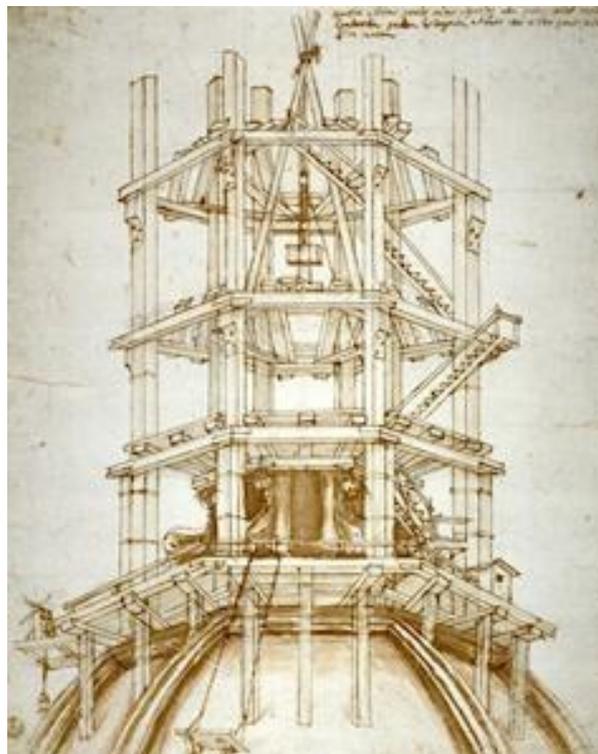


Figura 13. Schema descrittivo del castello di montaggio della lanterna della basilica di Santa Maria del Fiore, Firenze. Disegno di Leonardo da Vinci

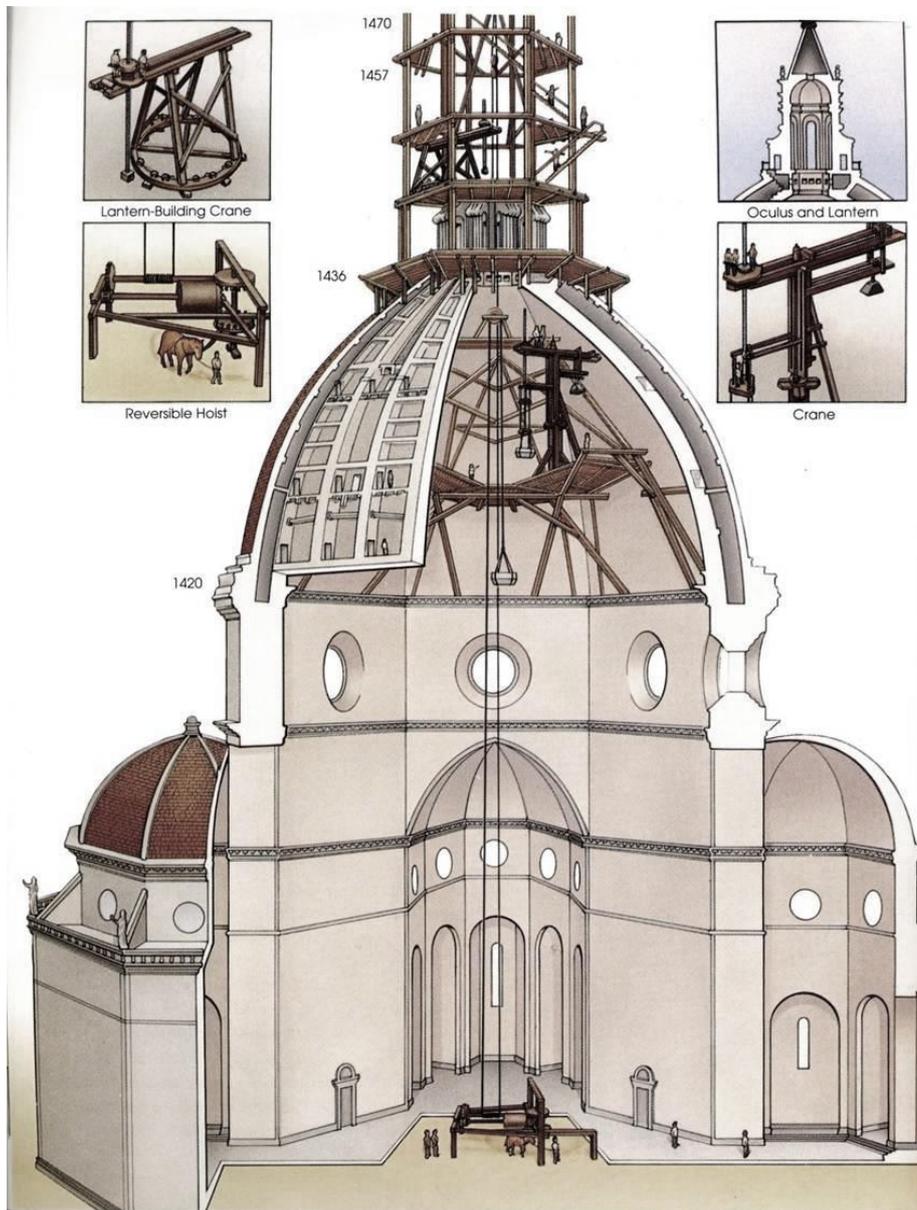


Figura 14. Ricostruzione delle macchine e degli apprestamenti impiegati per il cantiere della cupola di Santa Maria del Fiore, Firenze.
 Sulla sinistra del profilo, sono riportati gli anni di completamento delle strutture (da Kleiner et Mamiya, 2008).

Il cantiere della Basilica di San Pietro si inserisce in un contesto storico molto particolare, che vede la città di Roma in un processo di profonda trasformazione, guidata sia da esigenze pratiche che da necessità storico-culturali: le prime, infatti, erano legate alla vetustà delle strutture e infrastrutture della città che, in massima parte, risalivano alle epoche antiche; le seconde erano dettate dalle innovazioni acquisite durante il periodo rinascimentale che, tradizionalmente, può considerarsi concluso proprio al termine di questa esperienza.

Il progetto iniziò con un intento diverso, ovvero quello di rivisitare (seppur radicalmente) l'antica basilica costantiniana. I lavori, che iniziarono come era consuetudine dal coro, si interruppero subito per la morte del committente (Papa Niccolò V, 1397-1455) e rimasero in questo stato per diversi papati successivi, nonostante la prosecuzione dell'attività progettuale, che comunque era orientata ad un mantenimento dell'impianto basilicale a navate. La spinta decisiva alla realizzazione di un nuovo edificio fu data da Giulio II (1443-1513) che, dopo aver invitato diversi architetti ad apportare idee circa la realizzazione di questa importante opera, decise di demolire l'edificio esistente ed erigere una nuova fabbrica, in linea con le linee architettoniche e la tecnologia costruttiva del tempo (*fig. 15*).

Alla prosecuzione del progetto si avvicendarono diversi tecnici (Baldrati, 2014), con il risultato di una serie di alternative progettuali interessanti dal punto di vista tecnico-letterario, ma che si trasposero in un pesante rallentamento nelle lavorazioni. Dopo il sacco di Roma i lavori, guidati Antonio da Sangallo il Giovane (1484-1546) ripresero con una certa regolarità, arrivando alla quasi completa demolizione della basilica originaria che, comunque, non aveva mai interrotto la sua funzione²⁸ liturgica. Dopo la morte del Sangallo, la direzione del cantiere passò a Michelangelo (*fig. 16*), senza non pochi contrasti con gli altri tecnici dell'epoca, comunque coinvolti nell'organizzazione della *Reverenda Fabrica Sancti Petri*.

Alla luce di questo clima di conflittualità all'interno della commissione tecnica, e considerando la possibilità data dall'uso indipendente della struttura costantiniana, Michelangelo impostò il cantiere secondo canoni molto vicini ai nostri tempi, ovvero procedendo contemporaneamente su più parti. Questo permise all'artista di ridurre considerevolmente i tempi previsti, arrivando quasi alla conclusione del tamburo.

²⁸ Nell'edilizia di culto le aree di lavoro erano separate dagli ambienti liturgici mediante strutture temporanee in legno: in questo caso, dato che si ipotizzava che l'assetto sangallescopotesse essere quello definitivo, venne eretto un muro divisorio per aumentare il confort degli spazi e, dall'altro lato, aumentare i ritmi della produzione edilizia. *cfr.* (Spagnesi, 2002).

Michelangelo però lasciò l'incarico, oltre che per l'età, a seguito di un crollo in cantiere causato da un'imperizia di un suo capomastro: nel cantiere romano difatti, la figura dell'architetto era di assoluto rilievo e responsabilità pertanto, oltre al



Figura 15. Bramante presenta il progetto della basilica a Papa Giulio II. Horace Vernet, 1827.



Figura 16. Michelangelo presenta il modello della cupola a Paolo IV. Domenico Crespi "il passignano".

Potere decisionale pressoché totale su tutte le fasi dell'opera²⁹, aveva in carico anche gli effetti delle opere realizzate dalle figure che selezionava.

L'elevazione definitiva della cupola, dopo una numerosa serie di verifiche e varianti, si ebbe solo 1588 sotto la direzione di Giacomo della Porta (1532-1602) assistito da Domenico Fontana (1543-1607). A quest'ultimo, dobbiamo tutta una serie di documenti e schemi di cantiere che ci lasciano intuire quale fu il processo

²⁹ L'architetto disponeva del diritto al licenziamento dei singoli operai ritenuti inadeguati, o alla cessazione dei rapporti contrattuali con imprese inadempienti (Baldrati, 2014).

realizzativo di questa opera costruita, a differenza della cupola fiorentina, con l'ausilio delle centine (*fig. 17*). Una volta installata la centinatura in legno e le macchine per il sollevamento dei pesi, si procedette alla posa in opera delle costolonature in pietra per sezioni parziali, al fine di controllare il peso gravante sulle centine nelle prime fasi di montaggio e completare l'opera in seguito, quando le spinte sarebbero state assorbite in parte anche dalle catene perimetrali.

Successivamente, furono poste in opera le vele tra i costoloni, con l'ausilio di catene e tiranti metallici per contrastare le forze di trazione. Vi è da notare come l'uso di elementi metallici (grappe tra conci in pietra, perni antiscivolamento, tiranti etc.) fu particolarmente diffuso (Bussi, Carusi, 2009);

Le lavorazioni di chiusura si limitarono all'ultimazione delle connessioni murarie, ai collegamenti trasversali tra le due calotte e alla posa della lanterna (Masiero e Zannoner, 2013).

Questo processo durò circa 5 anni – compreso la messa in opera della copertura in piombo -, grazie anche alla ingente mole di risorse messe a disposizione dal Papa Clemente VIII.

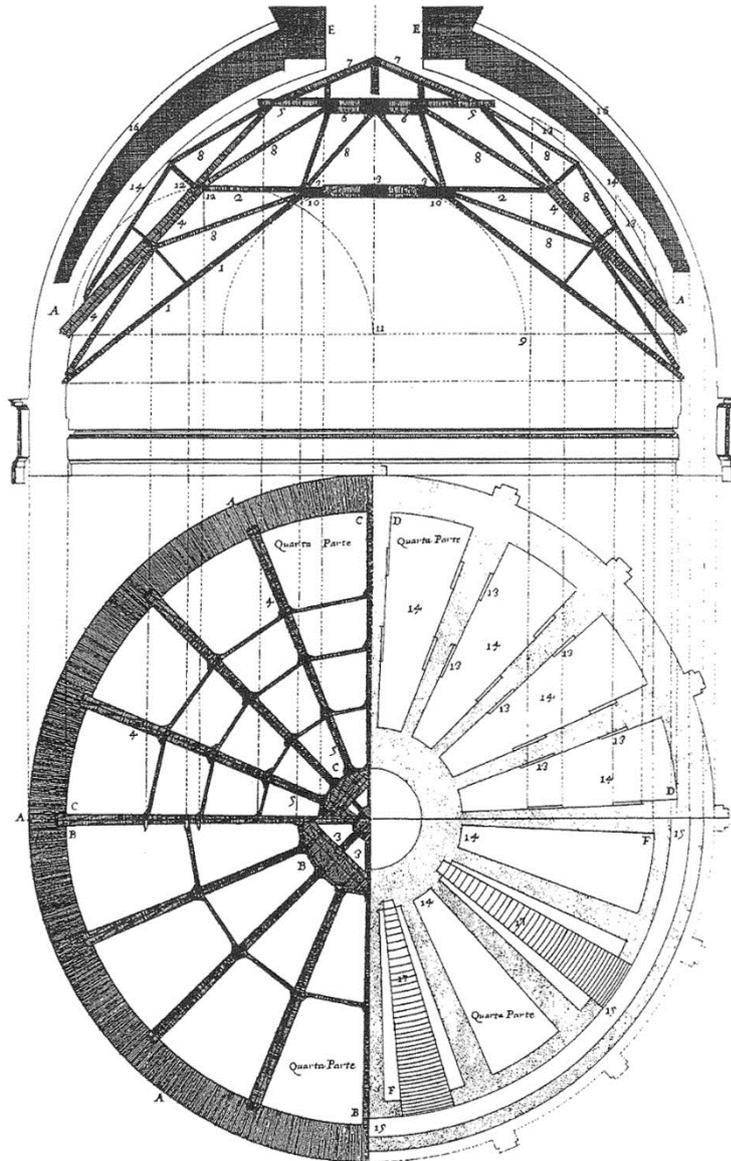


Figura 17) Schema strutturale per la costruzione della cupola di San Pietro: la sezione trasversale evidenzia le geometrie dei piani della centina e dei ponti di lavoro; la pianta, divisa in due emicerchi, illustra a sinistra lo schema del ponteggio, a destra lo schema delle strutture da realizzare.
 Disegno di Domenico Fontana, in (Masiero e Zazzoner, 2013).

1.5. Dall'Evo moderno alla Prima rivoluzione industriale

Prima ancora dell'avvento della macchina a vapore che sancisce, secondo la storiografia corrente, l'inizio dell'età dell'industria, nello specifico del settore dell'edilizia vi furono dei tentativi di serializzazione della produzione e di discretizzazione in fasi della produzione di componenti destinati al cantiere edile: un esempio iconico di questo fenomeno è sicuramente la reggia di Versailles (*fig. 18*). Costruita per volere del Re di Francia Luigi XIV (1638-1715) in un contesto già occupato da residenze reali, fu senza dubbio l'esternazione materica di un ego ipertrofico ma, analizzandone le modalità di processo, la tipologia e le tempistiche/modalità di spesa, la lettura dell'opera è molto più complessa. Questa infatti va considerata come:

- Un centro politico per controllo sul territorio, sulle famiglie nobili e su tutte le figure di potere dell'epoca, che abitavano direttamente nel palazzo;
- Una dimostrazione di forza verso gli altri monarchi europei, oltre la vetero-aristocrazia interna che si opponeva alle politiche luigine, orientate più alla visione della Francia come stato nazionale che non come insieme di piccoli poteri locali, detenuti appunto dai nobili delle vecchie famiglie³⁰;
- Un motore di innovazione e promozione dei prodotti "manifatturieri" francesi: la reggia era anche un ammortizzatore sociale ante-litteram e, per certi versi, un centro di addestramento e formazione per il poderoso esercito francese dell'epoca, visto che in tempo di pace venivano impiegati in questo cantiere per svolgere lavori di ingegneria civile che, poi, sarebbero tornati utili durante le numerose campagne militari dell'epoca. Stime basate sulle precise rendicontazioni condotte da Colbert (1619-1683) indicano che in questo processo vennero impiegati oltre 36.000 lavoratori e 6.000 cavalli³¹.

In questo caso, la sensibilità tecnica dell'epoca portò l'*entourage* del re a iniziare a considerare l'importanza della gestione delle risorse, nell'organizzazione delle sovrapposizioni e della catena di fornitura (Tiberghien, 2002). Furono perciò coinvolte delle eminenti figure scientifiche del tempo, che contribuirono a vincere delle sfide tecniche come, ad esempio, nel campo del rilievo e della topografia³² e

³⁰ Si possono correlare le difficoltà economiche dei decenni successivi, che culminarono con la rivoluzione francese, anche con il debito cumulato nella progressione del cantiere.

³¹ La contabilità del cantiere è stata successivamente raccolta da Guiffrey (1890).

³² Nel cantiere furono impiegate tecniche innovative per la misurazione dei manufatti e dei terreni sotto la direzione di Picard (1620-1682) e Cassini (1625-1712).

dell'ingegneria idraulica mentre, per quanto riguarda l'argomento oggetto di questa dissertazione, una forte innovazione venne dalla concretizzazione della politica economica di Colbert³³.

Questa teoria si basa sulla riduzione al minimo delle importazioni in favore di un aumento delle esportazioni: per questo motivo, una nazione doveva avere un efficiente apparato produttivo capace quantitativamente di soddisfare la richiesta interna mentre, qualitativamente, doveva essere in grado di attirare possibili acquirenti oltreoconfine. Nella visione colbertista della politica economica, la reggia doveva diventare una grande vetrina per "l'industria" francese, perciò la necessità in apparenza "frivola" di dover produrre ingenti quantità di materiali pregiati, come il vetro, fu l'occasione per creare un processo produttivo talmente all'avanguardia da poter cambiare i paradigmi dell'epoca.



Figura 18. *Costruzione del castello di Versailles nel 1669. Adam Van der Meulen, 1669. Royal Collection, Londra.*

La prima operazione fu l'investimento di risorse nell'impianto di stabilimenti produttivi a ridosso del cantiere, per limitare i costi di trasporto dei materiali e semplificare le operazioni di *commissioning* dei componenti e le verifiche in situ della qualità di quanto realizzato. Successivamente, il problema si spostò nel

³³ Oltre ad essere ministro delle finanze del regno, era anche supervisore generale del cantiere della reggia.

campo della *gestione della conoscenza*, ovvero l'insieme di informazioni ed esperienze necessarie per produrre elementi di livello elevato come il vetro. Nel panorama dell'edilizia del XVII secolo infatti, questo era considerato tra i prodotti più pregiati e richiesti dal mercato, visto il regime praticamente monopolistico degli artigiani di Murano, che da secoli detenevano gelosamente le relative tecniche di produzione e di lavorazione artistica di questi manufatti. Alcuni di questi riuscirono a raggiungere il cantiere francese e a condividere la propria conoscenza tecnica con le capacità gestionali degli assistenti del Ministro, finendo per costruire una linea produttiva "ante-litteram" capace di produrre vetri e specchi a servizio della reggia, e affacciarsi sul mercato estero. Grazie quindi ai contributi degli scienziati dell'epoca, del sostegno economico statale e delle sempre crescenti richieste del mercato, si arrivò alla produzione del vetro colato su tavola ovvero un prodotto serializzato, omogeneo, prodotto con economie di scala (dunque con costi più accessibili) e secondo procedure standardizzate, non più detenute cripticamente da pochi artigiani: erano state poste le basi per la costituzione della Saint-Gobain SA, una delle più grandi multinazionali di prodotti per l'edilizia³⁴.

Come tutti gli eventi paradigmatici della storia, anche in questo caso le origini di questi fenomeni scaturiscono da un progressivo processo di avanzamento generale delle scienze e delle tecnologie avvenuto in epoche precedenti. Nella specificità del settore dell'edilizia, alle nuove esigenze vennero date risposte in termini di evoluzione delle scienze ingegneristiche, trainate dagli apporti di studiosi quali I. Newton (1645-1727), G. Leibniz (1646-1716) e R. Cartesio (1596-1650) i cui risultati, ancora oggi, rappresentano dei cardini imprescindibili.

Quasi un secolo dopo, nel pieno del fervore della rivoluzione industriale, venne costruito il primo ponte interamente metallico della storia, a servizio del pionieristico distretto minerario/metallurgico della gola del Severn³⁵.

All'epoca i costi dei materiali, grazie alle economie di scala rese possibili dalla meccanizzazione del lavoro, permettevano la progressiva sostituzione di materiali comuni come il legno, con le più prestanti leghe metalliche che, anche stilisticamente, diventarono un elemento imprescindibile della modernità. Questa fase di innovazione dei materiali però non era stata accompagnata da una congrua

³⁴ Nel 2015 Saint-Gobain ha celebrato i suoi 350 anni di storia. La più antica società quotata nell'indice CAC 40 della Borsa di Parigi e una delle più antiche aziende manifatturiere al mondo <<https://www.saint-gobain.it/gruppo/350-anniversario>>.

³⁵ "Ironbridge Gorge" Patrimonio dell'umanità protetto dall'UNESCO <<http://whc.unesco.org/en/list/371>>.

evoluzione del relativo processo realizzativo: le prime strutture metalliche vennero perciò costruite con gli stessi approcci qualitativi delle costruzioni in legno, e quest'opera non fece eccezione.

Costituito da una serie di archi paralleli connessi trasversalmente tra loro, presentava elementi di giunzione realizzati con le stesse soluzioni tecniche sviluppate per il legno: questo, sebbene semplificò le operazioni di montaggio - durate appena tre mesi (De Haan, 2011) – comportò un aumento considerevole del peso degli elementi strutturali (e di conseguenza, del prezzo) portando alla rovina il principale finanziatore dell'opera, A. Darby. Sulla base di questa esperienza, iniziò un processo di ottimizzazione della progettazione delle sezioni degli elementi strutturali e dei giunti, che portò presto i risultati sperati: in un contesto molto simile (*Buildwas bridge*, sempre sul Severn), T. Telford (1757-1834) riuscì a risolvere la problematica progettuale impiegando 176 tonnellate di ghisa contro le 384 impiegate nella realizzazione dell'ironbridge (Frampton, 1993)

Dopo questa prima fase di industrializzazione dei processi edilizi, vi fu una seconda ondata di innovazioni, che riguardarono in parte il miglioramento delle prestazioni dei materiali e dei componenti delle tecniche conosciute, in parte l'acquisizione di nuove tecniche nel campo della chimica, dei materiali e delle fonti energetiche.

Per creare nuovi mercati dove vendere questi prodotti e, al contempo, acquisire le materie prime, gli stati nazionali intrecciarono una fitta rete di scambi e relazioni che, se da una parte limitarono lo scoppio di conflitti all'interno del suolo europeo, dall'altra aprirono la strada al colonialismo.

Per questo, al fine di promuovere i prodotti della consolidata realtà industriale, aprire nuovi mercati e illustrare le nuove scoperte scientifiche nel 1851 venne organizzata, a Londra, la prima Esposizione Universale.

Per accogliere un evento del genere, bisognava perciò disporre di un edificio che rappresentasse lo spirito di questa rivoluzione tecnologica in corso e, per questo, venne costruito il Crystal Palace, una struttura in acciaio e vetro totalmente prefabbricata e assemblata in opera (*fig. 19*).

La progettazione, come documentato negli archivi dell'epoca, richiese a Sir A. Paxton soltanto otto giorni, cosa resa possibile dalla profonda esperienza del tecnico nel campo delle serre e dalla sua visione pionieristica dell'edilizia prefabbricata modulare. I componenti dell'opera vennero realizzati in officina, al fine di garantire qualitativamente l'omogeneità del prodotto e, soprattutto, la facilità esecutiva dei giunti, visto il tempo a disposizione e la necessità di procedere secondo modalità "industriali", quindi con attività ripetitive e standardizzate volte a realizzare un

prodotto omogeneo e qualitativamente facilmente controllabile. È in questa occasione che, nel mondo dell'edilizia, inizia un inesorabile processo di trasformazione della figura del lavoratore edile: da artigiano possessore di conoscenza e tecniche, nonché motore esso stesso di innovazione, ad assemblatore di componenti (*fig. 20*). Per questo edificio i tempi di costruzione furono minuziosamente rispettati, mentre i costi duplicarono. Solo grazie al successo economico della mostra fu possibile per l'impresa avere la differenza di costo e il nuovo incarico per lo smontaggio e il rimontaggio dell'opera a Sydenham hill³⁶, all'epoca una zona in espansione del sud-est londinese.

La prima guerra mondiale mise fine ad un periodo caratterizzato da una serie di innovazioni tecnologiche che incisero positivamente sulla qualità della vita dell'epoca e sull'espansione commerciale della consolidata realtà industriale. I successivi decenni quindi vissero in balia di contrasti mai sopiti dal termine del conflitto, e furono caratterizzati da un costante aumento della tensione tra le nazioni europee. Questo clima perciò spense l'entusiasmo "internazionalista" degli anni precedenti, e queste strutture temporanee finirono tutte in stato di semi-abbandono (es. Parigi, New-York etc.) e quindi distrutte in rovinosi incendi (*fig. 21*).

³⁶ "...an epic of prefabrication, standardisation, precision and construction management unprecedented in its time" (Pawley, 1990).

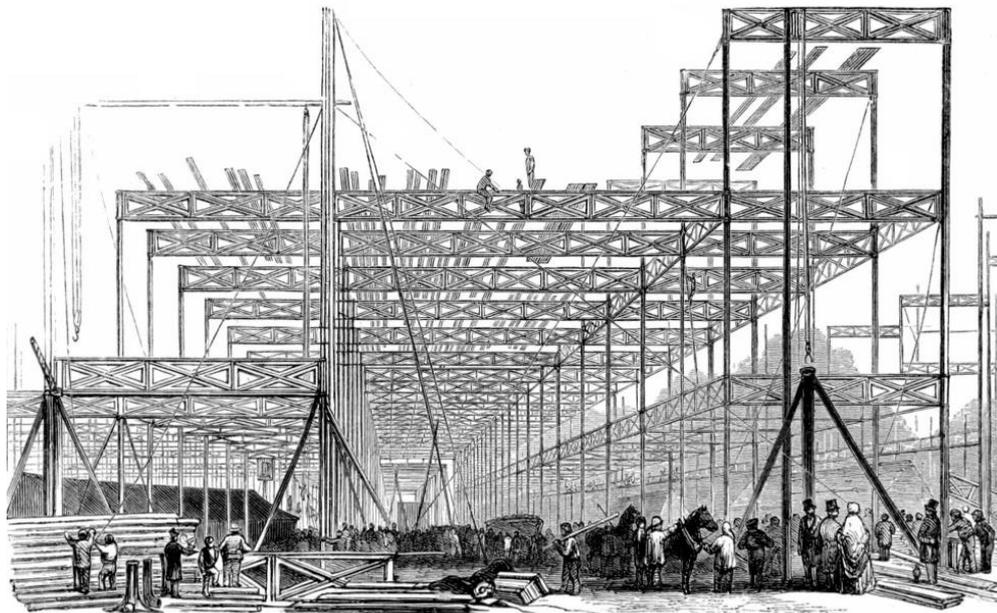


Figura 19. Il cantiere del Crystal Palace. Londra, 1851 (Berlin et al, 1851).

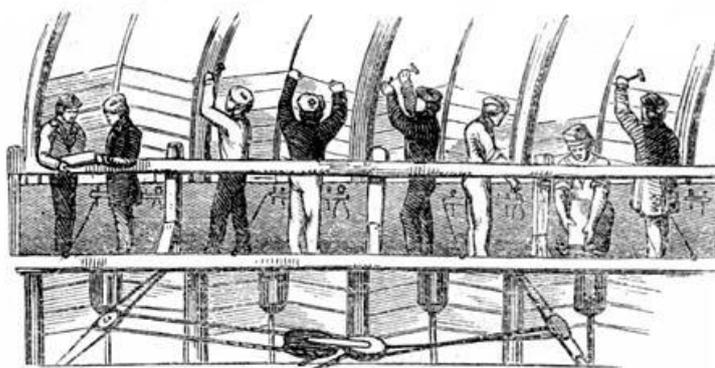


Figura 20. Il montaggio dei pannelli in vetro sulle volte del Crystal Palace. Londra, 1851 (Berlin et al, 1851).

Tabella n. 03: comparativa tra pratiche gestionali in uso all'inizio dell'industrialesimo e la contemporaneità.

Proto-industrialesimo	Epoca Contemporanea	Confronto
1) Capitali		
Per quanto l'intervento pubblico ancora sia preponderante in termini di impatto economico, grazie allo sviluppo industriale inizia a nascere una nuova forma di ricchezza , non più legata a titoli nobiliari o rendite agricole ma bensì al possesso dei beni di produzione . Le novità culturali apportate dalla rivoluzione francese inoltre, indebolirono il potere dei sovrani e della chiesa, contribuendo alla creazione del ceto borghese-industriale detentore dei capitali necessari per fare impresa. L'idea di "ceto medio" è ancora ben lontana.	La ciclicità delle crisi economiche e l'aumento del debito pubblico mondiale, oltre all'avvicinamento al modello liberista delle nazioni dell'ex blocco socialista (Russia e Cina, ad esempio) hanno distribuito ingenti ricchezze nelle mani delle oligarchie , che manifestano il loro potere attraverso imponenti opere edili. Infatti, la mole delle opere private è, in alcuni contesti, paragonabile a quelle pubbliche (si pensi alle sedi delle più importanti società della <i>Silicon Valley</i> o alle iniziative immobiliari degli Emirati Arabi)	Si assiste ad una progressiva perdita di potere da parte dei tradizionali stati nazionali in favore dell'iniziativa privata : tale aspetto è stato metabolizzato dalle varie legislazioni con istituzioni quali il <i>project financing</i> che prevede, a seconda degli accordi, la realizzazione di opere pubbliche da parte dei privati in cambio di concessioni speciali per la realizzazione di importanti iniziative o la costruzione di opere private di pubblica utilità (si pensi al caso degli stadi o degli ospedali).
2) Realizzazione delle opere		
La comparsa dei primi prodotti industrializzati nel mondo dell'edilizia comporta un profondo cambiamento , per certi versi ancora in atto, dell'organizzazione delle imprese edili . Le competenze artigianali del singolo vengono sempre più limitate dalla correttezza delle soluzioni adottate a monte del	Nonostante il settore delle costruzioni sia, tradizionalmente, caratterizzato da un basso tasso di automazione e digitalizzazione, la pervasività delle apparecchiature informatiche nella vita umana è tale che, di riflesso, anche nel cantiere si osserva un progressivo impiego di attrezzature tecnologico/informatiche .	Le evidenti potenzialità legate allo sviluppo dei sistemi CAD/CAM hanno portato il settore industriale a produrre elementi e componenti sempre più adattabili sia alle esigenze del cliente, sia alle effettive richieste del mercato, con la possibilità di impostare la capacità produttiva alle fluttuazioni della domanda (approccio <i>Just in time</i>). Inoltre stiamo assistendo,

<p>processo, ovvero nell'officina.</p>	<p>La piena consapevolezza delle potenzialità delle stampanti 3D (El Sayed et al, 2017) porterà, di qui a poco, a una vera e propria rivoluzione all'insegna della <i>mass-customization</i>.</p>	<p>grazie alle tecnologie portatili di stampa digitale, alla nascita di un vero e proprio fenomeno di "artigianato industriale" (<i>makers</i>) che, nello specifico settore dell'edilizia, può impattare in modo molto significativo sulla economicità delle soluzioni e sulla personalizzabilità di elementi, superando il concetto vetero-industriale di catalogo.</p>
<p>Proto-industrialissimo</p>	<p>Epoca Contemporanea</p>	<p>Confronto</p>
<p>3) Gestione della conoscenza</p>		
<p>In questo periodo avviene uno dei più impattanti cambi di paradigma nel settore delle costruzioni: difatti, la conoscenza passa dalle mani dell'artigiano, che la custodiva gelosamente nel corso dei secoli, alla realtà della fabbrica, luogo dove si accentra la proprietà dei mezzi di produzione della ricchezza</p>	<p>Grazie ad internet, alla creazione di piattaforme libere di informazione e alla redazione digitale dei progetti nella pressoché totalità dei casi, uno dei punti-cardine della società contemporanea è la condivisione della conoscenza. Per questo, i numerosi brevetti prodotti non sono spesso riconducibili ad un "padre" del sistema, bensì alla <i>corporation</i> che mette a disposizione i mezzi per produrre idee.</p>	<p>Nelle ultime decadi il proponimento illuministico della distribuzione capillare della conoscenza è realtà: con dispositivi di bassissima fascia e una sufficiente connessione dati, ogni persona può accedere a contenuti informativi e acquisire conoscenza. Il rischio della qualità della conoscenza in rete è dato dalla difficoltà di organizzare le fonti e le informazioni che, in poco tempo, possono diffondersi in maniera inarrestabile (si veda il fenomeno delle "fake news").</p>



Figura 21. Il 30 Novembre 1936 un violento incendio distrusse il Crystal Palace. A seguito dell'evento, l'allora Primo Ministro britannico, W. Churchill (1874-1965) parlò di "fine di un'epoca". Effettivamente, questa affermazione sembra premonire quello che sarebbe successo di lì a poco: l'Europa infatti, a seguito della disastrosa II guerra mondiale, oltre a doversi rialzare da una furia distruttrice mai vista nella storia, perderà il ruolo di "guida" economico-culturale in favore dei blocchi vincitori del conflitto, USA e URSS.

1.6. La nascita delle metodologie standardizzate di processo nella Seconda rivoluzione industriale

Nel passaggio dal XIX al XX secolo, l'edilizia consolidò la sua progressiva trasformazione da attività prevalentemente artigianale in un insieme di processi industrializzati, tanto da iniziarsi a interrogare sulla possibilità di far seguire a questo particolare settore, che praticamente produce *prototipi*, gli stessi principi di gestione della manifattura.

In quegli anni, l'industria manifatturiera stava metabolizzando l'applicazione pratica dei principi Tayloristici sulla gestione della produzione: questi erano basati, essenzialmente, sulla scomposizione elementare delle attività con pianificazione del personale da impiegare e dei tempi destinati allo svolgimento della mansione, l'assegnazione dei compiti al lavoratore (o a una squadra guidata da un *leader*), verifica a campione e l'assemblaggio definitivo (Zuffo, 2012).

Come visto nel caso del Crystal Palace che, in questo senso, ha anticipato i tempi, tale modello assicura un certo tasso di successo nella misura in cui i componenti da assemblare siano semplici, ripetitivi e modulari. Difatti, come sarà applicato estensivamente nel modello produttivo fordista, tale generalizzazione vale nel momento in cui il prodotto, come la linea produttiva, è unico e standardizzato.

La costruzione degli edifici differisce però da quella delle automobili per alcuni principi fisici quali la scala del prodotto finale, la "immobilità" degli edifici durante la costruzione contro la mobilità dell'auto lungo la linea produttiva, e la tendenza dell'edificio a subire gli influssi del contesto esterno, sia in fase progettuale, sia in fase cantieristica e operativa (Partouche et al., 2008). Il risultato di questa sommatoria di incertezze sono le varianti in corso d'opera, uno dei maggiori problemi che limitano il tasso di successo di un processo edilizio.

Nonostante queste differenze sostanziali, vi è sempre stato un fisiologico trasferimento di conoscenza tra questi due settori industriali, con esiti di alterna fortuna. Il passaggio dall'artigianato all'industrializzazione di massa è stato perciò il fenomeno caratterizzante della civiltà "moderna" del XX secolo³⁷. L'obiettivo, di carattere anche sociale, era quello di rendere gli immobili come le automobili, ovvero un bene accessibile alla maggior parte della popolazione e dotato di standard

³⁷ L'impatto dell'industrializzazione di massa fu talmente irruento da essere individuato immediatamente anche dagli stessi contemporanei. *Cfr.* "Tempi moderni" di C. Chaplin, 1936.

qualitativi condivisi e accettabili. Esempificando, si potrebbe estremizzare il concetto con la seguente proporzione (Kieran et Timberlake, 2004):

$$\text{Qualità} : \text{Scopo} = \text{Costo} : \text{Tempo}$$

Dove la Qualità³⁸ e lo Scopo³⁹ sono aspetti correntemente richiesti per qualsiasi soggetto committente che si accinga a iniziare un processo edilizio; Costi e Tempi invece, benché naturalmente legati alle due variabili sopra citate, sono valori che debbono rientrare in specifici limiti (budget) al fine di non compromettere la qualità del processo stesso e, nel concreto, la sua effettiva fattibilità.

Difatti, mentre nel caso dell'allora nascente industria delle automobili di massa era giusto ricorrere a metodi speditivi di standardizzazione al fine di abbassare i prezzi⁴⁰ Nel caso dell'edilizia invece, per quanto un prodotto possa essere standardizzato, composto da componenti prodotti fuori opera e realizzato secondo parametri di serialità, la possibilità che questo possa seguire un processo lineare e sequenziale è molto bassa, relegata a costruzioni particolari e, in massima parte, temporanee.

Un esempio di felice sintesi tra costruzione in serie e peculiarità edilizia è stata la realizzazione dell'Empire State Building (1930-1931). Difatti, questo processo realizzativo è stato caratterizzato da un approccio gestionale innovativo, che va a rappresentare una felice sintesi tra esigenze specifiche dell'edilizia e tecniche di produzione tayloristiche. Il principio progettuale era basato sulla ripetitività estensiva di sistemi strutturali e impiantistici di efficacia consolidata, in maniera tale da poter impiegare personale dotato di una certa esperienza per ogni specialismo.⁴¹ Inoltre, l'attenzione alla collaboratività era garantita dal general

³⁸ “Grado secondo il quale un insieme di caratteristiche intrinseche soddisfa i requisiti” (UNI EN ISO 9000:2005/3.1.1).

³⁹ *Cfr.* UNI EN ISO 9001:2015/4.1

⁴⁰ La Ford “model T” nei primi anni di produzione prevedeva una sola motorizzazione, un solo allestimento e un solo colore di carrozzeria, e costava quasi un decimo rispetto alle altre automobili sul mercato.

⁴¹ Venne impiegata manodopera “pellerossa” per le carpenterie metalliche in quota, dato che erano culturalmente abituati a lavorare su corda e/o in bilico a grandi quote; per gli impianti vennero selezionati lavoratori irlandesi, per la loro esperienza impiantistica a servizio delle navi mentre per le apparecchiature murarie, richieste dalla normativa per la protezione al fuoco del telaio metallico, furono impiegate maestranze di origine italiana (Willis e Friedman, 1998).

contractor dell'epoca⁴² che, forte dell'esperienza nel settore, mobilitò tutta una fitta rete di imprese esecutrici e di fornitori con l'intento di garantire un flusso costante di approvvigionamenti al cantiere che, effettivamente, non calò mai il suo tasso di produttività (fig. 23). L'innovazione portata da questo processo sta in una importante intuizione: oltre alla verifica della durata di una attività semplice in carico ad una squadra lavorativa, fu verificata la possibilità di agire, in parallelo, su più aree del cantiere stesso; quindi, secondo il principio del *divide et impera*, le lavorazioni procedevano sincronicamente grazie all'impiego contemporaneo di tutte le aree di cantiere, occupate da squadre diverse. I lavori, dalla progettazione al collaudo, finirono in 21 mesi (fig. 22), e i costi passarono da 40 milioni di dollari stimati a 38, con un risparmio di 2 milioni. Su 3.400 lavoratori, vi furono 6 incidenti mortali, mentre non sono note le stime relativamente ad altri infortuni (Willis, Friedman, 1998).

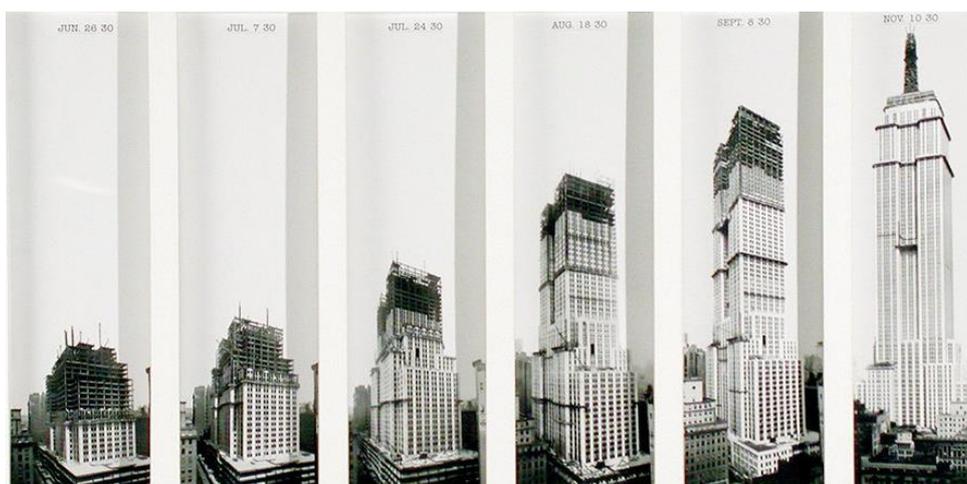


Figura 22. Progressione del cantiere dell'Empire State Building. Digital collection of the New York Public Library, 1930.

⁴² Starrett Corp., ancora oggi in attività <<http://www.starrettcorp.com/>>.



Figura 23. Il cantiere dell'Empire State Building. Digital collection of the New York Public Library, 1930.

1.7. Dalla Terza alla Quarta rivoluzione industriale: verso la digitalizzazione del processo edilizio

Il secondo conflitto mondiale può essere considerato lo spartiacque della realtà industriale del mondo contemporaneo: difatti, tra le macerie della devastazione bellica, insieme alla speranza della ricostruzione crescevano anche le tecnologie innovative sviluppate durante quegli anni.

Basti pensare, tra le altre, al razzo che poi condurrà l'uomo sulla luna⁴³ oppure all'invenzione che differenzierà questa fase dell'industrialesimo dalle precedenti: l'elaborazione automatica delle informazioni, ovvero l'arma più efficace sviluppata durante il secondo conflitto mondiale⁴⁴.

Il computer quindi, grazie alla successiva stabilità dovuta alla "politica della deterrenza" tra le super-potenze presenti sullo scacchiere strategico internazionale (USA-URSS) avrà modo di sviluppare le sue potenzialità dapprima in ambito militare, successivamente per usi civili. Difatti, lo stesso tecnico⁴⁵ a cui si attribuisce la definizione di *CAD – Computer Aided Design (o Drafting, a seconda dell'approccio operativo)* intuì l'applicabilità della nascente informatica alla progettazione tecnica studiando l'implementazione degli schermi radar negli anni '50.

Successivamente, grazie al lavoro di I. Sutherland, venne aperto il dibattito sull'interazione uomo-macchina nell'ambito della progettazione: il prototipo proposto infatti (*Sketchpad*) era capace di riprodurre sullo schermo le geometrie tracciate dal progettista attraverso l'uso di un pennino: vengono dunque formalizzate le basi delle successive tecnologie CAM/CAD quali i vincoli geometrici (*geometric constraints*), le librerie, la programmazione ad oggetti e la semplificazione dell'interfaccia grafica orientata all'usabilità da parte dell'utente.

Tali innovazioni furono metabolizzate dapprima dal settore dell'aero-spaziale, dove gli elaboratori trovarono fin da subito terreno fertile sia come strumenti per la gestione di ingenti quantità di dati e calcoli da processare, sia come tecniche di

⁴³ Erede diretto dei missili costruiti durante le fasi finali del conflitto, frutto delle applicazioni pionieristiche di W. Von Braun (1912-1977), uno dei fondatori della NASA.

⁴⁴ Seppur tenuto velatamente nascosto nell'immediato dopoguerra, la storiografia sta progressivamente sottolineando l'impatto decisivo che l'informatica ha avuto sulle sorti del conflitto. A tal riguardo si consideri la riabilitazione della figura del matematico A. Turing (1912-1954) dei primi anni '10 del duemila.

⁴⁵ Douglas T. Ross (1929-2007), *cfr.* Ross, D T (1961) "Computer-aided design". in: *Communication of the Association of Computer Machinery*, 4(5), pp. 235.

velocizzazione della produzione: è in questo settore infatti che vennero messe a punto le prime sperimentazioni, condotte da Bézier (1910-1999), orientate al collegamento tra elaboratore e linea produttiva meccanizzata: era nato il CAD/CAM.

Progressivamente, queste tecnologie avanzate vennero introdotte anche a settori con ridotto contenuto tecnologico, come l'edilizia e, fin dagli inizi, gli studiosi del settore si interrogarono sulle prospettive che questi strumenti offrivano all'architettura. Scriveva Nicolosi (1975)⁴⁶:

“Alla provvidenziale disponibilità della tecnologia per tutte le istanze di oggi: rapidità, economicità, produttività in serie, flessibilità, recupero – si aggiunge, se fra le tecnologie comprendiamo il computer, l'aprirsi di orizzonti insperati ed imprevedibili.

Questo strumento riesce ad acquisire e trasmettere al cervello umano quanto il cervello non poteva dominare per l'estrema sua complessità e vertiginoso evolversi, nel tempo: esattamente quel tessuto del reale dal quale può emergere, nell'atto creativo, contestualmente l'immagine della funzione e della sua forma.

La macchina non si sostituisce all'uomo; parlare di cervello elettronico è fantascientifico come sarebbe dire «occhio telescopico». Come il telescopio consente all'occhio – e solo all'occhio – di svolgere la sua insostituibile funzione, fin là dove, negli abissi dell'universo, da solo l'occhio non potrebbe mai penetrare, ma nei quali, senza l'occhio, il telescopio, inerte macchinismo, non vedrebbe nulla; così il computer aiuta il cervello ad acquisire, ad accumulare, a costituire l'edificio ormai smisurato dell'esperienza di oggi.

Presente, inoltre, nell'iter progettuale la macchina potenzia e snellisce l'attività ideativa stessa, evitando dispersioni di energie – non solo nelle complesse calcolazioni della statica – ma anche con l'automatizzare l'operazione grafica e la trasposizione nei vari tipi di proiezione: senza con questo peraltro impedire che la personalità, tesa verso l'atto creativo, investa e colorisca di sé anche la strumentazione grafica, nonché, notoriamente, l'ideazione dell'organismo statico, non mai riducibile allo schematismo delle calcolazioni.

[...] l'introduzione del computer, miracoloso strumento, quasi telescopio-macroscopio del cervello nel campo di quella particolare arte, l'architettura, che per rimanere se stessa non può non fare i conti con le effettive e concrete esigenze del

⁴⁶ Archivio digitale RAU <www.rassegnadiarchitettura.it/mat/pdf26-2.pdf>.

reale, dovrebbe far insorgere l'esigenza di sanare quella cesura ed indagare se indicazioni utili non potrebbero scaturire dal passato per rimettere l'architettura nel suo ruolo e ridarle il suo vero volto"

Nelle successive decadi, il computer ha pienamente ripagato tutte le aspettative riposte in questa tecnologia e, nel mondo dell'edilizia, è diventato uno strumento di supporto praticamente imprescindibile.

Difatti, oltre alla velocizzazione dei processi di rappresentazione e raccolta delle informazioni, frutto della "prima ondata" del CAAD, ha permesso l'introduzione della *parametrizzazione* nelle pratiche progettuali correnti. La progettazione parametrica è un processo basato su procedimenti algoritmici attuati mediante parametri e regole che, insieme, definiscono codificano e chiariscono le relazioni tra intento progettuale e risposta in termini di progetto (Woodbury, 2010).

Grazie a questi strumenti di calcolo, è stato dunque possibile andare oltre una certa ripetizione di proporzioni e canoni, metodologia tra l'altro conosciuta fin dai tempi di Stonehenge, e introdurre nella pratica progettuale degli aspetti di reciproco condizionamento della produzione delle geometrie e/o degli attributi degli elementi tecnici in maniera algoritmica.

Nel XX secolo, le prime esperienze in merito si devono ad A. Gaudi - in maniera empirica - mentre nei successivi studi di Luigi Moretti⁴⁷ e Bruno De Finetti (1953) venne indagato l'aspetto matematico/analitico nei rapporti formali e sostanziali del progetto di architettura (*fig. 24a e 24b*).

Dal punto di vista della gestione della progettazione e della realizzazione del cantiere complesso di architettura per quanto riguarda il settore dell'edilizia, il tema prevalente era la ricostruzione dell'Europa e del

⁴⁷ "I "parametri" e le loro interrelazioni divengono così l'espressione, il codice, del nuovo linguaggio architettonico, la "struttura", nel senso originario e rigoroso del vocabolo, deficiente le forme che quelle funzioni esaudiscono. Alla determinazione dei "parametri" e loro interrapporti, debbono chiamarsi a coadiuvare le tecniche e le strumentazioni del pensiero scientifico più attuali; particolarmente la logica-matematica, la ricerca operativa e i computers, specie questi per la possibilità che danno di esprimere in serie cicliche autocorrettive le soluzioni probabili dei valori dei parametri e delle loro relazioni." L. Moretti (1953).

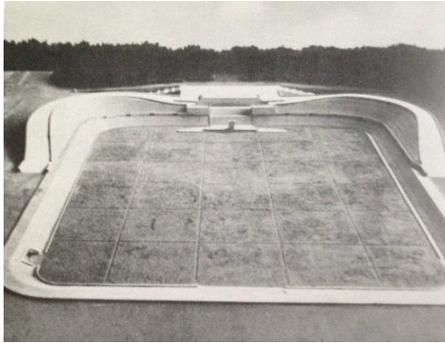


Figura 24a. *Plastico per il progetto “Arengo della Nazione” al Foro Italico, Roma. Luigi Moretti, 1936-37 (archivio fotografico de “Il Contrafforte – Roma”).*

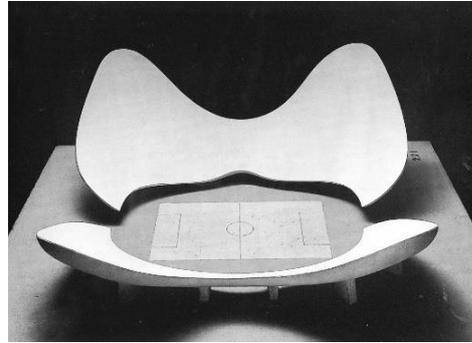


Figura 24b. *Plastico per il prototipo di uno stadio, progettato massimizzando le curve di “equi-desiderabilità” visiva degli spettatori. Moretti, De Finetti, XII Triennale di Milano (da Converso e Bonatti, 2006).*

Giappone, ovvero le realtà che più duramente erano state colpite durante gli anni del conflitto bellico, e la successiva soddisfazione del crescente fabbisogno abitativo dato dal “boom” demografico degli anni '60.

Sulla base di esperienze già avviate in alcune specifiche realtà, fu avviata una campagna massiccia di applicazione delle metodologie di produzione edilizia prefabbricata, aprendo una stagione inedita nella cultura costruttiva di cui oggi si valuta come valorizzarne gli esiti, molto spesso deludenti se non, da punto di vista tecnologico e sociologico, addirittura dannosi.

Nel frattempo, dal punto di vista della ricerca si iniziava ad andare oltre la semplice realizzazione di strumenti che velocizzassero la rappresentazione e la riproducibilità delle informazioni legate alla progettazione edilizia, iniziando ad intuire le potenzialità dei calcolatori, che nel frattempo aumentavano considerevolmente la loro potenza di calcolo e diffusione, potevano dare nel *supportare* il progettista nelle scelte progettuali come, ad esempio, la formalizzazione di sistemi automatici per la definizione dei sistemi tipologici mediante sistemi basati sulla teoria dei grafi (Carrara et al, 1980). Negli anni successivi, si passò quindi all'analisi dei sistemi edilizi complessi, elaborando metodologie basate sul formalismo delle *Frame* finalizzato alla rappresentazione della complessità delle singole entità (Novembri, 1987).

Nel panorama internazionale invece, nello specifico settore dell'edilizia si cercava di passare da strumenti di rappresentazione di geometrie a strumenti capaci di modellare “oggetti edilizi” dotati quindi di specifiche proprietà e regole di inter-

relazionalità strettamente dedicate al complesso sistema interdipendente, quale è il mondo delle costruzioni.

C. Eastman, tra i primi a descrivere le specifiche di questi strumenti e tutt'ora una delle massime figure attive nel campo, così si esprimeva a riguardo (1974):

Molti dei costi di progettazione, costruzione e funzionamento edilizio derivano dal ricorso a disegni come modalità per riportare le annotazioni dell'edificio. Come alternativa, il presente documento delinea la progettazione di un sistema informatico utile per memorizzare e manipolare le informazioni di progetto in un dettaglio che consente la progettazione, la costruzione e le analisi operative. Un edificio è considerato come la composizione spaziale di un insieme di parti. Il sistema, denominato Sistema Descrittivo dell'Edificio (BDS) è caratterizzato dall'essere:

- *un mezzo per un facile inserimento grafico di forme di elementi arbitrariamente complessi;*
- *un linguaggio grafico interattivo per modificare e configurare la disposizione degli elementi;*
- *capacità grafiche in formato cartaceo che possono produrre prospettiva o disegni ortografici di alta qualità;*
- *una funzione per l'ordinamento e la schematizzazione, che consenta l'ordinamento della base-dati per attributi. Per esempio, per il tipo di materiale, fornitore o componendo un insieme di dati per l'analisi.*

Tale descrizione combacia perfettamente con problemi che sono di stretta attualità, a conferma del fatto che, contrariamente a quanto può emergere da campagne informative o pubblicitarie, il BIM inteso come sistema di gestione informativa dell'edificio non è affatto “un'ultima moda”.

Negli stessi anni '70⁴⁸, venne rilasciato uno dei primi sviluppi commerciali di queste ricerche: il sistema RUCAPS[®] difatti, ovvero il primo software commerciale capace di modellare geometrie ed attribuirne informazioni, era esplicitamente basato sui principi sopra citati ma, vista anche l'epoca e la potenza di calcolo degli elaboratori, non aveva ancora maturato le potenzialità necessarie a gestire la complessità tipica del sistema edilizio.

⁴⁸ Nel 2017, nel dibattito sulla necessità di applicazione della metodologia BIM a scala globale, vi è stato un interessante scambio di lettere aperte tra i vari sviluppatori dei software che, unanimemente, sono riconosciuti come “genitori” del BIM contemporaneamente inteso. La rivista on-line statunitense “AEC magazine” ha raccolto tutte queste testimonianze, accessibili al link <http://aecmag.com/59-features/1352-celebrating-the-history-of-bim>.

A questa esperienza seguì dunque lo sviluppo di SONATA® che, a differenza del suo predecessore, iniziava ad avere dei rudimenti di linguaggio basato su regole, che permetteva di introdurre in questi sistemi le verifiche di interferenza (*clash detection*) e la parte analitica relativa ai computi dei materiali e ai costi.

In parallelo allo sviluppo e alla commercializzazione di SONATA®, seguito poi – per motivi legati a vicende societarie – dal sistema REFLEX®⁴⁹, in Ungheria (allora ricompresa nella “cortina di ferro” degli stati socialisti-sovietici) venne commercializzato “RADAR-CH®”, successivamente rinominato ARCHICAD®. Questo sistema, connotato da alte possibilità di parametrizzazione e di una ampia scelta di librerie di “oggetti intelligenti” (ovvero di famiglie BIM parametriche) venne diffuso capillarmente grazie ad una intelligente intesa commerciale con la Apple e fu, per diversi lustri il software *BIM-based* più diffuso tra gli addetti ai lavori e può vantare, ad oggi, uno sviluppo ultra-trentennale. Negli anni '90 perciò, queste metodologie divennero finalmente “alla portata di tutti”, permettendo a progettisti e imprese di passare all'applicazione relegata a grandi infrastrutture (ad es. aeroporti) a progetti complessi di diversa entità.

Emblematico è il caso di F. O. Gehry⁵⁰: l'autore canadese/americano difatti, è stato tra i più grandi interpreti dell'avvicinamento tra la creatività scultorea dell'architetto e le possibilità realizzative date dalla tecnologia, in questo caso espresse dal connubio tra informatica e produzione edilizia.

La realizzazione delle sue dirompenti architetture è stata possibile infatti solo grazie alla capacità di impiegare strumenti digitali capaci di interpretare la plasticità dei suoi *concept*, e quindi ingegnerizzarli per la produzione diretta in officina, garantendo perciò la realizzazione di elementi fuori standard in ambiente controllato e serializzato, per poi procedere ad un assemblaggio prefigurato dei pezzi in cantiere (*fig. 25*), con evidenti maggiori garanzie di rispetto dei tempi e dei costi rispetto alla costruzione *in situ* di pezzi unici. Per organizzare la complessità di questi componenti (basti pensare che il solo rivestimento esterno in titanio conta circa 33.000 lastre) venne introdotto nel suo raggruppamento di progettazione il software di derivazione aero-spaziale “CATIA” che, a seguito di una serie di

⁴⁹ Parte del team di sviluppo di REFLEX in seguito creò una società autonoma, (acquisita nel 2002 da Autodesk), la Revit Technologies (Crotty, 2012).

⁵⁰ <<http://www.gehrytech.com/en/projects/>>.



Figura 25. Il cantiere del Guggenheim Museum di Bilbao durante le fasi di realizzazione, dal 1993-97 (dal sito ufficiale del museo: <<https://www.guggenheim-bilbao.eus/en/the-building/the-construction/>>

aggiustamenti necessari a renderlo interoperabile con i software abitualmente in uso presso gli studi di progettazione architettonica, diventò uno standard per l'applicazione nei sinuosi progetti di Gehry.

Questo episodio è un punto chiave nell'attuale processo di trasformazione della figura dell'architetto contemporaneo: si consideri difatti che il software-base CATIA venne talmente personalizzata per gli *specifici usi* legati allo sviluppo dei progetti di architettura, che nello studio di Gehry nacque uno specifico *spin-off* (*Gehry Technologies*) che, tutt'ora, si occupa specificamente dello sviluppo informatico di queste soluzioni⁵¹.

