

Analisi economiche e strumenti di Ricerca Operativa per la stima dei livelli di produttività nell'edilizia off-site

Antonio Nesticò*, Rosalia Moffa**

parole chiave: Edilizia Off-Site, valutazione economica, indici di produttività, programmazione PERT-CPM

Abstract

L'industria edile annaspa fra prestazioni produttive sempre meno significative. Mentre altri settori sono stati in grado di trarre vantaggio dai progressi della tecnica, ammodernando i processi realizzativi e accrescendo le performance, il comparto delle costruzioni è rimasto zavorrato ai livelli produttivi degli anni '80. In edilizia metà delle ore lavorate non genera valore economico. È opinione condivisa che la recessione del settore possa essere arrestata optando per un'ibridazione con il comparto manifatturiero. La sintesi fra manifattura e costruzioni è oggi identificata con l'edilizia off-site, letteralmente "fuori sito". Essa abbassa l'intensità delle lavora-

zioni di cantiere trasferendole in officina, ove le componenti vengono realizzate in base a principi economici che rimarcano quelli della produzione industriale.

Lo studio mira a stimare il contributo produttivo imputabile a tale alternativa strategica. A tal fine, con riferimento ad un predefinito prototipo edilizio, è elaborato un protocollo per l'estrapolazione di dati economici e indici di produttività. Tale protocollo è implementato con l'ausilio delle tecniche reticolari di programmazione PERT-CPM. I risultati cui si perviene evidenziano la reale possibilità, per il settore edile, di portarsi in pari con le performance dell'economia totale.

1. IL FALLIMENTO PRODUTTIVO DELL'EDILIZIA

Ogni anno circa \$10 trilioni, corrispondenti al 13% del prodotto interno lordo globale, sono investiti in edifici, infrastrutture e impianti. Questa cifra, secondo le proiezioni della Global Construction e della Oxford Economics, è destinata ad aumentare, portandosi a \$14.9 trilioni entro il 2025 [1, 2]. Il settore edile ad oggi impiega il 7% della popolazione lavorativa e, al di là delle percezioni locali di mercato, si conferma ancora come determinante per l'andamento dell'economia globale. Tuttavia, mentre alcuni settori, come quello agricolo, hanno aumentato di 15 volte la propria produttività dal 1950 ad oggi, il comparto edile è

fermo ai livelli del 1980, attestandosi come il ramo manifatturiero più deficitario [3].

Comprendere le ragioni di tale *gap* produttivo è senz'altro il primo passo per il suo superamento. Innanzitutto va specificato che il settore delle costruzioni non è omogeneo e lo stesso vale per le sue performance. Virtualmente lo si suppone diviso in soggetti maggiori coinvolti in produzioni in larga scala (infrastrutture e edilizia pesante) e un numero elevatissimo di imprese minori molto specializzate che lavorano su piccoli progetti. Non sarebbe corretto separare del tutto queste realtà, fra le quali invece esiste forte commistione, ma in generale le aziende maggiori tendono

ad essere le più produttive. Negli Stati Uniti, ad esempio, le imprese con meno di \$1 milione di fatturato annuo sono meno produttive di quelle con reddito di oltre \$10 milioni: le aziende con ricavi annuali minori di \$50 mila producono \$6 di valore aggiunto per ora lavorativa, quelle con un reddito fra i \$5 e i \$10 milioni ne producono \$77 [1].

Uno dei motivi per cui le piccole compagnie non riescono a restare al passo delle maggiori è l'impossibilità, per loro, di trarre vantaggio dalle economie di scala. Il lavoro delle imprese minori manca di ripetibilità, necessita di minuziose lavorazioni manuali ed è costretto in siti vincolati.

In realtà le questioni che impediscono la crescita produttiva nel settore edile sono già state oggetto di analisi. Ma, al tempo stesso, le dinamiche da approntare per superare il problema sembrano essere meno importanti che in altri settori. La causa di ciò pare essere il fatto che il settore è così opaco, frammentato e denso di investimenti disallineati che spesso non sono i soggetti più produttivi a guadagnare. Da ciò scaturisce un naturale disinteresse verso una più elevata produttività. Da una rilevazione statistica sulle opinioni di 210 attori del comparto, individuati nelle persone di imprenditori, fornitori e committenti, sono emerse dieci cause del problema produttivo che possono ricondursi a tre grandi categorie [1]:

- a) i fattori esterni, che riguardano 1. la crescente complessità dei progetti e l'aumento delle operazioni manutentive, 2. la regolamentazione rigida, la frammentazione del suolo e la ciclicità della domanda pubblica, 3. la distorsione del mercato provocata da corruzione e irregolarità;
- b) le dinamiche di industria, cioè 4. la frammentazione e l'opacità del settore, 5. il disallineamento dei contratti, 6. l'inesperienza dell'acquirente;
- c) i fattori operanti a livello aziendale, che attengono a 7. progettazione e investimenti inadeguati, 8. project management ed esecuzione approssimative, 9. mancata o inadeguata competenza della forza lavoro, 10. insufficienti investimenti in termini di innovazione.

1. *La crescente complessità dei progetti e l'aumento delle operazioni manutentive.* A differenza delle economie emergenti, che necessitano di investire in infrastrutture avanzate, i Paesi sviluppati hanno vissuto questo processo decadi fa e ora devono mantenere e aggiornare il sistema. La manutenzione e il rinnovamento sono però operazioni che tipicamente è difficile ripetere, sono poco standardizzabili e costrette in siti fortemente vincolati. Ciò fa sì che, al crescere delle operazioni di tipo manutentivo, si registri un crollo di produttività [4].

2. *La regolamentazione rigida, la frammentazione del suolo e la ciclicità della domanda pubblica.* Il settore edile è uno dei più rigidamente normati. Questo è giusto nell'ottica di perseguire standard di sicurezza, ma il volume dell'apparato normativo non è problematico quanto la sua complessità burocratica. La World Bank ha stimato che mediamente occorrono 160 giorni per ottenere i nulla osta per l'esecuzione di un'opera, rilevando che in sei Paesi è

necessario più di un anno e in due più di due anni. Il settore edile è poi fortemente sostenuto dalla domanda pubblica. Se da un lato l'Amministrazione rappresenta l'acquirente principale, dall'altro circostrive fortemente le spinte espansive del comparto, investendo in maniera ciclica e confinandolo le derive innovative.

3. *La distorsione del mercato provocata da corruzione e irregolarità.* A causa della complessità del sistema di norme che lo regola e della macchinosità dei suoi oneri burocratici, il comparto edile è divenuto uno dei più affetti dal problema della corruzione, secondo solo all'ambito estrattivo. Per la World Bank nei Paesi con un livello di corruzione basso (Australia, Danimarca, Nuova Zelanda) anche il procedimento amministrativo è più snello e incide sulla spesa totale non più dello 0.5%. Al contrario, in Paesi altamente corrotti (Nigeria, India, Brasile) l'iter procedurale può durare anche un anno, con un aggravio di spesa fino al 25% [5]. Inoltre le grandi ondate migratorie hanno prodotto schiere di lavoratori irregolari a basso costo su cui, data l'aleatorietà della loro permanenza, le compagnie non sono pronte ad investire in termini di formazione. Così, nel maldestro tentativo di minimizzare i costi, le aziende stesse zavorrano la propria produttività [6, 7].

4. *La frammentazione e l'opacità del settore.* In Europa le aziende con meno di 10 impiegati full-time costituiscono il 94% del settore e producono il 39% dell'output. Questa frammentazione comporta l'assenza di massa critica in grado di canalizzare una pionieristica innovazione, perché sostanzialmente non c'è pressione competitiva in tal senso. La frammentazione non solo abbassa la produttività a causa dell'esclusione dai benefici dell'economia di scala, ma rende anche il settore opaco, cioè è sempre più difficile trovare dati sulle performance degli operatori e sui costi di progetto. Così l'acquirente non può effettuare confronti e l'offerta non è stimolata a migliorarsi [1].

5. *Il disallineamento dei contratti.* È stato provato dal Construction Industry Institute Performance Assessment System che i contratti a forfait determinano una produttività dal 35% all'88% più alta di quelli a corpo. Le ragioni sono intuitive: nei contratti a forfait la totalità del rischio grava sull'imprenditore, il quale è pertanto portato a migliorare le sue performance. I modelli contrattuali oggi disponibili tendono in ogni caso a sbilanciare il rischio verso un unico soggetto. Quando ciò accade riuscire ad allineare gli sforzi per ottenere un maggiore slancio produttivo è molto difficile, perché la parte che sostiene il rischio sarà sempre tesa verso un approccio maggiormente conservativo [8].

