

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



Candidato: Francesco Livio Rossini, XXX Ciclo

Supervisore: Prof. Antonio Fioravanti

Indice

| | |
|--|-----|
| 0. Le criticità della costruzione del progetto di architettura nell'era digitale | 6 |
| 1. Superamento dei limiti attuali mediante implementazione di metodologie e tecnologie ICT avanzate | 13 |
| 1.1. Teoria e stato dell'arte della modellazione degli Agenti in architettura..... | 15 |
| 2.2. Il modello <i>Agent-BIM</i> per la previsione dei tempi e dei costi delle attività di cantiere | 19 |
| 2.2.1. Sommario: strutturazione del processo generale di gestione degli agenti espresso in pseudo-codice | 22 |
| 2.2.2. Definizione del luogo di lavoro <room>..... | 24 |
| 2.2.3 Interazione tra il Sistema Multi-Agente e la <room> | 28 |
| 2.3. Implementazione logica e operativa del modello <i>Agent-BIM</i> | 40 |
| 2.4. Conclusioni | 42 |
| 2. I processi realizzativi dell'architettura: storia, problematiche e metodologie di ottimizzazione, controllo e gestione..... | 43 |
| 2.1. Progetto e costruzione nell'evo antico..... | 45 |
| 2.2. Gestione del processo edilizio nel tardo-antico: l'importanza della trasmissione della conoscenza | 56 |
| 2.3. Il processo edilizio medioevale: la sfida tecnologica delle cattedrali e la definizione degli attori nel cantiere medioevale | 61 |
| 2.4. 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 | 69 |
| 2.5. Dall'evo moderno alla prima rivoluzione industriale | 78 |
| 2.6. La nascita delle metodologie standardizzate di processo nella seconda rivoluzione industriale | 87 |
| 2.7. Dalla terza alla quarta rivoluzione industriale: verso la digitalizzazione del processo edilizio | 91 |
| 2.8. Conclusioni | 102 |
| 3. Metodologie di gestione e rappresentazione del processo edilizio | 108 |

| | |
|---|-----|
| 3.1. Strategie di gestione della complessità della realizzazione del progetto di architettura..... | 109 |
| 3.2. Tecniche di gestione del tempo | 118 |
| 3.2.1. Il diagramma di Gantt | 120 |
| 3.2.2. Tecniche reticolari: CPM, PERT e ulteriori evoluzioni | 122 |
| 3.3. Un nuovo approccio: la Costruzione Snella (<i>Lean Construction</i>)..... | 127 |
| 3.3.1. Location-Based Management: definire l' <i>equilibrio</i> della gestione del processo mediante la <i>Line of Balance</i> – LOB | 139 |
| 3.3.2. Last-Planner System..... | 147 |
| 3.4. Conclusioni..... | 151 |
| 4. Processi realizzativi dell'architettura: la gestione del rischio | 154 |
| 4.1. Ottimizzazione, controllo e gestione dei processi realizzativi: la modellazione informativa dell'edificio – BIM..... | 158 |
| 4.2. Le dimensioni del BIM: la gestione del tempo (4D), dei costi (5D) e le frontiere del <i>nD</i> | 163 |
| 4.3. Strumenti digitali per il controllo della qualità del processo | 166 |
| 4.4. Il coordinamento della sicurezza nell'era digitale | 169 |
| 4.5. Conclusioni..... | 176 |
| 5.0. Casi-studio per la validazione e verifica del modello proposto: tre progetti realizzati..... | 182 |
| 5.1. Chiesa <i>Santa Maria Assunta</i> a Roccasecca (anni '60): ristrutturazione totale per adeguamento architettonico, liturgico e impiantistico..... | 185 |
| 5.1.1. Premessa: l'edilizia di culto nel contesto dell'espansione post-bellica dei tessuti urbani | 188 |
| 5.1.2. Sperimentazione del metodo: caso 1, cantiere <i>non promiscuo</i> | 189 |
| 5.1.3. Conclusioni..... | 194 |
| 5.2. Chiesa <i>San Giovanni Battista</i> a Sant'Angelo in Theodice, Cassino (anni '50): adeguamento architettonico, liturgico, impiantistico e miglioramento sismico..... | 198 |
| 5.2.1 Premessa: l'importanza dell'identità | 199 |
| 5.2.2 Sperimentazione del metodo: caso 2, <i>cantiere promiscuo</i> | 202 |
| 5.2.3 Conclusioni..... | 209 |

| | |
|--|-----|
| 5.3. Santuario Rupestre Sant'Angelo in Asprano a Roccasecca (XI sec.), restauro degli affreschi alto-medievali | 212 |
| 5.3.1 Premessa: lux ab petra..... | 214 |
| 5.3.2 Sperimentazione del metodo: caso 3, cantiere <i>su bene culturale in condizioni logistiche estreme</i> | 217 |
| 5.3.3 Conclusioni..... | 225 |
| 6. Conclusioni: possibilità della metodologia sperimentata nell'ottimizzazione dei processi realizzativi..... | 226 |
| Bibliografia | 230 |
| Capitolo 0 | 230 |
| Capitolo 1 | 231 |
| Capitolo 2 | 235 |
| Capitolo 3 | 238 |
| Capitolo 4 | 243 |
| Capitoli 5 e 6 | 245 |
| Indice delle figure | 246 |
| Appendice | 252 |
| 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..... | 252 |
| 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 | 257 |
| A.3. Caso studio n. 3: <i>Santuario Rupestre Sant'Angelo in Asprano</i> a Roccasecca, restauro degli affreschi alto-medievali | 262 |

0. Le criticità della costruzione 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: ad esempio, nel caso dell'arte, 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. Parafrasando Antonino Saggio ne "Lo Strumento di Caravaggio" (2007):

"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 verso la sperimentazione di 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 conoscenze e le visioni di un settore il quale, altrimenti, rischia di perdere l'occasione che il galoppante sviluppo del mondo digitale offre; conseguentemente, 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).

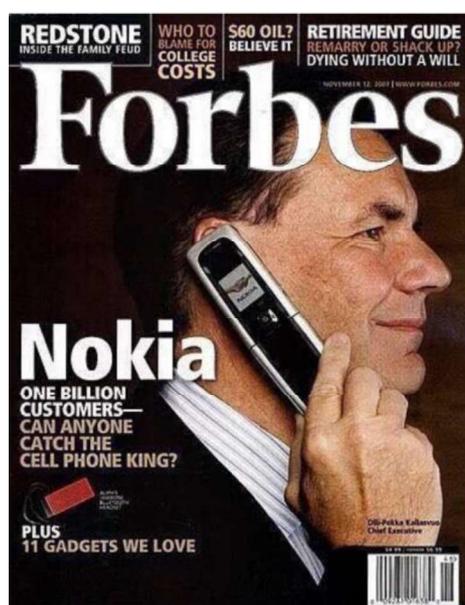


Figura 01. I risultati del mancato aggiornamento del paradigma: nel 2007, il mercato della telefonia cellulare era praticamente dominato dalla Nokia ®. A gennaio dello stesso anno Steve Jobs presentò l'iPhone ® che, nel giro di poco tempo, monopolizzerà le preferenze dell'utenza e diventerà il costante 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 evidenti potenzialità nel permettere un approccio progettuale circolare e collaborativo, non sono adeguatamente utilizzati in una visione di progettazione integrata (Carrara et Fioravanti, 2001), supportata dalla rete digitale.

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, come accade nello sviluppo di verifiche puramente analitiche.

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).

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 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 innovative 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 integrando al modello informativo dell'edificio digitale un ambiente-specchio 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, 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 anni².

² 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.



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