Pertanto, all'architetto contemporaneo è richiesto lo stesso sforzo compiuto ai tempi dell'antichità con l'uso e lo sviluppo di archi e volte; nel rinascimento con la prospettiva; oppure nei secoli delle rivoluzioni industriali con le allora innovative soluzioni tecniche prospettate dalla scoperta dei nuovi materiali: occorre dunque che

⁵¹ Tale sviluppo ha portato alla definizione di un nuovo software, chiamato "Digital Project", ceduto successivamente alla "Trimble Technologies" ma tutt'ora impiegato dallo staff di Gehry per le ultime opere, ad es. il museo della fondazione "Louis Vuitton" di Parigi. <<http://www.gehrytechnologies.com/en/products/>>

il tecnico colga le opportunità messe a disposizione dagli avanzamenti tecnologici delle altre discipline o ne promuova di specifici, al fine di poter ottimizzare al massimo le possibilità che le condizioni della sua epoca gli mette a disposizione.

Per quanto riguarda la realtà italiana, uno dei primi progetti complessi in cui si è fatto uso estensivo delle tecnologie digitali nel campo architettonico è stata la nuova chiesa di San Giovanni Rotondo – FG, dedicata a San Pio da Pietrelcina, costruita tra il 1994 e il 2004.

In questo caso, il tema progettuale era dotare il frequentatissimo luogo di culto di una Sala liturgica adeguata all'accoglienza delle decine di migliaia di fedeli che, in occasione delle celebrazioni più importanti, si riversano nella località garganica.

Per enfatizzare il valore dell'accoglienza del pellegrino, la soluzione architettonica prevede la rinuncia ad elementi divisorii "forti" in facciata, in favore dell'eliminazione degli ostacoli visivi tra l'ampio sagrato esterno e la Sala interna, divise da una grandissima vetrata policroma che rappresenta scene tratte dal Vangelo dell'Apocalisse⁵². Inoltre, questa continuità è rafforzata dalle pavimentazioni che uniscono interno ed esterno senza soluzione di continuità ma, nonostante queste scelte, allo stesso tempo l'interno della chiesa offre una certa sensazione di tepore e intimità.

Questo risultato è stato possibile anche grazie alla serie di arconi in pietra disposti in senso concentrico, che inducono quindi alla concentrazione visiva e spirituale verso il presbiterio e dalle coperture rivestite in legno che, collegate con sottili forcelle metalliche agli arconi in pietra, sembrano quasi distese dolcemente sull'assemblea, senza mostrare l'effettiva massa che può caratterizzare una superficie in orditura lignea e rivestimento in rame pre-ossidato che si spande per centinaia di metri quadrati.

Per gestire una struttura così ardita, era quindi evidentemente necessario ricorrere a strumenti di supporto adeguati, e così fu. Ricorda Piano (2005a): "Le arcate di sostegno in pietra sono disposte in modo radiale, così come fu previsto all'inizio da Peter Rice. Grazie alle nuove tecnologie (il calcolo strutturale effettuato con il computer e il taglio controllato da macchine automatiche) abbiamo sperimentato nuove possibilità nell'uso del materiale di costruzione più antico in assoluto".

Difatti, i conci degli arconi sono realizzati in pietra di Apricena (*fig. 26*), estratta poco lontano dal Santuario: questi, oltre ad avere la complessità tecnica data dal fatto

⁵² L'apparato liturgico-decorativo della chiesa, come l'impianto della stessa è ancora oggi tema dibattuto tra i fedeli oltre che tra le stesse autorità ecclesiastiche: uno dei casi più eloquenti a riguardo è stata la sostituzione, imposta dall'allora Ordinario Diocesano, del crocifisso del Pomodoro con uno "tradizionale" in legno, con rappresentazione antropomorfa del Cristo, risalente al XIX sec.

che sono attraversati da cavi post-tesi che ne garantiscono la tenuta in caso di sisma, per dare l'attrito necessario al comportamento solidale dell'arco sono tutti sagomati in maniera tale da avere, benché posati a secco, il massimo della superficie di aderenza reciproca. Questo significa che ogni concio dei 22 arconi è realizzato in maniera differente, cosa che poteva essere gestita, sia dal punto di vista progettuale che esecutivo, solo con strumenti di tipo digitale (*fig. 26, 27*).

Dal punto di vista dell'efficienza di processo, i tempi sono stati molto superiori alle previsioni, mentre non si può essere esaustivamente precisi sull'aderenza tra costi preventivati e spesa definitiva, in quanto il finanziamento è stato nella pressoché totalità sostenuto dalle offerte dei fedeli, e rendicontato internamente dalla struttura dei frati cappuccini.

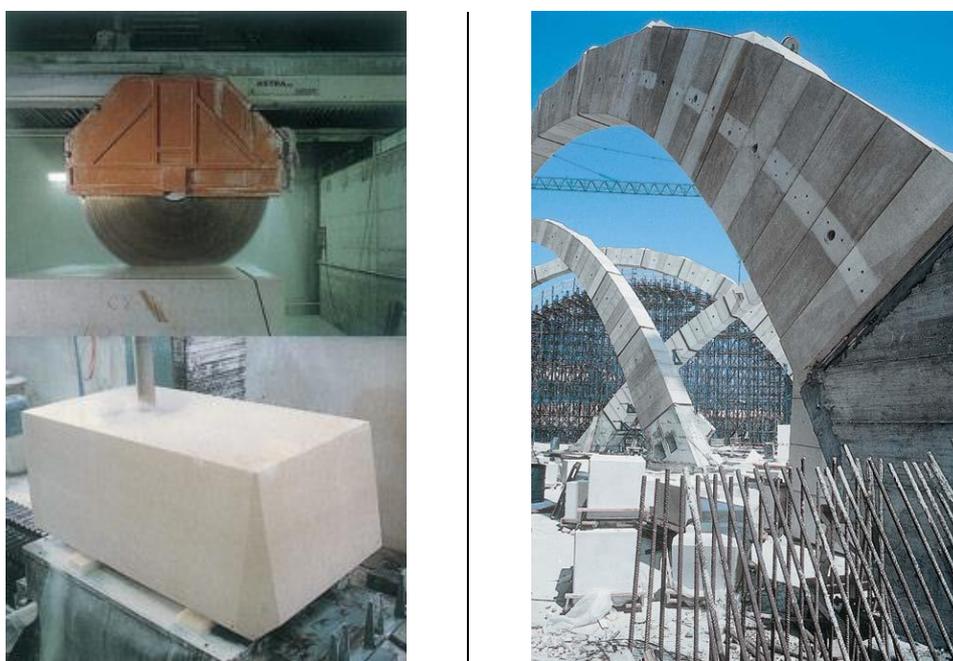


Figura 26. Fasi realizzative dei conci in pietra di Apricena: a sinistra, la lavorazione in officina con macchine CAD/CAM; a destra la posa in cantiere.

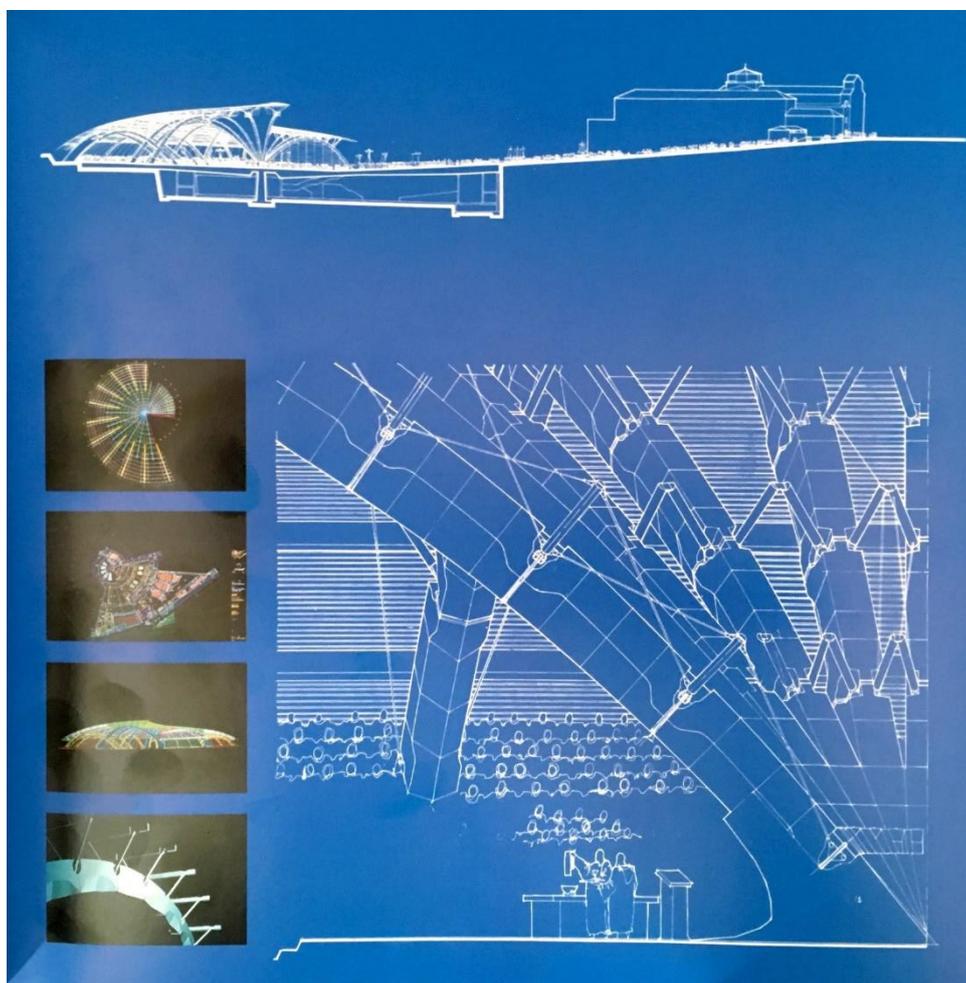


Figura 27. Chiesa Padre Pio da Pietralcina, San Giovanni Rotondo – FG.
Blueprint con collage di immagini tratte dalla modellazione 3D/CAD del progetto (Piano, 2005b).

L'orizzonte del superamento di questi paradigmi industriali è ormai prossimo, dato che il supporto delle tecnologie IT non si limita più ad automatizzare processi che, un tempo, erano possibili solo grazie alla “manifattura” nel senso pieno del termine, ma è endemico verso tutti gli aspetti della produzione industriale visto che, salvo alcune nicchie storiche dell'artigianato, le attività produttive sono tutte legate a processi informatizzati.

Inoltre, il digitale si sta sempre più imponendo come componente fondamentale, oltre che del processo, anche del prodotto che ne scaturisce. L'industria "4.0"⁵³ può esistere solo in virtù dell'attuazione di un sistema *ciber-fisico*: ovvero basato sulla capacità della *Cibernetica*⁵⁴ di poter collegare gli spazi virtuali a quelli fisici, mettendo in contatto gli oggetti, attraverso la rete-dati (internet) e permettendo agli stessi di trasmettere -e interagire – continuamente, attraverso informazioni catalogate, ad esempio, grazie agli apparati statici (*Internet of Things*).

Nell'edilizia, questi aspetti si possono declinare in diverse modalità: una, destinata semplicemente agli aspetti propri della "produzione edilizia", quindi alla massimizzazione del collegamento delle macchine di cantiere, delle strumentazioni CAD/CAM di officina (o di cantiere stesso, viste le opportunità delle "stampanti 3D" nelle costruzioni) ai modelli informativi dell'edificio; oppure l'impiego, molto più prolifico in termini economico/utilitaristici, di rendere l'edificio stesso un sistema di elementi interconnessi capaci di comunicare informazioni tra loro e aggiornare, automaticamente, il modello informativo legato alla gestione del bene edilizio, la gestione ottimizzata degli impianti tecnologici e/o misurare le metriche legate all'uso dell'immobile per desumere, attraverso la *user-experience*, quadri essenziali sempre al passo con le reali necessità dell'utenza. Questa prerogativa potrà essere poi utile, ad esempio, sia per meglio definire gli interventi successivi sullo stesso edificio, avendo un sostanziale "termine di paragone d'uso" o, semplicemente, come punto di riferimento in eventuali altre esperienze progettuali.

⁵³ Gli aspetti-chiave dell'industria 4.0 saranno: a) *l'integrazione totale* di tecnologie digitali nei processi di fabbricazione; b) *la disponibilità di una infrastruttura informatica diffusa*, un vero e proprio "ecosistema" digitale popolato dalle macchine di produzione e dai loro prodotti, a loro volta in comunicazione tra loro; c) *un dispendio consapevole delle energie* a disposizione, secondo criteri di *sostenibilità*; d) *l'innovazione collaborativa* data dalla alta interoperabilità tra uomo e macchina. Cfr. (C. Schwab, 2016).

⁵⁴ la *Cibernetica* si propone da un lato di studiare e di realizzare macchine ad alto grado di automatismo, atte a sostituire l'uomo nella sua funzione di controllore e di pilota di macchine e di impianti e, inversamente, di servirsi delle macchine anzidette per studiare determinate funzioni fisiologiche e dell'intelligenza. (Treccani, voce Enciclopedia on line <<http://www.treccani.it/enciclopedia/cibernetica/>>).

1.8. Conclusioni

L'analisi tecnico/storiografica dei cantieri analizzati ci indica come, nonostante i continui progressi sociali e tecnologici, alcune tendenze siano rimaste pressoché invariate nel corso dei secoli. Si pensi, ad esempio, al tema della *serializzazione* nelle costruzioni, interpretato sin dalle origini dagli operatori del settore i quali, a seconda delle tecnologie disponibili, hanno cercato di ottimizzare i processi progettuali e costruttivi definendo una serie di “standard” di riferimento per la produzione di componenti e le successive attività di montaggio.

Con gli opportuni distinguo, legati alle differenti tecniche di rappresentazione e gestione della conoscenza, possiamo affermare che tali sistemi hanno creato – seppur implicitamente – dei canoni di riferimento e delle buone prassi che, come risultato del loro tentativo di serializzazione del prodotto, hanno contribuito alla cristallizzazione di uno stile riconoscibile (basti pensare ai maestri cosmateschi nella Roma alto-medievale oppure ai mosaicisti bizantini) e di una qualità “oggettivamente” valutabile: tale criterio della “Regola d’Arte”, seppur oggi ancora presente nel codice normativo, risulta però anacronistico considerando che, appunto, questi processi non fanno più capo ad un’arte tramandata ma a dinamici processi di innovazione e aggiornamento che, nei fatti, possono essere valutati solo attraverso un approccio ingegneristico (Chapman, 1990).

Partendo da questi antichi, semplici ma ambiziosi intenti di “serializzazione dell’artigianato”, gli operatori del settore hanno perciò cercato di avvicinare le caratteristiche qualitative/gestionali del processo edilizio a quello dell’industria, ma l’evidenza di oltre un secolo di sperimentazioni in tal senso ha portato verso un ulteriore discostamento tra il “tradizionalismo” dell’artigianalità del processo edilizio e l’innovazione delle metodologie utili alla sua ottimizzazione. Difatti, uno dei maggiori limiti degli avanzamenti tecnologici nell’industria delle costruzioni è che, soprattutto per realtà come quella italiana dove le imprese edili sono per la maggior parte a prevalente conduzione familiare, i costi per sostenere l’investimento di partenza e i successivi aggiornamenti sono insostenibili a scale così piccole. Si consideri inoltre che il discorso è analogo per il mondo delle professioni tecniche, che incontrano sempre maggiori difficoltà a dotarsi delle strumentazioni necessarie a stare al passo dell’innovazione che, in alcune specifiche realtà, sta concretizzando un vero e proprio *gap generazionale*.

Nonostante queste debolezze sistemiche, l’interesse sulla mitigazione dei rischi e il contenimento degli sprechi attraverso l’ottimizzazione dei processi industriali non si

è mai spento finendo per abbracciare, fin dai primi anni '90, l'ottica post-industriale di snellimento delle risorse impiegate e, soprattutto, degli sprechi connessi alla produzione (*lean construction*⁵⁵) al fine di aumentare la *sostenibilità* di questo importante settore industriale. Difatti, l'edilizia rappresenta una delle prime fonti di produzione di CO2 sia per quanto riguarda i consumi legati all'uso degli edifici, sia per quanto riguarda l'energia che si impiega per la produzione edilizia (Bull et al., 2014), a scala dei prodotti, dei componenti e degli interi sistemi (l'energia grigia o *embodied energy*). Malgrado l'oggettiva difficoltà nell'attribuire all'edilizia le consolidate prassi gestionali tipiche di altri settori produttivi, negli ultimi decenni si è potuta apprezzare una lenta ma costante digitalizzazione del processo progettuale e costruttivo, con i conseguenti benefici in termini di valutazione delle metriche di qualità. Da queste analisi perciò è possibile quantificare la necessità di aumentare questa tendenza, al fine di ridurre sprechi sia di carattere organizzativo che di carattere economico (McKinsey, 2017).

Per questo, anche nell'edilizia si stanno introducendo nuove figure professionali specializzate nella gestione, ingegnerizzazione e informatizzazione dei processi, come accade da decenni negli altri settori produttivi che hanno avuto vita più facile nell'abbracciare questi approcci innovativi.

In questo contesto, la figura dell'architetto è in crisi: nella storia difatti, il tecnico è sempre stato percepito come una figura professionale poliedrica, spesso proveniente da altri campi come, per esempio, Leon Battista Alberti, Michelangelo, Brunelleschi... di formazione contaminata da letteratura, arte e tecnica, e talvolta dotati di forte personalità espressiva, legata a non comuni doti di comunicazione (Renzo Piano, Le Corbusier etc.).

Nelle attuali prospettive, l'architetto sembrerebbe tornare all'arcaica funzione di detentore della conoscenza necessaria per sintetizzare gli apporti di tutti gli specialisti dei settori convergenti nel progetto complesso, in un rapporto di reciproco arricchimento che, evidentemente, possiamo avvicinare concettualmente a quanto avveniva tra capomastri e architetti ai tempi delle opere medievali e rinascimentali. Tale tendenza è riscontrabile anche nell'analisi critica dei fatturati degli studi di architettura degli ultimi anni (Il Sole-24Ore, 2017): infatti, le società che sono state capaci di crescere (o mantenere posizioni) nonostante la pesante crisi economica degli ultimi anni, sono effettivamente quelle caratterizzate da un approccio interdisciplinare al tema della progettazione integrata, valorizzando la presenza e gli

⁵⁵ Cfr. Par. 2.3.

apporti dati dagli specialisti dei vari dominî che compongono la complessità del processo edilizio.

L'architetto contemporaneo perciò si sta trasformando (o tornando alle origini?) in una figura di collegamento votata alla ricerca di un armonioso equilibrio tra le esigenze dell'utenza e le prestazioni espresse dall'offerta dell'industria dei prodotti, in continua evoluzione e aggiornamento: è naturale dunque che, per governare una mole di dati, informazioni e combinazioni così elevata e dinamica, è necessario sviluppare metodologie e strumenti di supporto digitali adeguati alle nuove necessità espresse dalla società del nostro tempo.

Difatti, ogni arte e scienza sociale, compresa l'architettura, necessita di una struttura regolatoria capace di organizzare la caotica mole di informazioni che vive all'interno di esse: allo stato attuale, le strutture regolatorie a nostra disposizione sono gli strumenti di gestione informativa, da non confondersi con gli idealizzati costrutti matematici alla base dell'architettura classica (Kieran et Timberlake, 2004b).

Inoltre, questa trasformazione viene sempre più accelerata dalla diffusione di attrezzature CAM/CAD altamente efficienti e portatili, capaci di aprire le porte alla diffusione capillare della *mass-customization* che, nell'edilizia, rappresenterebbe l'anello mancante per una introduzione vincente del paradigma della prefabbricazione, evitando i problemi e le contraddizioni che l'impiego di queste tecniche ha comportato nella seconda metà del '900.

In questa evidente interdipendenza tra progettisti e produttori, quanto senso può avere discutere circa la divisione a compartimenti stagni dei compiti, allocati in diverse fasi - non comunicanti - del processo?

Il processo progettuale, assodato che inizia fin dal momento della programmazione dell'opera, vede una più stretta integrazione tra le soluzioni tecniche di progetto e la scelta della componentistica offerta dal mercato; inoltre, inizia ad essere sempre più importante valutare nelle fasi prodromiche, oltre alla convenienza economica delle soluzioni progettate/costruite, l'impatto che le stesse hanno sulla successiva gestione e manutenibilità del bene (*fig. 28*).

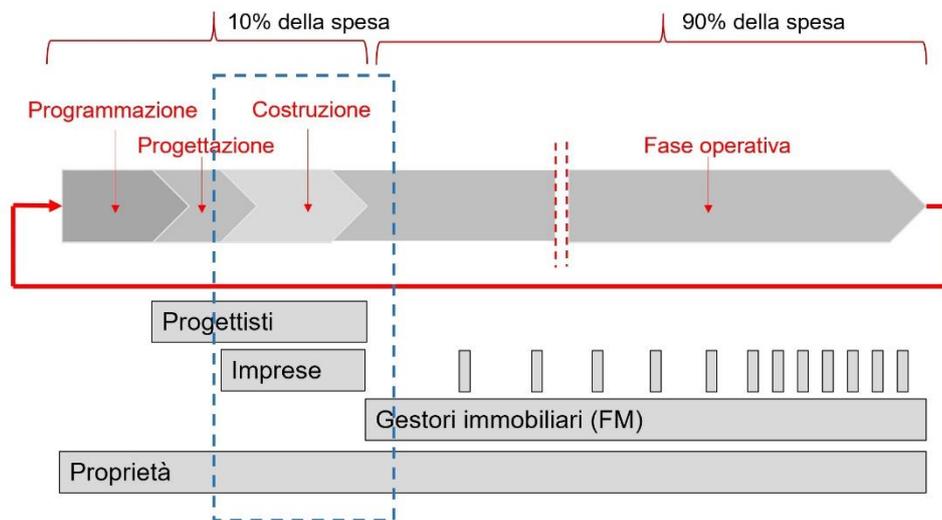


Figura 28. Sintesi delle macro-fasi, delle figure e dei costi necessari alla vita utile dell'edificio. Nel riquadro blu – tratteggiato è individuata la collocazione della ricerca oggetto di questa dissertazione.

Dal diagramma si evince perciò quanto sia decisivo, considerando le cifre in ballo, *ottimizzare* i contenuti progettuali e le contestuali fasi costruttive, al fine di disporre di un edificio che, in fase di operatività (di gran lunga superiori, in termini di tempi e costi, rispetto alle precedenti) possa godere di vantaggi e risparmi dati da precedenti misure migliorative scaturite, ad esempio, grazie a simulazioni sul comportamento dei vari insiemi strutturati di elementi che compongono l'organismo edilizio.

È altrettanto chiaro che spostare le valutazioni di carattere progettuale/operativo ad una fase molto precedente la costruzione dell'edificio, implica la necessità di modelli informativi dotati di solide Basi di Conoscenza, oltre ad adeguati elaboratori in grado di processare importanti moli di dati. Tali modelli inoltre, devono essere fortemente orientati alla collaborazione (interoperabili), in quanto nel modello informativo convergono, in maniera dinamica e continuativa, informazioni da tutti gli attori del processo: dalla committenza, alla pubblica amministrazione, dai tecnici alle imprese affidatarie, dai fornitori ai produttori di componenti, finanche agli addetti al trasporto del prodotto finito, per ottimizzare la logistica di cantiere nei casi, sempre più frequenti, di mantenimento dell'operatività del bene durante la cantierizzazione.

Il modello informativo diventa quindi, oltre che “contenitore” di informazioni raccolte dalle diverse figure processuali, un vero e proprio *sistema regolatore* per la progettazione e la costruzione (*fig. 29*): in tal senso, diviene l’affidabile strumento di supporto strategico per l’ottimizzazione, il controllo e la gestione dei processi di realizzazione dell’architettura.

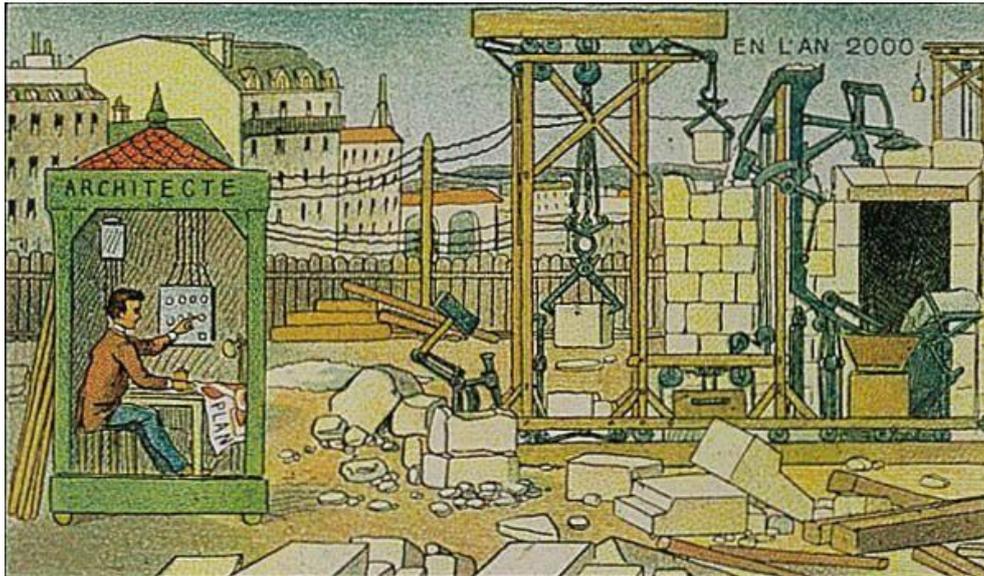


Figura 29. *L'Architetto nell'anno 2000. Cromolitografie degli anni '10 del novecento, Biblioteca nazionale di Francia.*

2. Metodologie di gestione e rappresentazione del processo edilizio

Il processo edilizio differisce dalla gran parte dei processi industriali contemporanei per tutta una serie di prerogative che lo rendono, di fatto, un'attività produttiva focalizzata alla realizzazione di *prototipi di se stessi*. Tale particolarità costringe, nei fatti, gli operatori del settore a confrontarsi ogni volta con condizioni al contorno in tutto o in parte diverse che, all'occorrenza, possono addirittura rendere vane o poco utilizzabili le esperienze maturate su progetti precedenti. Inoltre, per motivi culturali e sociali, soprattutto in realtà molto dispersive (come il mercato italiano) sia le imprese di costruzioni che le organizzazioni professionali risultano per massima parte di dimensioni molto piccole, se non addirittura a conduzione individuale/familiare. Questo comporta la mancata applicazione di economie di scala e dei necessari adeguamenti tecnologici che necessitano, a fronte di evidentissimi vantaggi, importanti investimenti iniziali: il risultato è una *tradizionale ritrosia* verso l'aggiornamento degli strumenti e delle tecniche in uso, salvo che in casi di commesse molto rilevanti, soprattutto di carattere infrastrutturale.

D'altro canto, non si trascuri il fatto che l'industria delle costruzioni, oltre a soddisfare un bene di primaria necessità per l'uomo, muove anche ingenti somme economiche con larghe ricadute occupazionali. Risulta indispensabile quindi, dotare gli attori impegnati nella gestione del processo edilizio di strumenti efficaci, capaci di rappresentare appropriatamente la complessità del problema sia nei termini delle molteplici relazioni tra i sottosistemi che compongono l'organismo edilizio, sia riguardo l'intricata interrelazione tra le figure che governano le scelte.

Pertanto, in un mondo in continuo cambiamento, è necessario che cambino anche gli strumenti e le metodologie di gestione dei processi secondo il miglior esempio di adattamento al contesto: il comportamento umano. Cosa fanno gli uomini? Ottimizzano, e ottimizzano attraverso l'uso dinamico delle capacità di astrazione e previsione degli esiti delle loro scelte (Fioravanti et al, 2017) L'obiettivo quindi è far convergere la frammentazione degli specialismi e delle abitudini pregresse verso un approccio *snello*, che permetta di ottimizzare l'uso delle risorse a disposizione in tempi prevedibili.

2.1. Strategie di gestione della complessità della realizzazione del progetto di architettura

La complessità (*fig. 30*) del processo realizzativo dell'architettura è data sia dalle numerose interrelazioni tra componenti e sistemi che costituiscono l'organismo edilizio, sia dalle condizioni al contorno (contesto geografico, sociale, economico e culturale) di ogni singola costruzione. Tale variabilità obbliga perciò le figure del processo, di volta in volta, all'elaborazione di specifiche strategie mirate all'ottimizzazione delle risorse da impiegare, al fine di raggiungere gli obiettivi prefissati con il minimo dispendio di energie.

Darsi una strategia significa prendere e formalizzare delle decisioni: nello specifico, potremmo affermare che il contenuto di una strategia è costituito dagli *obiettivi* che si intende perseguire e dai *mezzi* selezionati e impiegati per raggiungerli (Tronchia, 2001a).

Per quanto riguarda l'ambito della progettazione architettonica potremmo definire il problema della sua gestione, parafrasando H. Rittel⁵⁶, un "*problema maligno*⁵⁷" (Churchman, 1967) per l'effettiva impossibilità nel dare una soluzione definitiva ed univoca alle problematiche progettuali, per la molteplicità e complessità dei problemi riscontrati (ovvero delle loro soluzioni) e, soprattutto, per la difficoltà nel rappresentare compiutamente il problema stesso e le relative varie sfaccettature.

Tali *problemi maligni* dunque non possono essere risolti con le tradizionali formule newtoniane o basandosi esclusivamente sull'esperienza e professionalità del progettista, ma bensì affidandosi a modelli *digitali cibernetici* ideali, orientati al raggiungimento di obiettivi prefissati e capaci di recepire e adattarsi ai processi di *feedback* (Rittel et Webber, 1969).

L'aspetto cardine dunque è la *definizione del problema*: difatti, secondo l'autore tedesco, i problemi semplici sono altresì semplici da risolvere, poiché definire un problema significa, inerentemente, delinearne la soluzione. Si tenga presente

⁵⁶ (1930-1990) tra i fondatori della disciplina legata alle "*Design Theories*", nel secondo dopoguerra ha condotto ricerche nel campo nascente dell'intelligenza artificiale applicata alla risoluzione di problemi legati alla progettazione architettonica.

⁵⁷ Cfr. con (Xiang, W-N, 2013). In questo editoriale si possono trarre delle profonde riflessioni su quanto la società, a volte abbagliata dalle potenzialità delle macchine nella risoluzione dei problemi, non si renda conto di quanto diffusi siano i "*wicked problems*" nella società contemporanea.

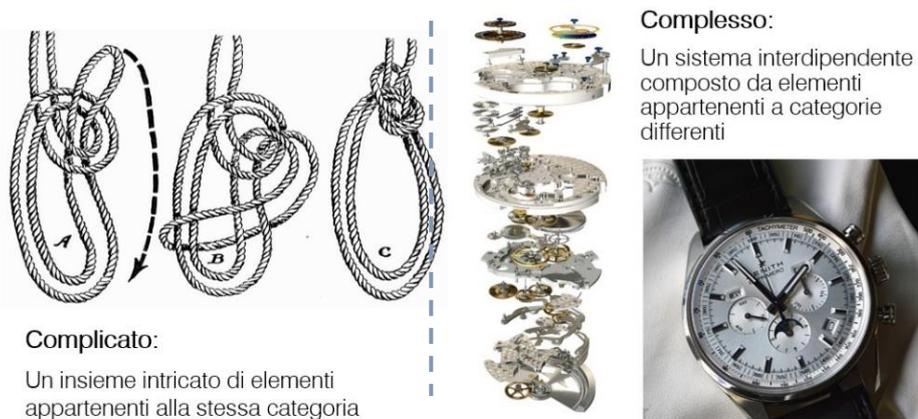


Figura 30. Sintesi del paragone tra i concetti di “complicato” e “complesso”. Tali concetti sono alla base della comprensione del problema gestionale dell’architettura.

però che nel settore edile entra in gioco una ampia *variabilità* che, oltre a coinvolgere sistemi complessi, deve tener conto anche della “soggettività nella definizione del problema, che porta all’adesione (o meno) dei partecipanti al processo decisionale, causando perciò incomprensioni, divergenza di vedute e, quindi, aumentando conseguentemente le probabilità di insuccesso del processo” (Rittel, 1988).

In estrema sintesi, la filosofia progettuale di Rittel si basa sostanzialmente sulla consapevolezza che il design è un’attività di pianificazione che coinvolge modelli; il ragionamento dei progettisti è un processo di argomentazione, diverso dalla risoluzione dei problemi; mentre il progetto è un atto “politico”, associato al potere presente in quel dato contesto.

L’esito di queste ricerche è stato lo sviluppo di strumenti di progettazione collaborativa basata su associazioni di elementi attraverso grafi, secondo un approccio digitale chiaramente cibernetico⁵⁸. I limiti di questi sistemi, oltre alla *complessità* nella gestione di moli di dati così ingenti e interconnessi, sono legati alla rigidità propria dei sistemi orientati a grafi, e da una certa pre-impostazione del risultato, a seconda dei percorsi preferenziali identificati dal progettista.

⁵⁸ “*Issue-Based Information system – IBIS*”, un sistema di progettazione collaborativa basato su un database organizzato con i grafi (Kunz, Rittel, 1970).

Le attuali potenze degli elaboratori però, associate alla *pervasività* della rete internet, hanno riaperto le condizioni per lo sviluppo di strumenti del genere, che possono diventare più “aperti” grazie all’integrazione di agenti autonomi che possono adattarsi (e adattare il percorso definito dei grafi) a seconda delle condizioni al contorno cui il progetto deve far fronte.

Nella pratica millenaria dell’architettura, le problematiche legate alla gestione della complessità (e delle relative problematiche operative) sono state pressoché evitate più che superate: difatti, all’insorgere di inconvenienti, le strategie risolutive sono state prevalentemente il fermo-cantiere in attesa di una soluzione o, sempre dopo il (costoso) fermo delle attività, l’applicazione di varianti progettuali. Come noto, il settore dell’edilizia è caratterizzato da un tasso di complessità caratteristico molto alto, che impone agli operatori di considerarne attentamente gli aspetti di governo del processo fin dalle fasi iniziali, dato che la successiva realtà di cantiere non sarà altro che il risultato di scelte strategiche prese in fasi progettuali precedenti.

Per conseguire l’obiettivo di adoperare le opportune strategie progettuali, i progettisti hanno sempre impiegato modelli e/o astrazioni geometriche al fine di avere una base di conoscenza tale da poter studiare i fenomeni e disporre soluzioni ai progressivi problemi. Nella contemporaneità, i tecnici hanno la possibilità di impiegare strumentazioni informatiche relativamente potenti, capaci dunque di offrire al progettista la possibilità di produrre modelli informativi virtuali dell’edificio, con un tasso di approssimazione del dato *sufficientemente* rappresentativo della realtà. Grazie a questi modelli perciò, è possibile verificare la bontà della strategia progettuale scelta in ambito virtuale, quindi prima della (eventualmente) errata messa in opera in cantiere, con le conseguenti sopracitate varianti.

Un’ulteriore opportunità alla definizione della strategia progettuale è data dall’uso di specifici strumenti di verifica, basati sull’analisi di questi modelli informativi

Questi strumenti hanno diversi livelli di approfondimento, a seconda delle regole di inferenza che si instaurano tra loro (*checking tools*) e il modello BIM. Il livello di controllo logico più basso è la verifica delle interferenze geometriche (*rule checking*, fig. 31):

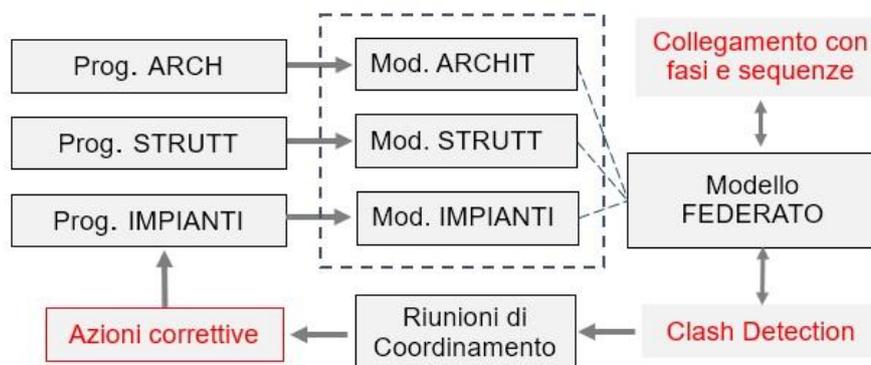


Figura 31. Processo iterativo di verifica delle interferenze geometriche (clash detection) per la verifica di fattibilità dell'opera. Schema rielaborato da "The Contractor's guide to BIM – 2nd edition".

Questa modalità di verifica ha un tasso di accuratezza molto alto che obbliga, nella pratica corrente, il tecnico esperto a valutare quali elementi considerare effettivamente interferenti e quali, invece, considerare "positivamente" interferenti⁵⁹. Aumentando il livello di complessità dell'analisi, si possono aggiungere al livello meramente geometrico gli aspetti legati al rispetto di regole *comportamentali* imposte tra oggetti. In questo caso, la complessità delle operazioni computazionali svolte dallo strumento è proporzionale al risultato richiesto. Un esempio tipico dell'utilizzo di questi applicativi si può riscontrare in Jiang et Leicht (2015). La metodologia esposta in questa ricerca prevede dunque la valutazione di costruibilità di un edificio attraverso la verifica automatizzata di regole imposte sugli oggetti del modello BIM e la loro interazione (fig. 32). Gli esiti di questa ricerca, condotta sperimentalmente sulla costruzione di un edificio in conglomerato cementizio armato, hanno dimostrato che lo svolgimento di queste verifiche non aiuta soltanto a ridurre le incoerenze progettuali e le inefficienze causate da una scarsa integrabilità delle soluzioni costruttive ma permette, allo stesso tempo, la verifica speditiva di soluzioni alternative, aprendo alla possibilità, mediante estensioni statistiche del metodo, alla *proattività* della macchina verso le intenzioni e convenienze del progettista (Novembri et al, 2017).

⁵⁹ Caso tipico sono i corrugati impiantistici annegati nel massetto, che necessitano di una indicazione di eccezione da parte del verificatore.

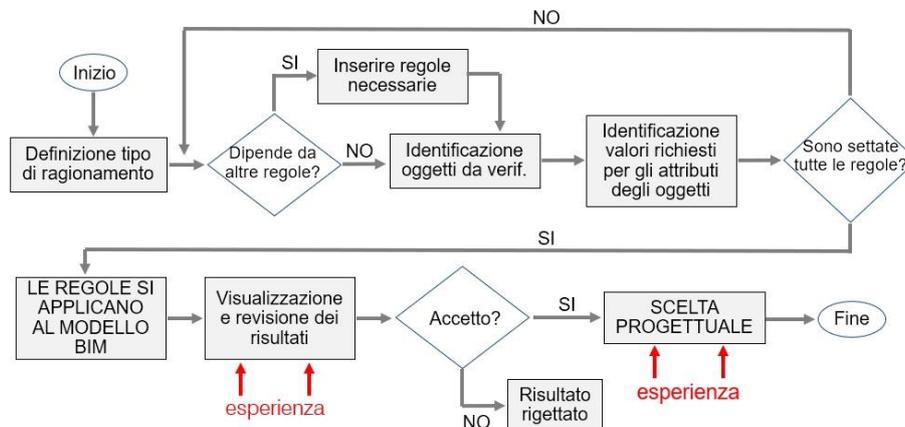


Figura 32. Verifica progettuale basata su regole e ragionamenti, applicata al modello BIM. Flusso operativo delle operazioni computazionali. Rielaborazione da (Jiang, Leicht, 2015).

Alzando ulteriormente il grado di complessità del metodo di verifica progettuale mediante regole, è possibile collegare al flusso processuale di definizione e controllo degli enti del progetto specifiche *regole, attributi e verifiche di rispondenza* (Solihin, Eastman, 2015). Questi contenuti semantici basilari – i semantemi – possono essere definiti (quindi formalizzati) da Sistemi Basati sulla Conoscenza che contengano la formalizzazione concettuale di Enti standard o alternativi, o innovativi. In questo caso, l’onere computazionale sta nell’impostare correttamente gli attributi delle entità presenti nel modello, le relazioni che vanno ad instaurarsi tra queste, e la relativa Base di Conoscenza (fig. 33). Si consideri che questa Base è specifica per ogni dominio da indagare, perciò per la validazione del metodo si rende necessaria una verifica iterativa e continua delle soluzioni progettuali, come accade per le simulazioni eseguite secondo il principio della ripetizione continua di tipo “Monte Carlo”. Questa nuova dimensione della verifica basata su regole è stata implementata con successo in uno studio relativo all’installazione di pannelli fotovoltaici su edifici esistenti, dove si erano verificati diversi incidenti con danni molto gravi e, in alcune occasioni, mortali. Per questa esigenza, è stata impiegata una Base di Conoscenza specifica riguardo gli apprestamenti per la protezione dalla caduta dall’alto (Dewlaney, 2011): da questa applicazione, si è potuto verificare che alla base di questi incidenti vi erano veri e propri errori progettuali, come l’errata disposizione delle torrette di aggancio delle linee vita. Queste difatti non

impedivano al lavoratore di cadere per una quota (cd. “tirante d’aria”) sufficiente a non riportare un urto contro altri corpi di fabbrica o alle facciate stesse.

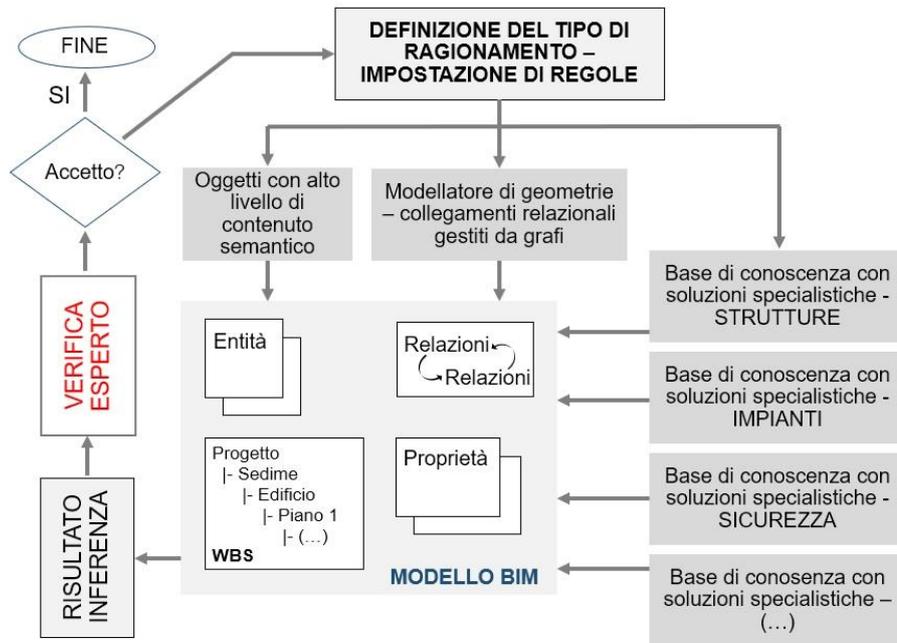


Figura 33. Schematizzazione del modello di verifica mediante interazione con basi di conoscenza specialistiche.

Mentre questa prima parte di esempi si concentrano prevalentemente sulle strategie di verifica iterativa del progetto, concentrandosi quindi sull’aspetto della complessità come *varietà* di sistemi e modelli interconnessi che seguono regole locali diverse⁶⁰, di seguito si illustra come è possibile scomporre questo *sistema complesso* in sottosistemi sempre più semplici, al fine di essere meglio

⁶⁰ *Complessità* è un termine per il quale la comunità scientifica non ha redatto una definizione univoca, visto l’ampiezza di sfaccettature che si possono attribuire a questo campo. Per (Carrara et al, 2014) la c. è data dalla “molteplicità di fattori in gioco, le loro relazioni multiple non lineari, la dipendenza di un contesto di volta in volta sempre diverso”. In una visione, derivata dalla *teoria del caos*, “la teoria della c. afferma che la componente che interagisce *criticamente* si auto-organizza per formare strutture potenzialmente in evoluzione che presentano una gerarchia di proprietà del sistema emergente (Curlee, Gordon, 2011)”.

governati sia dagli strumenti di supporto, che dalla mente-strategica del progettista. L'utilità della scomposizione del progetto è evidente: in un ambito quale quello delle costruzioni, caratterizzato da dinamiche dipendenti da fattori molto diversi, poter ricondurre una scelta – o semplicemente un elemento o componente – ad una categorizzazione rigorosa consente, oltre alla riduzione dell'errore per propagazione dello stesso, di condurre verifiche in maniera più puntuale e speditiva fin dalle fasi iniziali dell'attività progettuale.

A riprova di quanto affermato, si ipotizzi uno studio di fattibilità che trascuri le interferenze tra la logistica di cantiere e il contesto ambientale in cui si colloca un'opera: seppur molto intuitivo, si consideri che queste sottostime sono tra le prime cause di incidenti e rallentamenti in cantiere, soprattutto in realtà fortemente antropizzate come quella italiana.

Pertanto, mutuando – con cautela – strumenti organizzativi nati in seno all'organizzazione della industria, si prendono in considerazione queste tipologie di scomposizione gerarchizzata del progetto:

- Working Breakdown Structure (WBS): è la scomposizione gerarchica delle attività e dei relativi risultati previste in un progetto. Per attività in questo caso, si intendano tutti i processi, i materiali e le risorse che contribuiscono a dare il risultato atteso. Difatti, una delle regole imprescindibili della WBS è la cd. “Regola del 100%”, che prevede che ogni elemento della WBS deve essere composto da tanti sotto-elementi quanti ne sono necessari a completare il 100% della attività (*fig. 34*) intese come *scope*, cioè “tutto quello che rientra e solo quello compreso nel lavoro del progetto” (Guida, 2015);
- Location Breakdown Structure (LBS): ovvero la distribuzione gerarchizzata di tutte le aree di lavoro;
- Resource Breakdown Structure (RsBS): dove per risorsa si intendano le risorse umane presenti in cantiere;

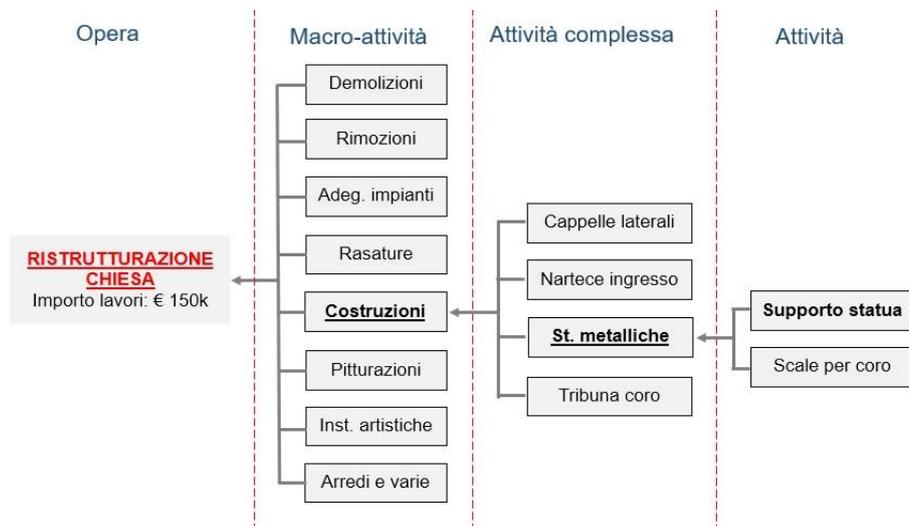


Figura 34. WBS. Scomposizione ad albero delle attività di cantiere legate alla realizzazione delle strutture metalliche. La fase progettuale è inserita implicitamente nella stessa attività. Caso studio n.1

A questi, si sommano altre discretizzazioni degli insiemi di elementi presenti in cantiere che, ai fini della specificità dello studio, rivestono una minore importanza (*Product B.S., Assemblies B.S., Spaces B.S., etc.*). Prendendo le mosse dai modelli di (Moine, 2013) e dalle considerazioni inerenti la necessità di governare le aree di lavoro per gestire al meglio le eventuali interferenze e/o sovrapposizioni, è utile considerare anche una rappresentazione tridimensionale del modello gestionale che prenda in considerazione, su tre assi, i tre domini delle attività - WBS, degli attori - RBS) e dei luoghi -LBS (fig. 35).

Questo modello, come visto, non tiene in considerazione il tempo, che si considera implicito nella WBS visto che, nella larga maggioranza dei software e dei modelli gestionali utilizzati in edilizia, questa dimensione viene associata alla attività mediante diagrammi a blocchi o reticolari. Inoltre, come strumento di verifica e controllo di queste scomposizioni processuali, si utilizza correntemente l'associazione matriciale tra attività (WBS) e attori, a cui sia stata affidata la responsabilità di portare a termine la stessa (*Organizational Breakdown Structure - OBS*).

OBS / WBS	Studio di fatt.	Progetto	Finanzia-mento	Gara di Appalto	Lavori	Rendicont.
Ufficio CEI	Z.A.	Z.A.	P.V.	Z.A.	-	Z.A.
Ufficio Diocesi	G.A.	G.A.	G.A.	-	-	G.A.
Parroco	G.V.	G.V.	G.V.	G.V.	G.V.	G.V.
Prog/DL	-	F.R.	-	-	F.R.	F.R.
Impresa	-	-	-	M.C.	G.M.	G.M.
Fedeli	-	-	N.S.	-	-	-
Comune	A.F.	A.F.	-	-	A.F.	-

Tabella 04. Responsibility Assignment Matrix (RAM) riferita al caso studio n.1. Nella casella corrispondente agli incroci matriciali, vi è la risorsa responsabile del dato (sono indicate le iniziali)

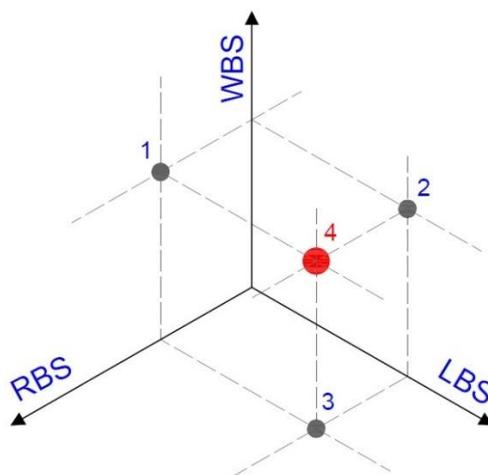


Figura 35. Grafico 3D “WBS+LBS+RBS”. Questo tipo di rappresentazione consente, in un unico diagramma, di individuare:

- 1) L'attore coinvolto all'interno della attività;
- 2) L'area di lavoro riservata ad una determinata attività;
- 3) L'attore che occupa una data area di lavoro;
- 4) Definizione dell'area di lavoro occupata da un attore nello svolgimento di una data attività nell'unità di tempo.

- Per quanto riguarda la specifica distribuzione dei piani cartesiani, si consideri nel piano XZ (LBS+WBS) la rappresentazione dell'edificio con inserite le attività negli spazi di riferimento; nel piano XY (LBS+RBS) la rappresentazione dell'edificio e l'inserimento delle risorse allocate; nel piano YZ invece (RBS+WBS) la rispondenza tra risorse ed attività.

2.2. Tecniche di gestione del tempo

Per quanto sistemi empirici di gestione delle attività siano sempre stati noti agli addetti ai lavori, la sistematizzazione delle fasi produttive secondo metodi grafici e modelli matematici semi-probabilistici si sviluppa in parallelo con l'avanzamento dello sviluppo in senso industriale delle attività costruttive.

Anche per questo motivo, si è propensi a supporre che le tecniche diagrammatiche di rappresentazione e gestione del tempo di produzione e l'allocazione delle risorse siano nati negli stessi luoghi che hanno visto lo sviluppo della catena di montaggio: sorprendentemente, la nascita di questi strumenti – o, per lo meno, una loro prima formalizzazione – è legata al mondo della musica. Difatti, uno dei motti di Karol Adamiecky⁶¹ era:

*“l'armonia del lavoro collettivo è soggetto alle stesse regole che determinano l'armonia nella musica. Sfortunatamente, l'uomo non ha un apparato percettivo - come l'orecchio per la musica - per poterlo apprezzare”*⁶²

Nella sua visione sulla gestione del lavoro (fig. 36), il concetto fondante di *armonia* era fondato su tre aspetti fondamentali:

1. Armonia delle scelte: le metodologie e gli strumenti utilizzati per la produzione e la fornitura devono avere un uso comprensibile da tutti gli attori del processo, consentendo agli stessi di partecipare collaborativamente alla definizione degli obiettivi e dei vincoli. Si confronti con la *Theory Of Constraints – TOC* di E. Goldratt (Naor et al, 2013);

⁶¹ (1866-1933), ingegnere meccanico, inizia la sua carriera professionale nella gestione di diverse acciaierie in Polonia e in Russia. Nominato docente a Varsavia e San Pietroburgo, descrive i suoi studi solo in russo e in polacco: questo limitò la diffusione dei suoi modelli fino al 1927 (diciotto anni dopo il primo articolo sul tema), quando iniziò a pubblicare in lingua francese. All'epoca, il successo del fordismo e dei modelli tayloristici basati sulle rappresentazioni di H. Gantt, impedì di fatto la diffusione di questi modelli di ottimizzazione, limitandone l'impiego solo nel settore metallurgico degli stati socialisti del XX secolo.

⁶² scheda-docente presso il sito dell'Università delle scienze economiche di Katowice <<https://www.ue.katowice.pl/en/university/anniversary/history-of-the-university/karol-adamiecki.html>> ultimo accesso il 16/08/2017.

2. Armonia nel fare: l'organizzazione delle attività necessita di essere costantemente controllata ed efficientata durante la produzione con, all'abbisogna, aggiustamenti sulla catena delle forniture o sulla disposizione delle risorse, al fine di non interrompere la fluidità del processo;
3. Armonia dello spirito: ovvero l'importanza di creare una comunanza di intenti all'interno del gruppo di lavoro e una sinergia personale nello svolgimento della mansione. Si noti in questo caso l'attualità del messaggio, in linea con le più aggiornate indicazioni delle scienze cognitive, in totale distonia con la visione scientifico-efficientista del modello fordista;

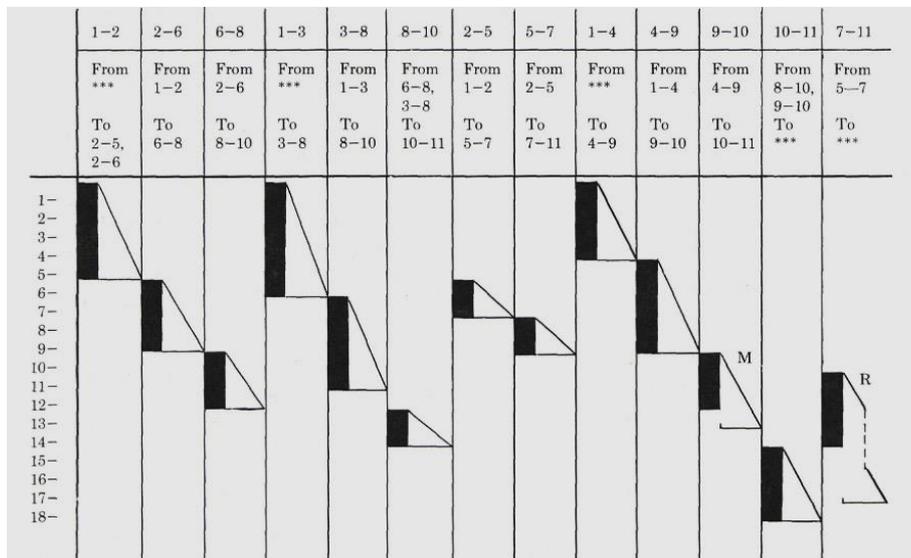


Figura 36. “Armonogramma di Adamiecky”. Sull’asse delle ascisse sono presenti le attività e i luoghi di lavoro, nelle ordinate la progressione temporale. L’inclinazione della retta indica il tasso di efficienza raggiunto dalle squadre operative

2.2.1. Il diagramma di Gantt

La formalizzazione del metodo lineare di gestione del tempo più impiegato nel settore delle costruzioni è il diagramma di H. Gantt⁶³. Questo diagramma nasce per organizzare il lavoro all'interno delle fonderie, nell'ottica di poter definire in termini più affidabili i tempi di consegna del prodotto.

Il quadro teorico in cui si colloca questo metodo è l'organizzazione scientifica del lavoro di matrice tayloristica (gli attuali "tempi & metodi"), quindi è mirato ad efficientare i processi secondo lo schema "scientifico" della massimizzazione della produzione mediante la *serialità*, la *ripetitività* e la definibile *cadenza temporale* delle maestranze impiegate: per questi motivi, il diagramma non prende in considerazione la localizzazione e la propedeuticità delle fasi produttive, in quanto queste sono già assodate dalla distribuzione "in linea" della catena di montaggio.