6. *l'inesperienza dell'acquirente.* In ambito edile la relazione che intercorre fra esecutore e committente è piuttosto saltuaria, soprattutto se comparata a quella in ambito industriale. Il committente civile manca quindi di esperienza e questo, insieme alla difficoltà di trovare dei benchmark a causa dell'opacità del mercato, fa sì che egli non riesca a valutare quale prodotto sia il più efficiente e appropriato per le sue necessità. Inoltre il generico acquirente ha – o crede di avere, dato che non ha altre opzioni – bisogno di personalizzare l'opera che commissiona e ciò impedi-

sce all'operazione di conseguire quei caratteri di standardizzazione e di ripetibilità che ne farebbero aumentare la produttività [3].

7. *Progettazione e investimenti inadeguati.* L'industria edile non tende a riutilizzare gli stessi *concept* ed è incline a "customizzare" le soluzioni a seconda dell'acquirente. I progetti altamente personalizzati sono però affetti da un elevato *gap* temporale fra la fine della progettazione e il termine dei lavori. Allo stadio iniziale i committenti non hanno percezione delle implicazioni relative alle scelte progettuali che compiono e talvolta l'esecuzione richiede un tempo così lungo che potrebbero variare le condizioni al contorno, accumulando così altri ritardi. D'altra parte le imprese edili non investono abbastanza tempo e risorse nel perfezionare il progetto e la presenza di errori in questa fase embrionale determina un effetto domino che inibisce gravemente le performance produttive [9].

8. *Project management ed esecuzione approssimativi.* La fase esecutiva del progetto, come quella ideativa, soffre di gravi carenze dovute essenzialmente a mancanza di comunicazione, insufficiente scambio di informazioni *front-end*, programmazione incoerente e variabile. Il principale ritardo in fase esecutiva si registra all'impatto col cantiere e in tal senso il Construction Industry Institute ha rilevato che i progetti che incorporano un "planning start-up", ossia una "pianificazione dell'avvio", riducono i ritardi almeno del 6% [8].

9. *Mancata o inadeguata competenza della forza lavoro.* Globalmente la manodopera edile è piuttosto anziana e poco specializzata. Dal 1985 al 2010 il numero di impiegati di età superiore a 45 anni è aumentato dal 32 al 50% ed è innegabile che questa fascia di età sia meno ricettiva rispetto alla formazione necessaria per approcciarsi a nuove tecnologie. Altro aspetto attiene al fatto che l'industria edile non sembra essere un settore allettante per l'ultima generazione di manager e ingegneri di talento, che preferiscono spendersi altrove [10].

10. *Insufficienti investimenti in termini di innovazione.* Il settore edile è uno dei più scarsamente digitalizzati. Negli USA è il penultimo, migliore solo dell'ambito agricolo, mentre in Europa il comparto edile è l'ultimo nella classifica dell'innovazione digitale. Un ulteriore profilo del problema riguarda la dispersione degli sforzi in questa direzione. Le aziende usano spesso software customizzati e specifici, incapaci di sincronizzarsi nei differenti livelli di progettazione e ciò non può che tradursi in un'ulteriore perdita di tempo e di risorse [9].

Naturalmente le dinamiche globali appena esposte si ripercuotono a livello nazionale sulle congiunture economiche del Paese. Nel 2015 il valore della produzione relativa all'intera filiera era di 398 miliardi di Euro, con una flessione dell'1,7% rispetto all'anno precedente. Una percentuale modesta se comparata alle perdite subite nel biennio critico 2008-2009, ma ancora molto elevata rispetto al calo di produzione nazionale (0,7%). Il settore stenta a ripartire, con riflessi sul quadro occupazionale che continua a perdere più

di 100.000 unità ogni anno. Il comparto più gravemente colpito dal lungo periodo di crisi è quello trainante delle costruzioni edili, che dal 2008 ha perso il 29% del valore iniziale di produzione [11].

2. L'EDILIZIA OFF-SITE. UN NUOVO IMPULSO AL SETTORE

È opinione condivisa che le sorti del comparto edile potrebbero essere risollevate se il settore tendesse ad un modello manifatturiero di produzione. La sintesi fra manifattura e costruzioni è oggi rappresentata dall'edilizia off-site, letteralmente "fuori sito". Essa sposta il perno della produzione in officina abbassando l'intensità delle lavorazioni in cantiere. Questa strategia riduce enormemente i tempi, com'è intuitivo se si pensa a trasformazioni che avvengono in un ambiente controllato, piuttosto che in un sito colmo di variabili [3]. Nel comparto edile è soprattutto l'ambito industriale a fare largo uso dell'edilizia off-site, la penetrazione nel contesto residenziale risulta molto più difficoltosa. A differenza della produzione manifatturiera, che mostra una domanda costante per design ripetibili, l'ambito residenziale è permeato dalla necessità, spesso presunta, di dover customizzare il prodotto. Un'ulteriore variabile del mondo edile, rispetto a quello manifatturiero, è costituito dall'imperscrutabilità della domanda: una produzione automatizzata richiede maggiori investimenti ed essi sono giustificabili solo a fronte di un livello di domanda certo. Si potrebbe obiettare che, in Italia, queste siano esperienze già viste in passato su cui oggi si formula un giudizio piuttosto negativo. Tuttavia, il concetto di edilizia industrializzata a cui si fa riferimento è relativo ad un modello produttivo innovativo che permea la gestione di impresa e sembra voler riuscire proprio laddove la prefabbricazione pesante aveva fallito [12, 13].

Anzitutto la domanda è oggi strutturata in maniera profondamente diversa. Negli anni '60 la richiesta del bene edilizio era talmente grande che si verificarono le condizioni socio-economiche per cui il lancio sul mercato di componenti prefabbricati avvenne senza correre particolari rischi. Differentemente da quanto accadde negli Stati Uniti o in Nord Europa però, in Italia, ove la tradizione era fortemente legata alla massa muraria, si affermò una prefabbricazione "pesante" a pannelli in calcestruzzo armato. Essa ha obiettivamente abbattuto i tempi di realizzazione e vinto, almeno in parte, i pregiudizi sul sistema costruttivo. Nondimeno è evidente che, per mantenere un certo dinamismo produttivo, doveva verificarsi un'elevata e costante domanda di strutture così da poter vendere a catalogo. In quest'ottica l'entità della programmazione pubblica degli interventi prevedeva commesse tali da mantenere vitali le aziende produttrici, pagando però lo scotto di notevoli disallineamenti sotto vari profili: a) dati gli elevati costi di gestione e di impianto, le grandi imprese erano favorite rispetto alle medie e alle piccole; b) i prototipi edilizi iniziarono a cristallizzarsi, impendendone l'evoluzione atta a rispondere alle esigenze abitative in profondo mutamento tipiche di quegli anni; c) la produzione edile industriale venne mono-

polizzata dagli elementi pesanti, chiudendo ogni altro eventuale sbocco sul mercato [14].

Nella seconda metà degli anni '60 il calo demografico che segue la fase espansionistica segna una profonda inversione di tendenza nella domanda di nuovi alloggi e questo sancisce la fine della saga della prefabbricazione residenziale in Italia. Il tramonto di quest'era lascia in eredità una serie di questioni che hanno contribuito a determinare un giudizio tendenzialmente negativo dell'esperienza: spinti dall'urgenza, gli interventi erano stati fortemente proiettati alla sola quantità di output, trascurando qualsiasi attributo estetico e funzionale.

Oggi alle imprese è richiesto uno sforzo molto diverso. Da un lato vi è il vastissimo mercato della rigenerazione edilizia, unico segmento del settore che può vantare, grazie anche agli incentivi statali, una crescita sostenuta degli investimenti, con 18 milioni di abitazioni che necessitano di essere ristrutturare [15-18]. Dall'altro, va considerata la crescente domanda per un'edilizia a prezzi contenuti, ma anche qualitativamente valida, da parte di un nuovo ceto medio che, sempre più consapevole delle proprie necessità e pure destinato a non conoscere più le fasi reddituali espansive tipiche degli anni precedenti, alimenta la già ampia forbice fra la domanda e l'offerta di edilizia convenzionata [12].