Le potenzialità di questo metodo furono subito riconosciute dal panorama manifatturiero dell'epoca: come rilevato da (Clark, 1925), questo approccio permetteva agli operatori del settore di valutare più attentamente il procedere della commessa e, grazie alla visualizzazione immediata della rispondenza giorno-attività, era possibile rilevare facilmente i ritardi e organizzare misure correttive o riadeguare la previsione dei tempi sulla base delle prestazioni effettivamente svolte. Nel periodo a cavallo tra le due guerre, venne impiegato massivamente anche nel mondo dell'edilizia (*fig. 37*) potendone apprezzare la caratteristica chiave, ovvero il fatto che il diagramma è focalizzato sull'approccio sistemico e non sulla singola attività (Wilson, 2003).

⁶³ (1861-1919) ingegnere meccanico, ha lavorato come supervisore in importanti cantieri infrastrutturali e nell'industria siderurgica. Qui ebbe modo di incontrare e collaborare con Taylor (1856-1915), di cui si notano reciproche influenze nello sviluppo delle loro ricerche. La sua opera più importante è "*Work, Wages and Profits*" (1916), dove vengono illustrate una serie di schematizzazioni diagrammatiche per l'organizzazione del lavoro.

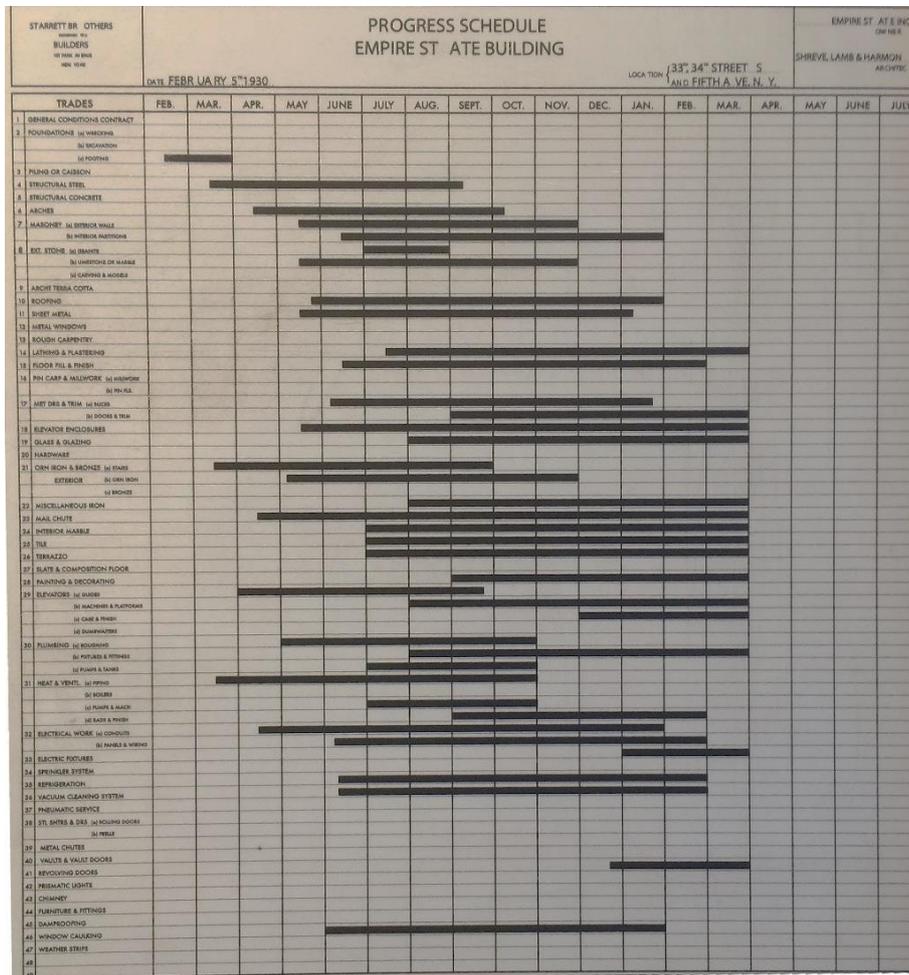


Figura 37. Il cronoprogramma Gantt del cantiere dell'Empire State Building, 1930.

2.2.2. Tecniche reticolari: CPM, PERT e ulteriori evoluzioni

Il diagramma di Gantt, seppur nella sua intuitività e immediatezza riscontrata in più di un secolo di applicazione (MacNiece, 1951) ha tuttavia un limite: non indica le precedenze tra le attività. Il fatto che un'attività B inizi temporalmente ad attività A conclusa non necessariamente implica un vincolo di precedenza di A ai fini della realizzazione B.

Affinché possa essere visualizzata un'effettiva precedenza, è necessario collegare le barre con delle frecce, ma questo – in presenza di molteplici barre/attività – non sarebbe graficamente consigliabile viste le intersezioni che si creerebbero tra le numerose frecce (Tronchia, 2001b). Per risolvere dunque questi limiti, particolarmente gravi nella dimensione edilizia che non prescinde dalla propedeuticità delle fasi e dalla continuità delle operazioni e degli approvvigionamenti nelle aree di cantiere, a partire dagli anni dell'immediato dopoguerra la comunità scientifica ha raggiunto soddisfacenti stadi evolutivi dei vari metodi e tecniche di pianificazione e controllo reticolare del progetto.

Queste tecniche prendono il nome dalla loro tipologia di rappresentazione grafica, visto che sono principalmente finalizzate non alla visualizzazione bensì all'elaborazione di dati, con l'obiettivo di effettuare la definizione della durata e i livelli di propedeuticità delle attività, l'analisi dei ritardi (o slittamenti) possibili fra le attività senza per questo determinare un allungamento della durata complessiva del progetto, che si traduce nell'individuazione delle attività critiche da un punto di vista temporale (ovvero la misura in cui il ritardo locale determina l'effetto globale sull'insieme delle attività progettuali).

Ne consegue l'esistenza di diverse tecniche reticolari:

- Critical Path Method (CPM): è uno strumento di gestione progetti sviluppato nel 1957 dalla *Catalytic Construction Company* per la manutenzione degli impianti della *Du Pont de Nemours*. Le attività, considerate di durata fissa come le precedenze, sono considerate fisse secondo il tipo "fine-inizio", quindi le attività stesse sono connesse in maniera strettamente sequenziale l'una all'altra. Una ulteriore evoluzione di questo metodo è il *Metra Potential Method (MPM)* che prevede la caratterizzazione delle rimanenti tre possibilità di legame tra attività (inizio-fine, inizio-inizio, fine-fine): l'utilità è nella possibilità di modulare le propedeuticità tra le attività e legare una o più attività ad una stessa data, attraverso l'attribuzione della stessa fine;

- Program Evaluation & Review Technique (PERT): questa tecnica è stata sviluppata nel 1958 dalla *Booz, Allen & Hamilton, Inc.* (una ditta di consulenza ingegneristica), per l'ufficio Progetti Speciali della Marina degli Stati Uniti. L'obiettivo era quello di ridurre i tempi ed i costi per la progettazione e la costruzione dei sottomarini nucleari armati con i missili *Polaris*, coordinando nel contempo diverse migliaia di fornitori e di subappaltatori. Ulteriori affinamenti di questa tecnica sono il *Graphical Ev. Rev. Tech.*, dove vengono analizzati probabilisticamente anche i percorsi, cioè i legami di precedenza fra le attività (vi sono pertanto dei *gate* logici per designare i percorsi, garantendo la possibilità di più conclusioni e di feed-back tra le attività) e il *Venture Ev. Rev. Tech.*, che considera contemporaneamente come variabili decisionali alla stessa stregua tempi, costi, risorse e rischi, risultando particolarmente utile nelle simulazioni “*what-if*” e nei problemi di valutazione e controllo di nuovi business o iniziative strategiche (come il termine ricorda).

Perciò CPM e MPM sono tecniche deterministiche, mentre PERT, GERT e VERT sono tecniche probabilistiche (Tronchia, 2001c).

Nel caso della rappresentazione più elementare (CPM), le rappresentazioni reticolari si suddividono in due tipologie: europea e americana: nella prima, le attività sono i nodi, nella seconda sono le frecce. In tutte le metodologie di gestione del tempo, un reticolo è generalmente costituito da attività (nodi – vers. “europea”), da vincoli di precedenza (archi e frecce), connessi tra loro secondo rapporti di propedeuticità e orientati secondo la discretizzazione utile alla progressione di cantiere (*fig. 38*).

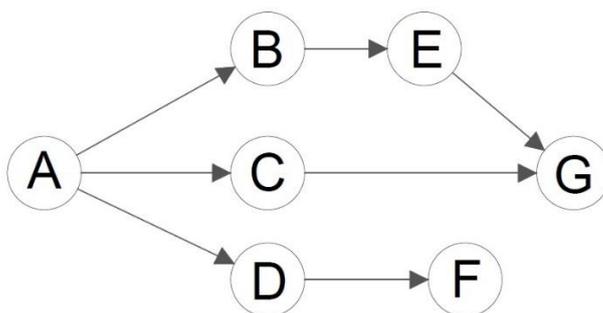


Figura 38. Esempio di Critical Path Method (CPM), specifico della fase di approvvigionamento di pigmenti e attrezzature per il restauro di pitture parietali alto-medievali in contesto critico (caso studio n.3).

Questi diagrammi, vista la complessità (anche di lettura) che manifestano, possono anche essere distinti in fasi e macro-fasi: con un approccio simile alle *matrioske* infatti, si possono produrre sia schemi reticolari che inquadrino il progetto per macro-fasi che, a loro volta, possono essere suddivisi per ordini di rappresentazione inferiori, fino ad arrivare alla sequenza-base della realizzazione del componente semplice.

Nel caso del PERT (fig. 39) oltre all'attività e alla durata, sono segnate i periodi di inizio e fine nella peggiore delle ipotesi (riga in alto) e quelli ipotizzati in via ottimistica (riga in basso).

La natura intrinseca dell'industria delle costruzioni, ancora legata a prodotti precisamente contestualizzati e a processi tecnologici scarsamente evoluti, la rende praticamente estranea alle dinamiche della progettazione industriale: questi, probabilmente, sono i principali motivi della mancata applicazione di tali metodologie e tecniche alla gestione del progetto di architettura (Carrara et al., 2014d)

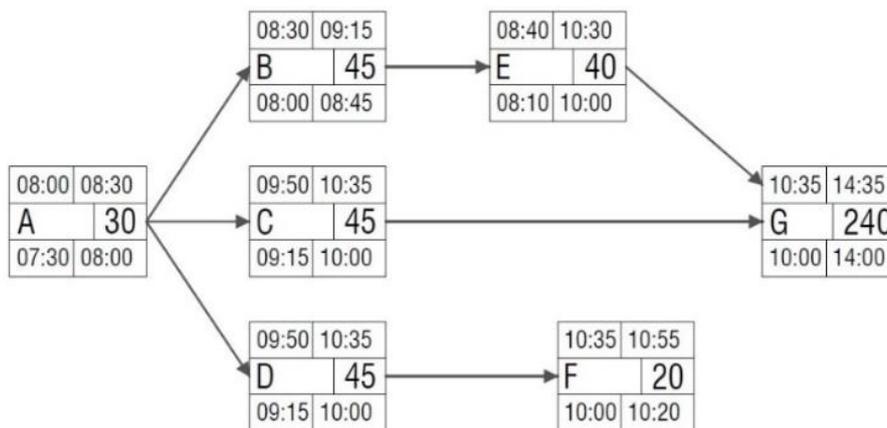


Figura 39. Esempio di Program Evaluation & Review Technique (PERT), applicato alla stessa casistica dell'immagine precedente.

LEGENDA

- A)** Arrivo a valle delle forniture;
- B)** Trasporto in situ di materiali da trattare prima della posa;
- C)** Trasporto in situ di materiali a pronta posa;
- D)** Trasporto in situ di attrezzature accessorie alle lavorazioni;
- E)** Trattamento a piè d'opera propedeutico alla posa;
- F)** Posa apprestamenti per lavoro in quota e luci accessorie;
- G)** Posa dei materiali e delle miscele sull'opera pittorica.

2.3. Un nuovo approccio: la Costruzione Snella (*Lean Construction*)

Vi sono diversi approcci per gestire le attività proprie dei processi realizzativi dell'architettura: allo Stato dell'Arte però, ancora si predilige l'approccio *per fasi*, che considera l'organismo edilizio come insieme di parti e, per questo, analizzato in maniera settoriale e segmentata.

Questo approccio, di derivazione *fordista*, impone l'identificazione di una serie gerarchicamente organizzata di attività da realizzare secondo delle specifiche procedure: queste, sono indicate operativamente nei *programmi di costruzione* e, riguardo alle tempistiche, cadenzate da date importanti sul diagramma di Gantt (pietre miliari o *milestones*), oppure secondo approcci reticolari. Concettualmente, il processo può essere sintetizzato attraverso 5 macro-fasi generali, scalabili dall'intero progetto alla singola sequenza:

1. *Iniziazione;*
2. *Pianificazione e progettazione;*
3. *Esecuzione e costruzione*
4. *Monitoraggio e controllo*
5. *Collaudo e consegna.*

Per analogia, si può prendere a esempio il processo di sviluppo di un software, dove questo approccio è conosciuto come *modello a cascata*, ovvero la successione sequenziale di una serie di compiti, in via strettamente lineare. Nel settore dell'industria infine, tale approccio è generalmente denominato *push programming*.

Tale impostazione viene puntualmente a mostrare le sue falle quando, per via della alta probabilità che vi possano essere problemi lungo il suo svolgimento, si debbano fronteggiare ritardi, sovrapposizioni tra attività o spostamenti delle risorse, umane e materiali allocate in cantiere. Questa alea di incertezza e dinamicità comporta quindi dei rischi, che devono essere individuati il prima possibile, al fine di limitare la propagazione degli effetti dannosi secondo l'effettivo peso che ogni scelta apporta nei processi decisionali.

Inoltre, si consideri quanto i fattori organizzativi e le decisioni umane abbiano un profondo impatto sui questi rischi (Walewski et Gibson, 2003), dove, globalmente, il rischio di progetto può essere definito come “gli effetti delle incertezze sugli obiettivi di progetto” (Chan et Kumaraswamy, 1997).

Tale dimensione del problema lascia intuire quindi come diversi fattori possano influire pesantemente sulla produttività di un settore che, difatti, risulta molto più bassa rispetto a quella delle linee manifatturiere.

Altra forte limitazione del settore edile è la composizione numerica del personale caratterizzata da un'alta frammentazione delle imprese e delle organizzazioni tecniche a guida dei processi, che risultano perciò inadeguate a fronteggiare le ripetute criticità dei processi e i livelli qualitativi richiesti.

A tal fine perciò, sono state proposte diverse soluzioni per ovviare alla cronicità di queste problematiche: tra queste, oltre ai citati metodi organizzativi di derivazione tayloristica, possiamo includere l'industrializzazione (in termini di prefabbricazione e modularizzazione dei componenti edili), vista per diversi anni come una soluzione a questa inefficienza sistemica, dando risultati spesso deludenti.

Non si trascuri poi la ritrosia del settore dell'edilizia a metabolizzare le innovazioni dato che, nonostante obblighi derivanti dai diversi aggiornamenti normativi che si sono susseguiti nel tempo, ancora si arranca nell'integrare le tecniche ICT nella filiera.

D'altro canto, dal punto di vista della programmazione e progettazione, l'approccio prevalente è sempre quello della validazione progressiva di esperienze empiriche (cd. "*Try and error*"), in luogo di una attenta pianificazione strategica del progetto di realizzazione dell'organismo architettonico basata, ad esempio, su simulazioni predittive degli esiti delle scelte progettuali effettuate.

Pertanto, oltre ad una fisiologica innovazione in chiave digitale degli strumenti impiegati per governare questa complessità, da tempo è in atto un sostanziale ripensamento delle modalità organizzative dei cicli produttivi edilizi che, come sappiamo, rappresentano un campo particolarissimo del novero delle attività umane, visto che si occupano esclusivamente di *prototipi* e, dal punto di vista della realizzazione, è uno dei pochi settori in cui *il luogo di lavoro è il prodotto stesso*.

Va da sé quindi che, se il problema è annoso, non possono essere altrettanto vetuste le soluzioni: l'obiettivo quindi è, a vecchi problemi, dare nuove soluzioni grazie a metodologie adeguatamente innovative (*tab. 05*).

Tabella n. 05. Sintesi dei principi dell'approccio snello (lean manufacturing⁶⁴) rispetto alla programmazione per sequenze.

Snello (focus sul flusso e sul ciclo di vita del processo/prodotto)	Non Snello (focus sulle fasi e sui pacchetti specialistici di cui si compone il processo/prodotto)
<p>a) L'obiettivo è ottimizzare il sistema di produzione, la trasformazione delle materie prime e dei semi-prodotti, i flussi di produzione e gli incrementi di valore lungo la filiera. Gli attori gerarchicamente inferiori sono sempre coinvolti nelle decisioni, anche di livello superiore;</p> <p>b) Prodotto e processo vengono progettati insieme: tutti i livelli del ciclo di vita sono analizzati in maniera unitaria, come nello stesso contesto vengono valutate e attuate le misure previste dai vari responsabili delle successive operazioni necessarie a dare il prodotto finito;</p> <p>c) il valore aggiunto è dato anche dalla stratificazione dell'esperienza (<i>know-how</i>) contenuta e sviluppata lungo il percorso progettuale e l'intero ciclo di vita del prodotto;</p> <p>d) l'imprevedibile è ricompreso nelle "zone cuscinetto" (<i>buffers</i>) fisiologicamente considerate nelle fasi di programmazione e ridistribuzione dei compiti, dunque considerate nell'interezza della tempistica di consegna globale.</p>	<p>a) l'obiettivo è sul rispetto delle date di consegna e, perciò, sulla consegna delle relative sotto-fasi di realizzazione del progetto/prodotto;</p> <p>b) l'obiettivo è la trasformazione del materiale lungo le fasi, in una serie di progressivi "compartimenti stagni" caratterizzati da diversi specialismi, volti a trasformare la materia prima in prodotti finiti;</p> <p>c) le decisioni sono prese in ambito specialistico nella misura in cui soddisfano dei precisi obiettivi, la collaboratività è ridotta al rispetto della coerenza generale degli obiettivi di progetto;</p> <p>d) Il processo produttivo inizia dopo la definizione del processo progettuale, con l'obiettivo sequenzializzare le fasi per "pacchetti chiusi";</p> <p>e) obiettivo è ridurre il tempo di realizzazione delle fasi, non lette in un'ottica generale di flusso ma come momenti distinti e separati dall'obiettivo generale;</p> <p>f) gli imprevisti sono localizzati nelle singole fasi e non considerati in maniera globale all'interno dell'intero progetto/processo.</p>

⁶⁴ Cfr. Womack, J.P., Jones, D.T., Ross (1990) *The Machine that Changed the World*, Rawson Associates, New York.

L'idea di un nuovo approccio alla gestione della produzione nasce in Giappone nei primi anni '50, figlia della necessità di ricostruire il potente apparato industriale pre-bellico nonostante la contestuale penuria di materiali e risorse. Per questo, come sempre accade nella cultura giapponese, si introdussero aspetti liminari al mondo dello spirituale all'organizzazione dei cicli produttivi: si iniziarono ad approfondire l'analisi di valori assoluti quali il *muda* (attività improduttiva), i *mura* (incoerenze di processo) e i *muri* (sovraccarico ingiustificato e inevitabile di richieste) come danno alla produzione e, quindi, alla necessità umana di fare *il giusto con il minimo delle risorse a disposizione*⁶⁵. Queste intuizioni, portate avanti da gruppi di ricerca pionieristici in seno alla *Japan Management Association – JMA* trovarono terreno fertile nei sistemi organizzativi della Toyota: l'idea di fondo era l'eliminazione delle scorte di magazzino o di altro materiale inutile, riducendo gli spazi di produzione, i tempi di messa a punto, l'impiego del personale per la custodia e la movimentazione di questo materiale non necessario sviluppando, invece, macchinari semi-automatici per la produzione, aumentando il livello di collaboratività tra personale interno e tra questi e i fornitori esterni. (Shingo, 1984).

Contemporaneamente, in America studiosi come W. E. Deming (1900-1993), J. M. Juran (1903-2008) teorizzavano modelli di supporto alla Qualità che ebbero molto seguito sempre in ambito nipponico, dove questi autori vennero chiamati a lavorare fin dai primi anni del dopoguerra.

Tra gli altri successi riportati, l'apporto più innovativo di queste ricerche fu l'integrazione di strategie progettuali e realizzative con le scienze statistiche.

Tali avanzamenti, seppur rimasti per diversi decenni relegati ad una nicchia di addetti ai lavori negli anni 80-90 guadagnarono un sempre maggiore interesse e diffusione, come attestato dalla bibliografia dell'epoca⁶⁶.

⁶⁵ Il concetto di *ottimizzazione* è, nella cultura nipponica, un tratto costitutivo, dato da necessità contingenti alle caratteristiche del contesto: si consideri che, a fronte di un territorio di dimensioni ridotte e perlopiù accidentato, il Giappone ha circa 126 milioni di abitanti (la Germania, con una estensione territoriale quantitativamente simile ma, qualitativamente, molto più favorevole, ha una popolazione di ca. 82 milioni di abitanti) e rappresenta una delle potenze economico-industriali più avanzate del mondo. È molto probabile che, con lo sviluppo generalizzato della domanda di prodotti ad alto contenuto tecnologico, questa posizione di privilegio sui mercati possa addirittura crescere.

⁶⁶ Cfr. Deming, W E (1982) *Quality Productivity and Competitive Position*, MIT, Boston, ISBN 978-0911379006;

Perciò, all'inizio degli anni '90 tali tecniche ebbero una notevole diffusione, iniziando ad essere conosciute sotto diversi nomi, tutti riconducibili alla grande famiglia della "produzione snella" (*Lean Construction*): una volta constatati gli effettivi benefici apportati ai processi, questi protocolli vennero applicati, oltre che alla manifattura, anche alla gestione di processi legati ai servizi e all'amministrazione (Harrington, 1991).

Semplificando, si potrebbe definire l'approccio snello (*lean thinking*) come la volontà espressa collaborativamente dalle figure del processo di:

- Generare Valore: nell'approccio scientifico-taylorista, il procedimento industriale era, semplificando al massimo, un processo di *trasformazioni* continue di materiali e componenti da uno stato a un altro, secondo azioni di input, procedure lavorative e output, con relativa consegna del prodotto al passaggio successivo.

Il *valore*, pertanto, è da intendersi come la differenza di valore tra la somma dei valori intrinseci dei materiali e componenti e il controvalore attribuito dal mercato al bene prodotto.

In un approccio *lean* invece, la catena del valore è composta anche da diversi beni intangibili quali la conoscenza acquisita dal personale durante i cicli produttivi (*know-how*) le buone prassi registrate lungo questi percorsi, l'esperienza maturata all'interno del gruppo di progettazione e realizzazione e l'aggiornamento delle attrezzature (o del luogo di lavoro in genere) impiegate durante il processo;

- Miglioramento continuo: ovvero la capacità di verificare, attraverso l'impiego di metriche quanto più oggettive possibile, il livello di qualità – inteso come rispondenza tra aspettative e quanto effettivamente realizzato – di un processo e migliorarne le prestazioni espresse.

Questo si concretizza in ogni occasione in cui uno o più approcci, processi o soluzioni operative risultino capaci di *migliorare* le prestazioni di un processo rispetto a quanto rilevato precedentemente (Bhuiyan, 2005). Tra le metodologie più adottate per questi scopi vi è il *Kaizen*,

Hayes, S C, Brownstein, A J, Haas, J R, Greenway, D E (1986). Instructions, Multiple Schedules, and Extinction: Distinguishing Rule-Governed from Scheduled-Controlled Behavior. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 46(2), p. 137-147;

Berang r, P (1995) *Les nouvelles règles de la production*, Dunod.

termine che, comunque, indica un approccio di ben più ampio respiro a riguardo⁶⁷, e il “ciclo di Deming” (fig. 40).

Nella manifattura a questo concetto si affianca quello di *benchmarking* ovvero la legge, definita in ambito economico, secondo la quale il *miglioramento continuo* consiste nella verifica della riduzione delle differenze qualitative tra l’impresa in analisi rispetto a quella identificata come leader del mercato.

In edilizia però quest’ultimo passaggio risulta alquanto ostico, vista l’ampia casistica che non permette di fare comparazioni molto affidabili in merito.

- Rimozione degli sprechi (waste) il concetto di spreco, definito dal TPS⁶⁸ nella triplice forma del *Muda, Mura, Muri* è uno dei concetti trainanti dell’approccio snello. Concretamente, lo spreco è ogni elemento che non apporta valore al prodotto e oppure non segue appartiene alle attività programmate.

Come riportato da Koskela (1992a) l’impatto dello spreco (dunque abbassamento della qualità) varia dal 10 al 20 % del valore complessivo del giro di affari legato alle costruzioni. È eloquente verificare che, in recentissimi report (McKinsey, 2017) i valori non siano variati sensibilmente: le cause di questi sprechi infatti sono riferibili per il 23% a carenze progettuali, per il 55% ad errate modalità costruttive, per il restante 20% ad inefficienze legate alla catena logistica di cantiere (Hammarlund et Josephson, 1991).

Dal punto di vista tipologico, i danni conseguenti lo spreco possono essere sia di natura materiale (impiego eccessivo di materiale, ripetizione della stessa lavorazione a seguito di demolizioni delle precedenti versioni, deperimento del materiale per inappropriato stoccaggio, etc.) sia di natura immateriale quale nolo infruttuoso di attrezzature, occupazioni di suolo indebite, fermo-cantiere, sottoimpiego delle maestranze, etc.;

⁶⁷ Difatti il *kaizen* prende le mosse dai fondamenti tipici della cultura orientale, quali in Confucianesimo, che rifugge da “rivoluzionismi” propri della cultura occidentale in favore di cambiamenti tanto gradualisti quanto costanti.

⁶⁸ *Toyota Production System – TPS*.

- Focalizzazione sui flussi di processo: la continuità operativa dei flussi di produzione è essenziale nell'armonica sintonia tra attori-contesto-prodotto e processo. Quindi in un processo *Lean-oriented* è fondamentale tenere sempre un equilibrio tra la produttività tra tutti gli apporti per garantire il parallelismo tra tutte le attività e scongiurare dei rallentamenti della produzione legati alla insufficienza degli apporti di tutte le parti in gioco. Nell'approccio *Lean* perciò, non esiste buon prodotto che non sia parte di un buon processo.

Tra le molteplici tecniche, procedure e terminologie, due concetti in particolare meritano un ulteriore approfondimento, per via del contributo che possono dare nella produzione edilizia: la produzione *Just in Time* – JIT e il *Total Quality Management* – TQM.

Nel caso del JIT, l'idea cardine della metodologia sta nel ridurre la necessità di avere scorte in magazzino, evitando perciò continui cambiamenti nel layout organizzativo, nel coordinamento con i fornitori e semplificando le modalità di scambio di conoscenza e collaborazione tra attori del processo. Pertanto, il fattore determinante per la gerarchizzazione dei processi è la *domanda reale* di un bene o servizio, evitando costose “diseconomie di magazzino” e/o l'impiego di personale esuberante rispetto alle reali esigenze. Nel caso delle costruzioni, tali considerazioni metodologiche si traducono in una più ponderata gestione degli approvvigionamenti di cantiere, in misura delle effettive necessità, considerando come “cliente finale” le squadre lavorative che hanno bisogno di forniture per terminare il lavoro previsto in quel dato momento.

Nel TQC invece, il punto di partenza dell'ottimizzazione è nella collaboratività e nel miglioramento continuo a livello di sistema, valutabile attraverso metodi statistici. Il termine *totale* si riferisce a tre accezioni, ovvero:

- ampliare il controllo della qualità dalla produzione verso tutti gli altri settori;
- espandere il controllo della qualità dai lavoratori al personale tecnico;
- ampliare la nozione di qualità fino a coprire tutte le operazioni svolte da una organizzazione, anche temporanea come nel caso dei cantieri edili.

Le metodologie di controllo e sviluppo della qualità sono state sviluppate in corrispondenza con l'evoluzione del concetto stesso di qualità, così come il

focus si è spostato dagli aspetti “ispettivi” (teoria del controllo a campione) verso il controllo del processo (controllo statistico del processo mediante i “sette strumenti”⁶⁹.

La produzione dunque è da intendersi come un *flusso* di materiali e informazioni che trasformano materie prime in prodotti finali.

Nel caso particolare dell’edilizia i prodotti di cantiere vengono processati (*convertiti*) in officina, verificati, messi temporaneamente in magazzino, stoccati nelle aree logistiche di cantiere, posati e rilasciati al *cliente finale* che, in questo caso, è la squadra lavorativa responsabile della posa degli elementi. Queste attività sono intrinsecamente differenti: la conversione (e la posa finale) rappresentano gli aspetti tipicamente produttivi, mentre le varie fasi della verifica, stoccaggio e spostamento logistico rappresentano gli aspetti fluidi del processo.

In definitiva questi flussi possono essere caratterizzati da *tempi, costi e valore* (ovvero la *qualità*). Il *valore* è dato dal tasso di soddisfazione dei requisiti espressi dai clienti finali che, in questo caso, si esprimerà come la aderenza alle specifiche di montaggio e al capitolato speciale di appalto, eseguito dalla squadra lavorativa e verificato dalla relativa Direzione Tecnica e, lungo tutte le fasi di cantiere, dal Direttore dei Lavori.

Il nuovo paradigma della produzione snella perciò, implica una doppia visuale sui processi produttivi: una prima parte è riferibile alla *conversione dei materiali* (approccio tradizionale) l’altra invece è più focalizzata sugli aspetti processuali, sui flussi di continuità operativa e sul contenimento degli sprechi. Nella modalità “tradizionale” di gestione delle attività ci si affida alla sequenzialità nella realizzazione di parti del progetto, secondo una organizzazione gerarchica delle attività legata agli specialismi che compongono il progetto (strutture, impianti etc.). Questo, oltre a rendere difficilmente valutabile la qualità, non valuta quali, tra le sequenze concretizzabili, quelle

⁶⁹ il diagramma di Pareto, il diagramma delle affinità, l’istogramma, il grafico di controllo, il diagramma a dispersione, i grafi e le schede di controllo per un progressivo aumento dello sviluppo della qualità di processo, declinata secondo le potenzialità dei *nuovi sette strumenti* (diagramma relazionale, diagramma di affinità, diagramma ad albero, diagramma a matrice, diagramma del processo decisionale, diagramma a frecce). Tutti questi strumenti hanno lo scopo di definire la qualità all’interno dei prodotti e dei processi *cfr.* (Tronchia, 2001).

ottimali. Difatti, la parziale interpretazione delle modalità di gestione tipiche della catena di montaggio hanno generato una poco governabile interazione tra aspetti non considerati, quali la compatibilità tra componenti e materiali, la corretta sequenza di montaggio tra elementi, l'adeguato calcolo delle risorse collegate allo svolgimento di un compito.

I problemi di questo approccio, basato sulla sequenzialità delle fasi e delle responsabilità, è da anni un tema dibattuto ma, nonostante le criticità siano note, è uno dei sistemi più utilizzati, nonostante si rilevino diversi limiti, quali:

- Poche iterazioni tra fasi progettuali;
- Poca considerazione dei reciproci vincoli e necessità dei diversi sistemi che, obbligatoriamente, devono convivere nell'edificio (distribuzione spaziale, strutture, impianti);
- Forte individualismo tra specialisti, con limitati scambi di conoscenza e di soluzioni condivise;
- Difficoltà ad individuare specifiche responsabilità tra specialisti.

Pertanto, l'approccio "sequenziale" porta a:

- Soluzioni di compromesso stabilite per la maggior parte come azione di riflesso ad un danno subito o incipiente;
- Scarsa costruibilità e gestione del bene, causata ad esempio da scarsa integrazione progettuale tra parti del sistema;
- Ampio ricorso al cambiamento del materiale ordinato a seguito del manifestarsi, in fase di costruzione, delle incongruenze sottovalutate in fase di progettazione, perciò:
- Ripetizione delle lavorazioni già terminate, sia in fase progettuale che, con maggior costi e rischi, in fase esecutiva;
- Bassa possibilità di introdurre innovazioni e migliorie.

In definitiva, il risultato di questo approccio superficiale porta, tanto inevitabilmente quanto frequentemente, a continue revisioni progettuali, riparazioni, nuove lavorazioni impreviste che, su progetti a larga scala, possono avere proporzioni importanti.

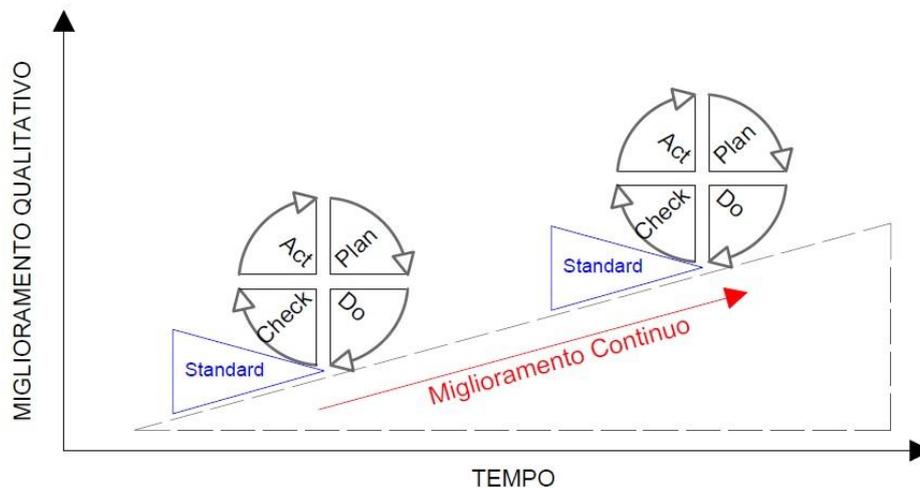


Figura 40. Schematizzazione del “Ciclo di Deming – PDCA”.

Si noti come sia necessario proseguire, all’evolvere del tempo, da una parte con miglioramenti scaturiti dalla buona applicazione del metodo, dall’altra con la standardizzazione (consolidamento) delle buone prassi, al fine di non perdere il livello di qualità raggiunto. Superare le sconfitte considerando il successo come continuo punto di partenza.

Il ciclo di Deming si compone di quattro attività iterative ovvero:

Plan: stabilire gli obiettivi e i mezzi necessari per il loro conseguimento;

Do: produrre quanto pianificato;

Check: verifica della coerenza tra quanto pianificato “P” e quanto realizzato “D”, verifica qualitativa del prodotto, test di resilienza, prove sulla durabilità e sostenibilità della soluzione.

Act: azioni attuative del miglioramento ottenuto, anche comprendendo ultime migliorie e aggiustamenti su quanto verificato in “C”. Una volta che questa fase non dovesse apportare ulteriori cambiamenti, standardizzare la procedura e ricercare nuovi miglioramenti sistemici.

Oltre questi modelli, radicati nella *tradizionalista* industria delle costruzioni, quali teorie e metodi sono alla base dei processi di innovatività, peraltro necessari in un’epoca contraddistinta da repentini cambi di paradigma? Purtroppo, e i risultati sono evidenti, non vi sono stati negli ultimi decenni grandi cambiamenti in termini di gestione del processo mentre, sull’onda dello sviluppo delle tecnologie digitali, vi è stato un progressivo aggiornamento degli strumenti impiegati, sia nella fase progettuale che nella fase cantieristica. L’introduzione della metodologia BIM ad esempio, ha contribuito

notevolmente nel ripensare e aggiornare la concezione della gestione dei processi realizzativi dell'architettura, ma anche in questa ottica i manuali sembrano sempre orientati a descrivere come adattare gli strumenti digitali BIM al cantiere e non, piuttosto, a fornire buone prassi o auspicabili panoramiche sulla nuova visione della gestione di un processo, sebbene vi siano diversi tentativi di sistematizzare questa tipologia di processi secondo un'ottica *Lean* (Sacks et al., 2010).

D'altro canto, l'integrazione delle tecniche digitali alle realtà produttive è diventata sempre più un obiettivo di sviluppo, sia nel campo della manifattura che nel campo della produzione edilizia. Difatti, l'idea alla base è quella di raggiungere la *Computer Integrated Construction* – CIC, ovvero la digitalizzazione dei processi costruttivi in modo tale da facilitare lo scambio di dati, conoscenza e soluzioni progettuali tra gli attori che prendono parte al progetto.

Fin dagli albori dell'era informatica, gli sviluppi in campo digitale sono stati prevalentemente rivolti all'approccio *activity-oriented*, mentre in campo gestionale il supporto delle tecniche digitali è stato limitato ad applicazioni automatiche di conoscenze implicite, proprie del bagaglio culturale del progettista (cd. *sistemi esperti*).

Pertanto, la situazione attuale del mondo delle costruzioni può essere sinteticamente delineata come segue:

- La base concettuale della produzione edilizia è ancora improntata ai *processi di trasformazione*, ovvero *segmentata* in attività specifiche e non considerata come un continuum ricorsivo che parte dalla programmazione alla manutenzione e gestione del bene costruito;
- Vengono scarsamente presi in considerazione i *flussi di lavoro*, ovvero la *presenza sinergica* di maestranze e attrezzature in determinati luoghi di cantiere, con relativo spreco di tempo, oltre a eventuali sovrapposizioni non prevedibili, perciò potenzialmente rischiose;
- Non essendoci un approccio *olistico* all'analisi del problema, risulta difficile individuare univocamente la problematica da risolvere e determinarne i confini in termini di localizzazione e responsabilità oggettive;

- Per lo stesso motivo, tecniche di analisi e innalzamento della qualità globale sono ostacolate dalla frammentazione degli specialismi coinvolti.

Perciò, alla luce di queste problematiche, il primo risultato da raggiungere è quello di pensare all'industria delle costruzioni come un *insieme fluido di attività sinergiche* in termini di azioni, risorse da impiegare e luoghi di lavoro. Questo approccio, da attuare con l'impiego di metodologie di gestione del tempo e degli spazi adeguate allo scopo, avrebbe la possibilità di iniziare a vedere sotto una luce più ampia la soluzione del *wicked problem* dell'architettura che, d'altronde, è caratterizzato da una complessità tale che solo con piani di lavoro semplificati e condivisi può avere spazi di governabilità.

Infine, un aspetto-chiave fondamentale per l'ottimizzazione, il controllo e la gestione dei processi realizzativi dell'architettura è la *collaboratività*: alle porte di quella che si prefigura essere come l'epoca della rivoluzione dell'*Internet of Things* è alquanto difficile immaginare che da un auspicabile livello di collaboratività tra specialisti dell'architettura, non si possa passare alla collaboratività interattiva con le macchine (*fig. 37*).

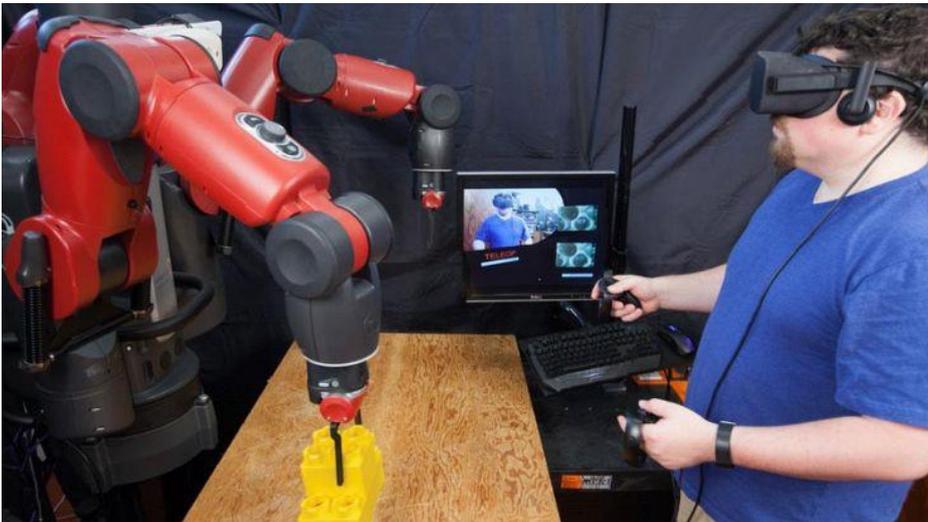


Figura 41. Baxter, un robot a controllo remoto governabile dall'operatore umano mediante strumenti di Realtà Virtuale. (Libero Tecnologia del 03/10/2017).

2.3.1. Location-Based Management: definire l'equilibrio della gestione del processo mediante la *Line of Balance* – LOB

Le tecniche di programmazione correntemente adottate dall'industria manifatturiera presentano, come visto, diverse criticità nell'applicazione nel mondo delle costruzioni.

Si può rilevare infatti una certa indifferenza tra quanto pianificato nelle tecniche reticolari del CPM/PERT e le esigenze dei flussi di lavoro delle squadre operative. Questa condizione perciò causa delle diseconomie, date dal mancato impiego ottimizzato di tutte le aree disponibili, alle sotto utilizzate sinergie tra squadre lavorative, macchine e apprestamenti oltre al mantenimento del – basso – tasso di produttività che, storicamente, contraddistingue l'edilizia (Arditi et al., 2002). Nella verifica delle metriche di cantiere inoltre, si può facilmente rilevare che le squadre lavorative, quando non hanno indicazioni precise sulle zone da occupare, procedono con le aree che, secondo schemi non organizzati, possono sembrare più disponibili/appetibili di altre: questo comporta, quasi sempre, un rallentamento dei lavori dato dallo scarso collegamento tra catena di fornitura, lavoratori e l'evidente aumento del rischio dovuto a sovrapposizioni non pianificate.

L'unica certezza della realtà del processo edilizio è “la sua natura iterativa e generativa” (Ballard, 1996) e, in tal senso, si consideri che lo svolgimento di lavorazioni in aree dove non sia stata fatta una accurata pianificazione delle attività, comporta dunque degli sprechi in termini di tempo sia nella misura in cui le attività svolte non potrebbero essere propedeutiche ad altre, sia nel caso in cui tali attività andassero sospese per essere poi riprese in un secondo momento. Dal punto di vista del Coordinamento della Sicurezza dei lavori edili⁷⁰ inoltre, questo significa rielaborare programmi già *equilibrati*, in favore di nuove situazioni che non è detto siano ottimali, oltre ad esporsi a dei rischi non pianificati (*fig. 42*). Le tecniche reticolari CPM e PERT, tra l'altro non illustrano problematiche riguardanti lavori simultanei negli stessi luoghi e

⁷⁰ Figura professionale introdotta dal *D. Lgs. 626/94*, modificata e integrata dal *D. Lgs. 494/96* “Attuazione della direttiva 92/57/CEE concernente le prescrizioni minime di sicurezza e di salute da attuare nei cantieri temporanei o mobili”. Successivamente, il corpus normativo è confluito nel Testo unico sulla Sicurezza (*D.Lgs. 81/08, come coordinato con il D.Lgs. 106/09*).

problemi di produttività derivanti dall'inadeguata gestione delle sovrapposizioni delle squadre produttive (Russel et Wong, 1993).

Perciò, queste tecniche di pianificazione portano a trascurare la valutazione del tasso di occupazione di un'area di lavoro in un dato periodo di tempo, con il rischio che ci si trovi nella situazione di dover iniziare delle attività in un'area, per poi abbandonare le stesse ad uno stato intermedio. A tale evidente limite si aggiunga la insita complessità del settore delle costruzioni che, in questo caso, si concretizza nella difficoltà tecnologico/gestionale data dalla varietà o diversità delle mansioni e delle interdipendenze tra esse, veicolate attraverso metodologie (più o meno efficaci) di comunicazione/collaboratività tra squadre di lavoratori (Baccarini, 1996). Altro aspetto da non sottovalutare è la complicatissima *scalabilità*⁷¹ del processo industriale edilizio: difatti, a differenza (perlomeno teorica) del processo manifatturiero, la produzione assoluta non è direttamente proporzionale al solo aumento delle risorse, espresse in termini di materie prime, personale e linee produttive; nel caso dell'edilizia infatti la produttività risulta espressione di una serie di fattori concomitanti, tra i quali molti esterni, quali il tasso di antropizzazione della zona in cui si ubica il cantiere, la raggiungibilità del sito⁷², la gestione logistica delle aree per l'approvvigionamento delle risorse, la consistenza dell'edificio di intervento e la collaboratività tra i vari raggruppamenti specialistici, sia in fase di progettazione che in fase di esecuzione. Per questi motivi, rimarcati anche da Peer (1974) le maggiori critiche rispetto all'impiego di tali metodologie nel campo dell'edilizia sono da ricercare proprio nelle supposizioni che vi sono alla base quali, ad esempio, la illimitatezza⁷³ del personale alla base dei metodi tradizionalmente legati alla catena di montaggio, come il Gantt.

⁷¹ Termine mutuato dal mondo dell'informatica e della finanza, rappresenta la capacità di un sistema di aumentare o diminuire scalarmente le proprie caratteristiche a seconda delle necessità espresse nel quadro esigenziale. Per estensione, è una forma di *resilienza* a livello sistemico.

⁷² Motivo della scelta del caso di studio n.3.

⁷³ La filosofia dell'industrializzazione vista da un punto di vista "capitalista", pone come uno dei pre-requisiti la presenza illimitata di personale che, oltre a garantire un modello di crescita lineare continuo (eredità filosofica dei *positivisti* ottocenteschi) mette in concorrenza competitiva la manodopera. Si consideri, a riguardo, il dibattito (ormai secolare) sull'*esercito industriale di riserva*, ovvero quel processo che porta a mantenere stabile il tasso di disoccupazione, per poter livellare unilateralmente il costo del lavoro da parte dei detentori dei mezzi di produzione.



Figura 42. Effetti della mancata applicazione delle misure di coordinamento spazio-temporale: le squadre di manutentori devono abbandonare le attività di manutenzione ordinaria per permettere l'accesso ad una squadra lavorativa impegnata con delle attività in quota. Il risultato è il prolungamento del fermo-macchine, l'abbandono dei materiali tecnici i quali possono costituire intralcio alle operazioni oppure essere danneggiati durante i lavori soprastanti. *Struttura alberghiera, Roma, 2017.*

Prendendo la produzione automobilistica come esempio notevole di applicazione ed evoluzione dei principi tayloristici, la realizzazione del prodotto finito “vettura” può essere intesa anche come mero assemblaggio di componenti progettati e prodotti in organizzazioni, luoghi e momenti assolutamente diversi (Kieran et Timberlake, 2004); nelle costruzioni invece – nonostante la crescente diffusione di prodotti prefiniti anche per opere minori, si pensi all’uso del cartongesso – il momento dell’assemblaggio non può essere una attività totalmente dissociata dalla progettazione e scelta del componente, anche se questo abbia una elevata standardizzazione e duttilità di impiego: i motivi sono da individuare appunto nella dinamicità del cantiere, nella *unicità* di ogni processo edilizio e nella discretizzazione delle lavorazioni nella globalità

dell'appalto e, per un certo senso, la conseguente frammentazione delle competenze professionali lungo lo sviluppo della costruzione.

Si evince, perciò, la necessità di considerare l'assemblaggio dei componenti edilizi come una parte del flusso che inizia dalla progettazione/realizzazione del componente in officina e finisce con la manutenzione dello stesso all'interno dell'edificio in funzione, fino allo smaltimento del componente con l'auspicabile recupero delle materie prime, secondo un'ottica *circolare*. Per questi motivi quindi, un fattore di successo del processo è indubbiamente la *continuità*.

La continuità nel lavoro è stata definita da Russell e Wong (1993) come “il rinvio dell'inizio di un'attività fin quando non venga garantito un lavoro continuativo, sottolineando la necessità di un sistema integrato che assicuri continuità nel lavoro ed un equilibrio dell'intero processo”. Sempre negli studi degli stessi autori, si rileva, mediante interviste e riscontri su cantieri similari, che sia in fase di organizzazione della produzione, sia nelle fasi operative i sistemi basati sulle attività (es. il CPM e il PERT) risultano poco gestibili nelle aree (*location*) di cantiere: basti considerare, ad esempio, gli angusti spazi in cui si interviene nel caso di cantieri in contesti storici. Inoltre, le metodologie *Activity-based* non considerano tempi di inattività e, cosa ben più limitante nel caso dell'edilizia, *l'indisponibilità delle aree*, dimostrando una certa affidabilità quindi solo in progetti altamente sequenzializzati (Flood, 2011), con basso tasso di imprevisti e la disponibilità continua e totale delle aree di lavoro, supportate costantemente dalla filiera logistica di approvvigionamento di materiali e risorse in cantiere.

In conclusione, nei cantieri si riscontra una maggiore efficacia nei processi che impieghino metodologie “*location based*” che considerino, perciò, i seguenti aspetti:

- Continuità del lavoro: sia rispetto la produttività legata alla squadra (*Unit production*) sia rispetto al tasso di completamento dei lavori nella singola *location* (*L. production*) l'obiettivo è programmare l'impiego delle risorse in maniera tale da utilizzare il giusto numero di materiale, personale e attrezzature per portare a completamento tale attività non secondo il criterio del *minor tempo*, ma seguendo le tempistiche necessarie a rispettare le propedeuticità, la prossimità delle aree logistiche, la cadenza dei rifornimenti e il dispiegamento di manodopera nella globalità del cantiere, limitando diseconomie legate

al sotto-utilizzo di aree rispetto al sovra-affollamento di altre (Kenley e Seppanen, 2009);

- Gerarchizzazione delle aree: la gestione delle attività basate sul principio delle *location* ha i suoi indubitabili vantaggi se si rispettano alcune pre-condizioni di base come: *a)* la prefigurazione della successione delle attività, ovvero dell'ordine in cui le attività si susseguono in una data area di lavoro; *b)* le attività-ombra, ovvero quelle operazioni che possono essere svolte "indipendentemente" nella prima area disponibile; *c)* le attività cicliche, ovvero quelle attività che devono ripetersi, seppure allo stesso modo, nelle stesse aree di lavoro secondo intervalli regolari oppure, considerando macro-location, quelle attività ricorrenti che pre-condizionano l'inizio delle lavorazioni (si prenda, ad esempio, la pulizia dell'area di lavoro oppure l'installazione dell'illuminazione di cantiere);

Il concetto di fondo, che riassume in maniera sintetica l'essenza del problema, è da individuare nella natura intrinseca della tecnica utilizzata: le metodologie Gantt e PERT/CPM infatti nascono per l'impiego in ambienti industrializzati, caratterizzati da fasi standardizzate condotte da personale selezionato e formato per produrre/assemblare un elemento in uno specifico e indifferibile luogo di lavoro, curato nei minimi dettagli dell'ergotecnica a vantaggio dell'efficienza. Risulta quindi altamente improbabile che la stessa possa andare bene anche per un contesto così dinamico e, a volte, accidentato come l'edilizia: le condizioni al contorno di questo settore, difatti, definiscono la necessità di avere un approccio completamente differente (Peer, 1974).

Anche Laufer e Tucker (1987) hanno criticato le carenze del CPM e del PERT riguardo la limitazione nelle risorse non concordando inoltre sul dare agli stessi team di costruttori compiti simili. Il CPM e il PERT, tra l'altro, non approfondiscono le modalità di svolgimento di lavori simultanei negli stessi luoghi, e i conseguenti problemi di produttività derivanti dall'inadeguata gestione dei team (Russel e Wong, 1993). Trascurare queste mancanze potrebbe portare a difficoltà nella produttività dei gruppi di lavoratori successivi, in caso fosse preferibile che lo stesso team lavori in più località simultaneamente: questa evenienza, nell'edilizia, è praticamente la regola e, pertanto, ottimizzare la gestione e l'intercambiabilità delle aree rispetto alle squadre lavorative impiegate, risulta incidere fortemente sul tasso di successo di un processo edilizio. Per questo è fondamentale incrementare la conoscenza e l'uso di

tecniche basate sulla ottimizzazione della produzione in relazione al luogo di lavoro occupato e dell'intensità con la quale le risorse impegnate in queste aree portino a termine gli obiettivi previsti, considerando quindi la relativa gestione dei flussi logistici di supporto alle attività lavorative.

In tal senso, la metodologia LOB è una tecnica per assemblare, selezionare, interpretare e presentare sotto la veste grafica i fattori essenziali da considerare nei processi produttivi, a partire dalla materia prima fino al prodotto finito, secondo delle date tempistiche.

Essenzialmente, è uno strumento gestionale che tende ad ottimizzare i flussi di trasformazione del prodotto all'interno del processo produttivo, mirando a facilitarne il controllo dello sviluppo attraverso le successive fasi. L'ottimizzazione avviene dunque grazie alla *individuabilità* della fase di processo e dello stato di completamento del prodotto, permettendo agli attori di poter migliorare i flussi legati alla catena di fornitura o la gestione delle propedeuticità e, quindi, soddisfare le effettive necessità del momento, cercando un sincronismo volto ad eliminare la sovrabbondanza di risorse rispetto ai ritmi di produzione. La LOB si compone principalmente di quattro fasi:

- *Definizione dell'obiettivo*
- *Stesura del programma;*
- *Monitoraggio sullo stato di avanzamento;*
- *Analisi comparativa tra l'avanzamento e l'obiettivo.*

Contesti nei quali risulti favorevolmente positivo l'uso della LOB è nei casi in cui il processo produttivo possa incontrare molti ostacoli, imprevisti oppure dei fermi produzione dovuti sia a fattori prevedibili che imprevedibili: in tal senso, le possibilità date dallo strumento di poter immediatamente individuare i luoghi di lavoro, le fasi, il personale coinvolto e l'intensità delle lavorazioni svolte può essere decisivo sia per quantificare le spese sostenute (o da sostenere) che per riprendere il lavoro anche a distanza di tempo, ovvero quando la conoscenza maturata all'interno delle squadre lavorative impiegate nel processo produttivo vada via via diminuendo in termini qualitativi, oppure sia stata superata da innovazioni tecnologiche, cambio del personale oppure modifiche agli scopi e incarichi della commessa.

Le tecniche di rappresentazione tipiche di queste metodologie gestionali vertono intorno ai concetti di "flusso" e di "linea di bilancio" (*Line*

Of Balance). Introdotta dalla Goodyear sin dagli anni '40 per la gestione di commesse militari⁷⁴, nel settore dell'edilizia invece tali metodologie vennero considerate più tardi (Lumsden, 1968) sebbene in esperienze quali *l'Empire State Bulding* (cfr. fig. 22) si ebbe la possibilità di testare tali approcci con un certo tasso di successo. Queste metodologie puntavano, a differenza degli altri sistemi lineari o reticolari, a gestire più che i tempi e le attività, le *relazioni* che intercorrevano tra questi e i luoghi di lavoro, al fine di mantenere sempre alto il livello di produttività delle squadre lavorative e gestire le sovrapposizioni e le interconnessioni spaziali tra squadre diverse.

Successivamente, per ottimizzare graficamente le informazioni necessarie a gestire i flussi di attività nei luoghi di lavoro, le metodologie *Location-Based* sono state implementate con la redazione di linee di flusso. In questi diagrammi quindi, ogni segmento rappresenta una attività da svolgere, mentre l'inclinazione dei segmenti indica la "velocità con cui ogni attività omogenea deve essere completata (Hegazy, 2001). Possiamo affermare quindi che la stessa è funzione dall'*intensità*, intesa come rappresentazione proporzionale dell'impiego di personale e attrezzature: più si approssima alla verticalità (condizione teorica), maggiore sarà l'intensità ovvero l'impiego di materiali e attrezzature in relazione al compito da eseguire (e la conclusione delle lavorazioni sarà più rapida); nel caso contrario (linea orizzontale) vorrà dire che la lavorazione procede più a rilento. Si tenga sempre presente che queste previsioni devono tenere conto dell'*intensità massima*, ovvero il quantitativo di personale, attrezzature e rifornimenti ammissibile per quel tipo di area e, di conseguenza, attività assegnata. Tale indicatore è, salvo l'impiego delle tecniche di cui al *cap. 4*, di stretta discrezione dell'esperienza e delle capacità previsionali del tecnico incaricato dell'organizzazione delle aree e gestione dei tempi. Il risultato infine, è inserito in un piano cartesiano popolato da segmenti inclinati, indicanti le lavorazioni e la loro intensità (fig. 43). Nel piano quindi, sull'asse delle ascisse viene indicata la progressione temporale, nelle ordinate invece saranno discretizzate le aree di lavoro.

⁷⁴ Cfr. < <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/672029.pdf>>. In questo documento illustrativo interno della Marina Militare USA degli anni '60 si vanno ad esplicitare gli avanzamenti della ricerca sulla LOB e la sua integrazione con metodi diagrammatici nella visualizzazione dei tassi di completamento degli obiettivi oppure nella calendarizzazione delle attività da interconnettere, come le forniture di complesse apparecchiature elettromeccaniche a servizio dei natanti.

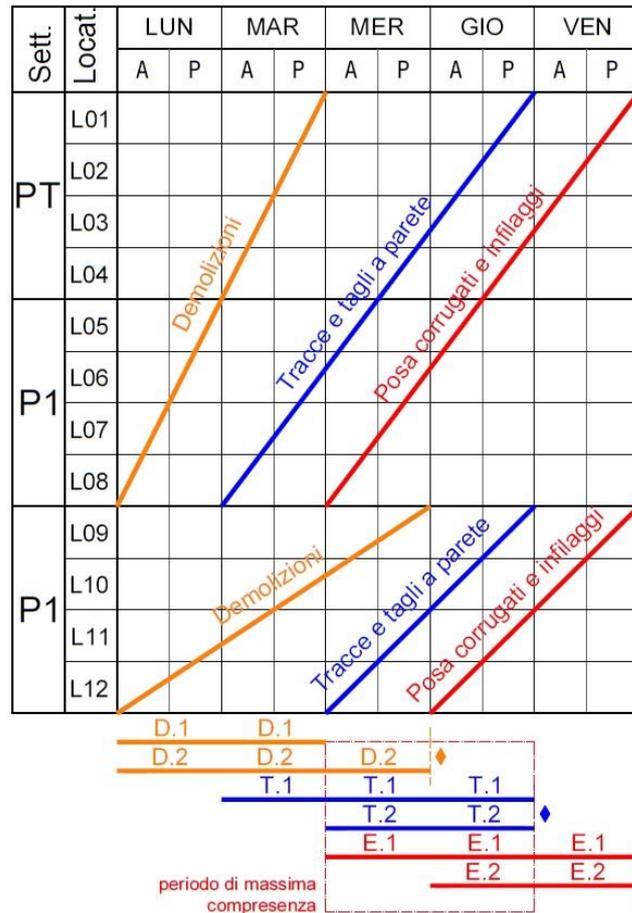


Figura 43. Rappresentazione LOB relativa alla gestione di una settimana lavorativa per adeguamento impiantistico di un'ala di albergo, lasciando inalterata la funzionalità degli altri spazi e la ricezione degli ospiti. Le ordinate rappresentano la LBS; le ascisse il tempo; i segmenti colorati le attività. L'inclinazione di tali segmenti indica l'intensità delle lavorazioni, e possiamo notare come le demolizioni, in alcuni settori, avanzino con inclinazione diversa: questo è dovuto alle difficoltà insite nelle L09-12, che non hanno permesso demolizioni estensive come per le aree L01-08. Per quanto riguarda la compresenza delle squadre lavorative, il diagramma lineare riassuntivo, in basso, indica come si mantengano delle continuità tra le squadre lavorative e come si sia programmata la compresenza massima nei giorni di MER e GIO, come da richiesto dalla struttura alberghiera. Roma, 2017.

2.3.2. Last-Planner system

“Le teorie e gli strumenti del *Last Planner* e del *Location-based Management* sono, infatti, accomunate dalla critica alla scarsa adeguatezza dei metodi reticolari per gestire la pianificazione e la programmazione della produzione cantieristica. Si tratta di una linea di pensiero che sostanzialmente cerca di condizionare le previsioni produttive sulla base della effettiva disponibilità di risorse e sul tasso di produttività riscontrato, ponendo al centro dell’attenzione la localizzazione dei fattori produttivi rispetto agli oggetti da realizzare (LBM) alla loro disponibilità, espressa anche in termini di riserve (*Critical Chain Management*⁷⁵) nonché alla determinazione delle previsioni sulla scorta dell’apporto offerto dai fornitori (*Last Planner*). Il che significa, in ultima analisi, che la pianificazione e la programmazione delle attività che concernono il cantiere (ma che avvengono anche prima o al di fuori di esso) richiedono un atteggiamento improntato alla integrazione e alla collaborazione che appare estraneo alle modalità correnti nel nostro paese [...] il fatto, poi, che negli Stati Uniti, in Germania e nel Regno Unito il *Lean Design* e la *Lean Construction* si saldino con l’*Information Modeling and Management* ci porta al cuore del problema che, non a caso, non verte sulla *Digital Fabrication* e sul *3D Printing*, ma su ipotesi di organizzazione del lavoro e della produzione” (Ciribini, 2017).

Oltre alla gestione delle tempistiche basata sul tasso di occupazione delle aree, l’approccio snello richiede una verifica costante sia verso le attività da svolgere (*look-ahead planning*) che riguardo quelle effettuate. Inoltre, visto l’alto tasso di apporto di *valore* da parte degli operatori, fondamentale per il soddisfacimento del *dogma* del miglioramento continuo, occorre dotarsi di opportuni metodi per incrementare il tasso di scambio di conoscenza tra attori e il loro continuo confronto.

Per tutti questi motivi nasce la metodologia di pianificazione e verifica sulla progressione delle attività *Last Planner System – LPS*: questa tecnica garantisce, in un approccio snello, il monitoraggio continuo delle attività di cantiere, l’aumento dell’efficacia delle strategie previsionali circa i tempi e i costi delle lavorazioni oltre a pianificare accuratamente gli effetti delle probabili variazioni organizzative lungo la costruzione dell’edificio (*fig. 44*). Sinteticamente, questa tecnica consiste nel controllo della produzione, sia dal punto di vista globale che dal punto di vista della singola squadra lavorativa, in

⁷⁵ Concettualmente complementare al CPM, si basa sulla gestione critica delle risorse a disposizione, spostando l’interesse alla successione logico/critica delle attività alle risorse collegate (Croom, 2000).

un continuo scambio di conoscenza e reciproche verifiche (Remon et Sherif, 2013). Il punto di partenza è la programmazione generale dei lavori che, come visto, può essere fatta preferibilmente, data la natura delle lavorazioni edili, basandosi sull'analisi del tasso di occupazione delle aree di lavoro e delle risorse allocate su queste (LBM).

Successivamente, il primo livello di verifica è la *Reverse Phase Scheduling* – RPS, ovvero un sistema di verifica basato sull'approccio dell'ingegneria inversa, ovvero provando già da questa fase a migliorare eventuali parti che ancora non abbiano raggiunto un tasso di efficienza soddisfacente.

Una volta superato questo livello di validazione della pianificazione, si procede con la pianificazione mensile, condotta secondo un approccio *pull*⁷⁶. Tali valutazioni vengono verificate dagli esperti che, ciclicamente, possono apportare delle migliorie oppure rimodulare le attività di pianificazione sulla base di eventuali (nell'edilizia, costanti) contingenze.

Una volta definita la gestione del sistema da una prospettiva temporale mensile, si procede con l'approfondimento settimanale che, oltre al costante apporto degli esperti, si basa su incontri settimanali tra i vari attori, per determinare dunque un effettivo e costante scambio di conoscenza tra queste figure e migliorare la qualità del processo, anche da un lato cognitivo-umano.

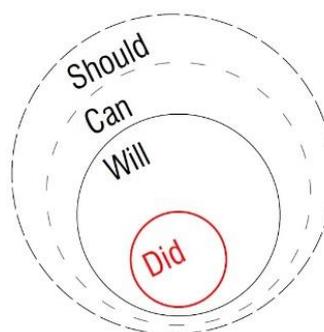
Successivamente, una volta svolte le attività previste, si procede con la verifica di quanto effettivamente svolto, valutandolo su base percentuale secondo il metodo della *Planned Percentage Completed* – PPC. Le attività residue sono, dunque, delle inefficienze di processo che saranno metabolizzate nella programmazione settimanale successiva,

⁷⁶ Ovvero partendo dagli obiettivi per ricavare, a ritroso, le attività necessarie al conseguimento degli stessi. Si differenzia dall'approccio inverso *push* che parte dalle attività (*tasks*) ne valuta il risultato e da lì vengono delineati gli obiettivi raggiungibili. Concettualmente, il metodo *push* punta sulla unidirezionalità, mentre il metodo *pull* ha fasi ricorsive che contribuiscono a migliorare progressivamente il prodotto.



Figura 44. Sequenze logiche del processo “Last Planner”, suddivise secondo le azioni caratterizzanti “Should-Can-Will-Do, [SCWD]”.

Con “S” si intende la definizione degli obiettivi; con “C” quelli definiti possibili; con “W” gli obiettivi da raggiungere e con “D” i risultati. Maggiore sarà la qualità della programmazione, minore sarà la differenza di superficie tra gli insiemi di attività, riportati nell’immagine a fianco.



visto che il risultato immediato di queste riprogrammazioni è il calcolo di una nuova data per il completamento delle attività (Auada et al, 1998).

Questo infatti è un sistema che nasce con lo scopo di gestire collaborativamente la rete di relazioni che intercorre tra programma, coordinamento delle attività, rispetto delle consegne in maniera condivisa, anticipando e discutendo collegialmente delle criticità riscontrate o prevedibili (Mossman, 2005).

In sintesi, i quattro elementi principali del *Last Planner System* sono:

1. Programmazione collaborativa: le valutazioni circa la fattibilità, le tempistiche e le allocazioni di risorse vengono svolte collaborativamente tra tutti gli attori del processo, in un continuo scambio di conoscenze e di verifiche condotte, ad esempio, su modelli informativi dell’edificio capaci di rappresentare *olisticamente* lo stato di fatto e le esigenze da soddisfare;
2. Operatività: insieme alle attività in programma, vengono definite le strategie operative per allocare risorse anche alla preparazione delle attività successive e/o parallele, secondo il principio del “*make-ready*”. Difatti, così si ha la possibilità di preservare – per quanto possibile – la continuità del flusso delle lavorazioni e, in caso di variazioni impreviste

- o emergenze, di non incorrere in fermo-attività ma di avere la possibilità di spostare dinamicamente le risorse verso altre attività predisposte, senza quindi abbassare il tasso di produttività globale;
3. *Aggiornamento continuo*: la pianificazione non è un documento immutabile calato dall'alto ma un testo quadro all'interno del quale vengono svolte le sessioni, condivise tra tutti gli attori, di aggiornamento e di verifica dei programmi. Tale attività è condotta sia in "remoto", attraverso la verifica costante degli esperti responsabili, sia *de visu* durante le riunioni settimanali operative (fig. 45);
 4. *Miglioramento continuo*: secondo uno dei principi più saldi del *Lean Construction* le attività devono essere sempre migliorate applicando ai processi in corso cicli di verifica iterativa come quello di Deming (cfr. fig. 40).



Figura 45. Riunione settimanale di cantiere. Il tema specifico riguardava la definizione dei percorsi dei materiali per il rifornimento dei piani superiori, e la contestuale verifica delle interferenze del raggio di azione del braccio meccanico.

Nuovo avancorpo del Terminal T3, aeroporto "Leonardo da Vinci, Fiumicino. Foto dell'autore, 2016.

2.4. Conclusioni

In questo tipo di esperienze, come premesso dalle teorie di K. Adamiecky (*cfr* par. 2.2), l'elemento alla base dell'affidabilità di questa tipologia di previsioni (e dei conseguenti risparmi operativi ottenuti) è legato all'*armonia* e al *ritmo naturale* delle costruzioni. A tal riguardo Arditi (1988) evidenzia che "il *ritmo naturale* di un'attività è definito come il tasso di produzione che una squadra lavorativa di dimensioni ottimali può essere in grado di produrre". Pertanto, la *dissonanza* tra il ritmo effettivamente registrato e il *ritmo naturale* va a determinare l'accumulo dei ritardi e del relativo aumento di costi.

L'ostacolo principale dunque è nella capacità di *misurare* tale ritmo, descrivendone dettagliatamente la progressione, la modularità e tutti gli aspetti utili a creare la conoscenza necessaria per confrontarsi, volta per volta, con nuove casistiche. Le metodologie descritte, benché orientate alla definizione delle regole e delle modalità con le quali questi ritmi si sviluppano, restano però in gran parte sconosciute agli operatori del mondo delle costruzioni: ad oggi infatti, confrontando i risultati di indagini condotte sia in ambito professionale che nelle categorie di settore, tali approcci risultano molto distanti dalla pratica corrente, perlomeno per gli operatori coinvolti in progetti di dimensioni medio-piccole. Diverso invece è il caso delle società impegnate in processi di più ampio respiro, soprattutto in ambito civile: queste infatti, avendo le opportune dimensioni numeriche e le possibilità economiche per attuare economie di scala, non solo hanno la possibilità di dotarsi dell'infrastruttura informatica necessaria a governare moli di dati così importanti ma, fattore ben più determinante, possono garantire un'adeguata formazione del personale. Inoltre, non si trascuri che le imprese medio-grandi hanno maggiori possibilità di entrare in contatto con realtà estere quali l'oriente e il mondo anglofono che, da tempo, fanno dell'applicazione di queste metodologie di rappresentazione e gestione del processo un importante valore aggiunto.

Nella peculiare situazione italiana, gli operatori del settore si affidano prevalentemente a basi di conoscenza implicite come l'esperienza personale e le consuetudini operative aziendali sebbene, soprattutto grazie alla rete internet, negli ultimi anni sia cresciuta la possibilità di fare ricorso a *buone prassi operative*, divulgate dai mezzi di comunicazione che veicolano l'informazione tecnica. Nonostante questo, l'impiego di metodologie e strumenti propri del *project management* nel settore della realizzazione dell'architettura risultano ancora pesantemente limitati a settori di nicchia.

La motivazione di fondo resta, comunque, la discretizzazione degli operatori del settore delle costruzioni: la larga maggioranza di questi infatti, ricade nel settore delle piccole e medie-imprese oppure, nel caso dei professionisti, studi che non vanno oltre i raggruppamenti occasionali di dimensioni variabili a seconda delle necessità operative per affrontare il progetto nel quale vengono coinvolti.

Questa condizione di instabilità organizzativa, di penuria di risorse e di scarsa collaborazione con gli altri attori del processo, porta ad utilizzare tecniche estremamente semplici e di facile comprensione per tutti, quali il diagramma di Gantt che, come visto in 2.2.1, mostra delle pesanti limitazioni per quanto riguarda il governo della complessità del cantiere edile.

D'altro canto, anche in questo campo la auspicabile digitalizzazione del settore porta verso prospettive inedite quali la *condivisione* (Chung et Crawford, 2016) di piattaforme gestionali⁷⁷ dotate di propri database in *cloud*, schemi-tipo e percorsi guidati di apprendimento che permettono all'operatore di potersi dotare di strumenti complessi a costi contenuti, contando inoltre su percorsi formativi adeguati all'uso corretto di tali tecniche. Resta comunque aperto il tema dell'integrazione con le metodologie di rappresentazione dei processi realizzativi dell'architettura che, al momento, non è stato esaurientemente esplorato dai produttori di software mentre, per quanto riguarda le linee di ricerca attive nel settore, tendono ad analizzare ed approfondire specifici specialismi del processo edilizio quali gli appalti, la gestione della catena di fornitura, l'impiantistica oppure, ad esempio, la produzione di specifiche tipologie edilizie prefabbricate (El Sayed et al, 2017).

⁷⁷ Cfr. <<https://www.capterra.com/project-management-software/>>

3. Processi realizzativi dell'architettura: la gestione del rischio nell'Era digitale

Una volta analizzate le potenzialità e le tecniche presenti nel mondo della progettazione, si scende nell'ambito interconnesso delle fasi realizzative, per verificare come i progressi nel campo dell'informatizzazione possano supportare i tecnici e le imprese nella gestione della sicurezza della produzione edilizia che, come noto (De Felice, 2017) è un ambiente di lavoro ad alto rischio e con un numero di infortuni, sovente mortali, sempre troppo alto. Le cause di questi infortuni sono, purtroppo, minuziosamente documentate e analizzate dalle banche dati nazionali (FILLEA-CGIL, 2016) e, nello specifico (*tab. 06*):



Questi dati, riferiti agli incidenti mortali, sono eloquenti su quanto ancora resti da fare per rendere l'edilizia un luogo più sicuro. Difatti, la diminuzione degli incidenti in cantiere, oltre al primario impegno sociale che questa attività comporta, resta – indiscutibilmente – il miglior modo di efficientare un processo che, come noto, ha un tasso di produttività tra i più bassi tra i settori produttivi. L'occorrenza dell'incidentalità di cantiere non è mai la manifestazione di un singolo effetto legato ad una singola causa, ma scaturisce da una interazione e concatenazione di eventi dannosi. Secondo Reason (1990), questo legame causa/effetto è riassumibile nello schema seguente (*fig. 46*):

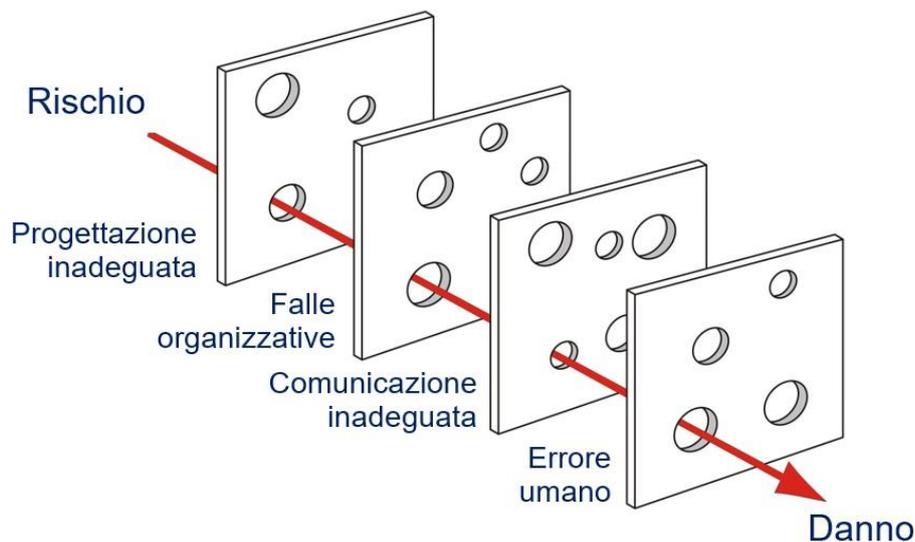


Figura 46. Modello probabilistico di gestione del rischio "Swiss cheese", rielaborato con le cause più comuni dei rischi in edilizia.

In questo schema, i macro-dominî del rischio sono rappresentati come lastre quadrate con dei fori: questi infatti, rappresentano le debolezze del dominio come, per esempio, le lacune progettuali. Nel dominio successivo, andranno quindi ad essere identificate altre falle.

La possibilità che, una volta disposte le lastre in fila, una retta possa passare da un lato all'altro della serie, rappresenta le modalità secondo le quali si può determinare un incidente e, con un processo di analisi inversa, risalire alle possibili cause per agire sulle stesse (ovvero "restringere il foro").

Per la forma delle lastre, lo schema è conosciuto come "Swiss Cheese", vista la somiglianza con le fette di *Emmental*. Attualmente vi è un vivo dibattito, soprattutto nel settore aero-spaziale (dove sono nate queste tipologie di studio, data l'importanza attribuita alla sicurezza in quel campo), per migliorare l'accuratezza del metodo (Reason, 2006).

Uno dei metodi preventivi verso gli incidenti in cantiere è agire su una delle cause più importanti, ovvero una erronea previsione del rischio in fase di progettazione (Sabatino et Di Muro, 2015). Per questo, la metodologia BIM entra a buona ragione all'interno delle modalità di prevenzione e protezione dei lavoratori (Stefani, 2015) poiché, da questo punto di vista è un modo per dare al tecnico della prevenzione, al coordinatore finanche agli operatori alla base

del processo costruttivo, le informazioni necessarie a valutare correttamente le procedure da attuare e monitorare costantemente lo stato dei luoghi di lavoro (quindi dell'edificio) a seconda delle attività da completare. Per approfondire dunque le capacità cognitive di questa metodologia di rappresentazione, le linee di ricerca si sono addensate intorno allo sviluppo di database informativi evoluti (Park et al., 2013). Difatti, uno degli elementi determinanti per il fallimento di un processo edilizio sono i difetti progettuali che, rispetto alla realizzazione corretta dell'opera, necessitano di successivi (dispendiosi e pericolosi) interventi. In questo caso quindi, il contributo dato dalle *ontologie informatiche*⁷⁸ serve a colmare l'attuale distanza tra informazioni del modello e situazione reale del cantiere, dovuta anche alla difficoltà di rendere dinamici rapporti informativi tra elementi edilizi che, nella metodologia BIM, sono incasellati in una modalità semi-statica di insiemi (famiglie).

A queste tecniche, indirizzate a dotare il professionista di un database dinamico basato sulle ontologie, vengono accostate anche strumenti capaci di semplificare gli esiti di queste previsioni informatiche, ovvero gli strumenti di aumento della percezione dell'operatore (Park et al, 2013), come le visualizzazioni aumentate⁷⁹ o i dispositivi di protezione individuale dotati di sensoristica e sistemi di segnalazione (*fig. 47*). L'obiettivo è rendere il cantiere un ambito produttivo controllabile in remoto (*fig. 48*) dove alle macchine siano demandate le lavorazioni più pesanti e pericolose.

⁷⁸ Una *ontologia* è la concettualizzazione formale della conoscenza in un determinato ambito [...] nei fatti, questa tecnologia informativa dovrebbe essere collegata con l'oggetto edilizio secondo modalità dinamiche e flessibili (Zhang, 2015)

⁷⁹ Settore in forte espansione, si divide per le categorie della *Augmented Reality – AR*: ovvero la visualizzazione del reale supportata dall'arricchimento informativo secondo grafiche sovrapposte al vero; *Virtual Reality – VR*, realtà parallela in cui l'operatore è sensorialmente immerso in un mondo virtuale, non permettendo quindi un collegamento con il reale; *Mixed Reality – MR* infine, al momento la più promettente, consente di trasporre il materiale informativo in maniera "corporea" nel mondo reale, secondo le modalità di rappresentazione e visualizzazione olografiche.

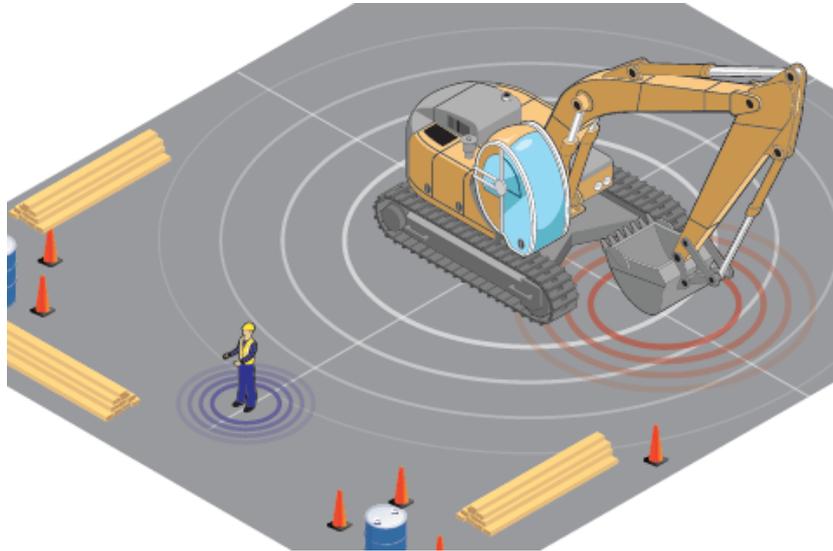


Figura 47. Mezzo d'opera e operatore edile dotati di sensori RFID per il riconoscimento della sovrapposizione in cantiere. All'ingresso dell'operatore in un'area pericolosa, il sistema a radiofrequenze si attiva e, mediante segnalatori presenti nel casco, al polso o negli abiti da lavoro (wearable technology), corregge l'azione del lavoratore.

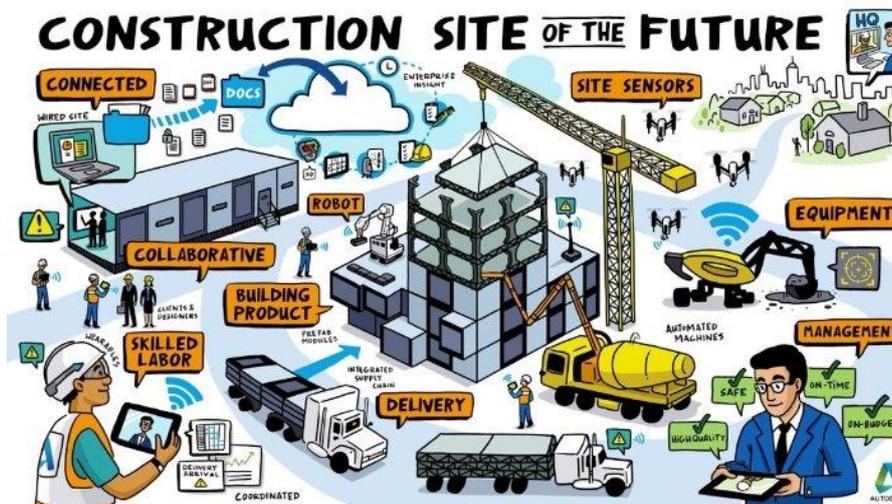


Figura 48. Sintesi del futuristico cantiere telematico, dove l'operatore è sempre più distaccato dalle operazioni manuali in favore della telegestione e della progettazione collaborativa. LinkedIn, J. Gall, 2016.

3.1. Ottimizzazione, controllo e gestione dei processi realizzativi: la modellazione informativa dell'edificio – BIM

L'impiego del BIM lungo la filiera dell'industria delle costruzioni ha subito delle ampie trasformazioni negli ultimi anni, dovuta sia a quadri normativi che impongono questo approccio metodologico (Ciribini, 2013), sia ad una maggiore consapevolezza dei professionisti del settore (Garagnani, 2017).

È interessante perciò osservare come sia cambiato l'approccio delle imprese di costruzione verso l'impiego degli strumenti digitali. In luogo della consolidata abitudine di impiegare gli stessi software impiegati nelle fasi progettuali per limitare la perdita di dati durante gli scambi di file, l'approccio BIM consente, grazie alla possibilità di arricchire il modello con informazioni provenienti da fonti diverse, di poter dotare le imprese di soluzioni informatiche specifiche (Hardin, McCool, 2015), mantenendo il necessario tasso di interoperabilità con i tecnici degli altri settori.

Sulla scorta delle esperienze maturate negli Stati Uniti, che possiamo definire un contesto “maturo” per quanto concerne l'impiego di queste metodologie, è possibile osservare come vi siano delle buone opportunità per legare il BIM al cantiere (cd. *BIM to field*)⁸⁰ e coordinare questi modelli con l'effettiva costruzione del bene edilizio. In cantiere difatti, i modelli BIM possono essere impiegati per:

- Confrontare le schede tecniche dei materiali approvvigionati con le specifiche di progetto;
- Governare le interferenze geometriche tra componenti edilizie;
- Gestire i tempi (4D) di approvvigionamento e posa e conseguentemente monitorare i costi (5D) sulla base dei quali liquidare gli *Stati di Avanzamento dei Lavori* (SAL);
- Gestire la logistica di cantiere, soprattutto per quanto riguarda le aree destinate a magazzino (tema cruciale per l'intervento sul patrimonio esistente);
- Monitorare l'effettivo impiego degli apprestamenti per la sicurezza in cantiere;
- Aggiornare gli elaborati “*as-built*” a seconda delle varianti e della loro effettiva realizzazione;

⁸⁰ Cfr. <<https://www.theblm.com/video/what-is-bim-to-field>>

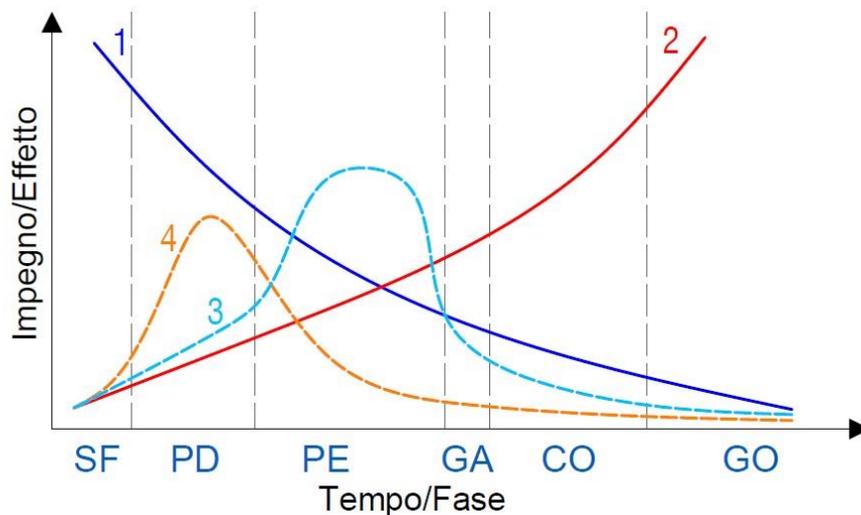
- Rendicontazione delle attività rimanenti (punch-list) associate alle relative aree di cantiere.

Quindi, il dato di fatto che emerge da questa analisi è che la gestione del modello informativo dell'edificio, associata alle valutazioni sulla costruibilità (ovvero sul rispetto delle caratteristiche progettuali, delle somme assegnate e dei parametri di sicurezza dei lavoratori, degli occupanti temporanei e dei successivi utenti) dei relativi componenti, diventano gestibili su una piattaforma unica (BIM) che accresce la sua affidabilità nella misura in cui i vari attori del processo ne arricchiscono il modello.

Tornando all'utilità del BIM come veicolo di scambio di informazioni tra fasi, si consideri la natura spiraliforme del processo edilizio, in opposizione alla classica concezione delle fasi a compartimenti stagni che, seppure possa essere considerata giusta per alcuni settori manifatturieri, non rappresenta la complessità dell'architettura e dell'ingegneria e la necessità di continue modifiche e adeguamenti in corso di progettazione o, nella peggiore delle condizioni, durante le fasi realizzative e manutentive.

Perciò, al fine di evitare difetti nella realizzazione e situazioni di rischio imputabili a mancanze di carattere progettuale, è preferibile spostare le analisi relative all'impiego delle risorse e dei tempi di esecuzione nell'ambito delle attività che precedono l'inizio dei lavori, evitando perciò che tutte le incongruenze o errori progettuali emergano nelle costose fasi di realizzazione e gestione del bene. A riguardo difatti, possiamo osservare gli esiti di un importante studio condotto da P. MacLeamy nel 2007 e riportato in (Eastmann et al, 2011): questa curva (*fig. 49*) descrive la diseconomia di traslare delle scelte architettonico/costruttive o delle verifiche dal momento della progettazione a momenti successivi della vita utile dell'edificio.

Per raggiungere le condizioni ideali di questa curva, è opportuno cambiare le modalità di modellazione e valutazione dei tempi di progetto, e con questo non ci si limiti alla preferenza di uso di uno strumento in luogo di un altro (*cfr. tab. 6*), poiché l'ostacolo concreto è nell'approccio: il problema difatti non è la quantificazione degli elementi e la connessione con durate temporali, bensì l'azione "sulla granularità del modello informativo medesimo e sulla ricchezza di indicatori presenti" (Ciribini, 2016).



Legenda:

SF: Studio di Fattibilità;

PE: Progettazione Esecutiva;

CO: Costruzione;

1: capacità di apportare modifiche al progetto senza costi;
3: approccio progettuale tradizionale (verifiche e modifiche alla fine delle fasi e non durante)

PD: Progettazione Definitiva;

GA: Gara di appalto;

GO: Gestione Operativa.

2: Costi legati a modifiche progettuali;
4: approccio progettuale collaborativo IPD⁸¹

Figura 49. Una elaborazione della curva di MacLeamy, aggiornata con le fasi processuali previste dal nuovo Codice dei Contratti (D.Lgs. 50/2016).

Sulla base di questo quindi, considerando come il processo decisionale dell'uomo verso scelte complesse (come la progettazione architettonica integrata) risponde prevalentemente a logiche di “try and error”, (Simon, Simon, 1962), non solo è necessario spostare la risoluzione del problema alle fasi progettuali, ma di implementare le stesse con tecniche di simulazione al

⁸¹ *Integrated Project Delivery*. Questa metodologia prevede il coinvolgimento del raggruppamento progettuale dell'intera opera (architetti, strutturisti, impiantisti, consulenti per la gestione del processo, coordinatore della sicurezza, arredatore, illuminotecnico, anti-incendio etc.) nelle fasi progettuali preliminari (Barry, 2014).

fine di verificare l'opportunità delle soluzioni in maniera iterativa e, perciò, più aderente a quello che potrà essere l'effettivo scenario di cantiere.

Uno degli aspetti che rende difficoltoso gestire un processo edilizio è la bassa prevedibilità dell'impatto che le scelte progettuali possono apportare su quanto effettivamente viene realizzato, per questo è necessario – oltre favorire un approccio IPD come visto nell'esempio precedente della curva di MacLeamy – verificare l'effettivo raggiungimento degli standard qualitativi imposti ad ogni fase progettuale.

Sulla base della letteratura in materia, si rilevano tre fattori-chiave che determinano un aumento della difficoltà nella gestione della qualità di un progetto (Chen, Luo, 2014):

- 1) La difficoltà nell'interpretazione delle norme di accettazione dei materiali, che hanno una complessità proporzionale a quella dello sviluppo dell'informazione tecnica nel mondo dell'edilizia;
- 2) La difficoltà nell'identificare la responsabilità dello svolgimento di un compito, vista l'intricata rete di imprese appaltatrici ed esecutrici che popolano il cantiere edile. In Italia questa difficoltà è ancora maggiore rispetto ad altri mercati, visto che la dimensione delle imprese è così piccola che, anche in cantieri di medio-bassa complessità, sono presenti più imprese con le stesse mansioni;
- 3) I controlli qualitativi sono più focalizzati sul prodotto finito invece che sul processo di ottenimento dello stesso e della catena di fornitura-posa in cantiere.

Il persistere di questi elementi critici quindi, fa denotare come sia possibile, nel mondo dell'edilizia, accumulare una notevole quantità di sprechi di risorse e materiali lungo la catena produttiva che, oltre al danno immediato, comportano un danno latente in termini di interventi di manutenzione straordinaria da realizzare a breve termine dalla chiusura di un cantiere (*fig. 50*).



Figura 50. Aggiunta di corpi illuminanti dopo la chiusura delle lavorazioni, a seguito della verifica dell'insufficienza dei Lux presenti. (Roma, 2016).

Grazie alla progressiva introduzione dell'informatica all'interno del cantiere edile, sono state testate tecnologie basate sullo scambio digitale delle informazioni per migliorare la comunicatività all'interno del cantiere e gestire meglio l'aspetto della verifica della qualità dei sotto-processi edilizi (William, 1986).

Il limite di queste esperienze però è stata la cesura che si è andata a creare tra la dimensione digitale/informativa e la realtà operativa di cantiere: per questo, si è resa necessaria l'introduzione delle dimensioni temporali (4D) e analitico/economiche (5D) del BIM, al fine di poter rendere i report di cantiere delle occasioni di aggiornamento attivo del modello, garantendo a tutti gli attori del processo di essere costantemente aggiornati sull'andamento delle lavorazioni e, di conseguenza, verificare la bontà delle loro scelte.

Difatti, mentre il BIM sta avendo un progressivo successo nel campo della progettazione, dove la platea professionale risulta essere molto entusiasta delle possibilità date da questa metodologia soprattutto nel campo della modellazione tridimensionale, della verifica delle interferenze geometriche e negli aspetti analitici (materiali, caratteristiche termo-energetiche, strutturali etc.) mentre, allo stato attuale, ancora non si vede un uso estensivo delle dimensioni del 4D del 5D, 6D e del 7D, ovvero delle dimensioni della gestione dei tempi, dei costi, della sostenibilità e del rischio, verso gli ulteriori affinamenti "...nD".

Nonostante questo, si può affermare con evidenza di moltissimi casi studio, sviluppati soprattutto in aree anglofone e asiatiche, che l'introduzione del BIM nei processi edilizi ha comportato un innalzamento della qualità dei progetti (Bynum, 2013), nei seguenti termini:

- Aumento dell'efficacia della comunicazione dei contenuti degli elaborati grafici e delle relazioni connesse;
- Riduzione degli errori dovuti ad uno scarso coordinamento interdisciplinare;
- Grazie alla potenza di calcolo degli elaboratori, le simulazioni condotte possono essere più rapide e accurate, permettendo la produzione di elementi tecnici con geometrie ottimizzate rispetto al materiale e alla forma strettamente necessaria per assolvere allo scopo; Produzione di documenti progettuali da un modello olistico, con riduzione delle inconsistenze e delle incoerenze tra elaborati visto il controllo reciproco sul modello unitario (Carrara, 2014);
- Riduzione dei costi di manutenzione grazie alla capacità di poter gestire i ricambi e le cadenze di revisione dei componenti dal modello dell'edificio, che deve essere noto ai responsabili delle attività di *Facility Management* sin dalle prime fasi progettuali (Wang et al, 2013), in modo da poter collaborare attivamente alle scelte progettuali in un'ottica di ottimizzazione in vista dell'uso del bene.

3.2. Le dimensioni del BIM: la gestione del tempo (4D), dei costi (5D) e le frontiere del *nD*

Passando dagli aspetti informativo/geometrici ad una scala di approfondimento legata prettamente agli aspetti esecutivo/gestionali del cantiere, è necessario sondare altre dimensioni della progettazione che non siano 1D (l'idea), 2D (rappresentazione tridimensionale) o 3D – BIM (rappresentazione tridimensionale arricchita da proprietà e parametri degli oggetti), risulta necessario allargare il campo alle altre “dimensioni”, che possono essere il 4D (tempi) il 5D (costi) il 6D (sostenibilità) 7D (analisi del rischio) e diverse altre dimensioni ...*nD* che, a tutt'oggi, sono in fase di definizione.

Nello specifico della progettazione finalizzata alla realizzazione costruttiva dell'opera, ricopre particolare attenzione l'analisi dell'entità dei conflitti spazio/temporali (Akinci et al., 2002). Questo è un approccio basilare

poiché, alla base del compito dei progettisti e, nello specifico, del coordinatore, vi è la necessità di legare le informazioni geometrico/analitiche di un edificio da realizzare con l'analisi delle interferenze che è possibile riscontrare durante le fasi di realizzazione. Uno degli approcci utilizzati per la risoluzione di questa tipologia di conflitto è l'utilizzo di sistemi digitali basati su regole legate alla progressione temporale della costruzione dell'edificio che però, allo stato attuale, risultano in gran parte slegati dall'ulteriore patrimonio informativo indispensabile per il governo dei processi di realizzazione, quali le *propedeuticità*, la valutazione delle condizioni di *prossimità* tra attività o, semplicemente, la possibilità di aggiornamento reciproco e continuo del modello federato, in un'ottica collaborativa (*tab. 07*).

Un esempio di come queste verifiche possano essere molto utili ad ottimizzare anche le fasi di progettazione di un edificio si può riscontrare in Benjaoran et. al (2010) che, per arginare la ricorrenza degli infortuni dovuti alla caduta dall'alto analizza le cause fino a risalire, attraverso la verifica della dimensione del 4D, all'origine *progettuale* del rischio.

Difatti, in questi esperimenti si dimostra come i componenti da installare, le modalità di montaggio, le caratteristiche dell'area di lavoro e le sequenze operative siano strettamente dipendenti da scelte di carattere progettuale più che organizzativo.

Dal punto di vista dell'applicativo, una volta modellate le informazioni progettuali con i dati relativi alle sequenze realizzative, il motore di inferenza logica basato su regole imposta le misure di prevenzione e protezione adatte, prendendo a riferimento la normativa vigente: il modello 4D perciò, non fa altro che visualizzare gli esiti di questo algoritmo, applicandoli alle squadre lavorative coinvolte nel periodo lungo il quale occupano l'area di cantiere in analisi, secondo gli elementi, le geometrie e le regole imposte dal progettista.

Il limite riscontrato in questa sperimentazione è che l'algoritmo in questione è troppo articolato, e non riesce sempre ad interfacciarsi con i database esistenti e, informaticamente parlando, potrebbe incorrere nel paradosso dello "*spaghetti coding*"⁸².

⁸² Ovvero una sequenza di operazioni intricata e ridondante che, per via della sua ripetitività (per esempio di metodi quali GO TO...GO TO etc.), potrebbe disorientare l'operatore o dare risultati disarticolati o non coerenti tra loro.

Per rendere quindi utile questo prototipo, è necessario che lungo le visualizzazioni 4D vi sia la verifica e il controllo di un esperto, affidando dunque le scelte fondamentali all'euristica soggettiva dell'attore-specialista nel settore.

Alla luce delle carenze di questi metodi fondamentalmente algoritmici/sequenziali, risulta quindi necessario introdurre aspetti previsionali su base statistica, sui quali stanno convergendo le ultime ricerche nel settore (Isaac et Thas, 2016; Novembri et al., 2017).

Inoltre, nella realtà di cantiere, sono stati condotti – con successo – esperimenti per verificare l'efficacia del *Safety Analysis of Building in Construction - SABIC*: il supporto dato da questo sistema non è di poco conto, dato che va a governare diversi aspetti peculiari della costruzione dell'architettura, ovvero la possibilità di analizzare dinamicamente le diverse fasi di cantiere, verificando la congruenza delle procedure operative sia con la disponibilità e sicurezza del luogo di lavoro, sia coerentemente con le caratteristiche dei materiali impiegati: ad esempio, il sistema è capace di verificare automaticamente le caratteristiche di sollecitazione dei componenti edilizi durante le fasi di lavoro, e combinare tutti gli esiti di queste simulazioni con previsioni probabilistiche basate sulla teoria delle “*Bayes Dynamic Linear Model – DLM*” (Mori et Ellingwood, 1993). Difatti, unendo i metodi probabilistici alle possibilità grafiche date dalla dimensione del 4D, è possibile constatare come sia possibile aumentare la capacità degli attori di comprendere nel dettaglio operativo spazio/temporale le attività da svolgere e i rischi connessi.

Gli svantaggi sono gli stessi della progettazione architettonica condotta con metodi digitali, ovvero la propensione a standardizzare le procedure a scapito della *qualità* (intesa come rispondenza della soluzione alla problematica riscontrata), ovvero a non indicare al progettista soluzioni “originali” ma restando nel novero delle possibilità date dalla consultazione del “catalogo” interno (simile alle “librerie” CAD/BIM) oltre al grande limite, soprattutto nel contesto italiano, di non avere sempre un interlocutore (clienti, imprese, gestori di patrimonio etc.) con dotazioni informatiche adeguate per lavorare sullo stesso modello informativo.

Comunque, per quanto possano essere raffinate le metodologie impiegate per la gestione del rischio, resta di fatto che “il limite di queste ricerche volte all'automazione dei processi decisionali è che gli algoritmi dati da codici molto sviluppati sono fondamentalmente chiusi, e non possono avere la dinamicità di

compiere decisioni complesse che necessitano il coinvolgimento della creatività e della conoscenza umana” (Zhou et al., 2012).

Strumento	Modellazione Informativa BIM	Modellazione delle attrezzature di cantiere	Simulazione delle fasi costruttive
AutoDesk Revit	SI	SI	NO
Nem. AllPlan	SI	SI	NO
A.Desk Navisworks (sim)	NO	NO	NO
Vico software	NO	NO	SI
Syncro	NO	NO	SI
Unity 3D	NO	NO	SI

Sintesi degli esperimenti condotti su alcuni dei principali applicativi diffusi sul mercato. Il risultato è la non disponibilità, ad oggi, di uno strumento che permetta di aggiungere alle regole e proprietà degli oggetti edilizi considerazioni circa la costruibilità, la ptaropedeuticità di posa e la necessità dell’uso degli apprestamenti necessari alla costruzione dell’architettura. Queste valutazioni perciò, restano tutt’ora in capo all’esperto in materia, spesso interpellato in fasi diverse rispetto al momento di concezione dell’opera, con le successive diseconomie del caso.

3.3. Strumenti digitali per il controllo della qualità del processo

delle condizioni operative, è necessario collegare i modelli *olistici* basati sulle metodologie BIM a quelli che sono tutti gli aspetti tecnici, economici e gestionali di aspetti che, in molte circostanze, sono verificabili solo attraverso ispezioni in cantiere. Perciò, la metodologia proposta in (*fig. 51*) indica come si possa ottimizzare un processo di controllo-qualità nello specifico contesto del settore delle costruzioni.

⁸³ “Esigenza o aspettativa che può essere espressa, generalmente implicita o cogente” (UNI ISO 9000-2005 3.1.2).

⁸⁴ Art. 2224 del Cod. Civile.

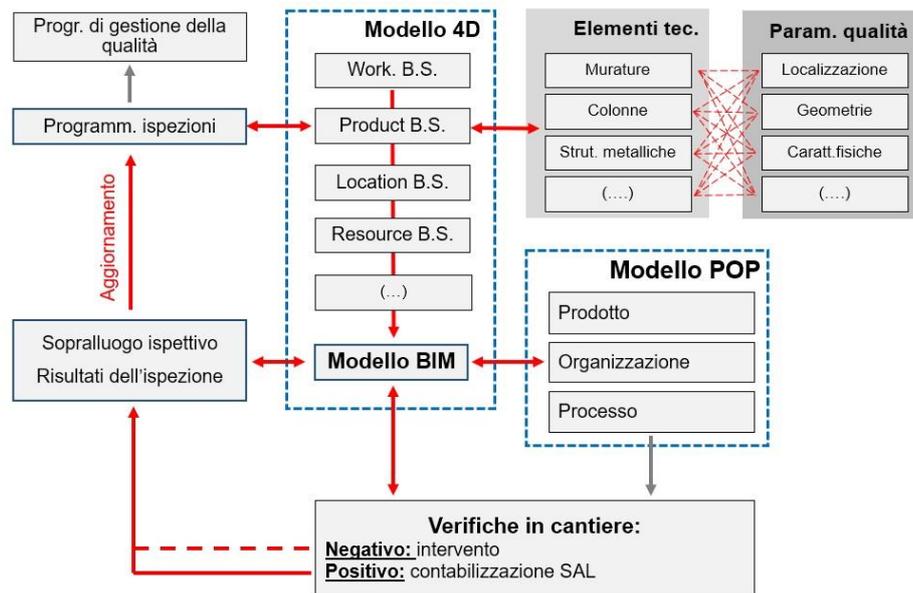


Figura 51. Schema di verifica della qualità con supporto BIM.
Rielaborazione dell'autore da Chen et Luo (2014)

Gli elementi tecnici quali murature, impianti etc. vengono verificati attraverso il soddisfacimento delle soglie di accettabilità definite in fase meta-progettuale, ovvero il primo momento in cui le stesse vengono inserite nel modello informativo.

Contestualmente, si possono applicare metodologie ormai consolidate quali il modello *Production, Organization, Process* – POP, capace di aggiungere alle caratteristiche geometrico-quantitative del modello BIM dei passaggi ricorsivi di verifica qualitativa all'interno di ogni singolo dominio (Kam et al. 2004). Questo aspetto comunque non è del tutto inedito nelle attuali potenzialità del BIM in quanto, nel senso largo del termine, verifiche simili possono essere condotte anche nella dimensione attuale del 4D, anche se la stessa si sofferma di più sull'associare all'attività prevista delle tempistiche di esecuzione di oggetti BIM, slegata da verifiche di tipo organizzativo o di verifica sul prodotto approvvigionato.

Un riferimento a questo approccio di verifica qualitativa è indicato in (fig. 52). Nell'esempio mostrato si vede come gli elementi di una ispezione di cantiere possano essere racchiusi e numericamente discretizzati in un diagramma

tridimensionale con assi rappresentativi, appunto, delle verifiche riguardo il Processo, l'Organizzazione e il Prodotto (da cui il metodo prende il nome). Nello specifico:

- Prodotto: il controllo del prodotto si attua in una serie di procedure ispettive "a campione" dei lotti presenti in cantiere. La verifica in questo caso ha come scopo la conferma dell'aderenza del prodotto campionato con le specifiche di capitolato;
- Organizzazione: in questo caso la verifica riguarda il confronto tra le competenze del personale attore del processo, il tipo di attività svolte e le loro modalità di concatenamento all'interno del cronoprogramma generale di cantiere, le modalità di verifica e controllo delle stesse e il livello di formazione del personale coinvolto;
- Processo: la valutazione riguarda l'analisi dei luoghi di lavoro, i processi produttivi intesi nello specifico delle micro-fasi realizzative o progettuali, qualora fossero in corso delle varianti o degli approfondimenti organizzativi.

Nella pratica corrente, la globalità dell'efficienza del processo edilizio va valutata anche nell'ottica del rispetto delle normative sulla sicurezza, visto che è pacifico il fatto che lavorare sicuri è sintomo di conoscenza dei processi, uso congruo delle attrezzature e ottimizzazione delle fasi lavorative secondo procedure di mitigazione del rischio (fig. 53).

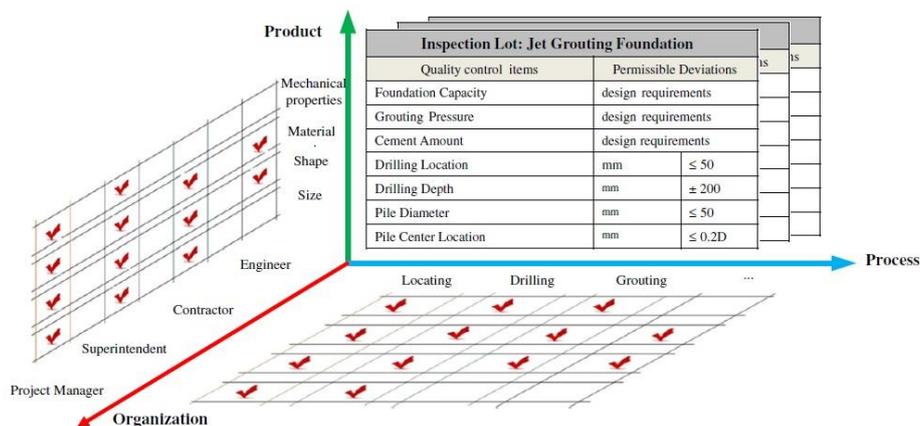


Figura. 52. Il modello POP a supporto delle verifiche in cantiere da Chen et Luo (2014).



Figura 53. Un cantiere durante una ispezione. Le misure correttive adottate in seguito consisteranno nella migliore ubicazione delle attrezzature e il ricollocamento della forza lavoro, in numero eccessivo rispetto alle reali esigenze della micro-fase in corso. Cantiere di realizzazione di un nuovo sito industriale, 2017.

3.4. Il coordinamento della sicurezza

La progettazione della sicurezza, come sottolineato da Szymbersky (1997) deve partire dalle primissime fasi di ideazione dell'intervento, monitorando l'evoluzione dello stesso fino agli aspetti più minuti delle operazioni di cantiere. Nel suo studio difatti possiamo rilevare come l'analisi della mitigazione del rischio sia utile in funzione della fase progettuale nella quale è inserita, con evidenti economie e aumento della sicurezza in proporzione con l'anticipo con il quale certi eventi rischiosi possano essere previsti.

Sebbene in Europa, dopo l'introduzione dell'apparato legislativo recepito in Italia con il Testo Unico per la Sicurezza (*D.Lgs. 81/08 e smi*) ci sia stato un sensibile decremento degli incidenti in cantiere (Aires et al., 2010), a tutt'oggi queste misure sono viste perlopiù come un mero adempimento formale piuttosto che facenti parte di un processo progettuale integrato. Purtroppo, tra i

professionisti ancora è diffusa la convinzione che “la sicurezza non sia un tema centrale della progettazione, quindi è buona cosa delegarne il governo a esperti esterni capaci di svolgere tutti gli adempimenti” (Brace et al., 2009).

È indubitabile inoltre che il coinvolgimento di esperti della produzione edilizia aiuti, nelle prime fasi progettuali, a comprendere meglio le criticità del progetto, le incoerenze riscontrate nell’integrazione tra le parti e le migliorie che, ottimizzando perciò le risorse in gioco, è possibile apportare. Come succede per la conoscenza progettuale, anche per quanto concerne gli aspetti della produzione edilizia ogni raggruppamento progettuale ha degli standard, delle buone prassi e dei “cataloghi” che si sviluppano con il tempo e con le esperienze maturate nel settore.

Perciò, sia dal punto di vista della ricerca applicata che dagli Enti che predispongono la formazione degli operatori del settore, è importante stabilire un chiaro livello conoscitivo sulla consapevolezza dei rischi di cantiere, sull’apprendimento collaborativo e la condivisione della conoscenza: fondamentale perché, benché il coordinatore della sicurezza non è detto sia dotato di una base di conoscenza che possa toccare altri campi, è invece evidente che deve conoscere, nel dettaglio, tutti i processi produttivi legati ai singoli specialismi (Oloke et al, 2007).

L’esperienza cumulata nello studio di queste problematiche progettuali/produttive rende indispensabile la stratificazione di una conoscenza condivisa sia all’interno del gruppo di lavoro specifico del progetto di riferimento, sia per le future applicazioni ove sia possibile trovare punti di contatto con le esperienze maturate. A tal fine sono disponibili diverse risorse informative, come i quaderni dell’INAIL⁸⁵ e il materiale di supporto per i professionisti del settore, messo a disposizione dagli organismi paritetici territoriali⁸⁶. L’importanza dell’interazione tra aspetti progettuali e misure organizzative delle lavorazioni è essenziale: è indispensabile quindi ricercare, come vera e propria azione progettuale, componenti edilizie opportune all’approvvigionamento, montaggio e manutenzione in sicurezza, da coordinare con le figure presenti sia nelle fasi preliminari di progettazione, che nelle successive fasi esecutive e cantieristiche, al fine di avere un quadro quanto più

⁸⁵ <https://www.inail.it/cs/internet/comunicazione/pubblicazioni/catalogo-generale/quaderni_tecnici_per_i_cantieri_temporanei_o_mobili.html>.

⁸⁶ <<http://www.cefmectp.it/pubblicazioni/quaderni-della-sicurezza-edilizia>>.

chiaro possibile circa le tempistiche e le modalità di intervento (Atkinson et Westall, 2010). Si tenga sempre presente che ottimizzare le attività in chiave di mitigazione del rischio non significa annullare la probabilità che questo possa verificarsi, ma deve essere considerato come una parte importante di quel complesso sistema di attività che compongono, in una visione olistica, i processi di realizzazione dell'architettura; per questo, gli strumenti, già citati nel testo sono pensati per poter intervenire lungo diversi momenti della sua progressione, ovvero dal concepimento dell'opera fino alle fasi di gestione e dismissione del bene. Da tempo ormai, sia le imprese con esperienza nel settore che gli Enti preposti al controllo e alla vigilanza sulla sicurezza dei cantieri propongono una serie dettagliata di contributi distribuiti sulla rete che aiutano gli operatori ad orientarsi in una materia comunque complessa e per la quale non esiste, nel concreto, una casistica di riferimento che possa coprire davvero nel dettaglio le varie situazioni lavorative dato che, come risaputo, *il cantiere (come il progetto) è un prototipo di se stesso*.

Nelle esperienze estere è stato formalizzato un sistema di monitoraggio della gestione del cantiere (Cheung et al.,2004) capace di segnalare in tempo reale le aree che possono essere soggette ad un incremento del rischio per i lavoratori. Impiegando gli evidenti vantaggi che la rete internet dà nella diffusione dei dati, il sistema è capace di avere un rapido accesso remoto ai database, quindi la rapida raccolta di dati e di informazioni desunte da precedenti esperienze sotto forma di immagini, documenti e testi.

Il risultato perciò consiste nel dare all'utente la possibilità di monitorare le prestazioni di processo lungo un dato periodo attraverso dei punteggi attribuiti a seconda di parametri di produttività/rischio, impostati dall'utente all'inizio del processo. Pertanto, i dati-chiave possono essere trasformati in diagrammi, curve, tabelle e database. L'efficacia del sistema, chiaramente, è alta nella misura in cui lo stesso viene applicato già nelle fasi preliminari di progetto, per via della più "ricca" Base di Conoscenza sulla quale possono essere condotte queste elaborazioni. Questi strumenti, di natura chiaramente digitale, sono pensati per poter intervenire lungo diversi momenti della vita del progetto, inteso dal concepimento dell'opera fino alle fasi di gestione e dismissione del bene. Per quanto riguarda le risorse disponibili, attualmente si possono dividere in due macro-categorie, caratterizzate da diversi momenti nei quali si possono configurare attività lavorative:

- *Livello progettuale*: la basi di dati disponibili in rete sono comunemente utilizzati per catalogare/colmare le competenze tra diversi attori. La finalità è fornire una ampia base di conoscenza agli operatori del settore, attraverso documenti ipertestuali, video e incontri inter-aziendali. Questa conoscenza viene trasferita agli altri attori del processo mediante elaborazione di documenti (quali il Piano di Sicurezza in fase di Progettazione), elaborati grafici e, secondo un approccio cognitivo/gestionale, attraverso periodiche riunioni progettuali;
- *Livello esecutivo*: gli elementi e componenti vengono analizzati sia in quanto fonte di rischio o pericolo, che attraverso gli aspetti legati alle modalità logistiche di gestione della loro catena di fornitura ovvero l'approvvigionamento, la gestione del magazzino di cantiere, e le – critiche – fasi di movimentazione dalle aree di stoccaggio a quelle di montaggio;
- *Livello gestionale/manutentivo*: a questo livello di indagine si approfondiscono aspetti quali la *sostenibilità e la durabilità* delle soluzioni adottate, la possibilità di programmare manutenzioni ottimizzate sugli stessi, in termini di abbassamento dell'impatto ingenerato dalle attività legate alle manutenzioni ordinarie/straordinarie a cui sottoporre il bene edilizio lungo tutto il suo ciclo di vita.

Un altro approccio per la prevenzione e protezione dei lavoratori è quello di agire sulla segnaletica e sull'aumento della percezione del rischio, vista l'importanza che la cognizione, sia dal punto di vista progettuale che dal punto di vista costruttivo, è uno degli elementi di successo più importanti nelle dinamiche di cantiere.