3. OBIETTIVI E METODOLOGIA DI STUDIO

La presente ricerca mira a valutare gli effetti che l'edilizia off-site è in grado di determinare nello scenario socio-economico italiano. In particolare, s'intende stimare gli indici di produttività corrispondenti alla realizzazione di un manufatto edile campione attraverso tre diverse tecnologie costruttive, con crescente grado di meccanizzazione:

1. tradizionale esecuzione in sito in calcestruzzo armato;
2. parziale industrializzazione in calcestruzzo armato;
3. totale industrializzazione in acciaio.

Il perseguimento di tale obiettivo è complesso. L'edilizia è uno dei settori economici che meno si presta all'indagine produttivistica. Le cause di questa difficoltà sono molteplici, ma comunque tutte riconducibili all'estrema variabilità del comparto: il permanere, ancora oggi, di molti metodi di esecuzione tradizionali accanto a tecnologie più avanzate; l'esistenza sul mercato di prodotti lapidei, plastici o metallici che, pur impiegati per la stessa funzione, hanno rese estremamente differenti fra loro; i tempi di esecuzione ed il valore aggiunto per numero di lavoratori di uno stesso prodotto edilizio, variabile a seconda del tipo di procedimento costruttivo adottato. Accade quindi che le funzioni di produttività, che normalmente correlano i flussi di fattori produttivi (gli *input*) con il flusso di prodotto per unità di tempo (l'*output*), comprendano un elevato numero di variabili: tipologie edilizie; organizzazione del lavoro; topografia; distanza dei trasporti; condizioni finanziarie; mercato della domanda e dell'offerta; regolamenti; struttura e grado di meccanizzazione del cantiere; specializzazio-

ne, qualificazione e dimensione delle imprese; specializzazione e qualificazione della mano d'opera; strutture professionali e amministrative coinvolte [19].

Alla luce di ciò, per operare un confronto sulla produttività che si consegue ricorrendo a tecnologie edilizie diverse, è necessario anzitutto prendere a riferimento un prototipo edile univoco. In secondo luogo, si opta per uno strumento di programmazione che uniformi le prestazioni esecutive.

L'archetipo edile che si seleziona ai fini dello studio è una soluzione abitativa monofamiliare su un solo livello, con superficie calpestabile di 130 m². Si tratta di un manufatto effettivamente eseguito attraverso una tecnologia industrializzata in acciaio, la cui paternità appartiene alla G.G. Costruzioni Srl di Montoro (AV). Lo stesso prototipo edile è poi studiato con riguardo ad altre due differenti ipotesi realizzative, cioè la tradizionale esecuzione in sito e la parziale industrializzazione in calcestruzzo armato, quest'ultima sviluppata dalla Sarotto Group Srl di Cuneo.

La G.G. Costruzioni Srl è portavoce di una tecnologia off-site in acciaio che attinge dall'ampissimo mercato della produzione siderurgica declinata in diverse tipologie di edilizia industrializzata a secco, in cui l'unico elemento gettato in opera sono generalmente le fondazioni. Il sistema industrializzato in acciaio preso a riferimento è costituito da profili sottili piegati a freddo (Cold Formed Steel) che si assemblano per creare un telaio leggero. Ossatura e riempimento coincidono e il pacchetto tecnologico si collega a secco all'apparato strutturale. Appare evidente la natura industriale del procedimento, dacché ogni elemento è prodotto solo a valle della chiarificazione del suo ruolo nel sistema e la sua destinazione finale, giunto sul luogo di montaggio, è univoca. In dettaglio, il sistema utilizzato è di tipo *panel* in cui pareti semicomplete si trasportano dall'officina al cantiere ove vengono installate e rifinite superficialmente.

La Sarotto Group Srl applica invece una tecnologia esecutiva brevettata in cui ad una struttura intelaiata in calcestruzzo armato gettata in opera si associano pannellature modulari ad alte prestazioni, prefabbricate e stoccate in officina. L'esecuzione prevede dapprima che le tompanature prefabbricate vengano temporaneamente fissate sul piano di posa; segue la preparazione e il getto dei pilastri che solidarizza la struttura; si procede quindi al completamento in opera.

In funzione dello scopo della ricerca, per ciascuna delle tre ipotesi realizzative, è innanzitutto redatto il Computo Metrico Estimativo (CME) che è alla base delle successive elaborazioni numeriche [20, 21]. Ciò anche grazie alla collaborazione delle due aziende specializzate. La metodologia di analisi prevede poi di estrapolare i dati economici, in termini di tempi e di costi ottimizzati di esecuzione, da utilizzare per la stima degli indici di produttività. Per tale stima ci si avvale delle tecniche di programmazione reticolare PERT-CPM, derivanti dalla Ricerca Operativa (RO). Di riconosciuta validità sia sul piano teorico che negli applicazioni reali, si tratta di strumenti che, più in generale, consentono di definire un protocollo tecnico-economico per

l'estrapolazione delle coordinate tempo-costo di ottimalità della realizzazione dei prototipi di studio [22, 23].

4. L'ARCHITETTURA DEL MODELLO

La caratterizzazione del modello si serve di strumenti della Ricerca Operativa che, come branca della matematica applicata, permette di studiare e risolvere in modo razionale problemi relativi alla valutazione delle alternative: «È la disciplina in cui si applicano metodi analitici avanzati per prendere decisioni migliori» [22]. Com'è noto, la RO si applica ad un ampio spettro di sistemi che hanno in comune la possibilità di essere rappresentati tramite modelli matematici a partire da una descrizione quantitativa. Per i fini dell'analisi, si fa ricorso alle tecniche proprie della Teoria dei Grafi, nella forma dei metodi reticolari PERT-CPM.

Per la loro relativa semplicità d'implementazione, le tecniche reticolari di programmazione sono largamente diffuse in ambito industriale ed edile. Esse tendono alla definizione di metodologie utili sia a programmare e ad ottimizzare i tempi, i costi e le risorse legate ad una determinata iniziativa progettuale, sia a tenere conto dell'incertezza nella stima di tali dati. Sono principalmente due le tecniche reticolari che conseguono gli obiettivi indicati: il *Critical Path Method* (CPM) e il *Program Evaluation and Review Technique* (PERT). Divulgati alla comunità scientifica contemporaneamente già nel 1959, nel tempo i due strumenti sono stati sviluppati insieme al punto che le differenze di impostazione sono oggi minime [24, 25]. Il fine delle applicazioni consiste nell'individuazione dell'ottimo di Pareto, ossia la decisione tale che non esista una decisione y preferita a x . Da segnalare che gli ottimi di Pareto possono essere numerosi, addirittura infiniti in problemi continui. Ma mentre la scelta finale è un atto soggettivo spettante al decisore, all'analista è richiesto di restringere oggettivamente il campo delle soluzioni ottime e ammissibili [22].

Nella presente ricerca l'ottimo coincide con la scelta, operata dall'imprenditore, della migliore tecnologia fra quelle esposte per l'esecuzione del prototipo edile.

Il protocollo tecnico-economico che viene proposto, individua due fasi sequenziali nell'indagine sull'esecuzione delle opere edili:

1. *l'analisi dei tempi e*
2. *l'analisi dei costi.*

Nella prima fase l'obiettivo è la stima della durata minima T_{min} del progetto. Formalmente si tratta di un problema di ottimizzazione che consiste nel determinare il punto di minimo della funzione $f(x)$ che definisce la durata dell'iniziativa progettuale:

$$T_{min} = \min_{x \in S} f(x)$$

ove S è l'insieme delle soluzioni ammissibili. A questo scopo, i passi da seguire sono 1.a, 1.b, 1.c.

1.a. Ordinamento cronologico delle attività di progetto

Siano le attività in esame, la durata della d_j e della j -sima atti-

vità e s_j il suo momento di inizio. Se E è l'insieme delle coppie (i, j) fra cui esiste un vincolo di precedenza, tale vincolo si formalizza come:

$$s_i + d_i \leq s_j \text{ con } (i, j) \in E$$

1.b. Stima della durata di ciascuna attività

Secondo la logica stocastica del PERT, la durata della d_j della j -esima attività è una variabile aleatoria descritta da una legge di distribuzione di tipo Beta e rappresentata dalla durata media attesa t_e calcolata con il metodo delle "tre stime":

$$d_j = t_e = \frac{a + 4m + b}{6}$$

ove a è la durata ottimistica dell'attività, m la media e b la pessimistica.