Nello specifico, in accostamento ad altre tecnologie del settore della sensoristica e della modellazione informativa dell'edificio e dei rischi, è sempre più diffuso l'uso di sistemi che possano avvertire l'operatore della possibilità di entrare in un contesto rischioso. Allo stato di fatto, la metodologia più affidabile si basa sul rilevamento degli ostacoli, intercettabili attraverso tecniche di scansione geometrica condotte con l'uso del laser: questi, una volta definiti gli ingombri del luogo di lavoro e interfacciata la realtà geometrica con quanto descritto nei modelli informativi dell'edificio, avvertono l'operatore sulla presenza di rischi.

Questo tipo di approccio tende ad abbassare la possibilità che si possa verificare un evento dannoso, potendo dotare i classici strumenti di protezione (caschi, scarpe, guanti ovvero tutti gli elementi indicati dalla normativa come (*Dispositivi di Protezione Individuale* – DPI), di strumenti capaci di poter avvertire in tempo reale l’operatore di eventuali rischi con cui si dovesse entrare in contatto, come verificato con successo da Vähä et. al (2013).

D’altro canto, si può facilmente obiettare che per rendere completamente dinamico questo sistema, dunque non dipendente dalle centraline di ricezione RFID come previsto da questo specifico studio, le attuali tecnologie GPS e – soprattutto in Italia – la scarsa diffusione e potenza della rete internet (cd. “banda larga”), hanno ancora un tasso di accuratezza troppo basso per il cantiere edile, che necessita di azioni di monitoraggio molto approfondite dato che, in luoghi di lavoro come questi, anche dieci centimetri possono fare la differenza (si prenda, ad esempio, il rischio di caduta dall’alto).

Considerando sempre il basso tasso di scolarizzazione degli operatori dell’edilizia, associato ad una “tradizionale” ritrosia alla digitalizzazione dei processi - in antitesi alle altre dimensioni del mondo produttivo - allo stato della pratica corrente si può iniziare a considerare un uso davvero estensivo del BIM in cantiere, grazie alle potenzialità e attuale diffusione dei dispositivi portatili (*Smartphone, Tablet, Convertible-laptops, etc.*) che, ormai da anni, sono alla portata di una ampissima platea di operatori. Una sistematizzazione della interconnessione di questi dispositivi, unita alla possibilità di interazione con l’utente/lavoratore da parte del gruppo di supervisione del processo edilizio, contribuisce sia a diminuire i rischi presenti grazie alla continua segnalazione di avvisi e di prescrizioni, oltre a descrivere costantemente l’avanzamento delle lavorazioni, la loro effettiva ubicazione e, perciò, fornire i presupposti per una accurata descrizione delle attività in corso al fine di poterne controllare dunque ottimizzare le eventuali sovrapposizioni tra squadre lavorative (*fig. 54*). Nell’ambito del mondo delle costruzioni però, lo sviluppo di strumenti digitali si è rivolto con maggiore interesse verso la realtà della progettazione e della gestione dell’informazione tecnica piuttosto che nel campo della gestione dei processi realizzativi.

Troppo spesso la gestione della sicurezza in cantiere viene percepita da un’ampia platea di operatori più come adempimento burocratico che come momento condiviso di progettualità, e gli strumenti digitali di supporto al professionista sono in larga parte dei documenti pre-strutturati secondo i

contenuti minimi della normativa, editabili con le specifiche amministrative del progetto; per quanto riguarda invece le fasi lavorative, vengono impiegati strumenti di semplice impiego e visualizzazione come i diagrammi Gantt e le planimetrie bi-dimensionali.

In ambito internazionale (si prenda ad esempio il gruppo di ricerca del GeorgiaTech guidato dal Prof. Gambatese) da anni sono in corso ricerche volte a sviluppare un vero e proprio manuale di validità generale, dove la verifica della qualità di gestione dei processi (come avviene, ad esempio, con il PMBOK del *Project Management Institute*) venga estesa all'ottimizzazione dei processi realizzativi dell'architettura, anche in chiave della realizzazione sicura delle fasi lavorative. In questi documenti quindi sono riportate casistiche notevoli, esempi pratici di risoluzione della criticità e buone prassi relative alle problematiche frequenti di cantiere e alla distinzione delle probabili catene incidentali.

A riguardo sono già attivi, da anni, portali internet con la catalogazione delle casistiche degli infortuni, da mettere a disposizione dei tecnici come Base di Conoscenza di carattere deduttivo: in America il NIOSH⁸⁷ ha attivato il programma *Fatality Assessment Control ad Evaluation - FACE*, che illustra oltre 500 casi di incidenti in cantiere, così come viene messo a disposizione dall'INAIL, l'ente omologo italiano. Ad ogni modo, il fatto che la valutazione operativa e gestionale sviluppata in ambito progettuale incida sui risultati, in termini di qualità, del processo edilizio è evidente, come indicato da Zhou et. al (2012) dove si dimostra che problematiche di tipo prettamente progettuale incidono per il 42% sugli incidenti in cantiere. In uno degli studi più approfonditi sul tema, Atkinson et Westall, (2010), hanno catalogato un numero di precauzioni che il progettista può prendere, considerando misure prevalentemente organizzative come la richiesta all'appaltatore delle modalità costruttive che si intende intraprendere; ricercare componenti edilizie di misure opportune all'approvvigionamento e montaggio in sicurezza; coordinare con le figure presenti in cantiere, compresi i sub-appaltatori e i lavoratori autonomi, le tempistiche e le modalità di intervento.

Tutte queste informazioni, in una visione *avanzata* della gestione ottimizzata dei processi realizzativi dell'architettura, andrebbero subito governate come

⁸⁷ *National Institute for Occupational Safety and Health - NIOSH*, agenzia federale statunitense che svolge ricerche e servizi nell'ambito della sicurezza sui luoghi di lavoro, fa riferimento diretto al Dipartimento per la Salute e i servizi all'uomo.

proprietà degli oggetti edilizi, e da qui processate in funzione di ottimizzazione del comportamento reciproco tra elementi (es., ottimizzare le propedeuticità di fornitura o dedicare apposite aree di stoccaggio in cantiere).

È lampante quindi che, oltre all'obbligo normativo, la progettazione della sicurezza in cantiere richiede la collaborazione del progettista, del proprietario delle opere e degli altri attori per poter essere quanto più chiara, comprensibile e condivisibile tra le parti. Resta comunque la certezza, come fa notare Gambatese (2008) che, per quanto si possa approfondire l'aspetto progettuale della sicurezza, questo non garantisce l'assenza di rischi nelle operazioni cantieristiche, ma bensì è solo un elemento del sistema complesso, mirato alla riduzione della probabilità che possa avvenire un danno (secondo la nota equazione che vede il *Rischio* "R" come il risultato della moltiplicazione della *Probabilità* "p" che si possa verificare un *Danno* "D" [$R = p \times D$] quale può essere un sistema previsionale composto da differenti livelli di verifica degli elementi e situazioni di rischio, da effettuare prima della consegna definitiva degli elaborati progettuali e, ovviamente, dell'ingresso in cantiere degli operatori (Novembri et al., 2015).

Per quanto riguarda il coordinamento delle aree di cantiere, i già citati problemi relativi alle scarse prestazioni espresse dall'attuale eco-sistema informatico limitano le potenzialità delle tecnologie di localizzazione: difatti, le tecniche di modellazione informativa delle caratteristiche geografiche del sito si pongono in una posizione ancillare rispetto alla tematica dell'ottimizzazione dei processi realizzativi dell'architettura, offrendo una macro-prospettiva sugli aspetti ambientali legati all'aspetto costruttivo dell'opera. Con queste tecniche si vanno quindi ad approfondire e legare gli aspetti legati al territorio, alle caratteristiche idro-geologiche (e, talvolta, economiche) del sito proprio perché, ribadendo l'importanza della collaborazione tra attori fin dagli albori del progetto, risulta non trascurabile coinvolgere anche esperti nel settore ambientale, visto che la scelta di un sito piuttosto che un altro determina poi le modalità organizzative del cantiere che, in misura abbastanza rilevante, vanno a determinare l'effettiva quantità di risorse da dispiegare in termini di forza lavoro, materiali, attrezzature, la raggiungibilità logistica e, non ultima, la manutenibilità futura dell'edificio (Paradis et Tran, 2013). Perciò, l'acquisizione di queste informazioni facilita la affidabilità della successiva modellazione 4D dell'edificio e il rispetto delle sequenze ottimizzate delle fasi di cantiere. Inoltre, per aumentare l'affidabilità del dato e la qualità del supporto

che si può dare ad un raggruppamento progettuale, diversi ricercatori si sono cimentati nel collegare queste con Sistemi di Supporto Decisionali (*Decision Support System – DSS*) soprattutto per quanto concerne le operazioni di scavo (tradizionalmente molto pericolose) dove l'aspetto territoriale e l'aspetto realizzativo-gestionale sono più strettamente connessi (Cheng et al, 2002).



Figura 54. Confronto tra il momento della progettazione virtuale della sicurezza e la sua applicazione in campo reale. In questo caso la dimensione 4D del BIM viene impiegata per la verifica delle sovrapposizioni operative (Fioravanti et. al, 2018).

3.5. Conclusioni

Allo stato dell'arte, l'implementazione delle metodologie di gestione del rischio con strumenti e tecniche ICT sta avendo delle ricadute importanti, che inducono a riflettere su *come* l'industria delle costruzioni possa adeguarsi rispetto a tali evoluzioni. Dunque, prendendo come riferimento di tale fenomeno l'approccio BIM, si può constatare come agli attori del processo possano ottenere vantaggi sin dal breve termine, sia dal punto di vista meramente relativo agli aspetti legati alla gestione della rappresentazione geometrica sia, ovviamente, nelle facilitazioni che tale metodologia apporta nell'organizzazione dei contenuti informativi. Visti i risultati ottenuti nei diversi scenari applicativi e, in un certo senso, nell'*entusiasmo* che accompagna la diffusione di queste metodologie di rappresentazione, possiamo concordare con Succar (2009) nel definire il BIM “un dirompente cambio di rotta nelle procedure e nelle tecnologie nell'architettura, nell'ingegneria e nell'industria delle costruzioni”.

Nonostante però questo evidente passo in avanti conseguito, tali strumenti presentano ad oggi delle questioni aperte che incidono negativamente sulla qualità dei contenuti informativi elaborati. Inoltre, non si trascuri che all'adozione di una tecnologia innovativa corrispondono fisiologicamente delle lunghe fasi di apprendimento e reciproco adattamento tra operatori, strumenti e condizioni del contesto, implicando conseguentemente il riadeguamento di tutta la conoscenza e gli apparati pregressi (*fig. 55*).

In questi casi, il contributo degli utenti risulta essere centrale negli studi sull'innovazione (von Hippel, 1976) pertanto, oltre al fondamentale contributo dato dalla formazione e dalla consapevolezza dell'utenza, restano comunque da analizzare e considerare alcuni importanti limiti, quali:

- *Il costo dell'evoluzione ICT*: pur considerando l'evidente risparmio operativo dato dall'impiego di tali metodologie, i costi per riconvertire la dotazione informatica di uno studio tecnico non sono immediatamente accessibili a gran parte della platea di professionisti. Difatti, considerando le statistiche Inarcassa (2017) i redditi del mondo delle professioni tecniche si posizionano nelle parti più basse della classifica delle professioni, ponendo serie riflessioni circa la necessità di favorire processi aggregativi oltre alla riqualificazione globale delle competenze dei tecnici, al fine di poter aumentare la competitività e offrire i propri servizi anche in contesti, come l'estero, dove la congiuntura economica è più favorevole;
- *Frammentazione della domanda*: soprattutto nella specificità dell'industria delle costruzioni italiana, la presenza di un numero elevato di professionisti ed imprese, a fronte della minima dimensione di queste organizzazioni, rende difficilmente applicabile la concretizzazione di metodologie che, come queste, hanno tra i requisiti la presenza di un buon numero di persone, gerarchicamente coinvolte nel progetto (Rahaman et al, 2016). Per le imprese invece, il tema è ancora più spinoso in quanto le stesse, nella grande maggioranza dei casi inquadrabili nelle PMI, non presentano le caratteristiche necessarie per il passaggio verso questa dimensione sia per un discorso economico legato ai costi di avviamento, sia per la penuria di personale adeguatamente formato per poter gestire non solo la collaborazione tra attori, ma governare i processi di cambiamento all'interno dell'impresa stessa dove, come ribadito più volte, si ha tradizionalmente una forte ritrosia verso l'innovazione.

- I limiti dell'interoperabilità: tale problema è di carattere sistemico, e riguarda la compatibilità e reale efficienza dello scambio di dati, visto che “i sistemi ICT sono pesantemente condizionati dall'assenza di un reale standard di riferimento” (Wang et al, 2014). Per questo è necessario sistematizzare la standardizzazione nelle procedure di modellazione (cfr. PAS 1192-2 e BS 1192) al fine di produrre modelli da condividere sia mediante protocolli di interscambio quali IFC, sia nei termini dell'uso consapevole di piattaforme collaborative dedicate al mondo delle costruzioni (Xue et Fan, 2012)

Come sinteticamente analizzato, il problema non è strettamente limitato alla dimensione tecnologico/infrastrutturale ma ha, effettivamente, delle ricadute nel campo dell'*organizzazione* del settore che, evidentemente, necessita di profondi cambiamenti dal punto di vista organizzativo dell'intera filiera, che deve essere messa in condizione di cogliere queste concrete opportunità.

Dal punto di vista dei costi, oltre alle fisiologiche economie di scala (d'altronde già in essere) è necessario che gli operatori nel settore inizino ad attivare delle concrete sinergie sfruttando, ad esempio, le possibilità date dal progressivo potenziamento della rete internet⁸⁸ e le importanti potenze di calcolo disponibili in *cloud*⁸⁹: queste difatti permettono, con una spesa iniziale limitata, di poter disporre di potenti macchine in remoto secondo la formula *on-demand*, con maggiori possibilità quindi di ammortizzare la spesa.

Per quanto riguarda l'aspetto della formazione delle risorse, un importante contributo può venire dalla diffusione della realtà digitale: queste tecniche infatti, oltre a ridurre le tempistiche di lavorazione delle informazioni (grazie all'ancor minore ricorso alla carta e ai dispositivi “classici”) possono incidere positivamente nella formazione dell'operatore, grazie alla possibilità di supportare lo stesso nelle attività da svolgere mediante un supporto di tipo visivo sensoriale più immediato e comprensibile, permettendo l'acquisizione più veloce e completa delle competenze e, contemporaneamente, risparmiando tempo e energia, a favore della qualità del processo (Xiangiu et al, 2012).

⁸⁸ Non si trascuri il danno economico del *Digital Divide* in Italia dove, ancora oggi, molte zone – anche industrializzate – del Paese non possono fruire di coperture di rete adeguate alle potenze richieste dagli strumenti ICT.

⁸⁹ Si prenda ad esempio Microsoft Azure®: questo servizio on-line permette di noleggiare potenza di calcolo in remoto secondo delle tariffe orarie, permettendo al progettista di poter avere, all'occorrenza, a disposizione strumenti performanti limitando la spesa al solo effettivo utilizzo, secondo quindi la filosofia del JIT ivi analizzata in par. 2.3.

Nel caso dei cantieri edili, tra i vari vantaggi quindi vi è la possibilità di confrontare, sul campo oppure in remoto, lo stato di fatto reale con lo stato di progetto virtuale visto che, fin dalla notte dei tempi il progetto⁹⁰ è, appunto, la proiezione virtuale delle idee, sintetizzate secondo gli apporti reciproci dei progettisti (Rossini et al, 2016).

L'obiettivo quindi, non può che essere la trasformazione, in parallelo all'indispensabile *ecosistema*, della una platea di attori in utenti digitalmente maturi, dotati di adeguata formazione gestionale, quindi predisposta all'uso di sistemi basati sul *Knowledge management* (Carrara et al, 2001) e all'approccio collaborativo, da condurre anche a distanza grazie alle possibilità della rete. Date queste premesse, il settore sarebbe pronto per l'uso estensivo di tecniche di intelligenza artificiale applicate per il supporto strategico al progettista, aprendo la strada alla diffusione degli approcci simulativi necessari a ottimizzare le scelte progettuali a monte dell'inizio delle opere, concretizzando i vantaggi descritti nella Curva di McLeamy (*fig. 49*).

⁹⁰ dal latino *prōiectūs* (*pro* avanti, e *jacere* gettare) indica concretamente l'azione di prefigurare la concretizzazione delle idee (intenzioni) che sono alla base del p. stesso e, in maniera ricorsiva, governeranno le scelte dei vari attori. Progettare dunque, è la proiezione di una idea nel mondo concreto. In termini più "concreti", è lo sforzo corale temporaneo che un raggruppamento di attori svolge per soddisfare, attraverso le prestazioni espresse dal sistema di elementi e componenti progettato, il quadro esigenziale definito a monte.



Figura 55. Ad ogni innovazione tecnologica corrisponde un addestramento preliminare all'uso e l'adeguamento del contesto fino a tangere le abitudini degli utenti. Si prenda ad esempio l'introduzione dell'illuminazione elettrica nella quotidianità e di come abbia cambiato i millenari ritmi delle abitudini umane. L'energia elettrica arriva nelle campagne russe, foto originale di A. Shaikhet.
cfr. <<http://www.clickblog.it/galleria/arkady-shaikhet-un-maestro-della-fotografia-russa-degli-anni-venti-e-trenta>>

4. Superamento dei limiti attuali mediante implementazione di metodologie e tecnologie ICT avanzate

Fin dai primordi dell'introduzione del concetto stesso di intelligenza artificiale, vi è stata una progressiva introduzione di queste tecniche nel mondo delle costruzioni, con l'evidente obiettivo di "costruire una macchina che si comporti in un modo che sarebbe considerato intelligente nel caso di un essere umano" (Cordeschi, 2002).

Difatti, gran parte di questi studi ricadono nell'ambito della *scienza cognitiva* ovvero la disciplina scientifica che analizza e sperimenta le prestazioni e i confini delle potenzialità di analisi, catalogazione ed elaborazione delle informazioni, conoscenza ed esperienza della mente umana per poi trasportarle, fino a farle interagire, con evoluti sistemi digitali. Questi, perciò, devono presentare caratteristiche affini a quelle della mente umana, caratterizzata da un alto livello di *adattamento* al contesto e a tutte quelle forme *alte* di intelligenza quali "il ragionamento euristico e la pianificazione, la gestione e il reperimento dell'informazione, le capacità logico-linguistiche e la rappresentazione della conoscenza" (Cordeschi, D'Avanzo, 2009).

Partendo da queste premesse, dagli scorsi anni ottanta le applicazioni di queste tecniche nel modo dell'edilizia sono state rivolte verso la definizione di *sistemi esperti*. Questi sono realizzati mediante la definizione di un dominio di applicazione, la formalizzazione del problema da risolvere dunque la modellazione di un certo numero di regole, dalla cui applicazione se ne ottiene la relativa soluzione.

Tali metodologie, evidentemente premature e non dotate ancora di una infrastruttura *hardware* adeguata all'elaborazione della imponente mole di dati necessaria a definire quanto sopra elencato, sono perciò rimaste ad uno stato prototipale avanzato, non trovando riscontro nel settore delle costruzioni.

⁹¹ La genesi del concetto di Intelligenza Artificiale, inteso come la riproduzione del comportamento intelligente tipico dell'essere umano, segue principalmente i passi evolutivi dello sviluppo dell'informatica. A partire infatti dal "test di Turing" e da parallele esperienze condotte da altri studiosi,

Successivamente, grazie anche all'aumento esponenziale delle potenzialità degli strumenti informatici a disposizione si sono potute sviluppare altre tipologie di strumenti di progettazione assistita dall'elaboratore.

Tra queste, particolare rilievo assume il sistema KAAD (*Knowledge-based Assistant for Architectural Design*) che, sostanzialmente, è una interfaccia di alto livello tra l'utente ed i sistemi software tradizionali, in grado di *interagire* con il progettista in maniera semplice, utilizzando un linguaggio naturale; *controllare la consistenza e la coerenza* dei dati introdotti nei riguardi di un dato insieme di esigenze; *gestire* per conto del progettista gli strumenti digitali tradizionalmente richieste nelle varie fasi del processo di progettazione (Novembri, 1989).

Allo stato attuale, per superare i limiti imposti dallo stato dell'arte riguardo l'interoperabilità dei modelli e la costruzione e condivisione di una base di conoscenza utile al progetto e al suo processo, la risposta in termini ICT è nella messa a punto di piattaforme collaborative, anche dotate di una più immediata interfaccia uomo macchina (mediante "realtà digitali" quali *Virtual, Augmented and Mixed Reality*) capaci di aumentare l'accuratezza del dato, la comprensione reciproca tra attori e, non ultimo, la possibilità di costruire modelli simulativi capace di prefigurare l'esito delle scelte condivise nella fase di evoluzione del progetto. Tale traguardo perciò è ottenibile mediante l'applicazione di modelli simulativi i quali, mediante l'uso di queste tecniche di intelligenza artificiale, possano descrivere in anticipo gli esiti di una scelta, rappresentarne i passaggi logici e le condizioni di base e, quindi, procedere con l'individuazione della procedura opportuna per determinare la strada migliore rispetto alle esigenze espresse.

In questa ricerca pertanto, il tema è l'integrazione di questi sistemi con tecnologie già in uso quali il BIM attraverso l'approccio *Agent-based*, impiegato nella verifica della fattibilità nei tempi e nei costi della realizzazione di un'opera, nel rispetto della concatenazione delle operazioni e dell'ottimizzazione della loro realizzazione in seno alla dinamicità del contesto di cantiere.

⁹² si considerino le cd. "*Legge di Moore*", valide fino agli anni '10 del duemila. Alle porte degli anni '20, si è nell'attesa di un cambio di paradigma (Kuhn, 1962) quale potrebbe essere quello dell'introduzione dei computer quantistici che, oltre alla condizione di aperto/chiuso, considerino anche la sovrapposizione degli effetti. *Cfr.* < <http://www.mit.edu/~aram/advice/quantum.html>>.

4.1. Teoria e stato dell'arte della modellazione degli agenti in architettura

Nelle tecniche di intelligenza artificiale, uno dei principali temi di approfondimento è stato il concetto di *agente autonomo*, ovvero di quella entità capace di effettuare operazioni a seconda delle condizioni al contorno esterno e rispetto lo stato interno degli attributi, della topologia, delle regole comportamentali e degli obiettivi prefissati (Simeone e Fioravanti, 2012).

Ad ogni modo, oltre alla dimensione pioneristica di questo campo di indagine, si consideri che per la intrinseca natura concettuale del tema risulta difficile individuare una definizione unanimemente condivisa di *agente*, nonostante le fonti siano abbastanza concordi su caratteristiche fondamentali, unanimemente condivise come la condizione di autonomia (Wooldridge et al, 1994). Per autonomia infatti, si intende la capacità di un agente di poter agire, dopo aver percepito uno stimolo, applicando regole comportamentali volte al raggiungimento di un obiettivo senza il diretto controllo umano (*fig. 56*). Questa autonomia si può declinare secondo diversi livelli di complessità. Un agente difatti può avere comportamenti molto semplici, puramente *reattivi* rispetto all'applicazione di regole condizionali del tipo *if-then*, verso realtà più complesse come l'architettura *Belief-Desire-Intent*- BDI. In questo caso: il *Belief* è generalmente definito come l'informazione che un agente ha rispetto al suo ambiente, che può essere più o meno accurata, a seconda della tipologia e precisione del sensore impiegato; il *Desire* invece descrive uno o più obiettivi che un agente vorrebbe vedere conclusi, con la definizione di classifiche di priorità; l'*Intent* è il modo in cui l'agente tenta intervenire sullo stato di fatto, sia interno al suo sistema che nell'ambiente nel quale è immerso.

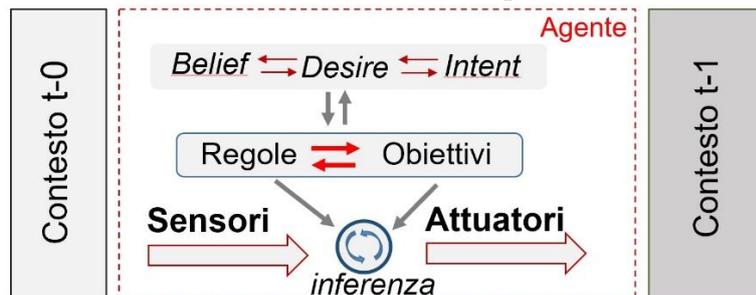


Figura 56. Sintesi del ciclo base di Percezione-Inferenza-Azione dell'Agente. Il livello di intelligenza aumenta all'integrazione di ulteriori tecniche di AI come Reti Neurali per l'apprendimento etc.

A questa costituzione logica che, seppur basilare, già ci consente di modellare fenomeni anche abbastanza complessi in diverse discipline (Chung. 2005) si possono integrare ulteriori tecniche di intelligenza artificiale, abbinate a inferenze di tipo statistico, capaci di elevare il livello di astrazione.

Quindi, a fronte dell'aumento della potenza di calcolo necessaria e della qualità della struttura della conoscenza iniziale, si arriva ad accrescere l'accuratezza e affidabilità del modello, in relazione al confronto con il reale, considerando quanto elevata può essere la variabilità dei numerosi fattori presi in esame che variano al variare del tempo, secondo il concetto informatico di *randomizzazione*⁹³. A riprova di questo, basti considerare il caso della stessa azione condotta in due condizioni apparentemente identiche: il risultato presenterà sicuramente delle differenze, più o meno apprezzabili.

L'agente inoltre, ha una natura prettamente relazionale, tesa a creare sistemi di agenti (*Multi-Agent system- MAS*) che meglio si adattano a modellare la realtà complessa e, perciò, le relative interconnessioni dinamiche.

L'azione dell'Agente può essere prevalentemente *reattiva* o *proattiva*. Nel caso di agente reattivo, questo è focalizzato nella reazione verso uno stimolo in maniera univoca, secondo il *set* di regole di cui dispone per rispondere a quella tipologia di stimolo, senza perciò verificare le ripercussioni che una data scelta può innescare in uno specifico contesto in un dato momento. Nel caso dell'agente *proattivo* invece, sempre a seguito di una perturbazione rispetto allo stato precedente, questo reagisce prendendo iniziative basate sulla valutazione di diverse alternative, soppesate basandosi sulla *probabilità* delle ricadute – semplici o complesse – che tali scelte avrebbero sull'equilibrio dell'intero sistema e anche sull'agente stesso che, sicuramente, andrebbero a configurare un nuovo stato di fatto.

Pertanto, potremmo definire un comportamento *proattivo* la capacità di un agente di prendere iniziative generando autonomamente obiettivi sulla base di uno *scenario prefigurato* e, sulla base di questo, agire per ottenere prestazioni soddisfacenti.

⁹³ Sarebbe interessante riprendere il dibattito, di memoria dantesca, dello studio dell'eziologia della casualità, da Democrito al concetto informatico di Random.

Tabella n. 08: caratteristiche notevoli dell'Agente. (cfr. Ingham, 1997)

Definizione di alcuni attributi fondamentali degli Agenti
- autonomo : un agente è capace di prendere iniziative e controllare le proprie azioni;
- orientato al raggiungimento dell'obiettivo : capacità di interpretare richieste, anche complesse, definendo le modalità di soddisfacimento dei requisiti richiesti;
- collaborativo : l'agente non esegue meramente una sequenza di indicazioni impartite ma attiva la sua rete di relazioni, con altri agenti o sensori ad esempio, al fine di poter definire al meglio il quadro esigenziale attraverso approfondimenti puntuali oppure aumentare in quantità e qualità il numero di informazioni necessarie a definire il quadro operativo;
- flessibile : una delle condizioni che differenzia l'agente dallo script è il non ripetere in maniera fissa una sequenza definita di operazioni bensì adattare dinamicamente l'algoritmo operativo con le "condizioni al contorno" e il suo stato e, da queste, eventualmente scegliere quale script invocare;
- ad iniziazione autonoma : l'agente non è un programma standard, quindi che inizia le operazioni solo dopo essere stato direttamente invocato dall'utente ma, essendo dotato di sensori, è capace di percepire una variazione di stato, dunque processare gli input per procedere con una propria azione specifica rispetto all'obiettivo da raggiungere;
- continuo : l'agente, sebbene possa intervenire in maniera puntuale o discreta lungo un processo, non è un attore "occasionale" ma bensì un ente attivo lungo tutta la vita del contesto in cui è immerso;
- comunicativo : l'agente agisce preferibilmente in gruppo, secondo la logica dello sciame (Jun, 2012) e necessita di avere perciò delle capacità comunicative molto sviluppate, sia per intavolare delle complesse comunicazioni con gli altri agenti, sia per comunicare efficientemente con gli altri dispositivi quali i sensori etc.;
- adattivo : come gran parte degli enti che popolano le "Realtà digitali", anche gli agenti devono agire in maniera resiliente, ovvero essere capaci di adattarsi dinamicamente al contesto, reagendo in maniera soddisfacente ai vari stimoli;
- multi-dispositivo : l'agente deve essere capace, oltre all'adattamento al contesto, anche ad adeguarsi ai dispositivi sui quali è installato, in maniera tale da non perdere mai il contatto con le diverse tipologie di sensori/attuatori oppure con gli altri raggruppamenti di agenti (agenzie);
- orientato all'apprendimento : caratteristica essenziale nel caso del comportamento <i>proattivo</i> , definisce la capacità dell'agente di sedimentare

l'esperienza maturata sulla base dei processi precedenti oppure dall'interfaccia con basi di dati di altre agenzie o agenti.

Hybrid-Agents: si consideri comunque che la suddivisione tra agenti reattivi e agenti proattivi non è da intendersi così netta. Difatti, nella categorizzazione tra agenti (o agenzie) si considera l'atteggiamento prevalente (*emergent behaviour*) considerando anche che l'agente stesso non è, tecnicamente, una entità unica bensì risulta essere costituito da diversi livelli di sub-agenti, realizzando così – anche per entità semplici – strutture complesse (Minsky, 1985) come accade in natura con le strutture atomiche. Pertanto, *l'Hybrid-Agents* va inteso come la condizione individuata tra i due estremi della formalizzazione della *Subsumption Architecture* (Brooks, 1986) che descrive la progressione dal livello-base, puramente reattivo, verso il più alto grado di astrazione, caratterizzato dal comportamento proattivo.

4.2. Il modello *Agent-BIM* per la previsione dei tempi e dei costi delle attività di cantiere

Nella ricerca è stato focalizzato il modello ad Agenti per la previsione dei tempi e dei costi delle attività di cantiere pensate come *fase progettuale*, non a valle del progetto definitivo o esecutivo. Per essere efficace nella pratica corrente quindi, tale modello si è interfacciato con gli enti che definiscono compiutamente un progetto dal punto di vista informativo (BIM-Objects). Gli enti fondamentali con i quali sono stati modellati, sotto forma di Agenti, le attività di cantiere sono: la WBS di progetto, quindi le attività da svolgere e i relativi elementi edilizi; le CREW, intese come le squadre lavorative e le attrezzature in uso e la LBS, intesa come la zonizzazione delle aree di cantiere.

Ognuno di questi macro-elementi, è così definito (*fig. 57*):

- Work Breackdown Structure (WBS): la scomposizione gerarchizzata degli elementi tecnici dell'edificio viene associata - all'interno del modello - all'*attività*, ovvero le lavorazioni che consentono di produrre gli elementi e ai componenti previsti nel progetto. In questo modo, nell'ambiente simulativo sono collegati i quantitativi di materiale, le caratteristiche geometriche degli elementi, le proprietà fisico-meccaniche e, allo stesso tempo, la relativa categoria che ne caratterizza il tipo di lavorazione;
- CREW: identifica il modello della squadra-tipo di lavoratori. Le prestazioni di queste squadre sono definite mediante indicatori stabiliti secondo valori oggettivi quali gli anni di esperienza del singolo componente del *crew*⁹⁴, le attrezzature che, a seconda della qualifica, sono in loro uso e i brevetti e gli attestati conseguiti (es. per l'uso di piattaforme aeree etc.). Per ogni mansione viene perciò definito un numero minimo di operatori, da comparare al numero massimo di persone impiegabili, in relazione alla superficie da occupare e alla sua regolarità geometrica;

⁹⁴ Per le risorse umane viene impiegato un fattore correttivo in base all'avanzamento dell'età e alla pesantezza della mansione. Un decoratore infatti, più anni avrà di esperienza, più sarà rappresentato nel sistema con un punteggio alto; per il lavoratore edile generico al contrario, all'avanzare dell'età corrisponderà un fattore correttivo per comparare il limite fisico degli anni alle competenze acquisite con il tempo.

- Location-Based Structure - LBS: indica la suddivisione delle aree di cantiere secondo omogeneità geometrica e quantità prevedibile di lavorazioni da svolgere al loro interno. In questo ambito poi, verranno anche illustrati i risultati della simulazione nei termini dell'area effettivamente occupata dal CREW che, in modo ottimizzato, utilizzerà per svolgere le attività previste dalla WBS.

A livello operativo, le sperimentazioni sono state condotte in ambiente Autodesk™, avvalendosi perciò delle licenze “educational” in uso alle macchine di laboratorio: i modelli BIM degli edifici sono stati realizzati con Revit® 2016, le verifiche di *clash detection* e la definizione della WBS con Autodesk Navisworks Simulate, 2016 Edition®. La raccolta dei dati e la gestione dei risultati invece sono state condotte con fogli di calcolo Microsoft™. Il prototipo invece è stato sviluppato in ambiente “Visual Studio”⁹⁵, dove è stato definito inizialmente un Windows Presentation Foundation – WPF in linguaggio C#.

L'obiettivo iniziale era impiegare un modello di parallelizzazione più aggiornato, con l'obiettivo di migliorare le prestazioni in termini di risorse di calcolo impegnate nei processi di concorrenza (*concurrency*) tra agenti. Difatti, vista la numerosità e il peso informatico dei dati in lavorazione, questo aspetto è molto importante al fine di non sovraccaricare la CPU: pertanto, il metodo <CancellationToken> serve ad omettere visivamente lo sviluppo degli altri sottoprocessi (*thread*), poiché questi comunque eseguono calcoli in *background*. Difatti, per immaginare il carico di lavoro supportato dalla CPU, si consideri che ad ogni richiesta da parte dell'operatore, o modifica in ambiente BIM, il sistema ad Agenti inizia ad interagire, verificando concorrenzialmente tutte le reciproche condizioni di soddisfazione delle differenti regole fino al raggiungimento degli obiettivi – se possibile – di ogni agente (Castelfranchi et Falcone, 1998).

⁹⁵ Si ringrazia Cristiano Insola per il supporto informatico.

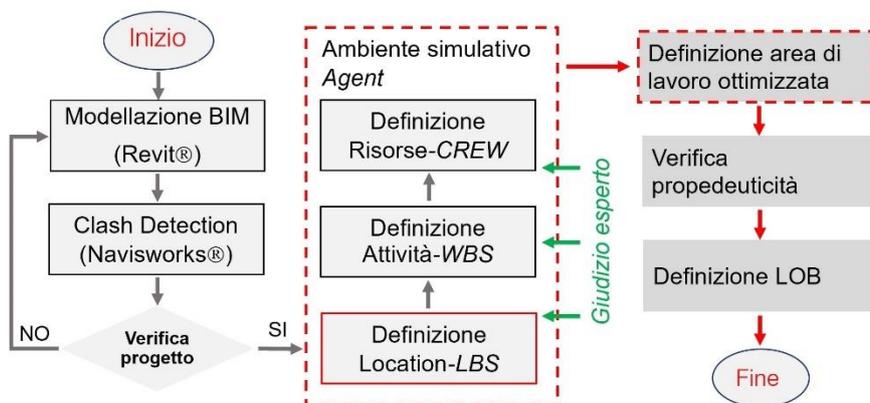


Figura 57. Sintesi del workflow operativo. L'ambiente simulativo è comunque sensibile al giudizio esperto, ovvero al contributo che l'operatore umano apporta alla base di dati del sistema Multi Agente.

Difatti, ad ogni simulazione gli agenti ingaggiano una *corsa competitiva* dove ognuno ha obiettivi diversi, a seconda della categoria di appartenenza: gli agenti dell'insieme LBS tenderanno a restringere gli spazi assegnati, quelli CREW a impiegare il minor numero di personale per meno tempo possibile, mentre WBS tenderà a verificare che tutte le opere previste siano compiute, secondo la nota regola del "100%" (Fioravanti et al, 2015).

Il risultato finale quindi, ovvero la condizione di soddisfazione di tutti gli agenti, sarà la definizione dell'area *necessaria* ad un dato numero di attori per il lasso di tempo utile a completare, ottimizzando tutte le risorse in gioco, le attività da svolgere nell'area oggetto della simulazione. Poiché questi processi avvengono in modalità parallela, la conclusione di un *metodo* inibisce l'attivazione di ogni altra simulazione fino al successivo ciclo iterativo. Ogni ulteriore esecuzione del programma infatti, produrrebbe risultati simili ma differenti, poiché ad ogni momento "t" corrisponde un cambio di stato dato, come minimo, dalla condizione *random* di esecuzione dei metodi tra gli agenti, come accade in natura nei processi fecondativi spermatozoo – ovulo; proprio come accade in natura difatti, tale condizione è imposta per non favorire categorie di agenti in luogo di altre, nel preminente interesse di condurre calcoli che portino soltanto ad avere una maggiore ottimizzazione di risorse favorita dall'atteggiamento *concorrenziale* degli agenti. Questi infatti punteranno a raggiungere il massimo tasso di soddisfazione degli obiettivi in rapporto alla soddisfazione globale degli obiettivi di progetto, attraverso la parallelizzazione dei risultati ottenuti.

4.2.1. Sommario: strutturazione del processo generale di gestione degli agenti espresso in pseudo-codice

[When] a Revit Transaction is concluded (and Revit is idling):

1. Load all the installed agents as 'Agents';
2. Start a parallel execution of every Agent;
3. Wait for Agents action (the program enters in a suspended state).

[When] An Agent starts its thread:

1. Agent asks the agent manager for a collection of observed Revit items (a 'Collection');
2. The Agents manager reacts to the request (reacting itself) and checks if the required items are changed.
 - a. *If not*:
 - i. the agent manager kills the invoker agent;
 - ii. Agent manager stores a "current valid configuration" status message for the invoker agent;
 - b. *If yes*, send the changed items to the agent and waits for a status message.
3. The agents check if the Collection has changed and if the new items configuration matches its own valid range.
4. *If* the new configuration is valid, then the agent sends a 'current valid configuration' status response to the agent manager, then it kills itself.
5. *If* the new configuration is invalid:
 - a. The agents start to execute one or more internal algorithms to have a valid configuration.
 - b. *When* a new configuration is founded, the new collection of Revit items are sent to the agents manager
 - c. The agent manager recalls all other agents
 - i. *If* they were performing some tasks, they are interrupted to pay attention to the new deal

- ii. The agent manager sends the new Collection proposed as valid by the agent in point 5 to all the agents
- iii. Points 3 to 5 are performed until a universal 'current valid configuration' status is sent by all agents
- d. *When* all agents have sent a "current valid configuration" the agents manager start a Revit transaction
- e. The changed collection of Revit items is prompted to the Revit users
- f. The agent manager suspends itself and waits for a Revit document change.

****fine****

4.2.2. Definizione del luogo di lavoro “room”

Il punto di partenza della modellazione è la definizione del luogo di lavoro <room> di partenza. Questa scelta infatti determina sia il quantitativo di attività desunte dalla WBS da svolgere, sia di conseguenza le caratteristiche del CREW. L’interfaccia grafica, collegata all’ambiente BIM attraverso la finestra <Canvas>, ovvero l’editor grafico che unisce l’applicativo al modello informativo dell’edificio, dà la possibilità di definire i primi due vertici; il metodo <draw> poi, provvede a chiudere la geometria e richiamare tutti i dati ricadenti nell’ambito qui definito. Dunque, <SetAsLast()> evidenzia il bordo della <room>, mentre <SetAsBase()> aggiorna i contenuti da richiamare nella base di dati. Per definire quindi la regolarità dell’area <Area>, necessaria, oltre che per una eleganza geometrica, anche per meglio gestire l’apprestamento e l’uso delle attrezzature necessarie al CREW, viene imposto un fattore di forma <FormFactor>, tendente ad omogeneizzare le geometrie dell’area e le relative proprietà.

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Windows;
using System.Windows.Controls;
using System.Windows.Media;
using System.Windows.Shapes;

//definizione della <room>//

namespace TestRoomAgents
{
    public class Room
    {
        public List<Vertex> Vertices { get; private set; }
        public Polyline Drawing { get; private set; }
        public Room(Vertex topleft, Vertex bottomright)
        {
            Vertex topRight = new Vertex(bottomright.X, topleft.Y);
            Vertex bottomLeft = new Vertex(topleft.X, bottomright.Y);
            Vertices = new List<Vertex>() { topleft, topRight, bottomright, bottomLeft
        }
    }

    public void Draw(Canvas canvas, TextBlock info)
    {
        Random rnd = new Random();
        Drawing = new Polyline();
        Drawing.Stroke = System.Windows.Media.Brushes.SlateGray;
        Drawing.StrokeThickness = 2;
        Drawing.Fill = new SolidColorBrush(Color.FromArgb(100, (byte)rnd.Next(0,
250), (byte)rnd.Next(0, 250), (byte)rnd.Next(0, 250)));
        Drawing.FillRule = FillRule.EvenOdd;
        PointCollection plc = new PointCollection();
        Drawing.Points = plc;
        canvas.Children.Add(Drawing);
        int i = 1;
        foreach (var vertex in Vertices)
        {
            TextBlock letterVisual = new TextBlock();
```

```

        letterVisual.Text = i.ToString();
        letterVisual.FontSize = 14;
        canvas.Children.Add(letterVisual);
        letterVisual.Foreground = new SolidColorBrush(Colors.Black);
        letterVisual.SetValue(Canvas.TopProperty, vertex.Y + 2);
        letterVisual.SetValue(Canvas.LeftProperty, vertex.X + 2);
        plc.Add(new Point(vertex.X, vertex.Y));
        i++;
    }
    plc.Add(new Point(Vertexes[0].X, Vertexes[1].Y));
    Drawing.MouseEnter += (s, e) =>
    {
        Drawing.StrokeThickness = 6;
        info.Text = "Area: " + this.Area.ToString("n") + "; Forma: " +
this.FormFactor.ToString("n");
    };
    Drawing.MouseLeave += (s, e) =>
    {
        Drawing.StrokeThickness = 2;
        info.Text = "Passa sopra una forma per informazioni...";
    };
}

public double Area
{
    Get

//definizione coordinate//
    {
        var l1 = Math.Abs(Vertexes[1].X) - Math.Abs(Vertexes[0].X);
        var l2 = Math.Abs(Vertexes[2].Y) - Math.Abs(Vertexes[1].Y);
        var val = l1*l2;
        return val;
    }
}

public double FormFactor

//definizione fattore di forma//
    {
        get
        {
            double latoOriz = Vertexes[0].DistanceTo(Vertexes[1]);
            double latoVert = Vertexes[0].DistanceTo(Vertexes[3]);
            if (latoOriz > latoVert) return latoOriz / latoVert;
            else return latoVert / latoOriz;
        }
    }

    public void SetAsLast()
    {
        if (Drawing != null)
        {
            Drawing.Stroke = new SolidColorBrush(Colors.Red);
            Drawing.StrokeThickness = 3;
        }
    }

    public void SetAsBase()
    {
        Drawing.Stroke = new SolidColorBrush(Colors.Gray);
        Drawing.StrokeThickness = 2;
    }
}
}

```

Per la conclusione della prima fase della programmazione, quindi richiamare le informazioni necessarie alla definizione della WBS, si entra nel dettaglio della caratterizzazione della <room> definita in precedenza. Quindi:

```

<Window x:Class="TestRoomAgents.MainWindow"
    xmlns="http://schemas.microsoft.com/winfx/2006/xaml/presentation"
    xmlns:x="http://schemas.microsoft.com/winfx/2006/xaml"
    xmlns:d="http://schemas.microsoft.com/expression/blend/2008"
    xmlns:mc="http://schemas.openxmlformats.org/markup-compatibility/2006"
    xmlns:local="clr-namespace:TestRoomAgents"
    mc:Ignorable="d"
    Title="MainWindow" Height="500" Width="800">
    <Grid>

//individuazione all'interno della griglia strutturale di progetto//

        <Grid.ColumnDefinitions>
            <ColumnDefinition Width="6*" />
            <ColumnDefinition Width="4*" />
        </Grid.ColumnDefinitions>
        <Canvas Grid.Column="0" x:Name="canvas" MouseDown="canvas_MouseDown"
Background="AntiqueWhite" IsEnabled="True" />
        <Grid Grid.Column="1" Margin="10">
            <Grid.RowDefinitions>
                <RowDefinition Height="Auto" />
                <RowDefinition Height="*" />
                <RowDefinition Height="Auto" />
            </Grid.RowDefinitions>
            <TextBlock Grid.Row="0" TextWrapping="Wrap">

// Per iniziare, fare click con il mouse nel settore a sinistra della canvas per confermare
il primo vertice della <room>//

// Disegnare quindi il vertice opposto facendo click. Quando saranno stati confermati
entrambi i vertici, gli agenti verranno avviati//

                </TextBlock>
                <ScrollViewer Grid.Row="1" Margin="0 10 0 0">
                    <StackPanel x:Name="stackpanel"></StackPanel>
                </ScrollViewer>
                <Border Background="WhiteSmoke" Grid.Row="2">
                    <TextBlock x:Name="Info" FontStyle="Italic"> passa sopra una
forma per saperne di più...</TextBlock>
                </Border>
            </Grid>
    </Grid>
</Window>

```

Alla fine di queste funzioni, vengono resi noti all'interno del sistema Multi-Agente le geometrie e la WBS dell'area selezionata. Ogni elemento viene catalogato e identificato riprendendo il codice univoco rappresentativo dell'istanza BIM <Unique ID> assegnato già in fase di modellazione dal database BIM e, da questo, esportato sotto forma di stringa leggibile ed editabile in un foglio di calcolo.

4.2.3 Interazione tra il Sistema Multi-Agente e la “room”

L’obiettivo del sistema Multi-Agente è la definizione di una nuova <room> che, in sostituzione a quella assegnata in origine, indichi il tempo e il personale coinvolto per svolgere le attività previste.

A seconda dello stato di avanzamento di un compito perciò, verrà richiesta dal sistema la funzione <nullable>. La condizione <null> è importantissima per il bilanciamento e l’ottimizzazione del sistema in quanto determina il completamento delle inferenze di uno o più agenti, fissando così un valore da parallelizzare con quelli conseguiti dagli altri; se così non fosse, si assisterebbe ad una rincorsa continua verso un valore che, non avendo vincoli di riferimento quali la determinazione, appunto, di un risultato, potrebbe continuare all’infinito, senza quindi tracciare i bordi della nuova area ottimizzata. Perciò:

```
using System;
using System.Threading;
namespace TestRoomAgents.Agents
{
    class AgentArea : IAgent
    {
        const double MAXAREA = 10000;
        const double MINAREA = 2000;
        public string Name { get; private set; }
        public Func<Room, Room> WorkingFunc { get; private set; }
        public AgentArea()
        {
            Name = "AREA";
            WorkingFunc = (Room startingRoom) =>
            {
                Thread.Sleep(150);
                double area = startingRoom.Area;
                if (area > MINAREA && area < MAXAREA) return null;

                Vertex topleft = startingRoom.Vertexes[0];
                Vertex bottomright = startingRoom.Vertexes[2];
                double factorLato1 = 0.15 *
topleft.DistanceTo(startingRoom.Vertexes[1]);
                double factorLato2 = 0.15 *
topleft.DistanceTo(startingRoom.Vertexes[3]);
                Room returnedRoom;
                if (area > MAXAREA)
                {
                    Vertex newBottomRight = new Vertex(bottomright.X -
factorLato1, bottomright.Y - factorLato2);
                    returnedRoom = new Room(topleft, newBottomRight);
                }
                else
                {
                    Vertex newBottomRight = new Vertex(bottomright.X +
factorLato1, bottomright.Y + factorLato2);
                    returnedRoom = new Room(topleft, newBottomRight);
                }
                return returnedRoom;
            };
        }
        public void AbortRequired()
        {

```

```

    }
}

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading;
using System.Threading.Tasks;

// Inizia la definizione della nuova <room> ottimizzata //

namespace TestRoomAgents.Agents
{
    class FormFactorAgent : IAgent
    {
        const double MAXFACTOR = 1.2;
        const double MINFACTOR = 0.8;
        public string Name { get; private set; }
        public Func<Room, Room> WorkingFunc { get; private set; }
        public FormFactorAgent()
        {
            Name = "FORMFACTOR";
            WorkingFunc = (Room startingRoom) =>
            {
                Thread.Sleep(150);
                Vertex topleft = startingRoom.Verteces[0];
                Vertex bottomright = startingRoom.Verteces[2];
                double latoOriz = topleft.DistanceTo(startingRoom.Verteces[1]);
                double latoVert = topleft.DistanceTo(startingRoom.Verteces[3]);
                double formfactor = latoOriz / latoVert;
                if(formfactor > MINFACTOR && formfactor < MAXFACTOR) { return null; }
                Room returnedRoom;
                if (latoOriz > latoVert)
                {
                    double factorOriz = latoOriz * 0.15;
                    double factorVert = latoVert * 0.15;
                    Vertex newBottomRight = new Vertex(formfactor > MAXFACTOR ? bottomright.X - factorOriz : bottomright.X + factorOriz, bottomright.Y);
                    returnedRoom = new Room(topleft, newBottomRight);
                }
                else
                {
                    double factorOriz = latoOriz * 0.15;
                    double factorVert = latoVert * 0.15;
                    Vertex newBottomRight = new Vertex(bottomright.X, formfactor > 1/MAXFACTOR ? bottomright.Y + factorVert : bottomright.Y - factorVert);
                    returnedRoom = new Room(topleft, newBottomRight);
                }
                return returnedRoom;
            };
        }
    }

    // Viene restituita la nuova <room> ottimizzata, quindi la prossima funzione elimina gli spazi vuoti per poter dunque permettere alle successive funzioni di verifica della propedeuticit  di poter occupare, eventualmente nell'immediato l'area successiva //

    public void AbortRequired()
    {
    }
}

```

Per gestire il processo di parallelizzazione, ovvero il raggiungimento dello stato di equilibrio tra gli obiettivi raggiunti da ogni agente,   stato impiegato il

dataflow della *Task Parallel Library* – TPL. Questo permette l’impiego di `<System.Thread>` che consente l’avvio di diverse funzioni, gestibili con metodologie di programmazione *data-oriented* molto utili in questo passaggio che, in conclusione, serve a definire e catalogare i dati necessari per validare l’intera simulazione.⁹⁶

La `<Scheduler class>` invece, serve a visualizzare eventi pubblici, che possono essere utilizzati dall’interfaccia grafica (*User Interface* – UI) per visualizzare eventuali indicatori notevoli richiesti dall’utente riguardo lo stato degli Agenti.

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Reflection;
using System.Runtime.CompilerServices;
using System.Text;
using System.Threading;
using System.Threading.Tasks;
using System.Threading.Tasks.Dataflow;

namespace TestRoomAgents.Agents
{
    public static class Scheduler
    {
        public static event EventHandler<Room> AgentIstanced;
        public static event EventHandler<ReactEventArgs> AgentReacted;
        public static event EventHandler<IAgent> AgentReactionAborted;
        public static event EventHandler<IAgent> AgentPosted;

        private static CancellationTokenSource ThreadDestroyer { get; set; }
        private static List<IAgent> Agents { get; set; }
        private static Room WorkingRoom { get; set; }
        private static Dictionary<IAgent, TransformBlock<Room, Room>> AgentsDictionary { get;
set; }

        private static Dictionary<IAgent, RectStatus> AgentLastReturnedStatus { get; set; }
        private static volatile IAgent SynchronizedAgent;
    }
}
```

`<SynchronizedAgent>` è una funzione molto interessante poiché registra i valori espressi dai singoli agenti, ponendo le basi per la creazione di una conoscenza specifica riguardante le prestazioni ottenute dall’agente lungo ogni processo.

`<AgentLastReturnedStatus>` invece, registra gli output del singolo agente mentre `<WorkingRoom>` si riferisce alla location oggetto di sincronizzazione.

Per continuare dunque con l’interazione tra Agenti, è necessario inserire una *funzione di inizializzazione* che, essenzialmente, importa a seconda delle necessità relativa al luogo lavoro di partenza `<room>`, ovvero il luogo di lavoro selezionato originariamente, depurato dalle zone escluse in quanto ritenute “sprecate” mediante la funzione `<PublicStaticVoid>`: tale sorta di punto di

⁹⁶ L’intero pacchetto di funzioni è reperibile sulla piattaforma open-source *Nuget*, poiché al momento non è presente nell’ambiente Microsoft® “.NET”.

ripristino permette così agli agenti precedentemente modellati di avere sempre un punto di riferimento stabile per partire con una nuova iterazione:

```
// La funzione public static void permette di lavorare solo sulle aree effettivamente ottimizzate dai primi processi e non di riprendere in considerazione la prima <room>, ovvero il punto di partenza del processo //
```

```
public static void Init(Room room)
{
    WorkingRoom = room;
    Agents = new List<IAgent>();
    AgentLastReturnedStatus = new Dictionary<IAgent, RectStatus>();
    var agentsTypes = from t in Assembly.GetExecutingAssembly().GetTypes()
    where t.GetInterfaces().Contains(typeof(IAgent)) && t.GetConstructor(Type.EmptyTypes) != null select t;
    foreach (var agentType in agentsTypes)
    {
        IAgent agent = Activator.CreateInstance(agentType) as IAgent;
        AgentLastReturnedStatus.Add(agent, RectStatus.Wrong);
        Agents.Add(agent);
        if (AgentIstanced != null) { AgentIstanced(agent, room); }
    }
}
...

```

Non si trascuri il fatto che l'Agente deve inferire in maniera sincronica, necessitando quindi di continue verifiche iterative del risultato per non influenzare negativamente il processo di parallelizzazione con dati incoerenti. In questo esperimento questa funzione è estremamente semplificata per evitare il crash del sistema dovuto al sovraccarico sistematico della CPU:

```
...
[MethodImpl(MethodImplOptions.Synchronized)]
public static void Broadcast(IAgent skipAgent = null)
{
    SynchronizedAgent = null;

    // Il TreadDestroyer è un ulteriore metodo per alleggerire il processo //

    ThreadDestroyer = new CancellationTokenSource();
    AgentsDictionary = new Dictionary<IAgent, TransformBlock<Room, Room>>();
    lock (AgentsDictionary)
    {
        foreach (var agent in Agents)
        {
            if (skipAgent != agent)
            {
                TransformBlock<Room, Room> runningAgent
                = new TransformBlock<Room, Room>(agent.WorkingFunc, new ExecutionDataflowBlockOptions { CancellationToken
                = ThreadDestroyer.Token });
                runningAgent;
                AgentsDictionary.Add(agent,
                if (AgentPosted != null)
                AgentPosted(null, agent);
            }
        }
    }

    // La base dati, alleggerita dei thread non attivi, può ripetere il processo di
    parallelizzazione tra agenti //

    Parallel.ForEach(AgentsDictionary, currentAgent =>
    {

```

```

currentAgent.Value);
                                PostAndReceive(currentAgent.Key,
                                                });
                                }
...

```

I dati vengono perciò verificati da una funzione-chiave: <PostAndReceive>

// la coerenza dei dati e la congruenza dei risultati ottenuti dai processi di parallelizzazione tra task (attività) crew (workers) e room vengono verificati attraverso condizioni if ... else //

```

private static void PostAndReceive(IAgent agent, TransformBlock<Room, Room> worker)
{
    worker.Post(WorkingRoom);
    Task<Room> receiver = worker.ReceiveAsync();
    receiver.ContinueWith((Task<Room> t) =>
    {
        if (SynchronizedAgent == null)
        {
            SynchronizedAgent = agent;
            Room newRoom = t.Result;
            if (newRoom != null)
            {
                WorkingRoom = newRoom;
                AgentLastReturnedStatus[agent] =
RectStatus.Wrong;
            }
            else
            {
                AgentLastReturnedStatus[agent] =
AgentLastReturnedStatus[agent] == RectStatus.Ok ? RectStatus.OkConfirmed : RectStatus.Ok;
            }
            if (AgentReacted != null) AgentReacted(agent, new
ReactEventArgs(WorkingRoom, AgentLastReturnedStatus[agent]));
            if (AgentLastReturnedStatus[agent] !=
RectStatus.OkConfirmed) { PostAndReceive(agent, worker); }
            SynchronizedAgent = null;
        }
        else
        {
            AbortAgents();
        }
    });
}

```

Come possiamo vedere, il processo di sviluppo è relativamente semplice poiché il risultato, in sintesi, è il ritorno di una nuova <room> in luogo di quella definita in sede di suddivisione iniziale in aree omogenee.