1.c. Determinazione del percorso critico

Le logiche PERT-CPM organizzano le attività di progetto in un grafico reticolare che consente l'immediata visualizzazione dell'evoluzione cronologica del progetto (cfr. Figura 1). All'interno di questo grafico esiste il percorso critico, costituito dall'insieme delle attività il cui ritardo inficerebbe l'intera esecuzione. La determinazione di tali attività si effettua con algoritmi di Programmazione Dinamica che, per ogni azione, stabiliscono il relativo scorrimento (*Total Float, TF*), ossia il lasso di tempo in cui essa può fluttuare senza modificare il piano di lavoro. In sostanza, il *TF* risulta dalla differenza tra l'inizio *LS* dell'attività al più tardi e l'inizio *ES* della stessa attività al più presto. Se un'attività ha scorrimento nullo allora essa è critica.

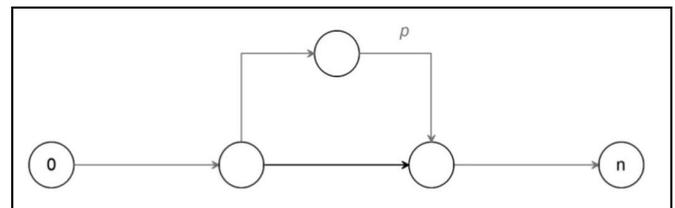


Figura 1 - Il grafico reticolare tipico delle logiche PERT-CPM

Con riferimento alla j -esima attività:

$$ES_j = \max(EL_j + d_j, j + 1)$$

$$ES_j = \min(LS_j + d_j, j - 1)$$

$$TF_j = LS_j - ES_j - d_j \quad ATF_j = 0 \rightarrow j \text{ attività critica}$$

La somma della durata delle attività critiche di progetto costituisce la sua durata minima che, secondo il CPM, è anche la durata normale. La prima fase del protocollo si riassume nel workflow di Figura 2.

Nell'analisi temporale si assume di ricavare la durata delle attività in condizioni normali, a cui corrispondono anche costi normali, cioè ordinari in senso estimativo. Il costo totale $C(t)$ del progetto, aggregazione dei costi diretti e indiretti, secondo il CPM è una funzione della variabile temporale. $C(t)$ conosce il suo punto di minimo in corrispondenza di una certa durata di progetto, detta ottima.

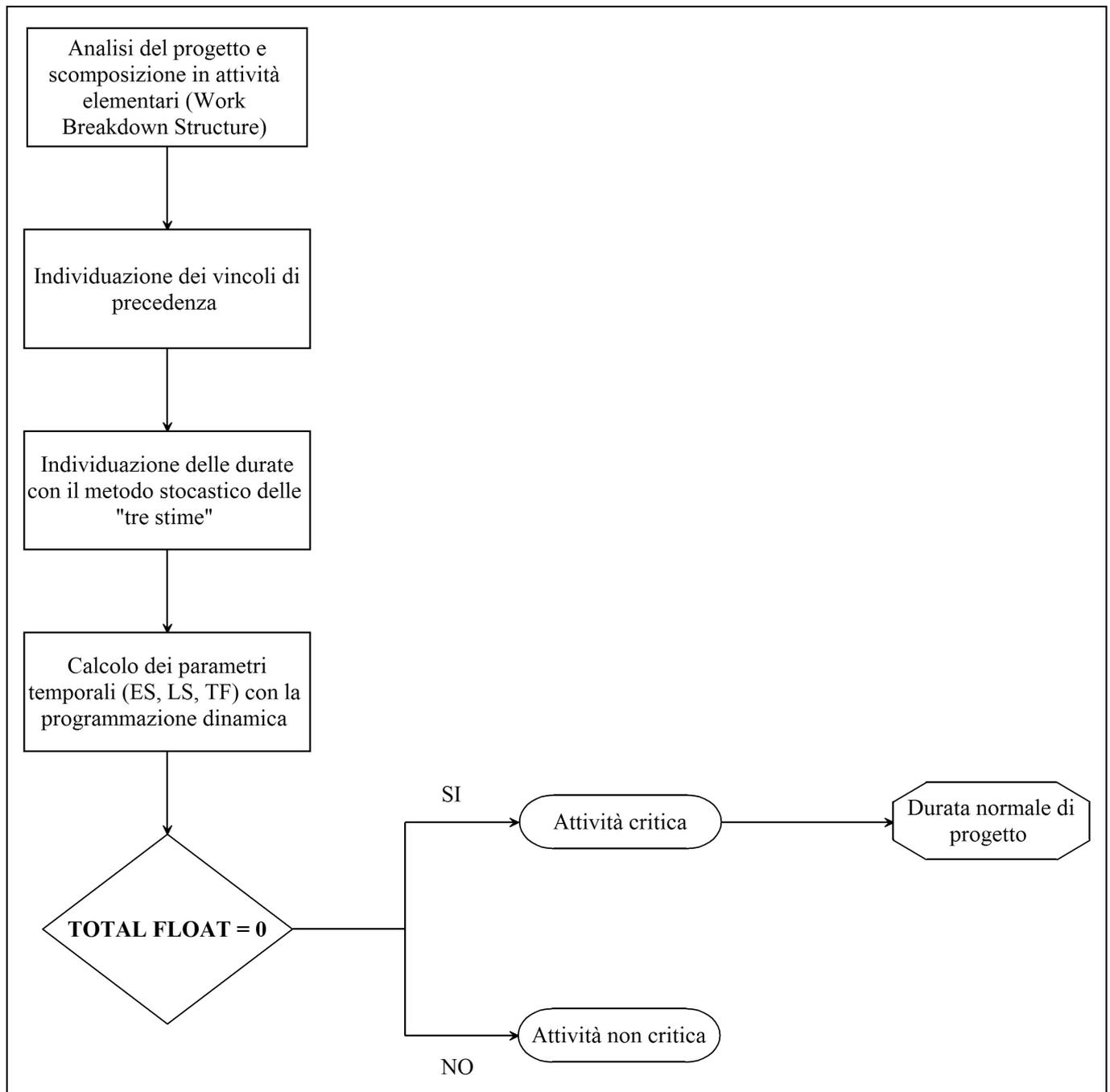


Figura 2- Il workflow della prima fase del protocollo

Se C_n è il costo normale di progetto, la seconda fase del protocollo mira a individuare la durata che garantisce la minimizzazione del costo totale, posto che essa deve essere almeno pari alla minima durata tecnicamente possibile ("metodo degli obiettivi vincolati"):

$$\min t \mid C(t) \leq C_n \text{ ove } t \in X \rightarrow t \geq \min_{d:0 \rightarrow n} \sum \bar{d}_i$$

A tale fine i passi del protocollo sono di seguito dettagliati ai punti 2.a, 2.b, 2.c.

2.a. Disaggregazione della voce di costo legata alla j-esima attività in costo diretto e indiretto

Dal Computo Metrico Estimativo e dalle relative analisi dei prezzi è possibile estrapolare il costo di costruzione che compete all'impresa in relazione ad una specifica iniziativa progettuale. In ambito edile alla ditta esecutrice spetta

il costo di costruzione, ottenuto sommando il costo tecnico di costruzione (materiali, manodopera, noli e trasporti), le spese indirette di cantiere (allestimento, sicurezza, figure gestionali...), le spese generali di sede e l'utile del costruttore. Il CPM considera, ai fini dello studio, solo due categorie di costi: diretti e indiretti. I primi corrispondono pedissequamente ai costi tecnici di costruzione, i secondi si calcolano come somma delle spese indirette di cantiere e delle spese generali di sede.

2.b. Definizione delle curve costo diretto - costo indiretto - durata di ciascuna attività

La relazione fra il costo indiretto c_i e la durata t di un'attività è assimilata ad una retta passante per l'origine del riferimento (c_i, t). Per cui se C_d è il costo diretto totale del progetto in condizioni normali e c_i è il costo indiretto calcolato come una sua aliquota, la retta dei costi indiretti si formalizza come:

$$C_i(t) = c_i t.$$

I costi diretti hanno invece un andamento tipicamente convesso rispetto alla durata delle attività, ma il CPM considera un'approssimazione lineare della relazione fra il tempo t e il costo diretto c_d della generica attività:

$$C_d = k - ht,$$

con $a \leq t \leq b$, ove a è la durata normale e b una durata detta accelerata, la minima durata tecnicamente possibile per completare l'attività. h è definito come costo di tempo guadagnato o indice di costo, come specificato più avanti al punto 2.c. La coordinata che sul piano tempo-costi è individuata dalla durata accelerata e dal relativo costo accelerato è detta *punto di crash* (Figura 3).