L'ulteriore verifica dei risultati è data lanciando metodi *working function* che, come risultato, ritornano il valore <null>. A questo punto, essendo stata definita la nuova area ottimizzata, si passa a verificare le *condizioni di propedeuticità* tra CREW mediante la classe <Scheduler>, come segue:

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Reflection;
using System.Runtime.CompilerServices;
using System.Text;
using System.Threading;
using System.Threading.Tasks;
using System.Threading.Tasks.Dataflow;

namespace TestRoomAgents.Agents
{
    public static class Scheduler
    {
        public static event EventHandler<Room> AgentIstanced;
        public static event EventHandler<ReactEventArgs> AgentReacted;
        public static event EventHandler<IAgent> AgentReactionAborted;
        public static event EventHandler<IAgent> AgentPosted;

        private static CancellationTokenSource ThreadDestroyer { get; set; }
        private static List<IAgent> Agents { get; set; }
        private static Room WorkingRoom { get; set; }
        private static Dictionary<IAgent, TransformBlock<Room, Room>> AgentsDictionary { get;
set; }

        private static Dictionary<IAgent, RectStatus> AgentLastReturnedStatus { get; set; }
        private static volatile IAgent SynchronizedAgent;
        public static void Init(Room room)
        {
            WorkingRoom = room;
            Agents = new List<IAgent>();
            AgentLastReturnedStatus = new Dictionary<IAgent, RectStatus>();
            var agentsTypes = from t in Assembly.GetExecutingAssembly().GetTypes()
where t.GetInterfaces().Contains(typeof(IAgent)) && t.GetConstructor(Type.EmptyTypes) != null select t;
            foreach (var agentType in agentsTypes)
            {
                IAgent agent = Activator.CreateInstance(agentType) as IAgent;
                AgentLastReturnedStatus.Add(agent, RectStatus.Wrong);
                Agents.Add(agent);
                if (AgentIstanced != null) { AgentIstanced(agent, room); }
            }
        }

        [MethodImpl(MethodImplOptions.Synchronized)]
        public static void Broadcast(IAgent skipAgent = null)
        {
            SynchronizedAgent = null;
            ThreadDestroyer = new CancellationTokenSource();
            AgentsDictionary = new Dictionary<IAgent, TransformBlock<Room, Room>>();
            lock (AgentsDictionary)
            {
                foreach (var agent in Agents)
                {
                    if (skipAgent != agent)
                    {
                        TransformBlock<Room, Room> runningAgent
= new TransformBlock<Room, Room>(agent.WorkingFunc, new ExecutionDataflowBlockOptions { CancellationToken
= ThreadDestroyer.Token });
                        AgentsDictionary.Add(agent,
runningAgent);
                        if (AgentPosted != null)
AgentPosted(null, agent);
                    }
                }
                Parallel.ForEach(AgentsDictionary, currentAgent =>
                {
                    PostAndReceive(currentAgent.Key,
currentAgent.Value);
                });
            }
        }
    }
}

```

```

private static void AbortAgents()
{
    foreach (var Agent in AgentsDictionary)
    {
        IAgent subAgent = Agent.Key;
        if (SynchronizedAgent != null && subAgent != SynchronizedAgent)
        {
            subAgent.AbortRequired();
            if (AgentReactionAborted != null)
                AgentReactionAborted(new object(), subAgent);
            PostAndReceive(subAgent, Agent.Value);
            if (AgentPosted != null) AgentPosted(new object(),
                subAgent);
        }
    }
}

private static void PostAndReceive(IAgent agent, TransformBlock<Room, Room> worker)
{
    worker.Post(WorkingRoom);
    Task<Room> receiver = worker.ReceiveAsync();
    receiver.ContinueWith((Task<Room> t) =>
    {
        if (SynchronizedAgent == null)
        {
            SynchronizedAgent = agent;
            Room newRoom = t.Result;
            if (newRoom != null)
            {
                WorkingRoom = newRoom;
                AgentLastReturnedStatus[agent] =
                    RectStatus.Wrong;
            }
            else
            {
                AgentLastReturnedStatus[agent] =
                    RectStatus.Ok ? RectStatus.OkConfirmed : RectStatus.Ok;
            }
            if (AgentReacted != null) AgentReacted(agent, new
                ReactEventArgs(WorkingRoom, AgentLastReturnedStatus[agent]));
            if (AgentLastReturnedStatus[agent] !=
                RectStatus.OkConfirmed) { PostAndReceive(agent, worker); }
            SynchronizedAgent = null;
        }
        else
        {
            AbortAgents();
        }
    });
}

public class ReactEventArgs
{
    public virtual object Result { get; private set; }
    public RectStatus Status { get; private set; }
    public ReactEventArgs(object Result, RectStatus Status)
    {
        this.Result = Result;
        this.Status = Status;
    }
}

public enum RectStatus
{
    Wrong,
    Ok,
    OkConfirmed
}
}

```

Il risultato grafico ottenuto è da completare con il metodo <CoreBehind> capace di collegare le informazioni grafiche con il sistema Multi-Agente che, nei fatti, è colui che andrà a definire le nuove aree.

In questo passaggio quindi avverrà l'iscrizione di calcoli statistici, più o meno complessi, che andranno a determinare i valori costitutivi dello <Scheduler>.

Sulla base di questi risultati quindi, verranno stabilite le sequenze logiche e cronologiche tra attività e definito, mediante trasposizione grafica dei dati, il grafico LOB cronoprogrammatico. La sintesi della sequenza è:

```
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Windows;
using System.Windows.Controls;
using System.Windows.Input;
using System.Windows.Media;
using System.Windows.Shapes;
using TestRoomAgents.Agents;

namespace TestRoomAgents
{
    public partial class MainWindow : Window
    {
        Room _lastRoom;
        Room lastRoom
        {
            get { return _lastRoom; }
            set
            {
                if(_lastRoom != null) _lastRoom.SetAsBase();
                _lastRoom = value;
                _lastRoom.SetAsLast();
            }
        }
        List<Vertex> drawnVertexes;
        public MainWindow()
        {
            InitializeComponent();
            drawnVertexes = new List<Vertex>();
            //notifica a video dell'ingresso di un nuovo agente //
            Scheduler.AgentIstanced += (object agent, Room startingRoom) =>
            {
                stackpanel.Dispatcher.Invoke(() => {
                    TextBlock t = new TextBlock();
                    t.Text = string.Format("{0} è stato avviato.",
                    L'area iniziale è: {1:n} - Il fattore di forma è: {2:n}", (agent as IAgent).Name, startingRoom.Area,
                    startingRoom.FormFactor);
                    t.Foreground = new SolidColorBrush(Colors.Gray);
                    stackpanel.Children.Add(t);
                });
            };
            Scheduler.AgentPosted += (object sender, IAgent agent) =>
            {
                stackpanel.Dispatcher.Invoke(() => {
                    TextBlock t = new TextBlock();
                    t.Text = string.Format("{0} è stato avviato",
                    (agent as IAgent).Name);
                    t.Foreground = new SolidColorBrush(Colors.Orange);
                    stackpanel.Children.Add(t);
                });
            };
        }
    }
}
```



```

        Ellipse vertexVisual = new Ellipse();
        vertexVisual.Width = 20;
        vertexVisual.Height = 20;
        vertexVisual.Stroke = new SolidColorBrush(Colors.DarkGray);
        vertexVisual.StrokeThickness = 2;
        vertexVisual.SetValue(Canvas.TopProperty, -vertexVisual.Height / 2 +
newVertex.Y);
        vertexVisual.SetValue(Canvas.LeftProperty, vertexVisual.Width / 2 +
newVertex.X);
        canvas.Children.Add(vertexVisual);

        if (drawnVertexes.Count == 2)
        {
            var topLeft = new Vertex(drawnVertexes.Min(x => x.X),
            var bottomRight = new Vertex(drawnVertexes.Max(x => x.X),

            Room room = new Room(topLeft, bottomRight);
            room.Draw(canvas, Info);
            StartAgents(room);
        }
    }

    /// <summary>
    /// Fornisco informazioni extra al click del tasto destro (mi serve per debug)
    /// </summary>
    /// <param name="e"></param>
    protected override void OnMouseRightButtonDown(MouseButtonEventArgs e)
    {
        if(e.OriginalSource is Polyline)
        {
            Polyline p = e.OriginalSource as Polyline;
            StackPanel infoStackPanel = new StackPanel();
            infoStackPanel.Background = p.Fill;
            infoStackPanel.Children.Add(new TextBlock { Text =
"Informazioni per la 'room' selezionata:", FontWeight = FontWeights.Bold });
            int j = 1;
            for(int i = 0; i<= 3; i++)
            {
                Point current = p.Points[i];
                Point next = p.Points[i + 1];
                TextBox t = new TextBox();
                int jn = j + 1;
                if (jn == 5) { jn = 1; }
                t.Text = string.Format("[{0}-{1}] lungo: {2}",
j.ToString(), jn.ToString(), (new Vertex(current.X, current.Y)).DistanceTo(new Vertex(next.X, next.Y)));
                j++;
                infoStackPanel.Children.Add(t);
            }
            stackpanel.Children.Add(infoStackPanel);
        }
        e.Handled = true;
    }
}
#endregion
}

```

fine

4.4. Implementazione logica e operativa del modello *Agent-BIM*

Il prototipo descritto, nei limiti della realtà dello stato di avanzamento del lavoro di modellazione degli agenti e delle potenze di calcolo messe a disposizione, tende a descrivere in maniera verosimile la complessità degli elementi che, influenzandosi a vicenda, vanno a costruire la intricata realtà dei processi realizzativi dell'architettura. Giunti nelle fasi di cantiere perciò, il confronto tra il risultato della simulazione (planimetria di cantiere cronoprogrammata) e il monitoraggio della progressione delle opere attraverso la verifica del modello BIM direttamente *in situ*⁹⁷, da un ulteriore vantaggio in termini di risparmio di risorse in quanto, semplicemente attraverso l'aggiornamento del modello in remoto, è possibile disporre in tempo immediato degli aggiornamenti progettuali *as-built* (fig. 58). In un suo immediato sviluppo logico quindi, possiamo estendere le potenzialità di questo metodo alle importantissime fasi di gestione e manutenzione del bene che, come evidenziato in *par. 1.8*, sono di gran lunga i momenti progettuali e realizzativi che necessitano di maggiore attenzione, anche dal punto di vista dell'impegno economico che richiedono.

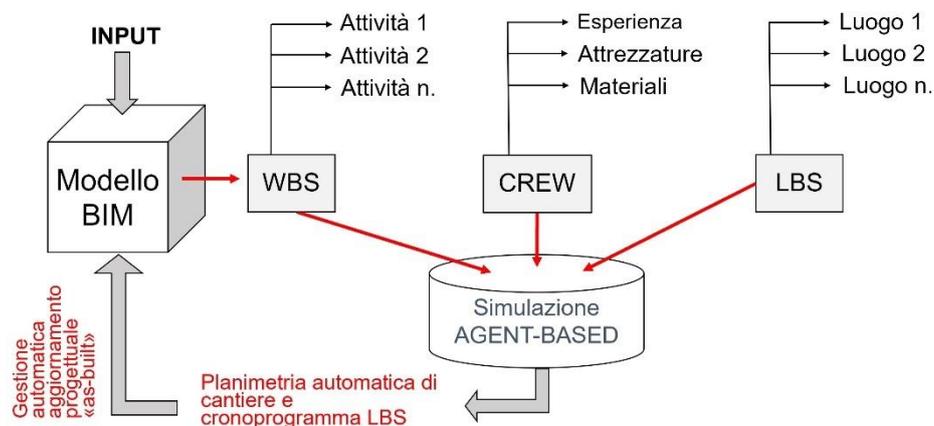


Figura 58. Sintesi del processo di elaborazione delle planimetrie automatiche di cantiere e il costante aggiornamento del modello BIM. Questo difatti, costituisce contemporaneamente sia la base di conoscenza progettuale che quella relativa alla gestione del bene, essendo sempre aggiornato con gli elementi effettivamente verificati in cantiere.

⁹⁷ La diffusione dei dispositivi portatili convertibili (MS Surface®, iPad®, Inspiron® e Lenovo Yoga® solo per citarne alcuni) consente agli attori di disporre di strumenti maneggevoli come un tablet, ma potenti quanto un notebook di fascia alta.

Pertanto, il prototipo oltre a sviluppare valori di prestazione da impiegare nell'immediato nella definizione della LBS ottimizzata, va interpretato come un possibile *repository* di tutte le metriche progettuali: infatti, come visto, se l'ottenimento del risultato LBS necessita di conoscere, con un elevato grado di accuratezza, la WBS, il personale attivo e le geometrie dei luoghi è evidente che, in occasione di interventi manutentivi ordinari e straordinari, questa modellazione precedente configuri una base di conoscenza coerente, utile alla prefigurazione di quel cantiere continuativo che è, nei fatti, la gestione di un bene edilizio.

Dal punto di vista operativo, il modello è capace di gestire gli aspetti economici grazie alla verifica iterativa, oltre del numero ottimizzato di personale da impiegare e dei quantitativi di materiale descritti nella WBS, anche attraverso la prefigurazione degli apprestamenti da installare e delle attrezzature necessarie (fig. 59), andando a coprire quelle voci di costo che, nella pratica corrente, sono spesso origine di divergenze tra spese ipotizzate e sostenute.

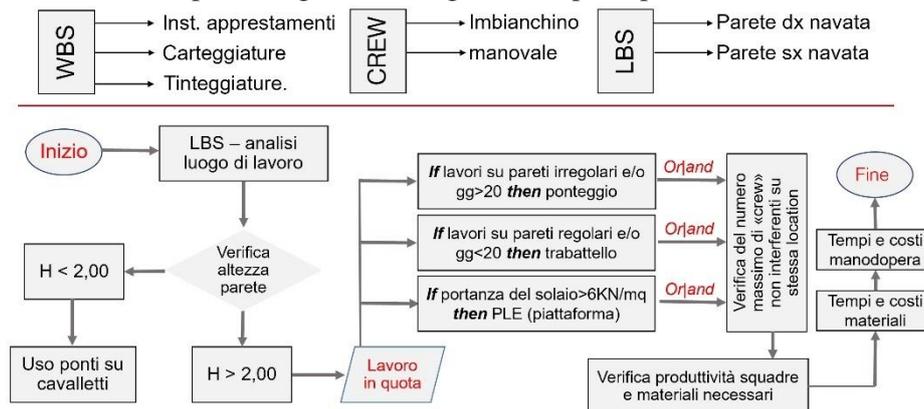


Figura 59. Sequenza logica della definizione esecutiva di una lavorazione semplice (pittura). Una volta definiti i tre macro-elementi (WBS-CREW-LBS) dalla definizione delle geometrie della <room> si deducono le caratteristiche geometriche che, in questo caso, attivano o meno le iterazioni con la normativa per la sicurezza sui luoghi di lavoro inerente le lavorazioni in quota. Successivamente, constatata la condizione di lavoro in quota, sono esplicitate le condizioni di uso delle attrezzature e il CREW necessario (per l'uso della piattaforma si impiegherà CREW abilitata; per il ponteggio a torre su ruote (cd. Trabattello) tale qualifica non è necessario. Stabilite CREW e noleggio dell'attrezzatura, è possibile ottenere la produttività di cantiere e, sulla base di questa, conteggiare le ore/uomo, i materiali necessari e il noleggio degli apprestamenti.

4.5. Conclusioni

L'applicativo è stato sviluppato per legare i risultati delle iterazioni avvenute nell'ambiente simulativo *Agent-based* con il mondo BIM, utilizzando la connessione messa a disposizione dalle API.

L'interconnessione via API si concretizza perciò in una interfaccia di lavoro grafica "*canvas*" (fig. 60) dove l'input è la definizione dell'area di partenza, l'output invece è la restituzione dell'area occupata effettivamente per il margine di tempo necessario a compiere le lavorazioni previste.

I limiti riscontrati nella gestione di questo specifico processo, per lo più informatico, ribadiscono le attuali criticità del settore ICT: la mancanza di standard condivisi pienamente interoperabili, la stabilità del sistema, la potenza di calcolo e di memoria, soprattutto in termini di potenza delle schede RAM e dei sistemi di grafica.

Per quanto riguarda gli aspetti relativi alla modellazione degli agenti, ad oggi non esistono delle basi di conoscenza strutturate o, per meglio dire, delle strutture di conoscenza "ben formate", basate sull'osservazione scientifica delle prestazioni del settore edile, oppure estratte da grandi basi di dati: pertanto, soprattutto nella definizione della produttività delle squadre operative, si deve fare ancora affidamento sulla *conoscenza implicita* dell'attore incaricato.

Il giudizio di questo esperto quindi è alterato dall'influenza dei (suoi) pregiudizi oppure valutazioni che, semplicemente, si basano su prestazioni non *oggettivamente* verificabili: si pensi all'esempio del giudizio di produttività rispetto a due lavoratori, con stesse mansioni e formazione, ma con età diverse: che differenza di produttività vi sarà tra un operaio edile generico con tre anni di esperienza e venti anni di età, rispetto ad un collega con 30 anni di esperienza e 50 anni di età? Come quantificare la differenza di produttività all'interno di un luogo di lavoro, a parità di dimensione, ma con accortezze diverse? Ci vuole meno tempo a pitturare una piccola cappella ottocentesca riccamente decorata a stucchi, oppure le facciate esterne di un capannone industriale con superficie coperta di 1.000 metri quadrati?

Sebbene un sistema simulativo del genere possa prefigurare scenari sicuramente validi dal punto di vista logico/informatico, gli stessi si basano su una base di conoscenza *soggettiva*, caratterizzata perciò più dalle sensazioni del singolo rispetto alla oggettiva osservazione del fenomeno.



Figura 60. Rappresentazione della <room> ottimizzata nell'interfaccia Canvas. La parte in verde chiaro identifica l'area di lavoro originariamente assegnata, il riquadro più interno in verde scuro contornato rosso invece, delinea l'area effettivamente da impiegare per svolgere le lavorazioni previste in quell'area, permettendo di porre in contiguità un'ulteriore attività, preferibilmente connessa alla precedente da rapporti di reciproca propedeuticità: l'obiettivo dunque è ricreare, nei limiti del possibile, quella condizione di continuità delle lavorazioni della catena di montaggio dell'automotive.

5.0. Casi-studio per la validazione e verifica del modello proposto: tre progetti realizzati

Il criterio di scelta impiegato per la definizione dei casi studio è stata la necessità di avere edifici in cui fosse necessario svolgere lavorazioni quanto più possibile simili o, per lo meno, con metriche comparabili. D'altro canto, non si poteva non considerare l'unicità del processo edilizio quindi, considerando anche la effettiva disponibilità di progetti attivabili nel breve termine, la scelta è ricaduta su tre edifici appartenenti alla stessa categoria, Edilizia di Culto), interessati da una serie di interventi di tipologia abbastanza simile tra loro ma, nella valenza architettonica, nella complessità dell'intervento e nelle condizioni logistiche di cantiere, caratterizzati da specifiche diverse.

L'obiettivo dunque era testare la validità del metodo in un contesto generale comparabile, ma con condizioni al contorno molto differenti, al fine di poter meglio valutare gli effettivi limiti e potenzialità.

L'Edilizia di culto è un settore molto particolare, non solo per la elevata valenza architettonica di una cospicua parte di questi o per il significato attribuitogli, ma soprattutto la complessità tecnico/procedurale della

programmazione e progettazione, tipiche di un ambito in cui le scelte intraprese hanno delle ricadute su migliaia di persone, catalogabili sotto differenti profili di utenza, a partire da quella “debole” quali anziani, bambini e portatori di disabilità.

Data la necessità di soddisfare gli attuali quadri esigenziali, questi edifici devono essere capaci di offrire determinate condizioni di confort, sia nell’uso ordinario del bene che nelle occasioni soggette a notevole affollamento quale, ad esempio, le cerimonie e le festività liturgiche; non si trascuri il fatto che, soprattutto in contesti periferici, è indispensabile che queste tipologie edilizie presentino una certa flessibilità d’uso, necessaria per consentire altri impieghi degli spazi come accade in caso di convegni, concerti, rappresentazioni teatrali e ogni altra forma di incontro della comunità.

I lavori necessari alla gestione di questo patrimonio⁹⁸ vengono nella maggior parte dei casi gestiti Ufficio Diocesano, preposto ad organizzare e razionalizzare le somme stanziare a servizio di questo ingente patrimonio edilizio. Negli ultimi tempi quindi, il tema maggiormente trattato è stato quello degli interventi sull’esistente, volto sia alla tutela e valorizzazione dell’importante patrimonio culturale, sia al problema - sempre più pressante - delle strutture realizzate negli anni del dopoguerra, dato che iniziano a manifestare tutta una serie di carenze strutturali, impiantistiche e, non da ultimo, a livello di conservazione della qualità artistica e architettonica, spesso oggetto di alterazioni.

Dall’analisi degli ultimi cantieri conclusi, è emerso che la maggior parte delle pratiche oggetto di richiesta di finanziamento riguardavano edifici a ridosso dei cinquanta anni di funzionamento che necessitavano di tutta una serie di manutenzioni straordinarie dovute sia ad errori di progettazione ed esecuzione, che al fisiologico deperimento dei materiali in un contesto dove le parrocchie, da sole, non riescono a pianificare campagne continuative di manutenzione oppure ad organizzare cantieri così complessi.

Nei fatti, considerando il numero degli interventi richiesti rispetto alla penuria di risorse, era necessario trovare questa nuove metodologie per ottimizzare la ogni intervento e, soprattutto, avere tempi certi di chiusura dei cantieri, al fine di ridurre al minimo il disagio arrecato alla comunità e, contestualmente,

⁹⁸ A seconda della proprietà o della committenza delle opere. Gli edifici di culto infatti possono essere privati, comunali, di proprietà del Ministero dell’Interno attraverso il *Fondo Edifici di Culto* oppure delle Parrocchie, caso in cui si può accedere direttamente ai fondi previsti dal cd. “otto per mille”.

Cfr. <<https://bce.chiesacattolica.it/richieste-di-contributo-8x1000-new/>>

contenere i costi connessi alla durata supplementare dei lavori quali i noleggi, gli eventuali affitti delle aree oppure il florilegio di varianti e riserve tipiche di cantieri governati dall'incertezza.

I limiti degli strumenti utilizzati finora erano chiari: l'uso prevalente delle documentazioni cartacee implicava la propagazione degli errori, la difficoltà nella gestione degli archivi, tempi morti tra la consegna e il ritiro dei plichi e la vorticosa dinamicità dei cantieri. Era quindi necessario sondare metodologie innovative, capaci di garantire con ridotti margini di errore i tempi e i costi di esecuzione, riuscendo quindi a completare gli interventi secondo quanto programmato. L'obiettivo di questi casi di studio era perciò la definizione di una metodologia utile ad individuare uno standard gestionale e operativo per le successive campagne di organizzazione dei lavori in questa tipologia di edifici, e realizzare una metodologia generale di riferimento⁹⁹ applicabile ad altri progetti.

I tre edifici oggetti dei casi studio, seppur della stessa tipologia, appartengono a tre categorie differenti: il primo, è un edificio degli anni '60, oggetto di diversi interventi invasivi nel corso degli anni e giunto allo stato di obsolescenza precoce; il secondo invece, è un progetto d'autore del secondo Dopoguerra, interessato da seri problemi di carattere impiantistico e strutturale; mentre il terzo, è un suggestivo edificio della tradizione rupestre alto-medievale, caratterizzato da spazi angusti, e da pesantissime difficoltà per la gestione della catena logistica.

⁹⁹ *Benchmarking*: è un processo di comparazione tra operatori dello stesso settore, dove l'operatore qualitativamente migliore viene preso come riferimento dagli altri, al fine di analizzare le carenze (o i punti di forza) della propria organizzazione. Pratica di grande uso e successo nel mondo dell'industria, nel caso dell'edilizia ha una minore diffusione, dovuta sempre alle peculiarità di questo settore quali l'irrepetibilità del prodotto, la discretizzazione degli attori etc. (*cfr.* McCabe, S, *Benchmarking in Construction*, Blackwell Science Ltd, Oxford, pp. 1-20. ISBN: 0632055642.)

5.1. Chiesa *Santa Maria Assunta* a Roccasecca (anni '60):
ristrutturazione totale per adeguamento architettonico, liturgico e
impiantistico

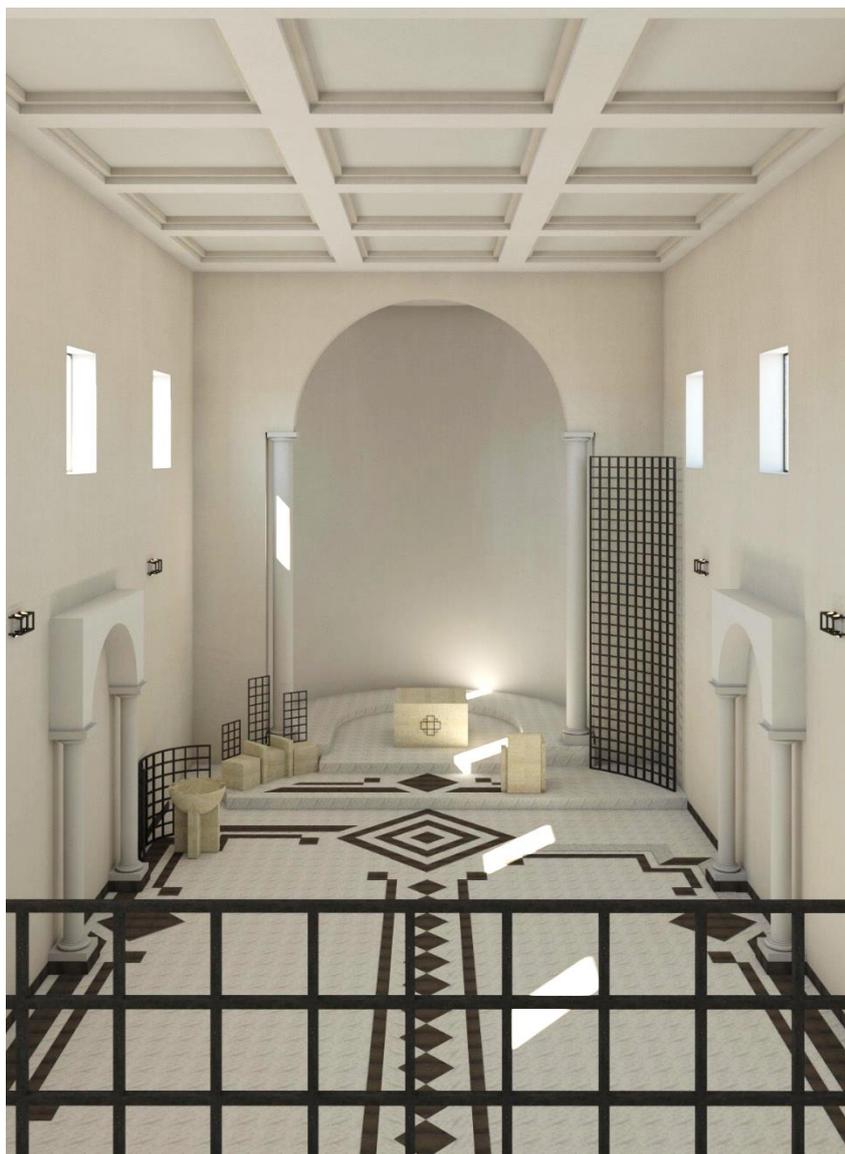


Figura 61. Vista digitalizzata dalla Schola Cantorum. Caso 1.

Tabella n. 09: scheda progetto, caso studio n. 1 – cantiere non promiscuo.

Onomastica edificio	Chiesa Parrocchiale "S. Maria Assunta" in Roccasecca Scalo Via Piave 58 – 03038 Roccasecca – FR
Committenza:	Ente parrocchia "S. Maria Assunta" in Roccasecca Scalo, via Piave, n. 58 – 03038 Roccasecca (FR). <i>Supervisione:</i> Diocesi Sora-Cassino-Aquino-Pontecorvo, ufficio Beni Culturali ed Edilizia di Culto.
Stato di fatto:	L'edificio, a sala unica e catino absidale, risale agli anni '60, quando venne eretto in luogo di una struttura provvisoria in legno causa il notevole sviluppo dell'area a seguito dell'incremento delle industrie nel basso Lazio, un tempo periferica e scarsamente abitata. La struttura ha già subito due grandi rivisitazioni: la prima, negli anni '70, in occasione della visita del Beato P. Paolo VI, e la seconda, sul finire degli anni '90 (<i>fig. 62</i>), come risposta a tutta una serie di carenze dal punto di vista impiantistico e della vetustà delle finiture.
Sintesi interventi di progetto:	Gli interventi progettuali sono concentrati esclusivamente all'interno della sala liturgica e all'unico ingresso. Questo, in occasione del Giubileo Straordinario della Misericordia del 2015-16, ha avuto nei 3 giorni successivi all'inaugurazione il privilegio di essere Porta Santa. I lavori consistevano quindi nella riqualificazione architettonica degli interni, prevedendo la demolizione totale di tutte le sovrastrutture esistenti e degli intonaci pericolanti. Successivamente, si procedeva alla realizzazione dello adeguamento liturgico del presbiterio, del nuovo battistero e di due cappelle votive, alla riqualificazione della cantoria, e alla rivisitazione del soffitto e della pavimentazione in marmo. Inoltre, in occasione dello spostamento della statua del Maestro A. Biancini dall'abside alla parte iniziale del presbiterio, sarà realizzata una nuova struttura artistica, come supporto sia statico che "visivo/concettuale" al tema dell'Assunzione in cielo. Per la parte impiantistica si procederà all'ottimizzazione dell'impianto di riscaldamento esistente e alla realizzazione ex-novo dell'impianto illuminotecnico.

¹⁰⁰ Angelo Biancini (1911-1988) allievo della scuola d'arte di Firenze, segue le orme del maestro Libero Andreotti. Nella prolifica carriera ha realizzato la statua dell'atleta vittorioso, nello Stadio dei marmi (Roma) e la statua del Genio della pittura a Palazzo della Civiltà Italiana (Roma). In ambito sacro, le opere per la nuova Basilica di Nazareth (1959), il baldacchino del Tempio dei Martiri Canadesi a Roma (1961).

Obiettivi	<p>Rimuovere tutti i fattori di rischio quali l'impianto elettrico vetusto o gli intonaci in fase di distacco; razionalizzare il consumo energetico ottimizzando gli impianti di riscaldamento e illuminotecnico; revisionare le finiture e gli arredi; realizzare un supporto artistico per valorizzare l'opera ceramica del Biancini.</p> <p>Obiettivo principale: realizzazione di tutte le opere in tre mesi, al fine di limitare il disagio della comunità di oltre 5.000 fedeli a non avere la disponibilità del luogo di culto di riferimento.</p>
Attori del processo:	<p><i>Committente:</i> Mons. Giandomenico Valente, legale rapp.te dell'Ente Parrocchia.</p> <p><i>Responsabile del Procedimento:</i> Mons. Giandomenico Valente.</p> <p><i>Progettista (arch. e strutt.):</i> arch. Francesco Livio Rossini.</p> <p><i>Coordinatore della Sicurezza in fase di Progettazione ed esecuzione:</i> arch. Francesco Livio Rossini.</p> <p><i>Direttore dei Lavori (arch. e strutt.):</i> arch. Francesco Livio Rossini.</p> <p>Consulenti: ing. Francesco Squasi, ing. Sara Ambrosio.</p>
Note.	<p>Questo cantiere è stato individuato dalla committenza diocesana come progetto-pilota per l'introduzione di nuove metodologie oggetto di questa ricerca anche a livello operativo.</p>



Figura 62. Vista in direzione absidale dell'ante-operam. Si notino le sovrastrutture in cartongesso, il coro in legno, il sistema di illuminazione e la diversa disposizione della statua del Biancini. (foto dell'autore, maggio 2016). Caso 1.

5.1.1. Premessa: l'edilizia di culto nel contesto dell'espansione post-bellica dei tessuti urbani

Ancora oggi, in quartieri di città come Roma (si pensi agli edifici tutt'ora danneggiati dai bombardamenti nel quartiere "San Lorenzo") come nelle periferie (le aree antistanti lo scalo ferroviario di Motta, Treviso) vi sono tracce evidenti della devastazione del secondo conflitto mondiale. Questo testimonia dunque quanto imponente sia stata l'opera di ricostruzione e conversione di una nazione, a prevalente sviluppo rurale, verso l'industrializzazione e la crescita delle polarità urbane. Tale crescita (il cd. *boom economico*) non è stata però sempre ben indirizzata da accurate previsioni di espansione dei contesti urbani dove, per giunta, per decenni si è assistiti ad un incontrollato sviluppo edilizio di carattere *spontaneo*: in questi contesti infatti, spesso le uniche strutture a disposizione della collettività sono tuttora i complessi parrocchiali con le loro attrezzature sportive, le strutture per l'educazione e l'intrattenimento.

L'edificio oggetto di questo studio appartiene a questa categoria: il territorio di Roccasecca infatti, fin dal basso medioevo è sempre stato suddiviso nella parte alta, abitata dalle famiglie nobili quali i d'Aquino prima, i Boncompagni poi e dunque dagli artigiani e commercianti dell'epoca mentre, nella parte pianeggiante, si sviluppavano le attività agricole. A fine '800 però, con la realizzazione dell'infrastruttura ferroviaria e la revisione del tracciato dell'antichissima via Casilina, la parte bassa della Città iniziò a sviluppare un centro abitato di modeste dimensioni, servito da una piccola cappella: dopo il pesantissimo bombardamento subito nello scenario della battaglia di Montecassino però, gran parte dell'esistente venne rasa al suolo. Successivamente, grazie alla rinascita della polarità urbana della zona (Cassino) e l'impianto di importanti realtà industriali questa località crebbe in maniera esponenziale, e la chiesa lignea provvisoria venne presto sostituita da una costruzione in tecnica mista muratura-cemento armato. La nuova opera, come accadeva nel medioevo (*cfr. cap. 1.3*), venne realizzata intorno al vecchio edificio, che venne smontato solo alla fine dei lavori. Il caso in analisi quindi esemplifica il tema, di stretta attualità, della manutenzione diffusa del patrimonio minore che, a distanza di oltre cinquanta anni, inizia a mostrare gli effetti del tempo e la inadeguatezza, rispetto alla complessità dei nuovi quadri esigenziali, delle soluzioni tecnologiche adottate in passato.

5.1.2. Sperimentazione del metodo: caso 1, cantiere *non promiscuo*

Questo cantiere è stata la prima sperimentazione estensiva della metodologia “Agent-BIM”. In prima istanza perciò, è stato realizzato un modello BIM dell’edificio secondo lo standard LOD 350 (Eastman et al, 2011), ove è stato possibile condurre le prime verifiche di carattere progettuale quali la coerenza del linguaggio compositivo dell’intervento, la congruenza degli elementi proposti secondo le linee guida CEI¹⁰¹ e la verifica delle interferenze (*clash detection*) tra elementi esistenti, impianti vecchi e nuovi, le opere da realizzare e gli arredi sacri (*fig. 63a*). Una volta raggiunto il livello di definizione richiesto e soddisfatte le ulteriori verifiche da parte della Commissione diocesana, alla quale sono stati sottoposti sia i progetti nella versione “canonica” su supporto cartaceo, sia una proiezione interattiva del modello, si è passati alla definizione delle *location* (*fig.63b, 64*).

Tale compartimentazione iniziale è stata condotta secondo valutazioni soggettive dell’esperto riguardo l’omogeneità delle geometrie e delle lavorazioni presenti nelle aree, seguendo quindi la logica del definire, sostanzialmente, aree di *isorischio*. Parallelamente, per verificare l’efficienza del metodo, è stata richiesta all’impresa affidataria, individuata tra i fornitori abituali della diocesi e dunque connotata da esperienza pluridecennale nel settore, una valutazione delle tempistiche di realizzazione dell’appalto (*cf. appendice, caso studio n.1*).

Una volta definite le *location* di partenza dunque, l’applicativo basato ad agenti inizia a processare le opzioni di *ottimizzazione* degli spazi effettivamente occupati dalle squadre lavorative e dalle loro attrezzature; nel concreto, il sistema inizia i suoi cicli di analisi partendo dalle dimensioni di partenza della *location*, definite dal tecnico. All’interno di questo ambito perciò, attraverso il database informativo di progetto definito nella fase di modellazione BIM, si deducono la natura e le caratteristiche degli elementi tecnici (BIM object) sui quali intervenire: è in questa fase perciò che il sistema inizia a verificare vincoli sostanziali quali l’altezza massima di lavoro, le caratteristiche geometriche degli elementi e, dunque, i quantitativi dei materiali: in estrema sintesi, la WBS della *location*. Una volta definiti dunque gli oggetti dell’intervento e le loro caratteristiche, queste vengono interpolate con le attrezzature in uso ai lavoratori e la *qualità* dei lavoratori stessi, espressa in

¹⁰¹ *Cfr.* “La progettazione di nuove chiese”, nota pastorale della Commissione Episcopale per la Liturgia”, Presidente Mons. Luca Brandolini, Roma, 18/02/1993.

termini di esperienza, eventuali specializzazioni o limitazioni (ad esempio, saranno da escludere per lavori su PLE i lavoratori non muniti di attestato di formazione per il lavoro in quota).

Alla fine del percorso di verifica delle condizioni date dalla WBS, dal CREW e dalla LBS, il prototipo procede ulteriormente con la verifica delle condizioni di prossimità delle aree logistiche, la necessità di prevedere delle zone-cuscinetto per mitigare il rischio di sovrapposizione delle squadre di lavoratori e la progressione temporale prevista.

Nel caso di specie è stato possibile risolvere velocemente questo problema in quanto, avendo a disposizione tutte le superfici interne dell'edificio, la parte centrale risultava particolarmente comoda e adatta a ospitare i percorsi di cantiere e le aree logistiche.

Il risultato della simulazione (*fig. 65*) indica perciò lo spazio effettivamente necessario dunque il tempo di occupazione della stessa per compiere una determinata sequenza di fasi lavorative. Per il monitoraggio di cantiere, tali risultati sono stati trasposti in ambiente *ADesk Navisworks*® per la verifica degli apprestamenti e del rispetto delle scadenze, benché sia stato necessario trasporre i dati in un grafico Gantt, unico metodo ammesso dal software (*fig. 66*).

L'ottimizzazione si è concretizzata nell'occupare le zone strettamente necessarie per condurre le lavorazioni in qualità e sicurezza, permettendo quindi di introdurre più squadre lavorative in aree vicine, attuando con criterio le opportune condizioni di propedeuticità. Tale condizione ha dunque favorito l'occupazione seriale delle celle, nell'intento di raggiungere la condizione ideale di continuità delle lavorazioni (*fig. 67*), come avviene in ambito manifatturiero.

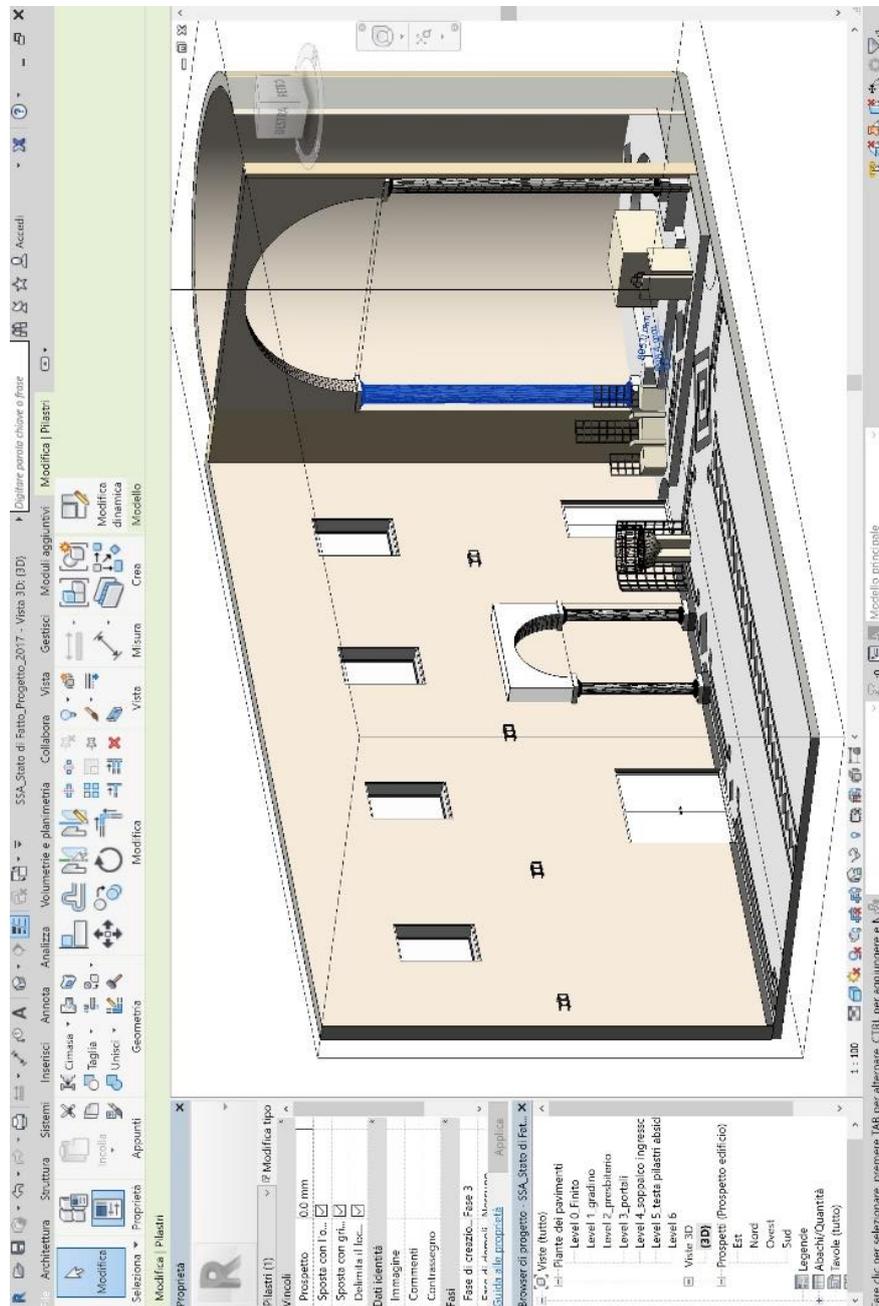


Figura 63. Modellazione BIM nelle fasi di definizione progettuali. Caso 1.

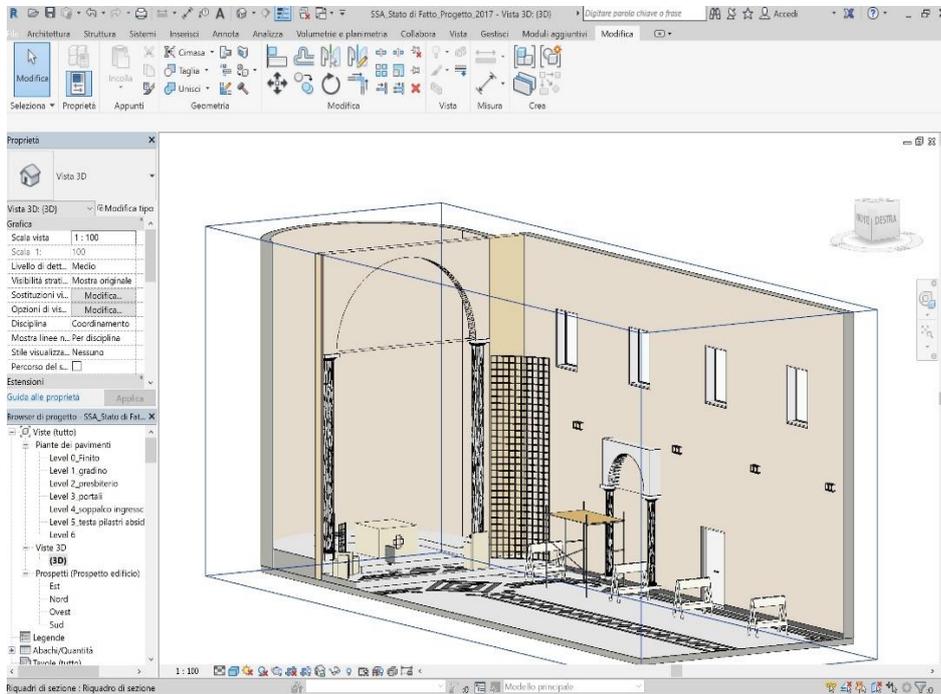


Figura 64. Modellazione BIM, particolare dell'inserimento degli apprestamenti e della divisione fisica delle location Divisione dell'edificio in location. Caso 1.

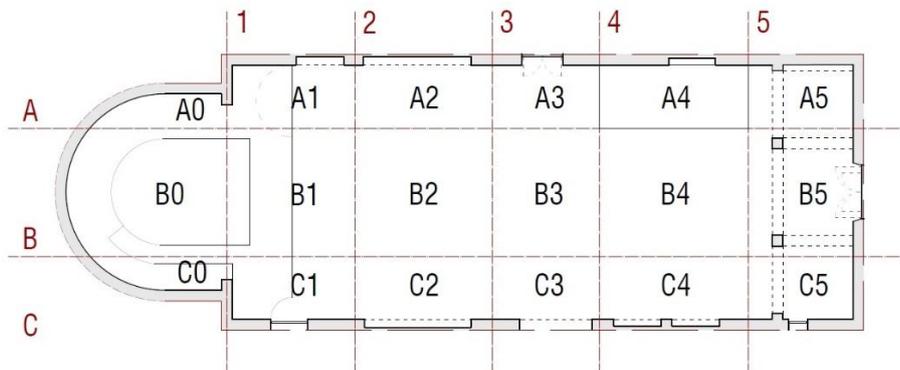
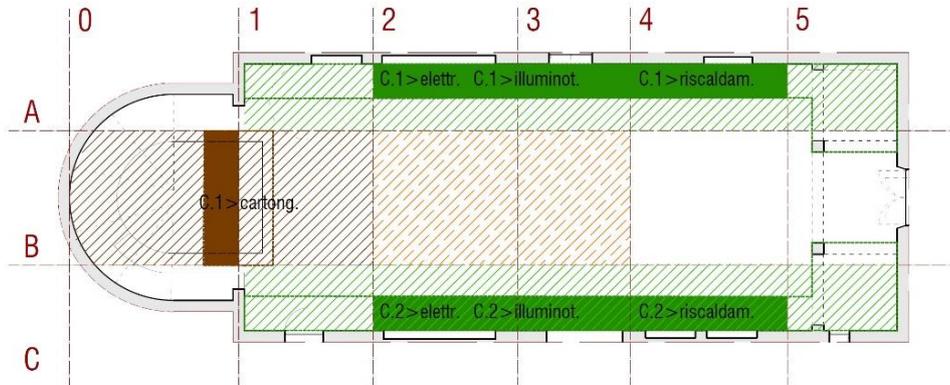


Figura 65. Divisione dell'edificio in location. Caso 1.

Caso 1) planimetria, sett.25, IV di cantiere, fino al 20/06



Caso 1) planimetria, sett.26, V di cantiere, fino al 27/06

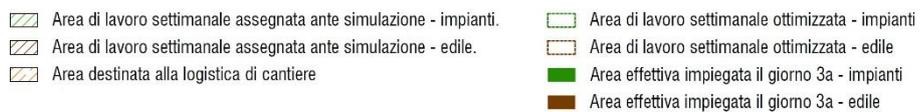
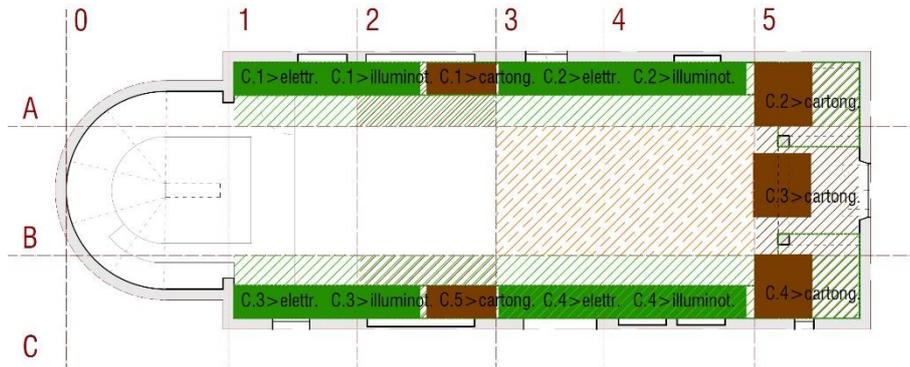


Figura 66. Individuazione planimetrica delle location. Confronto tra le aree assegnate in prima istanza e il risultato del processo di ottimizzazione. Si noti come le squadre lavorative “C” tendano a susseguirsi in senso lineare, per ottimizzare le sinergie che possono innescarsi soprattutto in situazioni come questa dove, con mansioni diverse, sono impiegate in larga parte squadre lavorative con la stessa base formativa (in questo caso, impiantisti). Caso 1.

5.1.3. Conclusioni

In questo specifico caso quindi, è stato possibile procedere contemporaneamente su un numero elevato di *location* (Fig. 68), permettendo di concludere le operazioni di cantiere in anticipo, aumentando il tempo a disposizione a ridosso dell'inaugurazione per posizionare ulteriori opere d'arte donate da artisti locali le quali, nella programmazione iniziale, erano previste in un ipotetico secondo cantiere. Le maggiori difficoltà sono emerse nelle fasi di *comunicazione* delle informazioni tra le diverse squadre di lavoratori, assolutamente non abituate a lavorare con procedure standardizzate, in luoghi predefiniti e secondo delle verifiche stringenti di attinenza alla programmazione che, tra l'altro, è stata condivisa secondo la metodologia *last planner* descritta in 2.3.2. (*Rapporto fotografico in Appendice*).

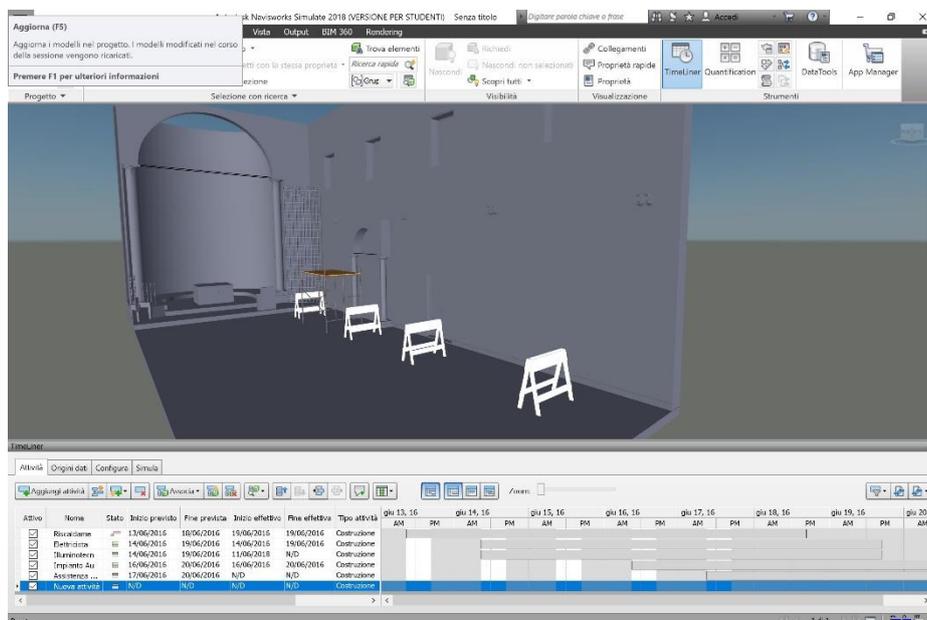


Figura 67. Verifica delle tempistiche e degli apprestamenti con Autodesk Navisworks®.

Questo strumento BIM permette un agevole controllo del materiale informativo del modello, grazie ad accurati sistemi di verifica delle interferenze, di computistica avanzata e di gestione delle tempistiche, descritte con la tecnica "Gantt". Per trasporre i risultati del prototipo (elaborati con la tecnica LOB) è necessario trascrivere dal LOB al Gantt le date di inizio e fine delle attività. Per tale operazione è possibile impiegare un foglio di calcolo espressamente formattato per questo scopo. Sul mercato, al momento l'unico applicativo che consenta la visualizzazione LBS con LOB in ambiente BIM-field è Trimble Vico®. Caso 1.

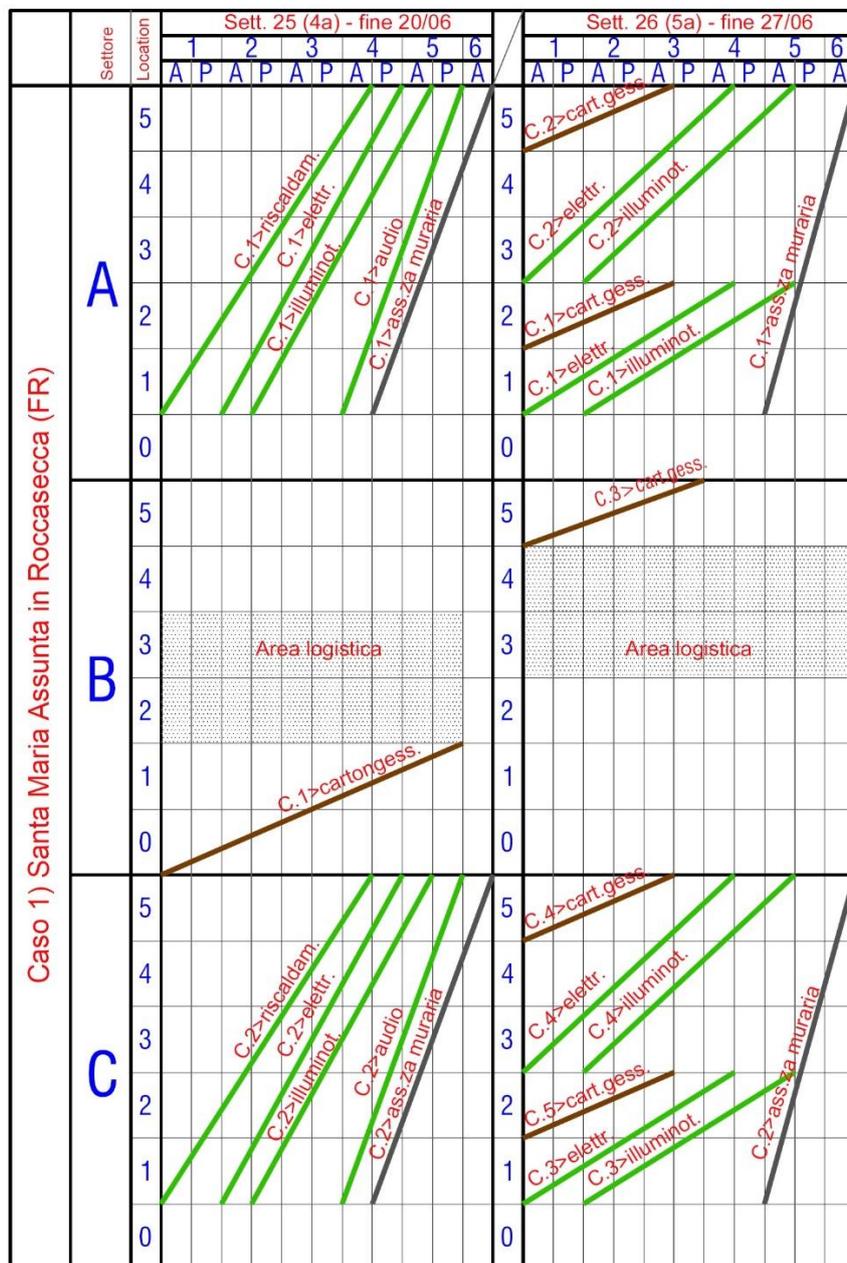


Figura 68. Pianificazione dei lavori nelle due settimane caratterizzate dal massimo tasso di occupazione, rappresentazione LOB secondo previsioni del sistema Agent-Based, Caso 1.

5.2. Chiesa *San Giovanni Battista* a Sant'Angelo in Theodice, Cassino (anni '50, progetto Prof. Nicolosi): adeguamento architettonico, liturgico, impiantistico e miglioramento sismico



Figura 69. Vista digitalizzata dello stato di fatto, Caso studio n.2.

Tabella n. 11: scheda progetto, caso studio n. 2 – cantiere promiscuo.



Figura 70. Vista in direzione absidale dell'ante-operam. Dall'immagine non si nota il quadro fessurativo, particolarmente preoccupante sui pilastri rivestiti in marmo. (foto dell'autore, aprile 2016).



Figura 71. Il prospetto principale con i tre portali e il campanile: questo, rispetto al progetto originario, totalmente difforme sia nell'aspetto che nell'ubicazione. Aprile 2016.

5.2.1 Premessa: l'importanza del recupero delle strutture e della memoria storica dei luoghi della comunità

La costruzione di questo edificio nella configurazione attuale è dovuta alla spaventosa distruzione di Cassino e del casinate durante gli eventi bellici dell'ultimo conflitto mondiale poiché questa zona, seppur periferica, si trova in una posizione strategica rispetto ai punti di attraversamento del fiume Gari.

Passata la tempesta, per effetto della liquidazione dei danni di guerra, alimentati soprattutto dal valore simbolico attribuibile alla ricostruzione della millenaria Abbazia di Montecassino e del suo territorio, il governo italiano (su finanziamenti e *placet* politico degli americani) si impegnò in maniera poderosa per garantire la rinascita della città e del circondario

Il progettista maggiormente coinvolto in questo processo di ricostruzione fu il Prof. Giuseppe Nicolosi¹⁰², all'epoca già affermato professionista e autorevole accademico che, insieme a molte altre opere, progettò questa chiesa. Nell'occasione, è necessario descrivere sommariamente la profondità e il rigore con il quale Nicolosi si approcciava al tema del sacro: infatti, secondo la sua ferma etica professionale, *“ogni nuova chiesa avrebbe dovuto interpretare poeticamente e costruttivamente sia l'anima della collettività sia il senso del sacro; recuperando il rapporto con il passato senza estraniarsi dalla contemporaneità; e parlare ad un tempo (in maniera sempre sommessa e mai urlata) il linguaggio della comunità e quello dell'architettura* (Argenti, 2001).

In questo caso, il risultato compositivo appare quindi ispirato dalla reinterpretazione di canoni della tradizione locale, figlia dell'ascendenza bizantina introdotta, in epoche lontane, dall'abate Desiderio (*cf.* nota 21). L'aula è composta da tre navate, di cui le laterali, più basse, separate dalla centrale da una serie di pilastri sui quali si impostano archi a sesto ribassato, drammatizzando la matericità della muratura del cleristorio. L'abside, di forma

¹⁰² G. Nicolosi (Roma, 1901-1981) ingegnere, architetto e urbanista, figura poliedrica con all'attivo numerose opere, prevalentemente commissionate da enti pubblici.

Ha progettato numerosi edifici di culto in cui è possibile rileggere la chiarezza del suo stile ove, mai rinnegando il razionalismo nelle forme e nell'approccio, rilegge di volta in volta i canoni dell'architettura italiana e la ricerca dell'essenza dei materiali impiegati, come le espressività del calcestruzzo e della pietra sbazzata fino al laterizio faccia vista, intessendo un legame filologico con le tradizioni costruttive più antiche.

poligonale, presentava in origine delle asole finestate, successivamente murate: questa modifica ha sicuramente compromesso l'equilibrio delle luci, elemento che nelle chiese di Nicolosi riveste sempre un aspetto principale nel trasmettere la percezione di sacralità del luogo. La facciata, rivestita in cortina muraria rossa – materiale insolito a queste latitudini – è ripartita verticalmente in tre ordini (*fig. 71*): il primo, scandito da sei lesene, ospita tre portali di eguale dimensione, che sono un chiaro rimando alla porta bronzea della chiesa dell'Abbazia; il secondo ordine invece, si imposta su una sottile fascia con dentelli in pietra bianca, e presenta lateralmente due spioventi, larghi quanto le navate laterali. Nell'ordine superiore è presente un rosone dalle forme fortemente geometriche, anch'esso in pietra bianca. La facciata è compiuta verticalmente da un timpano di impronta neoclassica – elemento ricorrente nelle architetture sacre nicolosiane sin dal 1937 (*cf.* Cappella del Collegio di Santa Maria, Roma) – e porta tuttora i segni delle decorazioni previste da progetto, che non furono mai terminate. Il campanile, realizzato sul lato opposto rispetto al progetto, è una massiva torre in cortina, contrariamente all'ipotesi progettuale di taglio più modernista.

Oltre all'indubbia importanza dell'architettura, uno degli aspetti più importanti da prendere in analisi, anche nella misura in cui ha influito nella sperimentazione di cantiere, è il *sensu di identità* che la popolazione attribuisce a questo edificio che, nei fatti, è l'unico luogo di aggregazione e socialità di questa comunità che, sorprendentemente visto lo spirito dei tempi, ancora sa apprezzare il piacere della condivisione di attività sociali, culturali, ludiche in luoghi fisici *storicizzati ed identitari*.

5.2.2 Sperimentazione del metodo: caso 2, *cantiere promiscuo*

A breve distanza di tempo, è stato possibile sperimentare la metodologia oggetto della ricerca in questo nuovo progetto dove, a differenza del primo, le situazioni al contorno erano più limitative. In questo caso infatti i luoghi di lavoro sono più difficilmente raggiungibili per via della scalinata monumentale che accompagna all'ingresso della chiesa mentre, sugli altri lati, vi è tutto il tessuto urbano del borgo antico il quale, naturalmente, mal si presta alla movimentazione dei carichi o alla gestione logistica di un cantiere del genere.

Comunque, anche in questo caso il primo passo è stata la modellazione BIM dell'edificio secondo lo standard LOD 350 e, da qui, la verifica da parte della commissione ecclesiastica. (*fig. 72*). Inoltre, trattandosi di un edificio affetto da diverse carenze strutturali, per poter verificare il costo e la tipologia degli interventi da prendere in considerazione per le operazioni di miglioramento sismico sono stati integrati, fin dalle fasi preliminari, elementi di consolidamento come le calastrellature dei pilastri (*fig. 73*). Nella modellazione inoltre, particolare attenzione è stata rivolta alla definizione delle demolizioni, vista la pericolosità connessa alle lavorazioni e all'incidenza che queste hanno nello specifico caso applicativo (*fig. 74*).

Una volta definiti i canoni progettuali e addivenuti ad una soluzione condivisa, è stato possibile attivare la verifica delle interferenze nel modello BIM, mediante gli strumenti di *clash deteccion* e, una volta confermata la versione corretta del progetto, ne sono state definite le *location* (*fig.75*).

Rispetto al caso precedente, è stato più difficile individuare le *location* in quanto non era possibile ragionare puramente per spazi suddivisi da linee reciprocamente ortogonali. Difatti, la necessità di mantenere l'uso del luogo di culto unita all'assenza di aree logistiche esterne alla chiesa, hanno obbligato una serie di scelte mirate alla minimizzazione degli ingombri. Quindi, sebbene il problema geometrico della disposizione della *location* si manifestasse soltanto all'ingresso e in parte dell'area presbiteriale, è stato abbastanza macchinoso adattare le caratteristiche del comando <room> alla definizione di questi spazi pseudo-trapezoidali. La ridefinizione della funzione all'interno dell'applicativo è stata comunque risolta, e tornerà sicuramente utile in altre applicazioni, considerando la ricorrenza di problematiche del genere nei casi di intervento sull'esistente, la casistica più ricorrente in questa categoria di interventi edili. Anche in questo caso, i tempi previsti sono stati più brevi rispetto a quanto previsto dall'impresa. (*cf. appendice, caso studio n.2*).

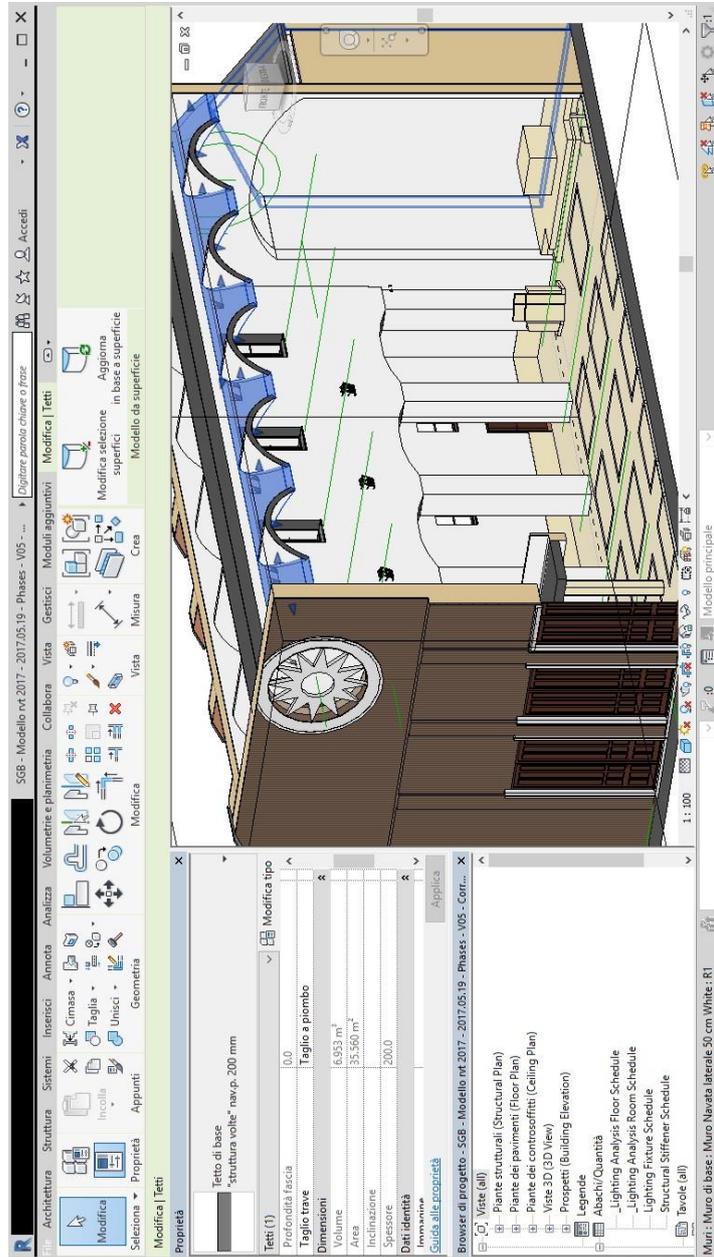


Figura 72. Modello BIM dello stato di progetto. Caso 2.

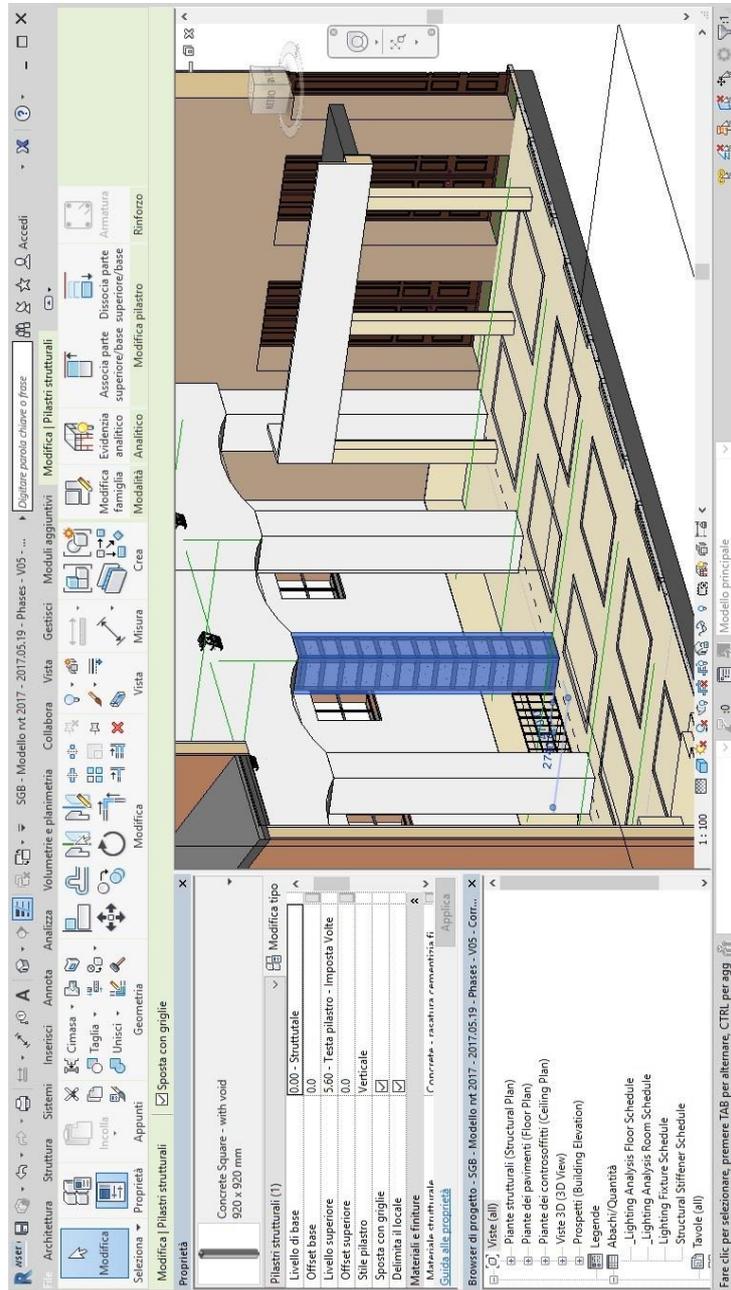


Figura 73. Modellazione e identificazione degli interventi strutturali. Caso 2.

Nella fase di simulazione invece, vi sono stati diversi problemi relativi alla penuria di spazi dove stoccare il materiale. Difatti, considerando che i sistemi ad agenti *ammettono il fallimento*, molte interazioni non arrivavano allo stadio di parallelizzazione poiché, nella fase in cui gli agenti processavano dati, uno o più obiettivi non riuscivano ad essere raggiunti, neanche considerando i più bassi intervalli di valori accettabili.

Per quanto riguarda la LOB, è interessante prendere a riferimento le due settimane più gravose, ovvero quelle in cui sono state rimosse le lastre in marmo ed è stato sostituito l'impianto elettrico. Mentre nel caso della gestione delle squadre di elettricisti, la difficoltà era data dall'evitare la sovrapposizione spaziale con le lavorazioni vicine (*Fig. 76*), nel caso delle squadre edili il problema, oltre alla gestione del lavoro in quota con carichi pesanti, è stato nel gestire il materiale in uscita: quindi, è stato fatto in modo che le squadre C1 e C2 lavorassero continuamente nello stesso settore, rispettivamente B e D: in tal modo, dal giorno 3 della settimana in analisi potevano disporre di aree-cuscinetto (*buffer zones*) per la raccolta dei marmi rimossi. Le squadre C3 e C4 invece, presenta una intensità delle lavorazioni bassa, come evidenziato dalla minore pendenza della retta poiché, a differenza delle altre due squadre, non avevano modo di lavorare intorno al pilastro, dovendo quindi allungare i tempi di esecuzione.

Nella settimana successiva (terza di cantiere), è stata testata un'altra strategia, ovvero la concentrazione di tutte le lavorazioni in *location* vicine (in questo caso 3, 4 e 5) prevedendo più turni di spostamento del materiale dal cantiere. Il risultato, è stato abbastanza deludente per quanto riguarda i tempi perché, a parità di lavoro, è stato necessario prevedere degli straordinari pari a circa il 10% del monte ore settimanali.

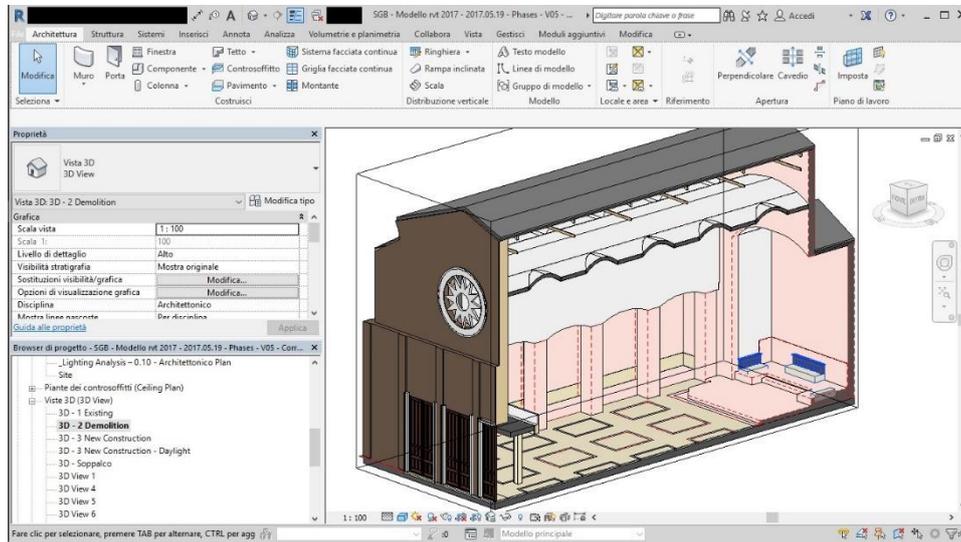


Figura 74. Identificazione e quantificazione delle parti di edificio da demolire. Caso 2.

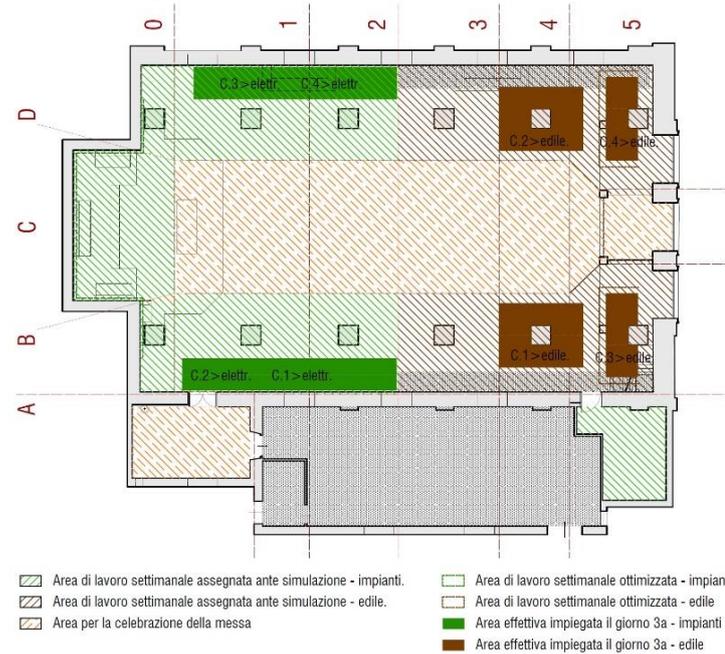


Figura 75. Divisione dell'edificio in location. Caso 2

Caso 2) planimetria, sett.37, II di cantiere, fino al 12/09



Caso 2) planimetria, sett.38, III di cantiere, fino al 19/09



- | | |
|---|---|
|  Area di lavoro settimanale assegnata ante simulazione - impianti. |  Area di lavoro settimanale ottimizzata - impianti |
|  Area di lavoro settimanale assegnata ante simulazione - edile. |  Area di lavoro settimanale ottimizzata - edile |
|  Area per la celebrazione della messa |  Area effettiva impiegata il giorno 3a - impianti |
| |  Area effettiva impiegata il giorno 3a - edile |

Figura 76. Definizione planimetrica delle location. Caso 2.

5.2.3 Conclusioni

Le maggiori difficoltà incontrate in questo cantiere sono state, prevalentemente, di carattere logistico. Difatti, oltre alla necessità di dover lasciare gran parte della sala liturgica all'uso dei fedeli, bisognava fare i conti con il considerevole quantitativo di vecchie lastre in travertino e copriferro da rimuovere.

Per la risoluzione di questo problema sono state verificate due strategie: la prima, più elaborata e complessa, prevedeva la definizione di zone cuscinetto, a ridosso dei luoghi di lavoro delle altre squadre, per il posizionamento del materiale da rimuovere solo alla fine della settimana lavorativa; la seconda, più gestibile dal punto di vista dell'organizzazione minuta, consisteva invece nello spostamento progressivo dei materiali accumulati a terra. Il risultato è stato nettamente a favore della prima, confermando dunque quanto possa essere utile dotarsi di tali strumenti di supporto. Memori dell'esperienza del caso 1, è stato intensificato l'uso di modelli digitali di rappresentazione dell'organizzazione di cantiere (fig. 77), per meglio veicolare le informazioni nelle fasi di comunicazione interna al cantiere, indispensabili per gestire le numerose attività previste, come mostrato in (fig. 78).

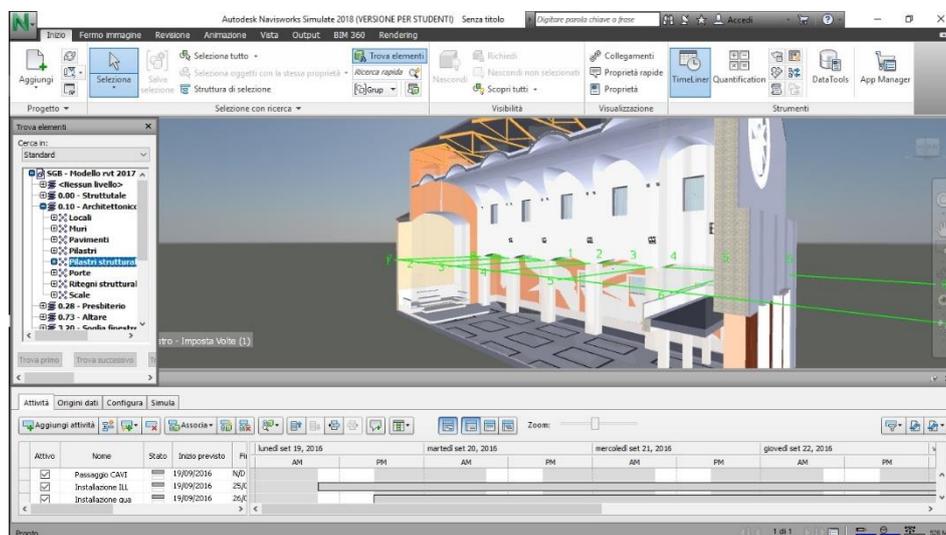


Figura 77. Modello AD Navisworks ® utilizzato anche per aumentare la comunicatività all'interno di cantiere. Nella riunione settimanale per lo stato di avanzamento, venivano proiettate le sequenze video sull'avanzamento lavori prodotte dall'applicativo.

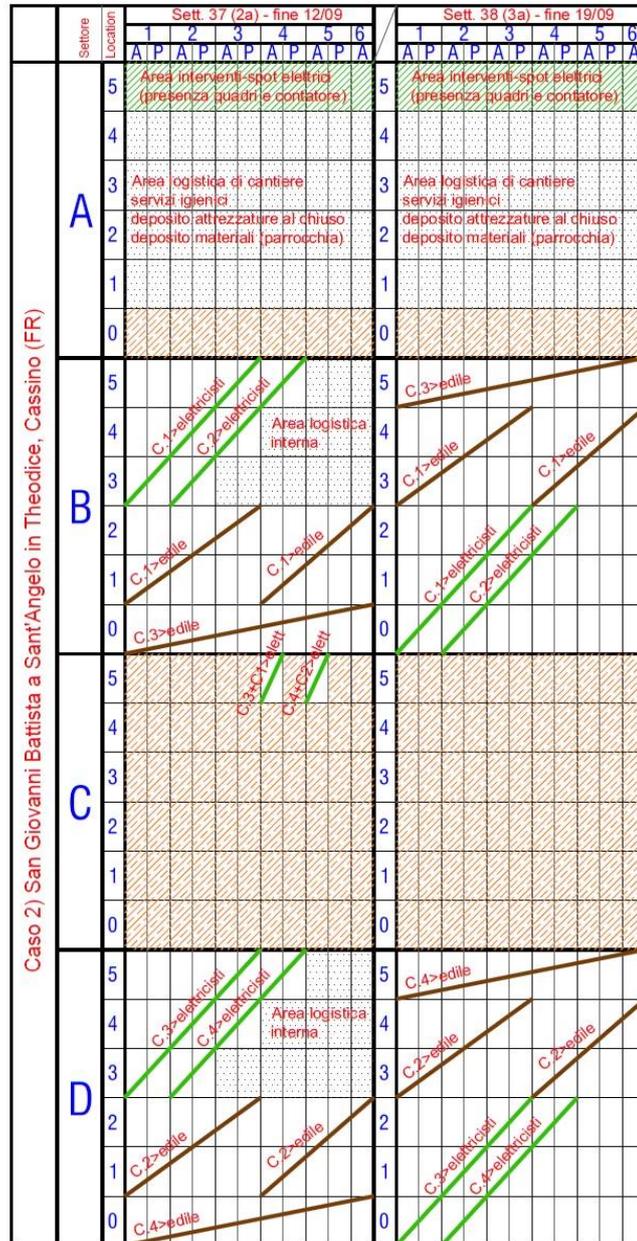


Figura 78. Pianificazione dei lavori nelle due settimane caratterizzate dal massimo tasso di occupazione. Rappresentazione LOB come da previsioni del sistema Agent-Based, Caso 2.

5.3. *Santuario Rupestre Sant'Angelo in Asprano a Roccasecca (XI sec.),
restauro degli affreschi alto-medievali*



Figura 79. Vista delle pitture murarie absidali. Caso studio n. 3

Tabella n. 12: scheda progetto, caso studio n. 3 – cantiere su bene culturale in condizioni logistiche estreme

	<p>Il sito è raggiungibile soltanto a piedi, dopo quaranta minuti di cammino lungo un percorso in roccia e terra battuta. La chiesa presenta un lungo e stretto sagrato, che diventa di forma trapezoidale soltanto in prossimità dell'ingresso sul prospetto meridionale. Il prospetto, intonacato solo in minima parte, aderisce parzialmente alla roccia e presenta due aperture, una piccola finestra sulla destra ed un portale sulla parte sinistra. Inoltre, più in alto rispetto alla porta d'accesso, è facile riconoscere le tracce di una antica apertura, oggi murata.</p> <p>Attraverso la soglia d'ingresso, si entra in una sala di dimensioni quadrangolari, priva di copertura ma totalmente sovrastata dal cielo della grotta, nel quale si inserisce il complesso architettonico.</p> <p>Alla destra del portale si trova una parete di contenimento, grezzamente rifinita ad intonaco, oltre la quale ancora oggi sono tumulate le salme degli abitanti dell'antico villaggio. A sinistra invece si esibisce una parete che non segue un tracciato regolare, partendo con il campanile e un muro che, probabilmente, un tempo doveva presentare un'apertura. In asse con il catino absidale e l'antico portale troviamo l'iconostasi, elemento tipico delle architetture che risentivano delle influenze del mondo bizantino. La parete destra dell'iconostasi appare spoglia, mentre la parete sinistra è decorata con pitture murarie. Quest'affresco è composto da due icone: una fortemente degradata, probabilmente raffigurante una sacra immagine femminile e l'altra, mediocrementemente conservata e con una lacuna trattata "a tinta neutra", che ritrae l'Arcangelo Michele con il tradizionale <i>Looron</i>, abito nobiliare bizantino. Oltrepassato il portale definito dall'iconostasi si accede al transetto. Queste pareti definiscono uno spazio rettangolare, con bracci asimmetrici coperti da volte a botte.</p> <p>In posizione centrale rispetto all'apertura dell'iconostasi si trova il catino absidale, decorato da un affresco di epoca desideriana (XI sec.). Quest'ultimo, nelle parti distaccate, lascia intravedere la decorazione parietale precedente che, pur essendo visibile in minima parte, presenta i caratteri stilistici tipici dell'iconografia religiosa longobarda (VIII sec).</p>
--	--



Figura 80. Vista del santuario rupestre. Caso 3.

5.3.1 Premessa: lux ab petra

Come evidenziato da Cesare Brandi, il caso delle costruzioni rupestri va considerato un intervento di Restauro ambientale quindi, in questo caso, oltre al *riconoscimento* dell'opera d'arte si affianca la necessità di analizzare (e valorizzare) il contesto naturale ove si colloca il monumento.

In situazioni simili, abbastanza diffuse nell'Italia centro-meridionale, fino a un passato non troppo remoto era consueto, attraverso la tecnica dello strappo, rimuovere affreschi e pitture murarie, per poi ricollocarle in musei locali o in edifici di culto più frequentati. Nell'elaborazione di questa proposta di intervento invece, ci si è attenuti ai moderni principi della teoria del Restauro quali il *minimo intervento*, la *compatibilità dei materiali* e la *reversibilità delle opere realizzate*, con l'obiettivo di privilegiare le scelte che consentano di mantenere l'unitarietà della percezione dell'opera d'arte.

“Noi dobbiamo inizialmente sondare la inderogabilità di attribuire il carattere di unità all'opera d'Arte, e precisamente l'unità che spetta all'intero, e non l'unità che si raggiunge nel totale” (Brandi, 1963)

In questo caso, tale condizione è raggiungibile solo cercando di normalizzare l'umidità relativa interna al monumento, quindi agire sulla causa dell'ammaloramento delle murature e dei distacchi delle parti dipinte.

Così in prima istanza, per scongiurare l'asportazione delle opere che, oltre a cancellare l'identità del luogo, avrebbe sminuito la riconoscibilità della decorazione stessa¹⁰³, è stata proposta una copertura trasparente, capace di non far perdere la continuità visiva con il cielo della grotta pur contenendo l'acqua in caduta. Tale sistema sarebbe stato supportato da un impianto di climatizzazione necessario per il controllo dell'umidità, e dunque evitare i pericolosi fenomeni di umidità superficiale e interstiziale.

Verificando però le disponibilità economiche per l'intervento, è stato possibile realizzare soltanto il primo lotto, consistente nella demolizione delle superfetazioni succedutesi nel tempo, nella pulitura delle superfici da patine biologiche e inopportune rasature cementizie e nel delicatissimo processo di rimozione dei materiali metacrilatici (Paraloid) apposti nei precedenti restauri in maniera copiosa. Questi infatti, creando una schermatura attiva riguardo la traspirabilità delle superfici, aumentava la portata dei numerosi fenomeni di micro-sollevamento della pellicola pittorica dunque la spinta dei Sali e della condensa. Successivamente, si è passati alla ricucitura delle parti in via di distacco utilizzando nano-calci e pitture a base naturale, operando sia sulle pitture storiche che sulle lacune.

¹⁰³ *"Le preesistenze archeologiche inamovibili debbono conservarsi in loco e vanno considerate sullo stesso piano scientifico e culturale di quelle mobili e va quindi predisposta per esse una serie di operazioni e di interventi atti a soddisfare tutte le esigenze di una conservazione attiva, esattamente come il museo le soddisfa per le opere che in esso vengono trasferite: si tratta in sostanza di sostituire al museo come luogo il museo come concetto: se il reperto non può andare al museo il museo dovrà andare al reperto."* Franco Minissi, Relazione al Convegno internazionale COPAM (1-4 luglio 1986, Napoli).



Figura 81. Particolari delle pitture rupestri oggetto dell'intervento. A sinistra, nella mandorla, il Christo Pantocrator con alla base la schiera degli apostoli e la madonna Blachernitissa; a destra, immagine popolare dell'Arcangelo Michele di epoca basso medievale. Caso 3

5.3.2 Sperimentazione del metodo: caso 3, cantiere *su bene culturale in condizioni logistiche estreme*

L'obiettivo da raggiungere, in questo caso, era non tanto l'ottimizzazione degli spazi interni per facilitare le sinergie tra squadre e annullare i rischi interferenziali dati dalla sovrapposizione di attività quanto stabilire, con accuratezza, i tempi di svolgimento delle specifiche lavorazioni.

Difatti, è possibile raggiungere il sito soltanto a piedi, quindi la gestione della catena logistica ha inciso, sia come onere progettuale che economico, in maniera molto importante; inoltre, i materiali da impiegare presentavano una certa sensibilità rispetto alle condizioni climatiche perciò era necessario, oltre a ridurre il numero di viaggi, verificare anche il rispetto del tempo massimo di stoccaggio ammissibile per questi composti.

La particolare complessità legata a questo caso-studio è stata, oltre le condizioni gestionali, nel decidere la modalità di modellazione BIM del complesso: questi sistemi difatti, non sono ancora molto duttili riguardo la definizione della stratigrafia delle murature storiche e, soprattutto, nella loro conformazione nello sviluppo in elevato, praticamente sempre irregolare. Considerando perciò il livello di attenzione che il tipo di lavoro richiede, è stato necessario ricorrere a strategie e strumenti di rappresentazione all'avanguardia. Quindi, oltre al già noto processo di modellazione e valutazione di cui ai due casi precedenti, è stato necessario condurre una campagna di rilievo supportata sia da misuratori analogici e digitali che da immagini fotografiche, al fine di costruire un modello BIM mediante mosaico fotogrammetrico (*fig. 82 e 83*). Una volta quindi trasposte le misure di riferimento e le immagini per la composizione della trasposizione fotogrammetrica, è stato realizzato il modello BIM dell'edificio secondo il LOD 200 (*fig. 84*). Tale abbassamento del livello di dettaglio è stato necessario a contenere le dimensioni del file.

In tal modo, se ne è aumentata la trasmissibilità e la lavorabilità permettendo, dunque, il collegamento della fotogrammetria di riferimento direttamente all'interno del modello BIM. Questo, in definitiva, presenta una *nuvola di punti* (creata con *ADesk ReCap®*), sul quale sono stati istanziati gli oggetti BIM: il risultato perciò è un modello informativo dell'edificio capace di mantenere, allo stesso tempo, sia il contatto visivo con le superfici, sia l'utilità di un modello analitico utile per monitorare e gestire gli aspetti qualitativi e quantitativi delle attività (*fig. 85 e 86*)

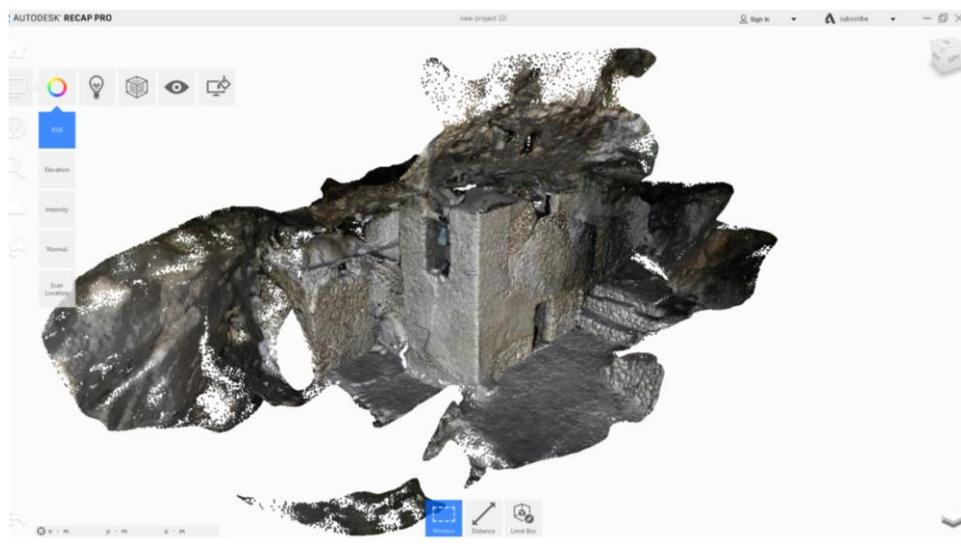


Figura 82. Inserimento delle immagini e realizzazione del mosaico fotogrammetrico. Per il modello in analisi sono state scattate circa 400 foto, in modo tale da avere ~ 100 punti di riferimento confermati da 4 foto scattate da angolazioni diverse. Tali immagini devono essere successivamente trattate in ambienti grafici dedicati per poter uniformare il tono dei colori, la saturazione quindi rendere quanto più omogenee possibile le sequenze di sovrapposizione delle immagini al fine dell'identificazione esatta del punto. Caricamento immagini in AutoDesk ReCap®, Caso 3.

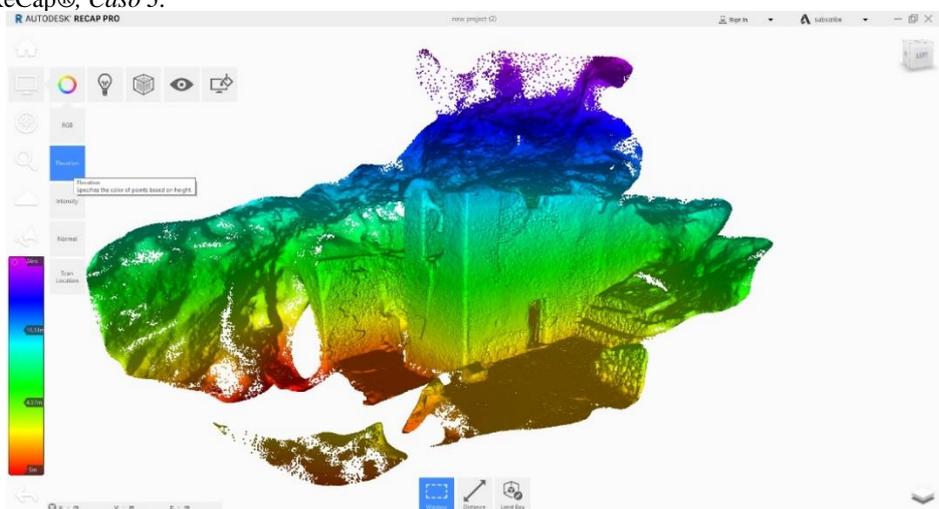


Figura 83. Attribuzione delle quote ai punti di collegamento e riferimento delle immagini sovrapposte. Caso 3.

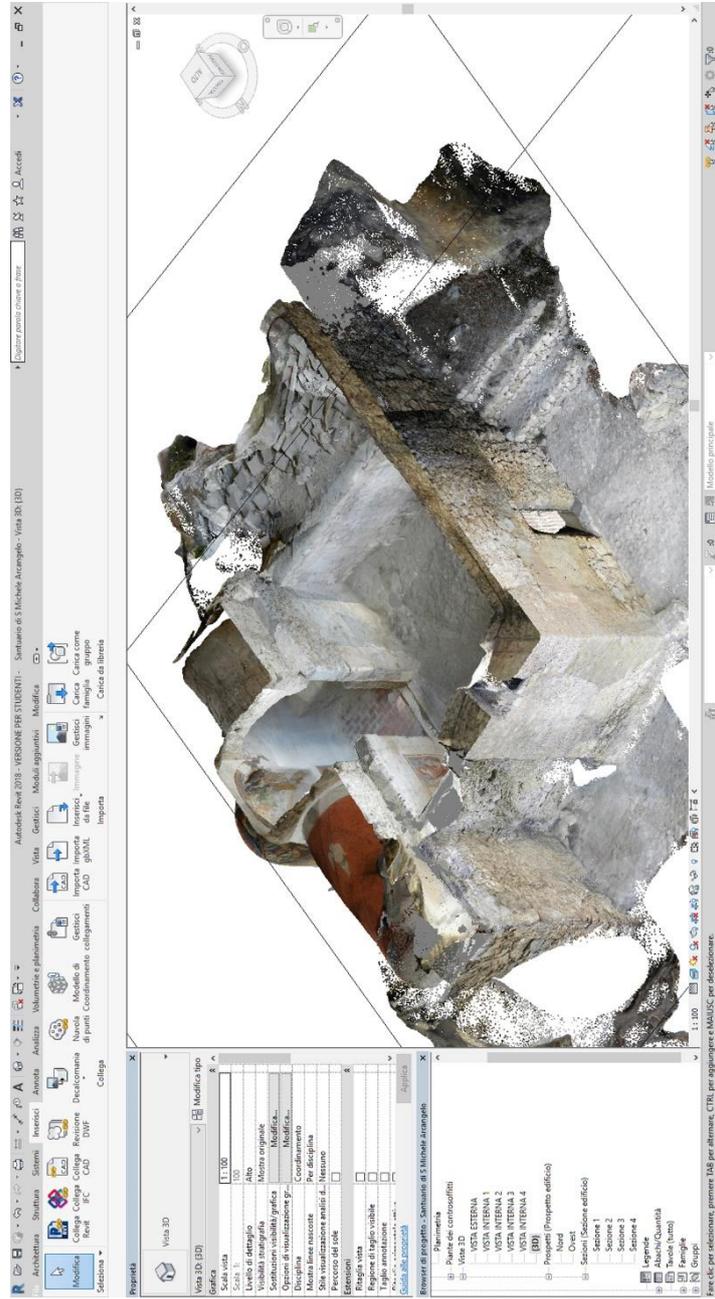


Figura 84. Modello BIM collegato al mosaico fotogrammetrico. Caso 3.

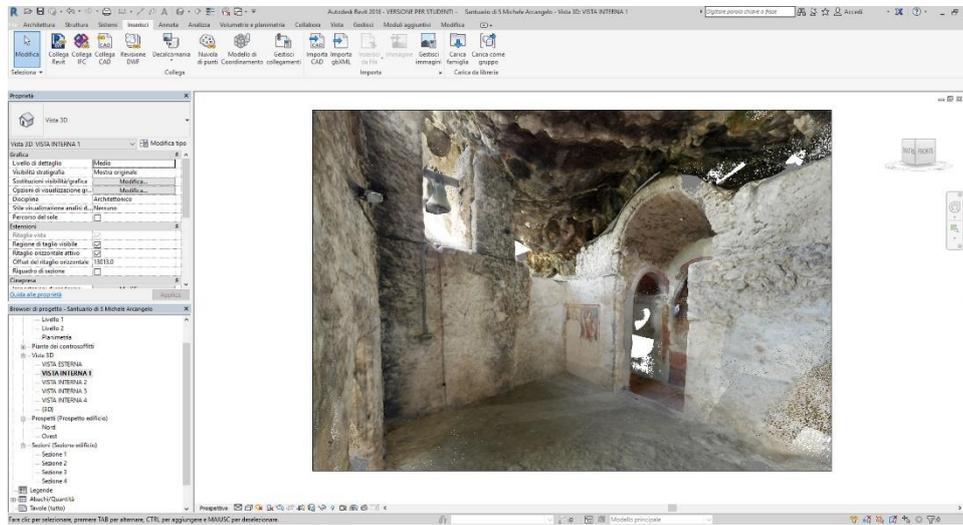


Figura 85. Verifica visiva, in ambiente BIM, della congruenza delle misure della nuvola di punti rispetto alle immagini collegate. Caso 3.



Figura 86. Sezione trasversale con collocazione delle opere pittoriche. Caso 3.

I processi sopra descritti, seppur assistiti da applicativi specialistici assolutamente performanti, richiedono molte ore/uomo per la pulitura delle immagini da dati ultronei, la corretta selezione dei punti, la verifica della consistenza della sovrapposizione delle immagini e, in ultima istanza, una verifica complessiva sulla presenza di “falsi positivi” come capitato spesso, in questo specifico caso di studio, con le ragnatele presenti agli angoli delle murature o zone d’ombra, amplificate dalla presenza di patine biologiche scure.

Una volta definito il modello, si è passati alla definizione delle *location* (fig. 87), con le prevedibili difficoltà connesse alla definizione della <room> in un contesto geometricamente complesso come questo edificio, in quale nelle sua veste sfoggia secoli di sovrapposizioni, modifiche e rimaneggiamenti. A differenza dei precedenti casi di studio, in queste simulazioni è stato necessario impostare come obiettivo-base il mantenimento di aree libere per il passaggio, viste le ridotte dimensioni a disposizione degli operatori e delle attrezzature. Pertanto, come descritto in (fig. 88) nella prima settimana è stato ritenuto preferibile iniziare dal transetto e dall’abside, in maniera tale da liberare il braccio lungo del transetto il prima possibile, e dotare così l’area absidale di un utile spazio per la gestione dei materiali necessari alle pitture e consolidamenti. Nella seconda settimana quindi, le lavorazioni a completamento della zona absidale hanno potuto fruire di “ampie” zone cuscinetto laterali mentre, all’interno della sala, era possibile procedere parallelamente sulle pareti dell’iconostasi, ottimizzando gli spazi per la logistica.

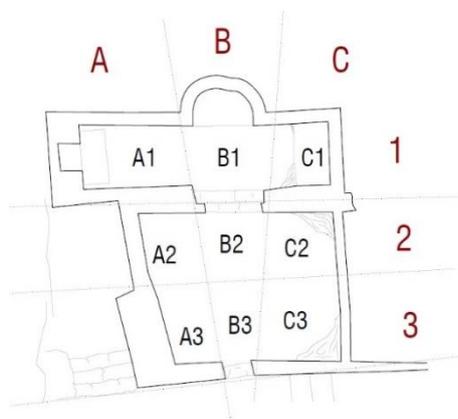
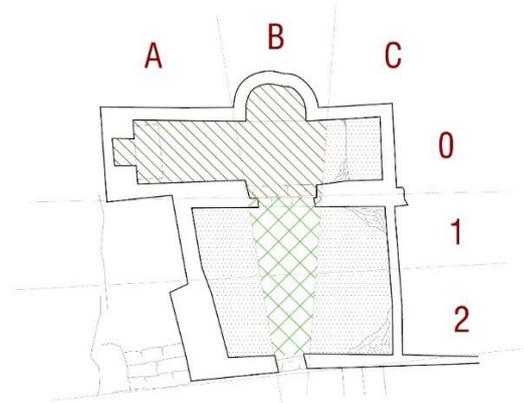
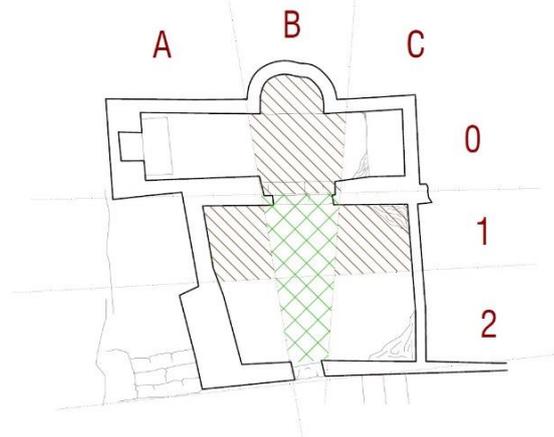


Figura 87. Definizione delle location. Caso 3.

Caso 3) planimetria, sett.25, IV di cantiere, fino al 20/06



Caso 3) planimetria, sett.26, V di cantiere, fino al 27/09



- Area stoccaggio materiali e attrezzature
- Area ingresso e passaggio
- Puliture e consolidamenti

Figura 88. Definizione planimetrica delle location. Caso 3.

5.3.3 Conclusioni

Le condizioni riscontrate nella gestione di questo processo realizzativo sono state al limite del proibitivo sin dalla parte meta-progettuale dove, per rispettare le stringenti condizioni di budget e di tempo, è stato necessario rinunciare a diverse voci, limitandosi alla considerazione delle sole lavorazioni ritenute indispensabili per la corretta conservazione dell'opera d'arte.