2.c. Applicazione dell'accelerazione di Fondhal per la ricerca della durata ottima

Sono note a questo punto la programmazione normale e quella accelerata. Nessuna di essa è la più vantaggiosa per l'esecutore nell'ottica di una valutazione complessiva dei costi. Si intuisce che la soluzione ottimale è una programmazione dei lavori intermedia fra le due che minimizzi il costo totale dell'opera.

Per la ricerca di tale durata ottima si fa ricorso al procedimento dell'accelerazione di Fondhal [24]. Anzitutto si definisce costo di tempo guadagnato o indice di costo (IC) per la j -esima attività il valore:

$$h = \frac{c_d^b - c_d^a}{a - b}.$$

Esso rappresenta il costo unitario aggiuntivo ($c_d^b - c_d^a$) necessario per accelerare la j -esima attività di un'unità di tempo. Questo valore è significativo per le attività del percorso critico. Difatti, soltanto le attività critiche, se accelerate, determinano una modifica all'intero progetto. Esse pertanto si ordinano secondo il proprio IC e, in successione, si accelerano di un'unità temporale iniziando dall'attività con IC minimo. Ad ogni iterazione il nuovo costo totale del progetto diventa:

$$C(t) = \sum_{i,j} k + \sum_{i,j} hb - \sum_{i,j} c_i(t - 1).$$

Nell'applicazione iterativa di Fondhal, il costo totale di progetto si calcola come il costo normale K di progetto, più il costo di tempo guadagnato (con hb relativo all'accelerazione dell'attività critica con l'IC più elevato, ove h è l'IC e b la durata accelerata dell'attività prescelta), meno l'ali-

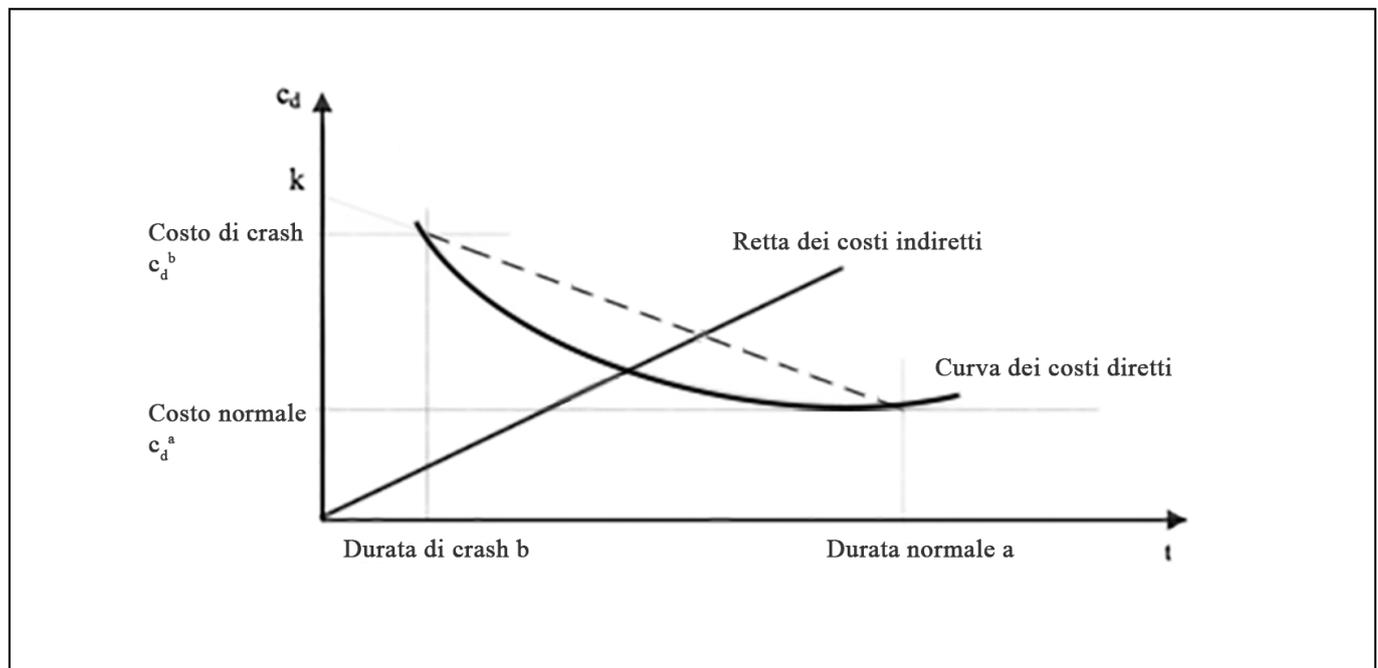


Figura 3 - Curve dei costi

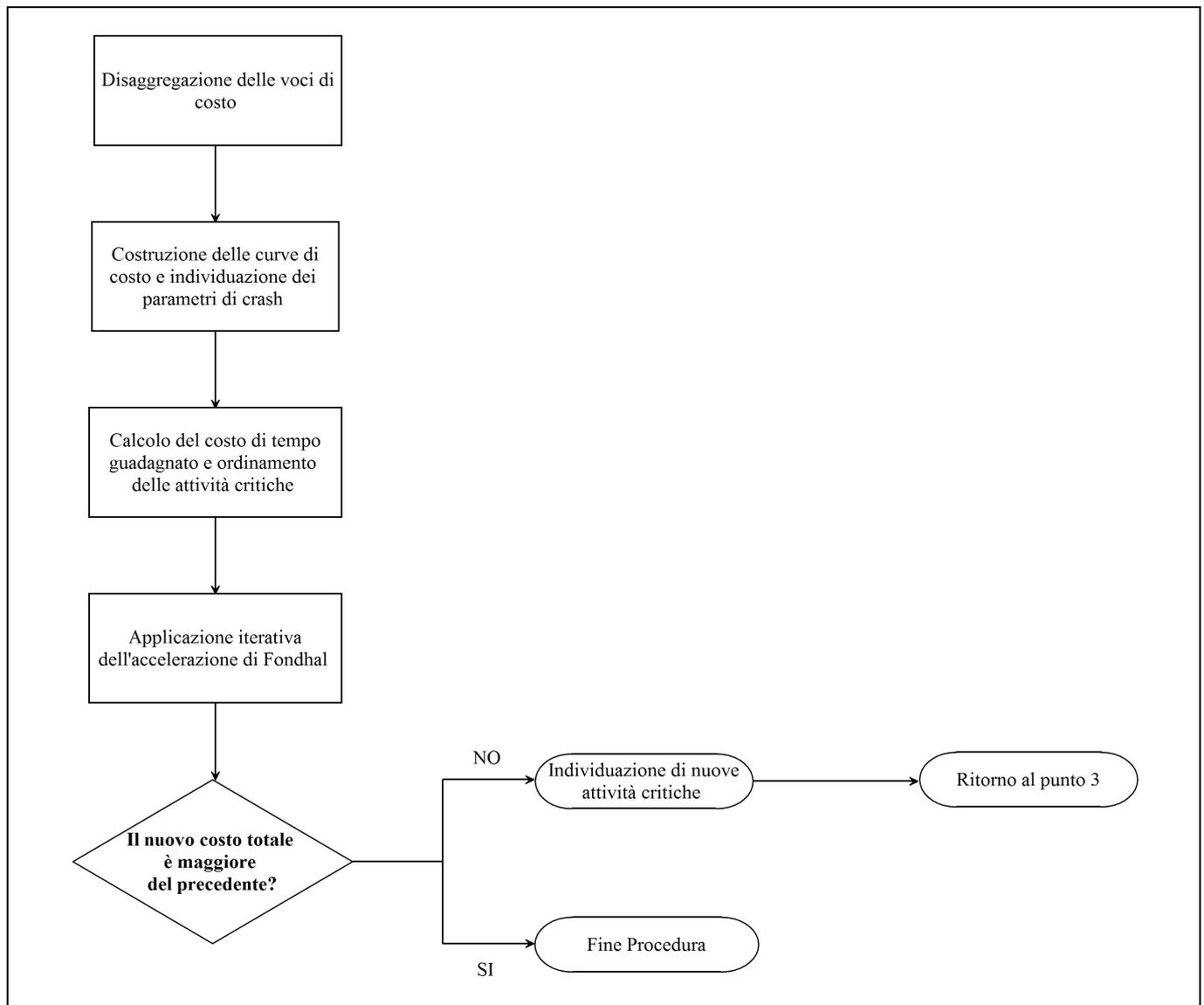


Figura 4 - Il workflow della seconda fase del protocollo

quota di costo indiretto che viene meno avendo accelerato le attività di un'unità temporale, quindi $c_j(t-1)$. Si cerca cioè l'equilibrio ottimo fra il maggior costo diretto dovuto all'accelerazione e il minor costo indiretto dovuto alla diminuzione dei tempi.