D'altronde, era molto importante dimostrare la validità del metodo in un caso così particolare in modo che, potendo contare su programmazioni affidabili, sia possibile convincere eventuali finanziatori sulla *effettiva fattibilità* di auspicabili interventi futuri. L'obiettivo di ottimizzare la catena logistica è stato raggiunto mediante la definizione accurata della WBS di ogni *location* e dei progressivi stati di avanzamento, permettendo così una verifica iterativa e puntuale dei viaggi da valle a monte e, soprattutto, razionalizzare i contenuti del trasporto. Il cantiere è stato completato in anticipo rispetto a quanto verificato dal sistema ad agenti in quanto, non avendo nessun parametro di riferimento rispetto alle prestazioni delle CREW in contesti del genere, a favore di sicurezza era stato imposto alla base della simulazione un fattore "γ" (come di consueto nell'ambito della progettazione strutturale), pari all'aumento medio del 20% della durata delle attività prevista.

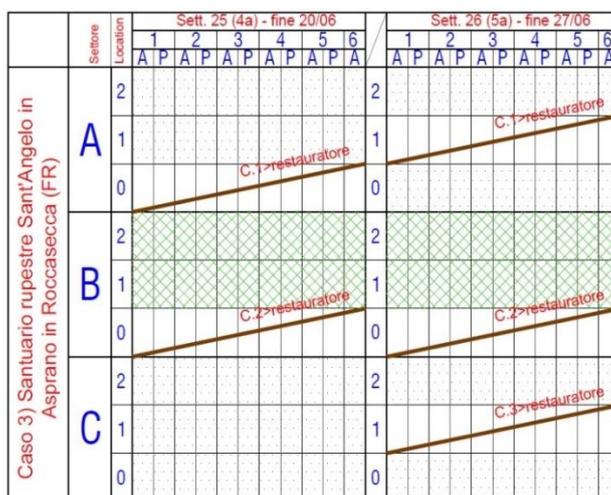


Figura 89. Pianificazione dei lavori nelle due settimane caratterizzate dal massimo tasso di occupazione, rappresentazione LOB secondo previsioni del sistema Agent-Based, Caso 3.

6. Conclusioni: possibilità della metodologia sperimentata nell'ottimizzazione dei processi realizzativi

Le motivazioni della ricerca nascono dalla costante osservazione di fenomeni che affliggono tanto la realtà dell'architettura minore, quanto la realizzazione delle grandi opere le quali, nella propria essenza, non solo vanno a soddisfare un'esigenza contingente ma, grazie alla potenza del messaggio che veicolano, caratterizzano la cultura di un popolo se non, addirittura, di un'epoca¹⁰⁴.

Queste riflessioni, dapprima limitate a considerazioni di carattere generale riguardo importanti opere degli anni '90, sono state poi estese, nel primo capitolo, a esempi notevoli catalogati in ordine cronologico decrescente. Qui è stato possibile verificare come, all'accrescere delle prestazioni richieste dai sempre più complessi quadri esigenziali, l'uomo-progettista abbia risposto in termini concettuali prima e tecnologici poi, con l'introduzione di sempre più innovative metodologie che, suffragate da adeguati *strumenti* siano riuscite, nell'immediato, a supplire alle esigenze del caso poi, con la loro dirompenza, a costituire la "*sfida, che impone una nuova visione*" (Saggio, *Op. Cit.*).

Nell'ottica di meglio comprendere la *visione* del nostro tempo, nel secondo capitolo sono state analizzate le metodologie necessarie alla gestione del progetto complesso evidenziando come, nella specificità della realizzazione dell'architettura, sia necessario un rapido cambio di mentalità, passando dai semplificati approcci lineari e sequenziali verso l'analisi dello *spreco*, nell'ottica di snellire le inefficienze di processo e permettere, grazie alle risorse materiali e immateriali risparmiate, di incidere positivamente sul risultato, in termini di qualità, del progetto di architettura.

Tali metodologie snelle, oltre alle accuratissime analisi sulla parcellizzazione della produzione e sull'ottimizzazione delle fasi, intese come la realizzazione di un flusso produttivo circolare di attività condivise a livello di conoscenza e a livello operativo, mirano concettualmente a trovare una *armonia* tra i fattori di produzione misurata, ad esempio, dalla LOB.

¹⁰⁴ Esplicativo in tal senso è il concetto, nato e radicato nella cultura filosofica tedesca, della *Weltanschauung*. Cfr. Adorno, P (1985) *L'arte italiana*, Vol. I, Tomo II, D'Anna editrice, Firenze, Messina.

Queste ad oggi, seppur nella loro logica innovativa, non risultano essere ancora adeguate alla dinamicità dei processi realizzativi dell'architettura perché, nella modularizzazione delle loro informazioni, si basano totalmente sulla *conoscenza implicita* dell'esperto addetto alla redazione dei programmi.

Tale condizione implica che ogni programmazione è condizionata dal *pregiudizio* dell'autore, maturato sulla rilettura soggettiva della propria esperienza che, pertanto, è unica e irripetibile.

Dal punto di vista della creatività e dello sviluppo del *giudizio consapevole* dell'intelletto umano, questo aspetto rappresenta un indubbio vantaggio mentre, dal punto di vista prettamente gestionale è un pesante limite. Difatti le programmazioni, una volta stabilite con raziocinio una strategia a monte, necessitano di procedure standardizzate concepite in maniera quanto più *comprensibile e condivisibile* possibile per poter trasformare l'ambito dell'edilizia, dominato dall'incertezza, in un luogo caratterizzato da processi produttivi con prestazioni certe, come avviene nel mondo della manifattura.

Per raggiungere questi obiettivi, è necessario quindi collegare le metodologie della costruzione snella con modelli digitali simulativi, al fine di poter verificare la possibilità di prefigurare, partendo da dati noti – anche ottenuti dalla conoscenza implicita dell'esperto – gli scenari operativi possibili, potendo confrontarsi con situazioni rischiose in ambiente *virtuale*, in luogo dei pericolosi e costosi imprevisti nel corso *reale* dell'opera. Il tema poi, non può che diventare più sottile ed interessante se la simulazione inizia a dare risultati congruenti quando non si conoscono, nelle fasi iniziali, le condizioni che governano il comportamento di un sistema (Schank et Abelson, 1977).

Per arrivare a tale livello di astrazione, fin dagli albori dell'applicazione delle tecniche di intelligenza artificiale si è data particolare attenzione allo sviluppo dei sistemi Multi-Agente, considerando perciò la loro spiccata vocazione nel simulare situazioni complesse anche partendo da comportamenti semplici. Nella recente passato però, la loro diffusione è stata limitata agli ambienti prossimi al mondo della ricerca, a causa soprattutto della limitatezza delle macchine unita al costo delle attrezzature necessarie.

Oggi, considerando i notevoli passi in avanti compiuti dall'informatica, e al progressivo adeguamento dell'infrastruttura necessaria digitale indispensabile a concretizzare il profondo cambio di paradigma, indispensabile

ad un settore così in crisi, è possibile *aumentare* le capacità cognitive degli agenti avvicinandoli sempre più ai ragionamenti umani, postulato di partenza dell'intelligenza artificiale stessa.

In un settore complesso come l'architettura, questo traguardo può essere raggiunto con l'interconnessione tra la costruzione virtuale dell'edificio basata su modelli informativi e questi sistemi ad Agenti, potenziati con regole di carattere statistico e ulteriori tecniche *biomimetiche* di intelligenza artificiale. Difatti, la potenza di calcolo raggiunta anche dai piccoli dispositivi, e la diffusione della rete internet a banda larga, consente oggi di iniziare a catalogare grandi moli di dati in maniera statisticamente organizzata e rilevante (cd. "*BigData*").

Così è possibile iniziare a acquisire le *preferenze di scelta* non solo sui motori di ricerca per orientare le campagne pubblicitarie (o elettorali¹⁰⁶) ma anche supportare i progettisti nelle fasi di scelta delle soluzioni progettuali oppure, in fasi di strategie operative, in fase di realizzazione, basandosi sui dati accumulati grazie ad esperienze di processi realizzativi, rendicontati mediante raccolte fotografiche e comparazioni con modelli BIM (Han et Fard, 2017) e quindi avere la base necessaria per verificare le scelte progettuali attraverso la simulazione (Scherer et Schapke, 2011). Inoltre, all'epocale possibilità data dal fortunato connubio tra statistica e informatica, si aggiungano tutte quelle tecniche quali le Reti neurali artificiali, gli Algoritmi Genetici e le Concettualizzazioni *Fuzzy* che, sebbene anche queste non abbiano raggiunto un adeguato livello di maturità, sono già di uso corrente presso i maggiori laboratori di ricerca del settore, quindi applicate in casi reali quali la gestione della produttività di cantiere (Mirahadi et Zayed, 2016), oppure la previsione dei costi medi di costruzione (Sonmez, 2011).

Altro presupposto per l'acquisizione dei dati progettuali, necessaria per la dotazione di informazioni di cui necessitano questi sistemi è la connessione alla rete-dati di dispositivi fisici, l'internet delle cose (*Internet of Things* – IoT): a questo stadio, oggetto anche di importanti campagne ministeriali, è possibile avvicinare ancora di più l'Agente dall'ambiente digitale all'ambiente reale,

¹⁰⁵ Non si trascuri che la persistente crisi, che in numeri assoluti e relativi ha superato i danni del "Venerdì nero" del '29, è nata a seguito dell'esplosione delle sofferenze del settore immobiliare americano.

¹⁰⁶ Cfr <<https://www.wired.it/internet/social-network/2018/04/04/kogan-come-funzionava-cambridge-analytica/>>

aprendo così la possibilità a strade inedite quali costruzioni reattive, micro-robotica di cantiere oppure esplorare le frontiere dell'applicazione degli *esoscheletri*, nell'ottica di una sempre maggiore interazione uomo/macchina.

Adesso che queste utopie scientifiche iniziano ad essere sempre più presenti e, addirittura, pervasive nella nostra vita quotidiana, si capisce bene come il modello presentato è ben lontano dalle potenzialità che questi sistemi possono esprimere. L'intento della ricerca, a maggior ragione, era perciò in prima istanza indirizzato verso la valutazione dell'attualità e della obsolescenza delle più diffuse metodologie di gestione di processi di realizzazione, tematica molto influente sulle effettive necessità del processo edilizio (affetto da un pervicace tradizionalismo) e quindi, da qui, passare all'individuazione della *visione* necessaria per interpretare i bisogni della nostra epoca: e questa visione non può che non essere digitale.

Tale modello quindi è dapprima la dimostrazione dell'importanza della transizione digitale e della urgente necessità di importare, nella filiera edilizia, un approccio 4.0, dove la connessione tra la realtà e i dispositivi virtuali diventi un *continuum* capace di sedimentare dati, informazioni, conoscenza fino, ad un livello ancora più alto di astrazione, esperienza.

Bibliografia

Capitolo 0

- Clausing, D (1994). Total quality development: a step-by-step guide to world class concurrent engineering. ASME Press, New York.
- Fischer, M, Kunz, J (2004) The Scope and Role of Information Technology in Construction, technical Report, Center for integrated facilities engineering (156) Stanford university, USA.
- Froese, T M (2010) The impact of emerging informatization technology on project management, in Automation in Construction (19), p. 531-538.
- Koskela, L, Howell, G, Pikas E, Dave, B (2014). If CPM is so bad, why have we been using it so long? 22nd Annual Conference of the International Group for Lean Construction, Oslo, Norway, 25 - 27 July 2014, Akademika forlag, p. 27 - 37.
- Koskela, L, Ptkas, E, Nitranen, J, Ferrantelli, A, Bhargav, D (2017) On epistemology of construction engineering and management, in LC3 2017 vol. II - Proceedings of the 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC), Walsh, K, Sacks, R, Brilakis, I (eds.), Heraklion, Greece, p. 169-176.
- Pascual, A C (1998) Museo Guggenheim Bilbao amando, in Journal of Constructional Steel Research, 46 (1-3), p.87.
- Saggio, A (2007) Lo strumento di Caravaggio, Kappa, Roma, p.34.

Capitolo 1

- Baldrati, B (2014) La cupola della Basilica di San Pietro in Vaticano. Il cantiere e il sistema costruttivo, Edizioni Studium, Roma, p.42.
- Baldrati, B, (2014) *ibidem.*, p.7.
- Barry J., Kemp, A (2006) Ancient Egypt, Anatomy of a Civilization, Routledge, USA, 2006, p. 302-336.
- Baluganti, A (2009) Impresa Sicura: l'uomo costruttore di sicurezza, Quaderni di Fabbrica Ethica, n.5, Regione Toscana, p. 20-45.
- Berlyn, P, Fowler, C, (1851), The Crystal palace, its architectural history and construction marvels, Getty research institute, London <<https://archive.org/details/crystalpalaceits00berl>> ultimo accesso il 25/09/2017.
- Bolpagni, M (2013) The implementation of BIM within the public procurement, VVT Technology, Esopo (FIN).
- Bonelli, R, Bozzoni, C, Franchetti-Pardo, V (2006) Storia dell'architettura medievale, parte II, XIII secolo, Laterza Editore, Roma-Bari, 2007, p.206.
- Bonelli et al., *ibidem*, pp. 200.
- Bozzoni, C, Franchetti-Pardo, V, Ortolani, G, Viscogliosi, A (2006) L'architettura del mondo antico, Laterza Editori, Bari.
- Brush, K, Draper, P, Raguin, V (1995) Artistic Integration Inside the Cathedrals, Social Consensus Outside? in Artistic Integration in Early Gothic Churches, University of Toronto Press, p. 214-35.
- Bussi, L, Carusi, M, *a cura di* (2008) Nuove ricerche sulla gran cupola del tempio vaticano, Edizioni Preprogetti - Aracne Editrice, Roma.
- Bull, J, Gupta, A, Mumovic, D, Kimpian, J, (2014) Lyfe cycle and carbon footprint of energy efficient refurbishments to 20th century UK school buildings in International Journal of Sustainable Built Environment, Vol. 3, p. 1-17.
- Cajano, E, *a cura di* (2006) il sistema dei forti militari a Roma, Gangemi Editore, Roma, p. 27-74.
- Campisi, R (2014) L'invenzione della stampa e lo sviluppo della scienza, ne *Il Nuovo Areopago*, n. 1-2, anno 33, p. 83-94.
- Cantarella, E, Guidorizzi, G (1998) La cultura della storia, Einaudi scuola, cap. 17-18.
- Carbonara, G (1979) Iussu Desiderii. Montecassino e l'architettura campano-abbruzzese nell'undicesimo secolo, Università degli Studi di Roma, Istituto di Fondamenti dell'Architettura, p. 62.
- Carrara, G, Cocomello, P, Paoluzzi, A (1980) Modelli per l'Analisi del Sistema Tipologico Ambientale, Roma, Tipografia E.S.A.

- Carrara G, Fioravanti A. (2001). Improving design quality of complex building systems by means of ICT enhanced collaboration. In: Carrara G., Fioravanti A., Kalay Y.E. (Eds), Collaborative Working Environments for Architectural Design, p. 3-18.
- Carrara, G, Fioravanti, A, Loffreda, G, Trento, A (2014), Conoscere, collaborare, Progettare; teoria tecniche e applicazioni per la collaborazione in architettura. Gangemi Editore, Roma, p. 29.
- Carrara et al.(2014b), *ibidem*, p. 135.
- Carrington, P (2002) Deva Victrix: Roman Chester Re-assessed, Chester, Chester Archaeological Society, p.45.
- Converso, S, Bonatti, F (2006) Parametric Model for Architectural Design in Game Set and Match: On Computer Games, Advanced Geometries, and Digital Technologies, edited by Kas Oosterhuis and Lukas Feireiss, Rotterdam: Episode Publishers, p. 242–247.
- Creuza B A, Alencar, M L H, de Miranda Mota, C. M. (2017) Project procurement management: A structured literature review, in International Journal of Project Management, Vol. 35, Issue 3 (2017) p. 353-377.
- Crook, J. (1975) Consilium principis: Imperial councils and counsellors from Augustus to Diocletian. New York: Arno Press, p. 25.
- Crotty, R (2012). The Impact of Building Information Modelling: Transforming Construction. London: SPON/Routledge, p. 72.
- Di Pasquale, S (2002) Il documento-programma di Brunelleschi in La costruzione della cupola di Santa Maria del Fiore, Marsilio Editore, Venezia, p. 88.
- Eastman, C, Pisher, D, Lafue, G, Lividini, J, Stoker, D, Yessios, C (1974) An Outline of the Building Description System, Research Report of the Institute of Physical Planning, Carnegie-Mellon University of Pittsburg – USA.
- Eastman, C, Teicholz, P, Sacks, R, Liston, K (2011) BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors, John Wiley and Sons, II ed., USA, p.203.
- Eck, W. (2003) Cura, curators. In Brill's new pauly: Encyclopaedia of the ancient world. Leiden/Boston: Brill.
- Erlande-Brandenburg, A, Pernoud, R, Gimpel, J, Bechmann, R, (1988) Villard de Honnecourt. Disegni. Jaca Book, Milano 1988.
- Frampton, K, (2007) Storia dell'architettura moderna, terza edizione, Zanichelli editore, Bologna, p. 22.
- Giudici, V.L., Spinelli, S., Chiarugi, L. (2017) Arte Multimediale, Le Monnier Scuola, Torino, , pp. 152 <<http://www.mondadorieducation.it/libro/vittorio-l-giudici-s-spinelli-l-chiarugi/arte-multimediale/120900035910#/68/>>.
- Guiffrey, J, (1892) Comptes des bâtiments du roi sous le règne de Louis XIV, 5 vols., Paris, Imprimerie Nationale, 1880–1890.

- Hidaka, K, Kaneshige, Y, Kato, S, Hara, T (2008) Finite Element Structure Analysis on Hagia Sophia, in *Worlds Heritage study research* 1/2, p. 34-49.
- Hussey-Pailos, R S (2005). *Construction of the Top of the Egyptian Pyramids: An Experimental Test of a Levering Device*, Gainesville, FL: University of Florida, ultimo accesso 23 December 2016.
- Janin, R (1950), *Constantinople Byzantine*, 1^a ed., Paris, Institut Français d'Etudes Byzantines, p. 41.
- John, J (1990) *The Master Masons of Chartres*. London.
- Kapheim, K, M, Pan, H, Li, C, Salzberg, S, Puiu, D [...] (2015) Genomic signatures of evolutionary transitions from solitary to group living, in *Science*, 48 (6239), p. 1139-1143.
- Kidson, P, (1995) *Enciclopedia dell'arte medievale*, <http://www.treccani.it/enciclopedia/gervasio-di-canterbury_%28Enciclopedia-dell%27-Arte-Medievale%29/> ultimo accesso il 20/10/2017.
- Kieran, S, Timberlake, J, (2004) *Refabricating Architecture. How manufacturing methodologies are poised to transform building construction*. McGraw-Hill, p.9.
- Kleiner, F S, Mamiya, C J, (2008) *Gardner's Art Through the Ages. Volume I, Chapters 1-18* (12th ed.). Mason, OH: Wadsworth, p. 329.
- Kleiner, F S *a cura di* (2016), *Gardner's Art through the Ages: The Western Perspective*, 15th editions, Volume 1, Cengage Learning, p. 233-234.
- Knotten, V, Svalestuen, F, Hansen, G K, Laendre, O (2015) Design management in the building process - a review of current literature, *Procedia Economics and Finance* 21, p. 120-127.
- La Rocca, E (1990) Il linguaggio artistico e ideologia politica a Roma in età repubblicana, in *Roma e l'Italia. Radices imperii*, Milano, p.405-406.
- Masiero, R, Zannoner, D (2013) La sfida della cupola in *Il contributo italiano alla storia del pensiero - Tecnica*, enciclopedia Treccani, Roma.
- Moretti, L (1953) Strutture e sequenze in Spazio, *Rassegna delle Arti e dell'Architettura*, n.7 dic. 1952-gennaio 1953.
- Nicolosi, G, (1973) Creatività e Tecnologia in *Rassegna di Architettura e Urbanistica*, n.26-27.
- Novembri, G (1987) *Progettazione Edilizia e Tecniche dell'Artificial Intelligence*, Dipartimenti di Tecniche dell'Edilizia e del controllo ambientale, Sapienza, Università di Roma, p. 53-55.
- O'Connor, J J, Robertson, E F (1999) *Antemio di Tralle*, MacTutor, University of St Andrews, Scotland, 1999.
- Partouche, R, Sacks, R, Bertelsen, S, (2008) *Craft Construction, Mass construction, Lean construction: lessons from the Empire State Building*, electronic proceedings of the the 16th IGLC conference, Manchester (UK).

- Pawley, M, (1990) *Theory and Design in the Second Machine Age*, Blackwell Pub, p.97.
- Peachin, M, (2004) *Frontinus and the curae of the curator aquarum*, Heidelberg Althistorische Beiträge und Epigraphische Studien 39, Stuttgart, Franz Steiner Verlag, p. 12.
- Piano, R (2005a) *Giornale di bordo*, Passigli Editore, Antella, Firenze, p.196. ISBN 883680898.
- Piano, R (2005a) *ibidem*, p. 197.
- Recht R (2000) *trad. da R. Cassanelli, il disegno dell'architettura. Origine e funzioni*, Jaca Book, Milano, 2000, p.48.
- Romanelli, P (1933) *Isidoro di Mileto*, Enciclopedia Italiana Treccani.
- Schwab, C (2016) *La quarta rivoluzione industriale*, Franco Angeli, p. 66, 78.
- Silenziano, P (1994) *Descriptio Ecclesiae Sanctae Sophiae*, tratto da Enciclopedia dell'arte medievale Treccani, voce Enciclopedia "Costantinopoli" di C. Barsanti.
- Schirollo, L, *a cura di* (1979), *Schiavitù antica e moderna. Problemi Storia e Istituzioni*, Guida Editori, Napoli, p. 260.
- Stocks, D A, (2003) *Experiments in Egyptian Archaeology: Stoneworking Technology in Ancient Egypt*. Routledge.
- Sqour, S (2016) *Influence of Hagia Sophia on the Construction of Dome in Mosque Architecture*, proceedings of the 8° Int. Conf. On Latest Trends in Engineering and Technology – ICLTET, 5-6 May 2016, Dubai, UAE, p. 5-12.
- Thomas Aquinatis, *Summa Contra Gentiles*, Lib. I, Cap. I, § 2-3. Textum electronicum praeparavit et indexavit Ricardo M. Rom n, S. R. E. Presbyterus, Bonis Auris, <[http://www.documentacatholicaomnia.eu/03d/12251274,_Thomas_Aquinas,_Summa_Theologiae_\(p_Centi_Curante\),_IT.pdf](http://www.documentacatholicaomnia.eu/03d/12251274,_Thomas_Aquinas,_Summa_Theologiae_(p_Centi_Curante),_IT.pdf)> ultimo accesso il 15/08/2017.
- Tiberghien, F (1662) *Versailles, Le chantier de Louis XIV, 1662-1715*, Perrin, p. 135-142.
- Walker, D. H. T, Dart, C. J. (2011). *Frontinus—a project manager from the Roman Empire era*. *Project Management Journal*, 42(5), p. 4–16.
- Ward-Perkins, J B, (2008) *Architettura romana*, Electa, 2008, p.12.
- Willis, C, Friedman, D, (1998). *Building the Empire State*. New York: W.W. Norton, p.28.
- Willis, C, Friedman, D, (1998). *Ibidem*, p.204.
- Woodbury, R (2010) *Elements of Parametric Design*, Routledge.
- Zuffo, R G, (2012) *Taylor is dead, Hurray Taylor! The 'human factor' in Scientific Management: between ethics, scientific psychology and common sense* in *Journal of Business and Management*, 17, 1, p.23-41.

Capitolo 2

- AA.VV. (2017) *Reinventing Construction: a route to higher productivity*, McKinsey Global Institute.
- Arditi, D, Sikangwan, P, Tokdemir, O B (2002), Scheduling system for high rise building construction, in *Construction Management and Economics*, Vol 20 Issue 4, p. 353-364.
- Baccarini, D. (1996), The concept of project complexity – a review, in *International Journal of Project Management*, 14(4), 201–204.
- Ballard, G, Howell, G, Castern, M (1996) PARC: a case study in *Proceedings of the 4th Annual conference of the international Group for Lean Construction*, University of Birmingham, Birmingham, UK.
- Bhuiyan, N, Baghel, A (2005) An overview of continuous improvement: from the past to the present, in *Management Decision*, Vol. (43) n. 5, pp.761-771.
- Carrara, G, Fioravanti, A, Loffreda, G, Trento, A (2014), *Conoscere, collaborare, Progettare; teoria tecniche e applicazioni per la collaborazione in architettura*. Gangemi Editore, Roma, ISBN 9788849229554, p. 29.
- Carrara et al. (2014c), *ibidem*, p.32.
- Carrara et al. (2014d), *ibidem*, p.33.
- Chapman, C B, (1990) A risk engineering approach to project risk management, in *International Journal of Project Management*, Vol 8 (1), p. 5-16.
- Chan, D W N, Kumaraswamy, M (1997) A comparative study of causes of time overruns in Hong Kong construction projects, in *International Journal of Project Management* V. 15, p. 55–63.
- Churchman, C W (1967). Wicked problems. In *Management Science*, 14 (4), B-141 and B-142.
- Chung, K S K, Crawford, L (2016) The Role of Social Networks Theory and Methodology for Project Stakeholder Management, in *Procedia – Social and Behavioural Sciences* (226), pp. 372-380.
- Ciribini, A L C (2016) *BIM e Digitalizzazione dell'ambiente costruito*, Grafill editore, Palermo, p. 73.
- Clark, W (1925) *The Gantt Chart*. The Ronald Press Co., New York, pp. 84.
- Croom, S , Romano, P, Giannakis, M (2000) Supply chain management: an analytical framework for critical literature review, in *European Journal of Purchasing & Supply Management* 6, p. 67-83.
- Dewlaney, K S, Hallowell, M R, Fortunato III, B R, (2011) Safety risk quantification for high performance sustainable building construction, in *Journal of Construction Engineering Management*, 138 (8), p. 964–971.

- Dewlaney, K S, Hallowell, M R, Fortunato III, B R, (2011) Safety risk quantification for high performance sustainable building construction, in *Journal of Construction Engineering Management* 138 (8) 964–971.
- El Sayed, K M, Fioravanti, A, Squasi, F (2017) Low-cost housing in Shock! Sharing of Computable Knowledge, proceedings of the 35th eCAADe International Conference, Rome, 20-22 oct 2017, p. 167-174.
- Flood, J (2011), Foresight: A Graphically-Based Approach to Modeling Construction Processes, Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference.
- Frontera, M (2017) Top 50 Architettura/1. One Works strappa lo scettro allo studio di Renzo Piano in *Edilizia e Territorio*, quotidiano in line de “Il Sole 24 Ore”.
- Guida, P (2015) *Il Project Management*. Secondo la Norma UNI ISO 21500, Franco Angeli Editore, p.160.
- Hammarlund, Y, Josephson, P-E (1991) Sources of Quality Failures in Building. Paper 1991:1, Chalmers University of Technology, Department of Building Economics and Construction Management.
- Harrington, H J (1991) *Business Process Improvement*, McGraw-Hill, New York.
- Hegazy, T. (2001). “Critical path method-line of balance model for efficient scheduling of repetitive construction projects.” *Transportation Research Record*, 1761: 124-129.
- Jiang, L, Leicht, R M, (2015) Automated Rule-Based Constructability Checking: Case Study of Formwork, in *Journal of Management in Engineering*, Vol 31 Issue 1.
- Kenley, R, Seppanen, O (2009) Location-Based management of Construction Projects: part of a new typology for project scheduling methodologies, in Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, Rossetti, M D, Hill, R R, Johansson, B, Dunkin, A e Ingalls G. eds.
- Kieran, S, Timberlake, J, (2004) *Refabricating Architecture*. How manufacturing methodologies are poised to transform building construction. McGraw-Hill, p.44.
- Koskela, L (1992a) Application of the new construction Philosophy to Construction, Technical Report n.72, CIFE, Stanford university, CA, p. 30.
- Kunz, W, Rittel, H (1970) Issues as elements of information systems, Working paper, Berkeley: Institute of Urban and Regional Development, University of California, Berkeley.
<<https://www.cc.gatech.edu/~ellendo/rittel/rittel-issues.pdf>> ultimo accesso 12/05/2017.
- Laufer, A, Tucker, R L (1987), Is construction Management Really Doing its Job?, in *Construction Management and Economics*, 5, 243–266.
- Lumsden, P. (1968), *The Line-of-Balance Method*, Pergamon Press Limited, Industrial Training Division.

- MacNeice, E H (1951) *Production Forecasting, Planning and Control*. John Wiley & Sons, Inc., New York. p.84.
- Moine, J, (2013) 3D Work Breakdown Structure method in PM World Journal, Issue 2, vol. 4, 1-26.
- Naor, M, Bernardes E S, Comanm A, (2013) Theory if constraints: is it a theory and a good one? in *International Journal of Production Research*, Vol 51, issue 2, p. 542-554.
- Novembri, G, Fioravanti, A, Rossini, F L, (2017) Actor-Based modelling design intensions on BIM systems, in *Re-shaping the construction industry*, Ciribini, A, Alaimo, G, Capone, P, Daniotti, B, Dell'Osso, G, Nicolella, M (eds.), Maggioli Editore, Sant'Arcangelo di Romagna (RN), ISBN 9788891624864, p.30-39.
- Peer, S, (1974), *Network Analysis and Construction Planning*, *Journal of the Construction Division-ASCE*, Vol 100, Issue 3, pp. 203-210.
- Remon, F A, Sherif, M H (2013) Applying lean thinking in construction and performance improvement, in *Alexandria Engineering Journal*, 52, Alexandria university, p. 679-695.
- Russel, A D, Wong, W, (1993) New generation of Planning Structures. *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol 119, Issue 2, p. 196-214.
- Sacks, R, Radosavljevic, M, barak, R (2010) Requirements for building information modeling based lean production management systems for construction, *Automation in Construction*, 19 (5) p. 641-655.
- Solihin, W, Eastman, C, (2015) Classification of rules for automated BIM rule checking development, in *Automation in Construction*, 53, p. 69-82.
- Tronchia, S, (2001a) *Il Project Management, come gestire il cambiamento e l'innovazione*, Il sole 24 Ore, Milano, p.28.
- Tronchia, (2001b), *ibidem*, p.50.
- Tronchia, (2001c), *ibidem*, p.54.
- Walewski, J, Gibson, E G, (2003) International project risk assessment: methods, procedures, and critical factors, in *Center Construction Industry Studies Report*, 31, University of Texas, Austin, 2003.
- Wilson, J M, (2003) Gantt Charts: A Centenary Appreciation, in *European Journal of Operational Research*, n. 140, pp. 430-437.
- Xiang, W-N, (2013) working with wicked problems, in *socio-ecological systems: Awareness, acceptance and adaptation in Landscape and urban planning* (Editorial) 110, pp. 1-4.

Capitolo 3

- AA. VV. (2017) Statistiche su iscritti e pensionati, redditi e volume di affari. Report "Inarcassa in Cifre", Inarcassa, Roma, p. 17.
- Aires, M D M, Gámez, M C R, Gibb, A (2010) Prevention through design: the effect of European Directives on construction workplace accidents, in *Safety Science*, 48 (2), p. 248–258.
- Akinci, B, Fischer, M, Levitt, R, Carlson, R (2004) Formalization and automation of time–space conflict analysis, in *Journal of Computing in Civil Engineering*, 16 (2) p. 124–134.
- Atkinson, A R, Westall, R (2010) The relationship between integrated design and construction and safety on construction projects, in *Construction Management & Economics*, 28 (9) p. 1007–1017.
- Barry, J, (2014) Integrated project delivery (IPD) for maximizing design and construction consideration regarding sustainability, in *Procedia Engineering*, 95, p. 528-538.
- Benjaoran, V, Bhokha, S, (2010) An integrated safety management with construction management using 4D CAD model, in *Safety Science*, 48 (3) p. 395–403.
- Brace, C, Gibb, A, Pendlebury, M, Bust, B (2009) Health and safety in the construction industry: Underlying causes of construction fatal accidents — external research, Secretary of State for Work and Pensions, Inquiry into the underlying causes of construction fatal accidents, Loughborough University, <<http://www.hse.gov.uk/construction/resources/phase2ext.pdf>>.
- Bynum, P, Issa, R R A, Olbina, S (2013) Building information modeling in support of sustainable design and construction, in *Journal of Construction Engineering Management*, ASCE (139), p. 24–34.
- Carrara, G, Fioravanti, A, Loffreda, G, Trento, A (2014), *Conoscere, collaborare, Progettare; teoria tecniche e applicazioni per la collaborazione in architettura*. Gangemi Editore, Roma, p. 47.
- Carrara, G, Fioravanti, A, Novembri, G (2001) Knowledge-based System to Support Architectural Design, in H Penttila (eds.), *Architectural Information Management, Proceedings of eCAADe 2001 Conference*, Helsinki, p. 80-85.
- Chen, L, Luo, H, (2014) A BIM-based construction quality management model and its applications, in *Automation and Construction* (46), p.64-73.
- Cheng, M Y, Ko, C H, Chang, C H (2002) Computer-aided DSS for safety monitoring of geotechnical construction, in *Automation in Construction* 11 (4) p. 375–390.

- Cheung, S, Cheung, K K W, Suen, HCH (2004) CSHM: web-based safety and health monitoring system for construction management, *Journal of Safety Research*, 35 (2) p. 159–170.
- Ciribini, A L C (2013) *L'information modeling e il settore delle costruzioni: IIM e BIM*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, p. 15.
- Ciribini, A L C (2016) *BIM e Digitalizzazione dell'ambiente costruito*, Grafill editore, Palermo, p. 156.
- Daniotti, B, Lupica Spagnuolo, S, Mirarchi, C, Pasini, D, Pavan, A (2017) An Italian BIM-based portal to support collaborative design and construction. A case study on an enhanced use of information relying on a classification system and computational technical datasheets, in *Shock! Sharing of Computable Knowledge*, proceedings of the 35th eCAADe International Conference, Rome, 20-22 oct 2017, p.67-76.
- De Felice, M. (2016) INAIL, *Relazione Annuale 2016*, sala della Lupa, Palazzo Montecitorio, 05/07/2017 <<https://www.inail.it/cs/internet/docs/alg-relazione-del-presidente-2016.pdf>> ultimo accesso il 20/10/2017.
- Eastman, C, Teicholz, P, Sacks, R, Liston, K (2011) *BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*, John Wiley and Sons, II ed., USA, p.198.
- Fioravanti, A, Rossini, F L, Trento, A (2018) Project Rule-Checking for Enhancing Workers Safety in Preserving Heritage Building, in *Computational Morphologies, Design Rules between Organic Models and Responsive Architecture*, Rossi, M, Buratti, G eds, Springer, p. 71-83.
- Fioravanti, A, Novembri, G, Rossini, F L (2017) Improving Proactive Collaborative Design Through the Integration of BIM and Agent-Based Simulations, in *Shock! Sharing of Computable Knowledge*, proceedings of the 35th eCAADe International Conference, Rome, 20-22 oct 2017, p. 103-108.
- Gambatese, J A, Behm, M, Rajendran, S (2008) Design's role in construction accident causality and prevention: perspectives from an expert panel, in *Safety Science* 46 (4) p. 675–691.
- Garagnani, S (2017) *Apprendimento e formazione nel dominio della digitalizzazione*, Ingenio, 2017 <http://www.ingenio-web.it/Articolo/5563/La_cultura_del_BIM_consapevole.html> ultimo accesso il 19/10/2017.
- Hardin, B, McCool, D (2015) *BIM and Construction Management*, John Wiley & Sons, USA, p. 236.
- Isaac, S, Thas, E. (2016) A statistical model for dynamic safety risk control on construction sites, in *Automation in Construction*, n. 63 pp. 66-78.

- Li, H, Ma, Z, Shen, Q, Kong, S (2003) Virtual experiment of innovative construction operations, in *Automation in Construction* 12 (5) p. 561–575.
- Kam, C, Fischer, M (2004) Capitalizing on early project decision-making opportunities to improve facility design, construction, and life-cycle performance-POP, PM4D, and decision dashboard approaches, in *Automation in Construction*, 13 (1), p. 53–65.
- Mori, Y, Ellingwood, B R (1993) Reliability-based service-life assessment of aging concrete structures, in *Structural Engineering* 119 (5), p. 1600–1621.
- Novembri, G, Fioravanti, A, Rossini, F L (2015) Geometria qualitativa nel “BIM world”. Generazione della *Location Breakdown Structure* per un processo di costruzione sostenibile, in *Sostenibilità ambientale, economia circolare e produzione edilizia*, ISTeA 2015, Milano, p. 502-521.
- Novembri, G, Fioravanti, A, Rossini, F L (2017) Construction time and cost Optimization using A.I. and statistical methods, through Bayes point machines, *Reshaping the Construction Industry*, Ciribini, Alaimo, Capone, Daniotti, Dall’Osso eds., pp. 40-49.
- Oloke, D, Yu,vH, Heesom, D (2007) Developing practitioner skills in construction health and safety management: an integrated teaching and learning approach, in *Journal for Education in the Built Environment* Vol. 2 (1) p. 3–30.
- Paradis, R, Tran, B (2013) Balancing security/safety and sustainability objectives. National Institute of Building Sciences. <http://www.wbdg.Org/resources/balancing_objectives.php> ultimo accesso il 38/09/2017.
- Park, C S, Lee, D-O, Kwon, O-S, Wang, X (2013) A framework for proactive construction defect management using BIM, augmented reality and ontology-based data collection template, in *Automation in Construction*, Vol. 33, p. 61-71.
- Perry, P (2003) *Construction Safety. Questions and Answers: A Practical Approach*, Thomas Telford Publishing, London.
- Qiu Xin (2011) Building information modelling (BIM) adoption of construction project management based on Hubei Jingzhou bus terminal case, *International Conference on Business Computing and Global Informatization*, 2011, p. 282–284.
- Rahman, A R, Alsafouri, S, Tang, P, Ayer S K, Comparing Building Information Modeling Skills of Project Managers and BIM Managers Based on Social Media Analysis, in *Procedia Engineering*, 145, p. 812-819.
- Reason, J (1990) The Contribution of Latent Human Failures to the Breakdown of Complex Systems *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* Vol. 327, No. 1241, *Human Factors in Hazardous Situations* (Apr. 12, 1990), p. 475-484 Published by: Royal Society <www.jstor.org/stable/55319>.

- Reason, J, Hollnagel, E, Paries, J (2006) Revisiting the "Swiss Cheese" model of accidents, eurocontrol experimental centre, EEC Note n.13/06, 2006 <https://www.eurocontrol.int/eec/public/standard_page/DOC_Report_2002_017.html>.
- Rossini, F, Fioravanti, A, Novembri, G, Insola, C (2016) "HOLOBUILD: process optimization by the introduction of Mixed Reality in construction site", in Back to 4.0: Rethinking the Digital Construction Industry, Ciribini, A, Alaimo, G, Capone, P, Daniotti, B, Dell'Osso, G, Nicoletta, M (eds.), IStEA, p. 279-288.
- Sabatino, R, Di Muro, A (2015) La progettazione della Sicurezza in Cantiere, INAIL, p.40.
- Simon, H A, Simon, P A (1962) Trial and error search in solving difficult problems: evidence from the game of chess in System Research and Behavioural Science, Vol.7 Issue 4, Wiley, p. 425-429.
- Stefani, M (2015) Il BIM e la sicurezza nella fase progettuale e in cantiere, INGENIO n. 31, 2015, <http://www.ingenioweb.it/Articolo/2652/Il_BIM_e_la_sicurezza_nelln_fase_pr_ogettuale_e_in_cantiere.html> ultimo accesso il 29/07/2017.
- Shingo, S. (1984). A study of the Toyota production system from an industrial engineering viewpoint. Tokyo: Japan Management Association.
- Succar, B (2009) Building Information modeling framework: a research and delivery foundation for industry stakeholders, in Automation in Construction, 18, p. 357-375.
- Szymberski, R (1997) Construction project safety planning, Tappi Journal 80 (11), p. 69-74.
- Vaha, P, Hikkila, T, Kilpelainen, P, Jarviluoma, M, Gambao, E (2013) Extending automation of building construction - Survey on potential sensor technologies and robotic applications in Automation in Construction, 36, p. 168-178.
- von Hippel, E (1976) The dominant role of users in the scientific instrument innovation process, in Resilience Policy (5), p. 212-239
- Vries, B D, Verhagen, S, Jessurun, A J (2004) Building management simulation centre, in Automation in Construction 13 (5) p. 679-687.
- Wang. X, Truijens, M, Hou, L, Wang, Y, Zhou, Y (2014) Integrating Augmented Reality with Building Information Modeling: Onsite construction process controlling for liquefied natural gas industry, in Automation in Construction 40, p. 96-105.
- Wang, T, Wang, X, Wang, J, Yung, P, Jun, G (2013) Engagement of Facilities Management in Design Stage through BIM: Framework and a Case Study, Adv. Civ. Eng. 2013 <<http://dx.doi.org/10.1155/2013/189105>> (Article ID 189105).

- William, B L, Allshouse, B, Ledbetter, B, Stukhart, G (1986) Quality management of industrial construction, Annual Quality Congress Transactions, 1986, pp. 632-641.
- Xiangyu W, Love, P, Jeong Kim, M, Park, C-S, Sing, C-P, Hu, L, (2012) A conceptual framework for integrating building information modeling with augmented reality, Automation in Construction, 34, p. 37-44.
- Xue, X, Fan, S (2012) IT supported collaborative work in A/E/C projects: A ten-year review, in Automation in Construction, 21, p. 1-9.
- Zhang, S, Boukamp, F, Teizer, J (2015) Ontology-based semantic modeling of construction safety knowledge: Towards automated safety planning for job hazard analysis (JHA), in Automation in Construction, Vol. 52, pp. 29-41.
- Zhu, W, Whyte, J, Sacks, R (2012) Construction Safety and Digital Design – A Review, in Automation in Construction 22, p. 102-111.

Capitolo 4

- Brooks, R A (1986) A robust layered control system for a mobile robot, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 2 (1), p. 14-23.
- Castelfranchi, C., Falcone, R. (1998) Toward a theory of delegation for Agents-Based systems, *Robotics and Autonomous systems*, 24 (24), pp. 141-157.
- Cordeschi, R (2002) The discovery of the artificial: behavior, *Mind and Machines Before and Beyond Cybernetics. Studies in Cognitive Systems* (28), Springer, p. 180.
- Chen, S.-H. (2005). *Computational Intelligence in Economics and Finance: Carrying on the Legacy of Herbert Simon*. *Information Sciences*, 170, p. 121–31.
- Chou, J-S, Lin, C-W, Pham, A-D, Shao, J-Y (2015) Optimized artificial intelligence models for predicting project award price, in *Automation in Construction* 54, p. 106-115.
- Fioravanti, A, Novembri, G, Rossini, F L (2015) Geometria Qualitativa nel “BIM World”. Generazione della Location Breakdown Structure per un processo di costruzione sostenibile, in *ISTeA: Sostenibilità ambientale, economia circolare e produzione edilizia. La ricerca scientifica nel Settore delle Costruzioni nell’era delle nuove sfide ambientali e digitali*. Alaimo G, Capone, P, Ciribini, A, Daniotti, B, Dell’Osso, G, Nicoletta, M (Eds.), Maggioli Editore, p. 502-521.
- Hegazi, T, Ayed, A (1998) Neural network model for parametric cost estimation of highway projects, *Journal of Construction Engineering Management* 124(3), p. 210-218.
- Ingham, J (1997) What is an Agent? Technical Report #6/99, Centre for Software Maintenance, University of Durham, p.3-10
- Jun, M (2012) Research on the Fish Behaviour Simulation based on Swarm Intelligence, in *Procedia Engineering* 43, p. 547-551.
- Kuhn, T S (2009) *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, opera originale del 1962, trad. in italiano da Carugo, A. Einaudi editore.
- Minsky, M (1985) *The Society of the Mind*, Simon&Schuster, New York.
- Novembri, G (1989) *Progettazione edilizia e tecniche dell'artificial intelligence*, Sapienza - Università di Roma, Dipartimento di Tecniche dell'Edilizia e del controllo ambientale, p. 80.
- Perng, Y-H, Chang, C-L (2004) Data mining for government construction procurement, *Build. Res. Inf.* 32 (4), p. 329-338.
- Schank, R., Abelson, R. P. (1977) *Scripts plans, goals and understanding: An inquiry into human knowledge structures*. New Jersey: Erlbaum, p. 137.
- Simeone, D, Fioravanti A (2012) An Ontology-based template of User-Actor to Support Agent-Based Simulation in Built Environments, in

- CAAD|INNOVATION|PRACTICE Design (6th International Conference Proceedings of the Arab society for Computer Aided Architectural Design (ASCAAD 2012), Manama (Kingdom of Bahrain), 21-23 Feb. 2012, p. 171-179.
- Wooldridge, M, Jennings, N R (1997) Agent Theories, Architectures and Languages: A Survey" in Wooldridge and Jennings Eds., Intelligent Agents. Berlin: Springer-Verlag, 1-22.
- Yau, N-J, Yang, J-B (1998) Case-Based reasoning in construction management, Computation Aided in Civil Infrastructure Engineering 13(2), p.977-984.

Capitoli 5 e 6

- Argenti, M. (2006) L'architettura religiosa, in Giuseppe Nicolosi (1901-1981): architettura, università, città. in Giuseppe Nicolosi (1901-1981): architettura, università, città. A cura di Paolo Belardi., Perugia, p. 88.
- Brandi, C (1963) Teoria del restauro, Einaudi (prima edizione del 1963 a cura di Edizioni di Storia e Letteratura), p. 13.
- Eastman, C, Teicholz, P, Sacks, R, Liston, K (2011) BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors, John Wiley and Sons, II ed., USA, ISBN 9780470470541371, p.203-261.
- Han, K K, Fard, M G (2017) Potential of big visual data and building information modeling for construction performance analytics: an exploratory study, in Automation in Construction, 73, p. 184-198.
- Mirahadi, F, Zayed, T (2016) Simulation-based construction productivity forecast using Neural-Network-Driven Fuzzy Reasoning, in Automation in Construction, 65, p. 102-115.
- Schank, R, Abelson, R (1977) Scripts, Plans, Goals and Understanding, Hillsdale, NJ: Erlbaum, cp. 2.
- Scherer, R J, Schapke, S-E. (2011) A distributed multi-model-based Management Information System for simulation and decision-making on construction projects. Advanced Engineering informatics, 25, p. 582-599.
- Sonmez, R (2011) Range estimation of construction costs using neural networks with bootstrap prediction intervals, in Expert Systems with Applications, 38, p. 9913-9917.

Indice delle figure

Num.	Titolo	Pag.	Fonte
<i>Capitolo 0</i>			
00.	<i>Real-Time process management: an aethernal uthopia?</i>	0	Rielaborazione dell'autore
01.	Chi fermerà il re dei telefonini?	12	Forbes
02.	Curva di efficienza della collaboratività nelle fasi evolutive della gestione dei processi.	12	Autore
<i>Capitolo 1</i>			
03.	Movimentazioni di cantiere nell'antico Egitto.	15	Stocks, 2003
04a.	Termitaio negli Stati Uniti.	16	A. Lessona, reperita in rete
04b.	Un favo di api europee.	16	Reperita in rete
05.	Miniatura del cantiere " <i>Hagia Sofia</i> ".	26	Cronaca di Manasse
06.	Sezione longitudinale della Basilica " <i>Hagia Sofia</i> " Acquerello del 1926.	27	Roger Hayward Papers
07.	Basilica di Santa Sofia, Istanbul.	29	Reperita in rete
08.	Cantiere della Cattedrale di <i>Chartres</i> .	31	Giudici et al, 2017
09.	Brano del ciclo di pitture murarie della chiesa di S. Angelo in Formis -CE. Ritratto dell'Abate Desiderio.	34	Autore
10.	Sezioni tipologiche di pilastri polistili nel " <i>Livre de portraiture</i> " di <i>Villard de Honnecourt</i> .	34	Erlande et al, 1998
11.	Il Re di Francia Luigi VI e l'abate Suger in visita al cantiere del coro di St. Denis (XII sec).	37	Reperita in rete.
12.	La costruzione di una apparecchiatura muraria medievale.	37	Trinity College, Dublino
13.	Schema descrittivo del castello di montaggio della lanterna della cupola di S. Maria del Fiore, Firenze. Attribuito a L. da Vinci.	41	Reperito in rete
14.	Ricostruzione grafica delle macchine e degli apprestamenti impiegati per il cantiere della cupola di S. Maria del fiore, Firenze.	42	Kleiner et Mamiya, 2008
15.	Bramante presenta il progetto della basilica a P. Giulio II.	44	Horace Vernet, 1827
16.	Michelangelo presenta il modello della cupola a Paolo VI.	44	Domenico Crespi "il Passignano"

17.	Schema strutturale della costruzione della cupola di S. Pietro, disegno di cantiere di Domenico Fontana.	46	Masiero e Zannoner, 2013
18.	Il Cantiere della <i>Reggia di Versailles</i> nel 1669.	48	Adam Van der Meulen.
19.	Il cantiere del <i>Crystal Palace</i> , Londra, nel 1851.	52	Berlin et al, 1851
20.	Il montaggio dei pannelli in vetro sulle volte del <i>Crystal Palace</i> , Londra.	52	Berlin et al, 1851
21.	La distruzione del <i>Crystal Palace</i> , Londra.	55	Reperito in rete.
22.	Progressione del cantiere dell' <i>Empire State Building</i> .	58	New York Public Library, 1930
23.	Il cantiere dell' <i>Empire State Building</i> .	59	New York Public Library, 1930.
24a.	Plastico di progetto de "L'Arengo della Nazione" al Foro Italico. Luigi Moretti.	63	"Il Contrafforte" , Roma.
24b.	Plastico per il prototipo di uno stadio caratterizzato dall'ottimizzazione della "Curva di Equidesiderabilità visiva" degli spettatori. Moretti e De Finetti.	63	Converso et Bonatti, 2006.
25.	Il Cantiere del <i>Museo Guggenheim</i> di Bilbao.	66	Reperito in rete.
26.	Fasi realizzative dei conci in pietra di Apricena. Officina e cantiere.	68	Piano, 2005.
27.	<i>Blueprint</i> della Chiesa di Padre Pio da Pietralcina.	69	Piano, 2005.
28.	Sintesi delle macro-fasi delle figure e dei costi necessari alla vita utile dell'edificio.	74	Autore
29.	L'architetto nell'anno 2000.	75	Biblioteca Naz. di Francia
Capitolo 2			
30.	Definizione di complessità.	79	Autore
31.	Processo iterativo di verifica delle interferenze geometriche (<i>clash detection</i>) per la verifica di fattibilità dell'opera.	81	The Contractor's guide to BIM – II edition.
32.	Verifica progettuale basata su regole e ragionamenti applicata al modello BIM. Flusso operativo delle operazioni computazionali.	82	Rielab. da Jiang et Leicht, 2015.
33.	Schematizzazione del modello di verifica mediante interazione con basi di conoscenza specialistiche.	83	Autore

34.	WBS. Scomposizione ad albero delle attività di cantiere legate alla realizzazione delle strutture metalliche.	85	Autore
35.	Grafico 3D "WBS+LBS+RBS".	86	Autore
36.	<i>Armonogramma</i> di Adamiecky.	88	Marsh, E R, 1976
37.	<i>Empire State Building</i> , cronoprogramma Gantt.	90	New York National Gallery
38.	Esempio di CPM applicato al caso studio n.3.	92	Autore
39.	Esempio di PERT applicato al caso studio n.3.	93	Autore
40.	Schematizzazione del <i>Ciclo di Deming</i> "PDCA".	103	Autore
41.	<i>Baxter</i> : robot a controllo remoto mediante VR.	105	Libero Tecnologia
42.	Effetti del mancato coordinamento tra lavorazioni diverse nella stessa area.	108	Autore
43.	LBS per la gestione di una settimana lavorativa in un complesso alberghiero operativo.	113	Autore
44.	Sequenze logiche del processo <i>Last Planner</i> .	116	Autore
45.	Riunione settimanale di cantiere.	117	Autore
Capitolo 3			
46.	Modello probabilistico di gestione del rischio <i>Swiss Cheese</i> con le specifiche del settore dell'edilizia.	122	Autore
47.	Schema di funzionamento del sistema RFID nella gestione delle sovrapposizioni di cantiere.	124	Reperito in rete
48.	Sintesi del cantiere telematico.	124	Gall, 2016.
49.	Elaborazione della Curva di McLeamy secondo le fasi della vita dell'edificio.	127	Autore.
50.	Completamento delle lavorazioni di cantiere dopo la tempistica prevista.	129	Autore.
51.	Schemi di verifica della Qualità mediante strumenti BIM.	135	Rielab. da Chen et Luo, 2014.
52.	Il modello POP per la verifica della Qualità in un cantiere edile.	137	Chen et Luo, 2014
53.	Ispezioni di cantiere e verifica delle inefficienze.	137	Autore.
54.	Confronto tra il momento della progettazione virtuale della sicurezza e la sua applicazione in campo reale.	144	Fioravanti et al, 2018.

55.	L'impatto dell'introduzione di nuove tecnologie sul processo, sul prodotto e sugli attori.	149	A. Shaiket, reperito in rete.
Capitolo 4			
56.	Sintesi del ciclo base di Percezione-Interferenza-Azione dell'Agente Intelligente.	151	Autore
57.	Sintesi del workflow operativo del sistema <i>Agent-BIM</i> .	155	Autore
58.	Sintesi del processo di elaborazione delle planimetrie automatiche e dell'aggiornamento degli elaborati <i>As-Built</i>	174	Autore
59.	Sequenza logica della definizione esecutiva di un'operazione semplice: pittura.	175	Autore
60.	Rappresentazione del risultato grafico nell'interfaccia di collegamento tra sistema <i>Agent</i> e modello.	177	Autore
Capitolo 5			
61.	Caso 1. Vista digitalizzata dalla Schola Cantorum.	182	Autore, Ambrosio
62.	Caso 1. Vista dello stato di fatto.	184	Autore
63.	Caso 1. Modellazione BIM.	188	Autore
64.	Caso 1. Modellazione BIM e inserimento apprestamenti.	189	Autore
65.	Caso 1. Divisione dell'edificio in location.	189	Autore
66.	Caso 1. Individuazione planimetrica delle location.	190	Autore
67.	Caso 1. Verifica delle tempistiche e degli apprestamenti.	191	Autore
68.	Caso 1. Pianificazione dei lavori nelle due settimane di massima occupazione delle location.	192	Autore
69.	Caso 2. Vista digitalizzata dello stato di fatto, dalla navata laterale.	193	Autore, Ambrosio
70.	Caso 2. Vista interna verso l'abside.	195	Autore
71.	Caso 2. Prospetto principale.	195	Autore
72.	Caso 2. Modellazione BIM.	199	Autore
73.	Caso 2. Modellazione e identificazione degli interventi.	200	Autore
74.	Caso 2. Indentificazione e qualificazione delle parti di edificio da demolire.	202	Autore
75.	Caso 2. Divisione dell'edificio in location.	202	Autore
76.	Caso 2. Definizione planimetrica delle location.	204	Autore

77.	Caso 2. Modello dinamico della divisione in location.	204	Autore
78.	Caso 3. Pianificazione dei lavori nelle due settimane di massima occupazione delle location.	205	Autore
79.	Caso 3. Vista delle pitture absidali.	206	Autore
80.	Caso 3. Vista del santuario rupestre.	208	Autore
81.	Caso 3. Vista delle pitture rupestri oggetto dell'intervento.	210	Autore
82.	Caso 3. Verifica visiva, in ambiente BIM, della congruenza delle misure della nuvola di punti rispetto alle immagini collegate.	213	Autore
83.	Caso 3. Attribuzione delle quote ai punti di collegamento e riferimento delle immagini sovrapposte	213	Autore/Sica
84.	Caso 3. Modello BIM collegato al mosaico fotogrammetrico.	214	Autore
85.	Caso 3. Verifica visiva, in ambiente BIM, della congruenza delle misure della nuvola di punti rispetto alle immagini collegate.	215	Autore
86.	Caso 3. Sezione trasversale con collocazione delle opere pittoriche.	215	Autore
87.	Caso 3. Definizione delle location.	216	Autore
88.	Caso 3. Definizione planimetrica delle location.	217	Autore
89.	Caso 3. Pianificazione dei lavori nelle due settimane caratterizzate dal massimo tasso di occupazione.	218.	Autore
90.	Caso 1. Ipotesi di cronoprogramma elaborato dall'impresa.	245	Autore
91.	Caso 1. Cronoprogramma consuntivo.	246	Autore
92.	Caso 1. Fasi salienti delle opere di demolizione.	247	Autore
93.	Caso 1. Progressione dei lavori.	247	Autore
94.	Caso 1. Finiture e completamenti.	248	Autore
95.	Caso 2. Ipotesi di cronoprogramma elaborato dall'impresa.	249	Autore
96.	Caso 2. Cronoprogramma consuntivo.	250	Autore
97.	Caso 2. Stralcio del progetto originario, Prof. Nicolosi.	251	Autore
98.	Caso 2. Immagini esplicative dello stato di fatto.	251	Autore
99.	Caso 2. Progressione dei lavori, tracciature	252	Autore

100.	Caso 2. Progressione dei lavori, completamento rimozione lastre	252	Autore
101.	Caso 3. Gestione del materiale all'interno del cantiere.	253	Autore

Appendice

A.1. Caso studio n.1: Chiesa Santa Maria Assunta a Roccasecca (anni '60): ristrutturazione totale per adeguamento architettonico, liturgico e impiantistico. Cantiere non promiscuo

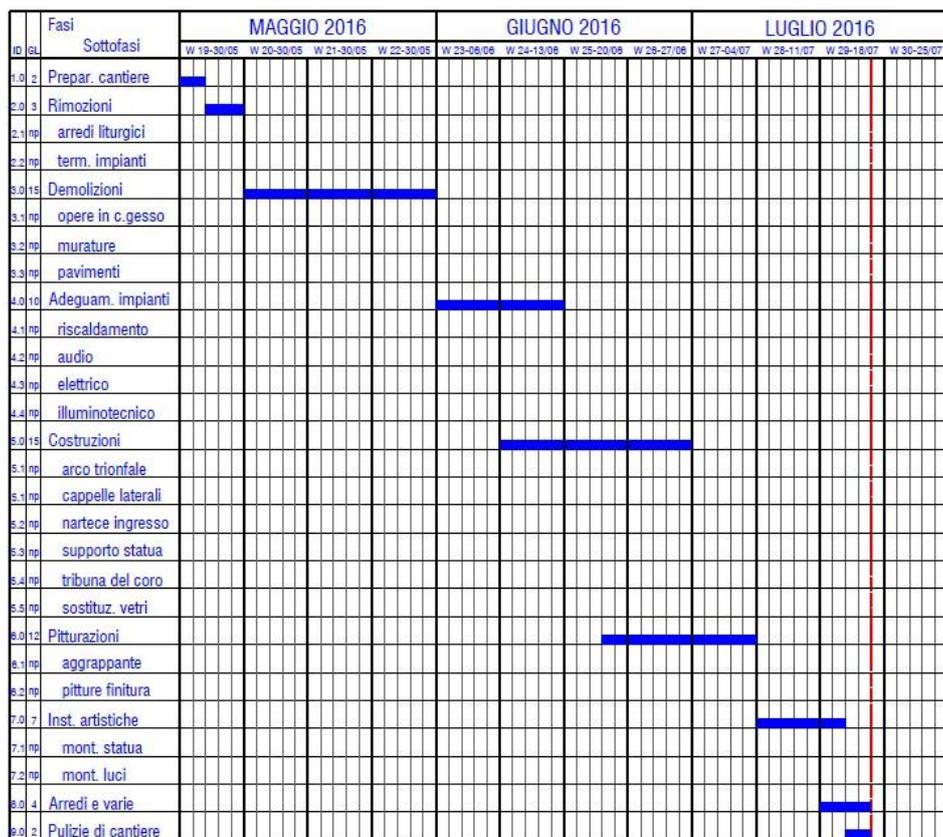


Figura 90. Ipotesi di cronoprogramma elaborato dall'impresa. Durata complessiva: 10 settimane e 4 giorni. Caso 1.

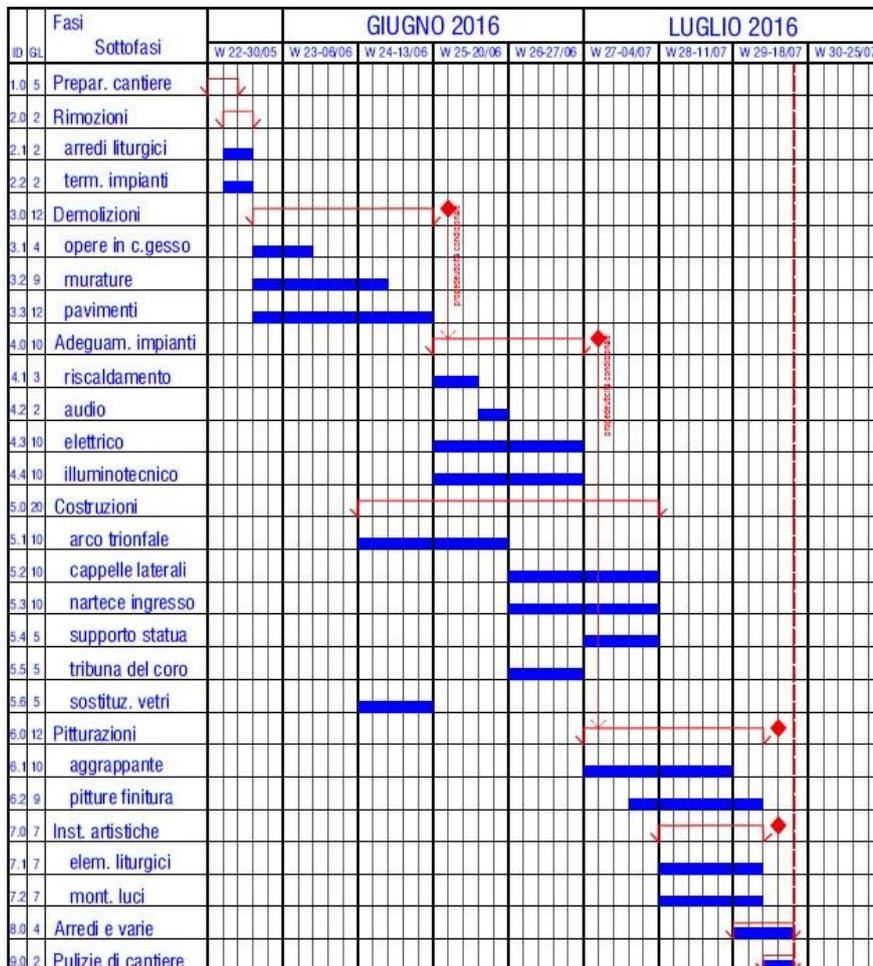


Figura 91. Trasposizione del cronoprogramma consuntivo del cantiere. Durata complessiva: 7 settimane e 4 giorni. Caso 1.



Figura 92. Fasi salienti delle fasi iniziali di demolizione. Caso 1



Figura 93. Progressione delle fasi di realizzazione del nuovo assetto. Caso 1.



Figura 94. *Finiture e completamento, in un momento di alta occupazione delle aree. Si noti la presenza in continuità di due squadre lavorative a ridosso dell'area logistica di cantiere. Caso 1*

A.2. Caso studio n. 2: Chiesa *San Giovanni Battista* a Sant'Angelo in Theodice, Cassino (anni '50): adeguamento architettonico, liturgico, impiantistico e miglioramento sismico

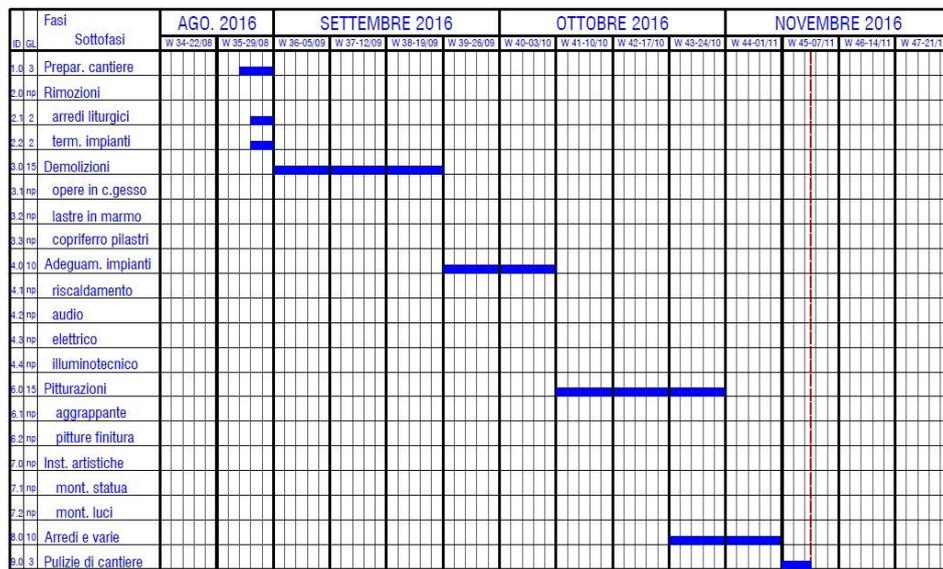


Figura 95. Ipotesi di cronoprogramma elaborato dall'impresa. Durata complessiva: 10 settimane e 1 giorno. Caso 2

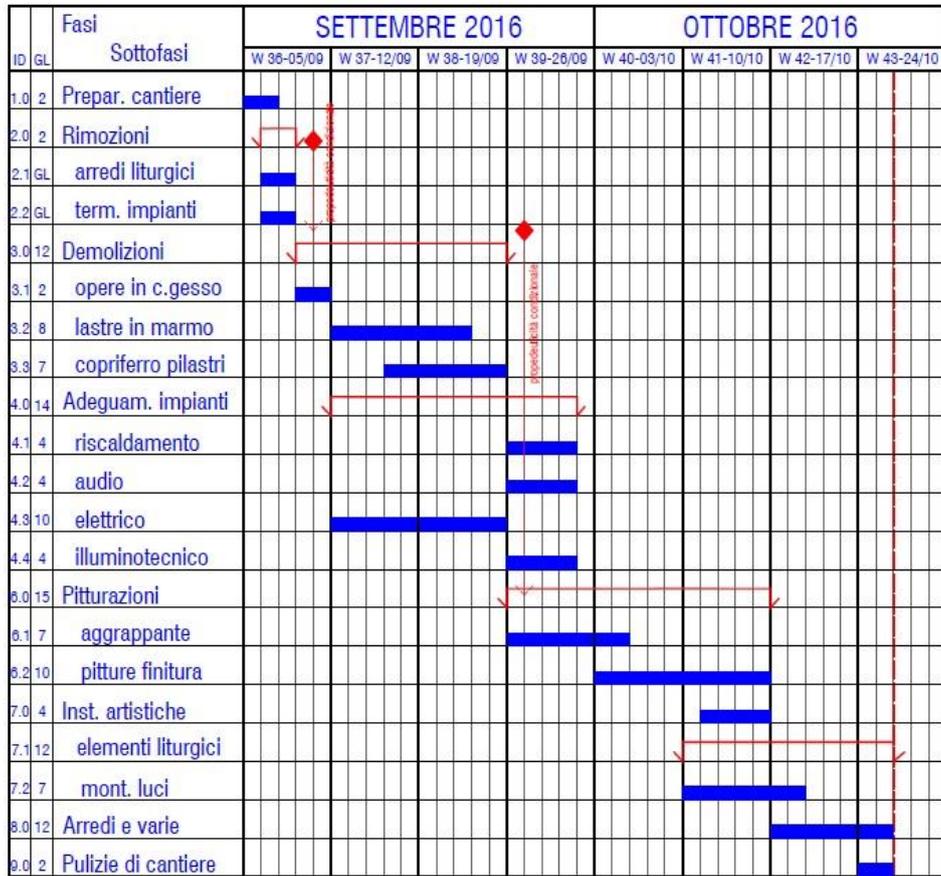


Figura 96. Trasposizione del cronoprogramma consuntivo del cantiere. Durata complessiva: 7 settimane e 2 giorni. Caso 2.



Figura 99. Progressione dei lavori in promiscuità con le aree destinate al culto. Caso 2.



Figura 100. Progressione dei lavori, completamento della rimozione delle lastre in marmo. Caso 2

A.3. Caso studio n. 3: *Santuario Rupestre Sant'Angelo in Asprano a Roccasecca*, restauro degli affreschi alto-medievali



Figura 101. Gestione del materiale all'interno del cantiere. Caso 3.