Dopo ogni accelerazione occorre controllare se altre attività sono divenute critiche. Il procedimento si arresta quando si ottiene un nuovo costo totale maggiore del precedente. A tale istante corrisponde l'ottimo ammissibile:

$$t \mid \min C(t) \leq C_n \wedge a_{ij} \leq t_{ij} \leq b_{ij}$$

Al termine dell'applicazione del protocollo, per ogni tecnologia oggetto d'indagine, si ottengono le coordinate tempo-costo ottimali di realizzazione. La Figura 4 sintetizza la seconda fase del protocollo.

5. IMPLEMENTAZIONE DEL PROTOCOLLO D'ANALISI

Le tre tecnologie edilizie oggetto di comparazione sono ora assoggettate al protocollo illustrato, ripercorrendo tutte le fasi 1.a, 1.b, 1.c, 2.a, 2.b, 2.c.

5.1 Struttura tradizionale in opera in calcestruzzo armato

Nella prima fase del protocollo le attività sono individuate con il supporto della Work Breakdown Structure in Figura 5. Le operazioni così determinate si ordinano secondo i vincoli di precedenza cronologica in Tabella 1. Il metodo

delle tre stime e le implementazioni di Programmazione Dinamica, nell'ambito delle logiche PERT-CPM, permettono di individuare rispettivamente la durata media attesa delle attività (Tabella 2) e il percorso critico (Figura 6). Segnatamente, le attività che vincolano l'intero progetto sono costituite dall'attesa che segue il getto della platea,

dalla realizzazione dell'impalcato e dalle finiture della copertura. Viene quindi stabilita una durata normale di progetto pari a 157 unità temporali (giorni lavorativi consecutivi), come in Tabella 3. A questo punto il protocollo sposta la sua attenzione sui costi del progetto: alla durata normale si associa un costo totale di 231.293 Euro, men-

1.a. individuazione e ordinamento cronologico delle attività di progetto

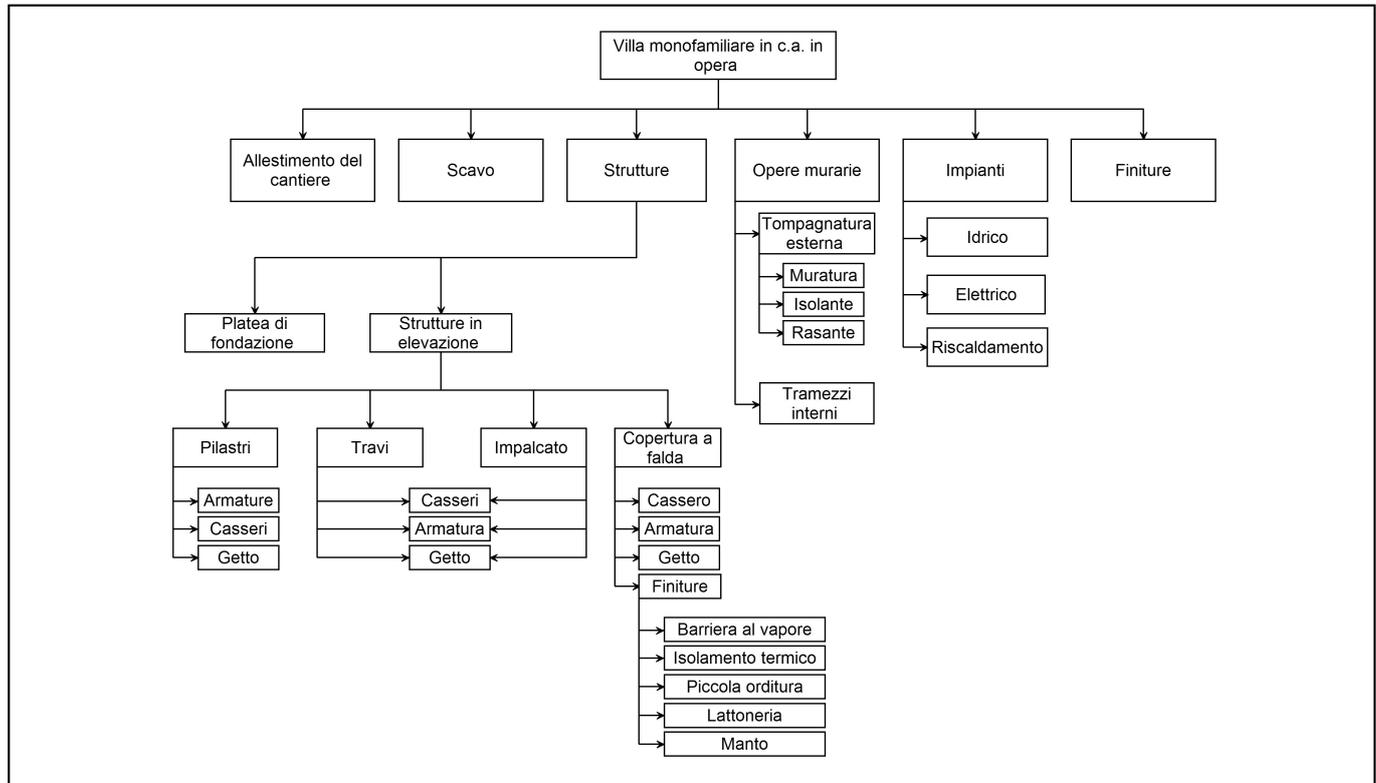


Figura 5 - Work Breakdown Structure

Tabella 1 - Ordinamento cronologico delle attività

N°	Attività	Codice	Attività strettamente precedenti
1	Fine progettazione	FP	-
2	Installazione cantiere	IC	1
3	Scavo	SC	2
4	Platea	PL	3
5	Attesa getto	A1	4
6	Pilastri	PI	4.5
7	Attesa getto	A2	6
8	Impalcato	IM	6.7
9	Attesa getto	A3	8
10	Copertura	CO	9
11	Tompagnature Esterne	TEs	9
12	Tramezzature Interne	TIn	9
13	Impianti	Imp	12
14	Finiture	FI	13

tre nel punto di crash la durata accelerata vale 70 unità temporali e il relativo costo totale è di 395.586 Euro (Tabella 4). L'accelerazione di Fondhal stabilisce infine che la

struttura tradizionale in opera in c.a. può essere ottimamente realizzata in 156 unità temporali, con un costo totale minimo di 231.168 Euro (Tabella 5).

1.b. Stima della durata di ciascuna attività

Tabella 2 - Applicazione del metodo delle tre stime

Attività i-j	Codice attività	Durata stimata [gg]			Media t_e [gg]	Deviazione standard s
		a	m	b		
1-2	IC	1	2	4	2	0.10
2-3	SC	0.2	1	2	1	0.04
3-4	PL	5	14	38	17	0.90
4-5	A1	9	18	30	19	0.58
4-6	PI	2	6	15	7	0.35
6-7	A2	9	18	30	19	0.58
6-8	IM	7	19	52	23	1.24
8-9	A3	9	18	30	19	0.58
9-10	CO	4	14	28	15	0.66
9-11	TEs	3	10	21	11	0.50
9-12	TIn	1	4	8	4	0.19
12-13	Imp	2	8	16	9	0.39
13-14	FI	17	48	118	54	2.80

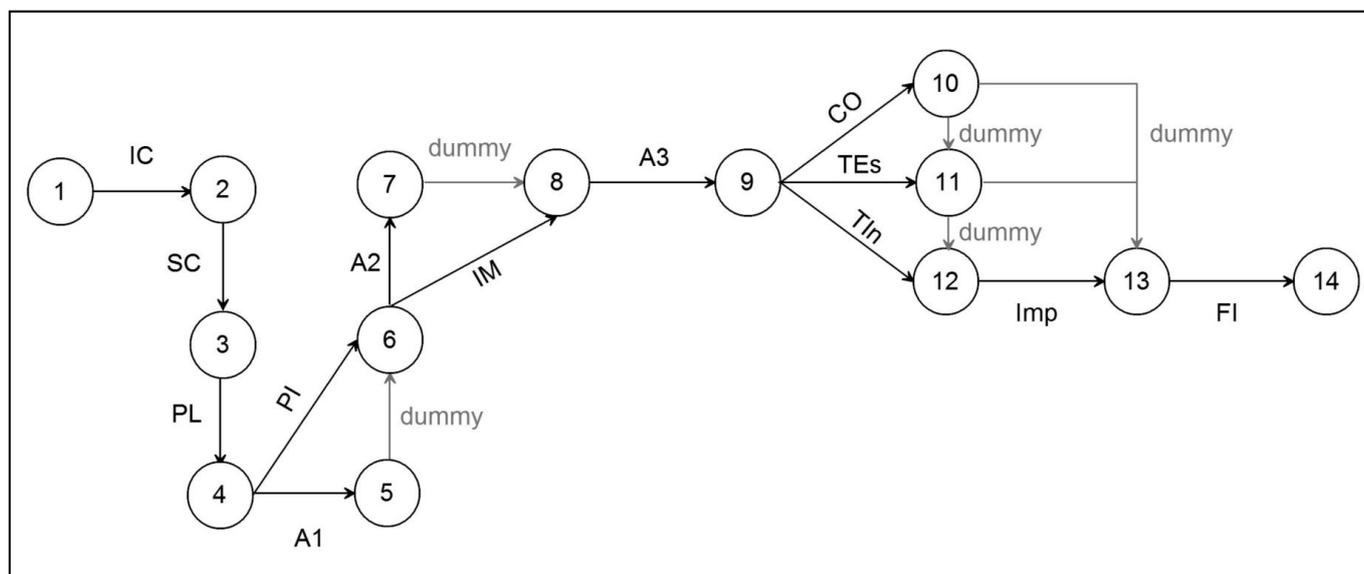


Figure 6 - Il grafico reticolare secondo le logiche PERT-CPM

1.c. Determinazione del percorso critico del progetto

Tabella 3 - Determinazione della durata normale del progetto

Attività i-j	Codice attività	Durata [gg]	(ES)n [gg]	(LS)n [gg]	(Sc)n [gg]	(ST)n.n+1 [gg]	Percorso critico	Durata normale
1-2	IC	2	2	3	1	0	SI	
2-3	SC	1	3	3	0	0	SI	
3-4	PL	17	20	20	0	0	SI	
4-5	A1	19	39	39	0	0	SI	
4-6	PI	7	39	39	0	13	NO	
6-7	A2	19	58	62	4	4	NO	
6-8	IM	23	62	62	0	0	SI	157
8-9	A3	19	58	62	4	0	SI	
9-10	CO	15	96	96	0	0	SI	
9-11	TEs	11	96	96	0	4	NO	
9-12	TIn	4	96	96	0	11	NO	
12-13	Imp	9	105	105	0	0	SI	
13-14	FI	54	159	159	0	0	SI	

2.a.-2b. Disaggregazione dei costi e costruzione delle curve costo-durata

Tabella 4 - Disaggregazione delle coordinate normali e di crash. Calcolo dell'IC

Attività	Condizioni normali			Condizioni accelerate			IC	Classifica
	Durata	Costi diretti	Costi indiretti	Durata	Costi diretti	Costi indiretti		
IC	2	4.026	1.047	1	6.858	1.783	1.711	7
SC	1	4.208	1.094	0.2	4.946	1.286	1.087	1
PL	17	39.066	10.157	5	52.103	13.547	1.166	3
A1	19	-	-	9	-	-	-	-
PI	7	8.165	-	2	13.852	-	1.232	-
A2	19	-	-	9	-	-	-	-
IM	23	31.136	8.095	7	48.416	12.588	1.136	2
A3	19	-	-	9	-	-	-	-
CO	15	16.082	4.181	4	31.295	8.137	1.437	5
TEs	11	10.617	-	3	22.289	-	1.469	-
TIn	4	2.986	-	1	7.174	-	1.369	-
Imp	9	16.070	4.178	2	25,164	6.543	1.435	4
FI	54	55.703	14.483	17	110.798	28.808	1.471	6
TOTALE		188.057	43.235		322.895	72.691		
		231.293			395.586			

2.c. Applicazione dell'accelerazione di Fondhal

Tabella 5 - L'accelerazione di Fondhal per il calcolo delle coordinate ottime di progetto

Attività	Nuova durata del progetto [gg]	ΔC [€]	Nuovo costo diretto [€]	Nuovo costo indiretto [€]	Nuovo costo totale [€]
SC	156	1,087	189,145	42,023	231,168
IM	155	1,136	190,281	41,756	232,037
PL	154	1,166	191,447	41,143	232,590

5.2 Struttura parzialmente industrializzata in calcestruzzo armato

Seguendolo stesso *iter* procedurale al punto precedente, è stabilita una durata normale di progetto pari a 117 unità temporali (Figure 7 e 8. Tabelle 6, 7 e 8). Per quanto concerne i costi, alla durata normale si associa il costo totale di

207.935 €, mentre nel punto di crash la durata accelerata vale 77 unità temporali e il relativo costo totale è di 338.425 € (Tabella 9). L'accelerazione di Fondhal conferma che la struttura parzialmente industrializzata in c.a. può essere ottimamente realizzata in 117 unità temporali, con un costo totale minimo di 207.935 Euro, sicché la durata normale coincide con quella ottima (Tabella 10).

1.a. Individuazione e ordinamento cronologico delle attività di progetto

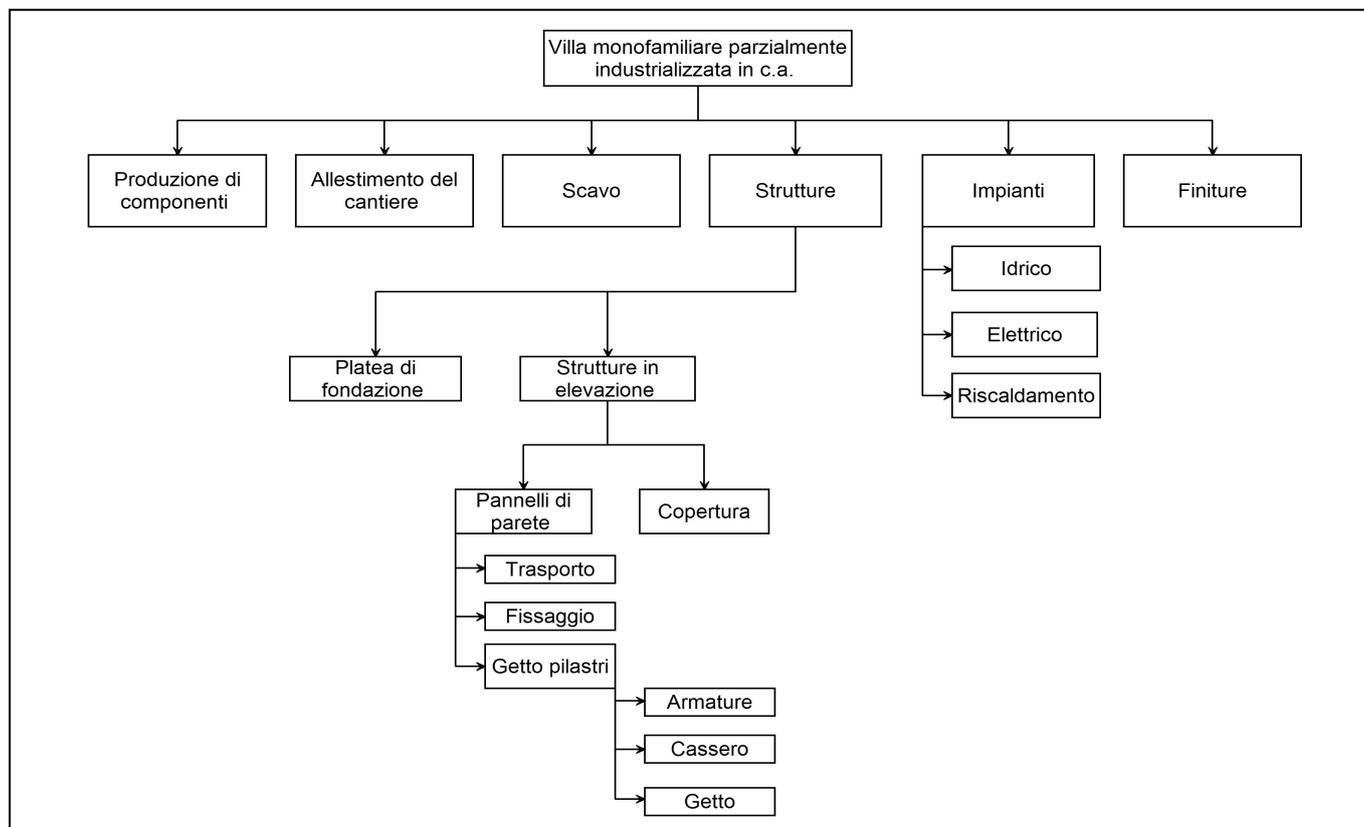


Figura 7 - Work Breakdown Structure

Tabella 6 - Ordinamento cronologico delle attività

N°	Attività	Codice	Attività strettamente precedenti
1	Fine progettazione	FP	–
2	Produzione elementi	PE	1
3	Installazione cantiere	IC	1
4	Scavo	SC	3
5	Platea	PL	4
6	Attesa getto	A1	5
7	Installazione pareti	IP	2,6
8	Attesa getto	A2	7
9	Copertura	CO	8
10	Impianti	Imp	9
11	Finiture	FI	10

1.b. Stima della durata di ciascuna attività

Tabella 7 - Applicazione del metodo delle tre stime

Attività i-j	Codice attività	Durata stimata [gg]			Media t_e [gg]	Deviazione standard s
		a	m	b		
1-2	PE	17	22	29	22	0.34
1-3	IC	1	2	4	2	0.10
3-4	SC	0.2	1	1	1	0.03
4-5	PL	5	14	38	17	0.90
5-6	A1	9	18	30	19	0.58
5-7	IP	4	10	30	19	0.71
7-8	A2	15	15	15	15	0.00
8-9	CO	6	14	41	17	0.98
8-10	Imp	2	8	16	9	0.39
10-11	FI	17	49	116	55	2.76

1.c. Determinazione del percorso critico del progetto

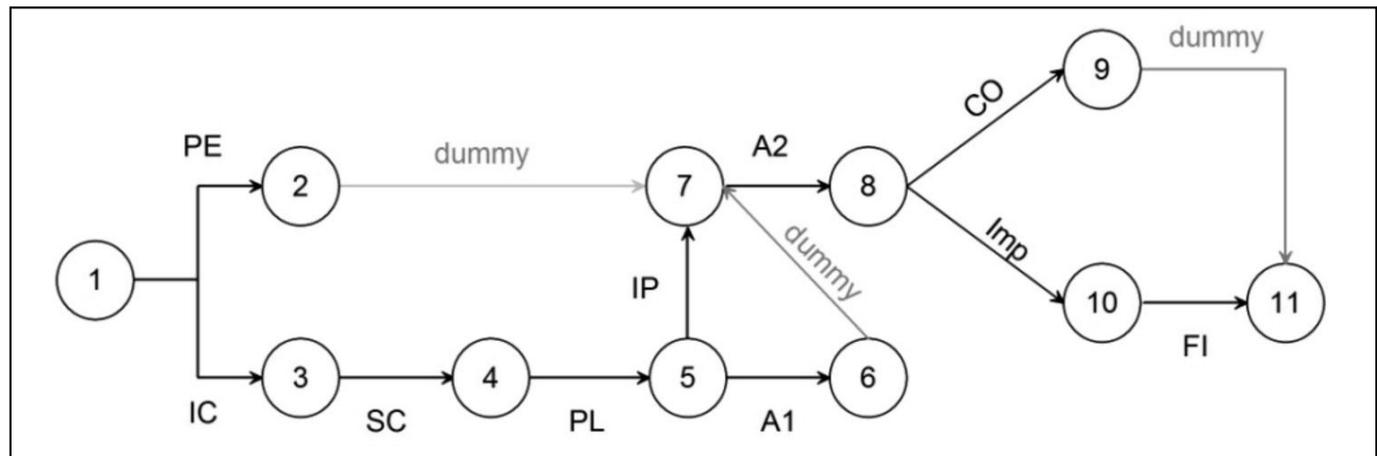


Figura 8 - Il grafico reticolare secondo le logiche PERT-CPM

Tabella 8 - Determinazione della durata normale del progetto

Attività i-j	Codice attività	Durata [gg]	(ES)n [gg]	(LS)n [gg]	(Sc)n [gg]	(ST)n,n+1 [gg]	Percorso critico	Durata normale
1-2	PE	22	22	39	16	16	NO	117
1-3	IC	2	2	2	0	0	SI	
3-4	SC	1	3	3	0	0	SI	
4-5	PL	17	20	20	0	0	SI	
5-6	A1	19	38	39	1	1	NO	
5-7	IP	19	39	39	0	0	SI	
7-8	A2	15	54	54	0	0	SI	
8-9	CO	17	71	117	46	46	NO	
8-10	Imp	9	62	62	0	0	SI	
10-11	FI	55	117	117	0	0	SI	

2.a.-2.b. Disaggregazione dei costi e costruzione delle curve costo-durata

Tabella 9 - Disaggregazione delle coordinate normale e di crash. Calcolo dell'IC

Attività	Condizioni normali			Condizioni Accelerate			IC	Classifica
	Durata	Costi diretti	Costi indiretti	Durata	Costi diretti	Costi indiretti		
PE	22	11.784	–	17	19.675	–	1.469	–
IC	2	3.178	826	1	4.595	1.195	856	1
SC	1	3.825	995	0.2	4.496	1.169	1.087	2
PL	17	39.071	10.158	5	52.113	13.549	1.166	3
A1	19	–	–	9	–	–	–	–
IP	19	11.944	–	4	20.824	–	602	–
A2	15	–	–	15	–	–	–	–
CO	17	29.311	–	6	41.622	–	–	–
Imp	9	16.070	4.178	2	25.164	6.543	1.435	4
FI	55	60.789	15.805	17	117.048	30.432	1.483	5
TOTALE		175.972	31.963		285.537	52.888		
		207.935			338.425			

2.c. Applicazione dell'accelerazione di Fondhal

Tabella10 - L'accelerazione di Fondhal per il calcolo delle coordinate ottime di progetto

Attività	Nuova durata del progettot [gg]	ΔC [€]	Nuovo costo diretto [€]	Nuovo costo indiretto [€]	Nuovo costo totale [€]
IC	116	856	176.828	31.599	208.428
SC	115	1.087	177.916	30.387	208.303
PL	114	1.166	179.082	29.774	208.856

5.3 Struttura industrializzata in acciaio

Come nei due casi precedenti, la prima fase del protocollo prevede le attività e le organizza nella Work Breakdown Structure (Figura 9). La totale industrializzazione riduce sensibilmente le attività in opera. Si effettua poi l'ordinamento delle attività secondo i vincoli di precedenza cronologica (Tabella 11). Si osserva che la produzione della struttura in officina può essere parallelizzata rispetto al resto. Il metodo delle tre stime e le implementazioni di Programmazione Dinamica, nell'ambito delle logiche PERT-CPM, permettono di individuare rispettivamente la durata

media attesa delle attività (Tabella 12) e il percorso critico (Figura 10). Viene quindi stabilita una durata normale di progetto pari a 94 unità temporali (Tabella 13).

Nella seconda fase di analisi dei costi, alla durata normale si associa il costo totale normale di 207.514 €, mentre le coordinate tempo-costo accelerate valgono rispettivamente 54 unità temporali e 352.626 € (Tabella 14). Infine, l'applicazione dell'accelerazione di Fondhal conferma che la struttura industrializzata in acciaio può essere ottimamente realizzata in 94 giorni lavorativi consecutivi, al costo totale di 207.514 €. Quindi la durata normale attesa coincide già con quella ottima (Tabella 15).

1.a. Individuazione e ordinamento cronologico delle attività di progetto

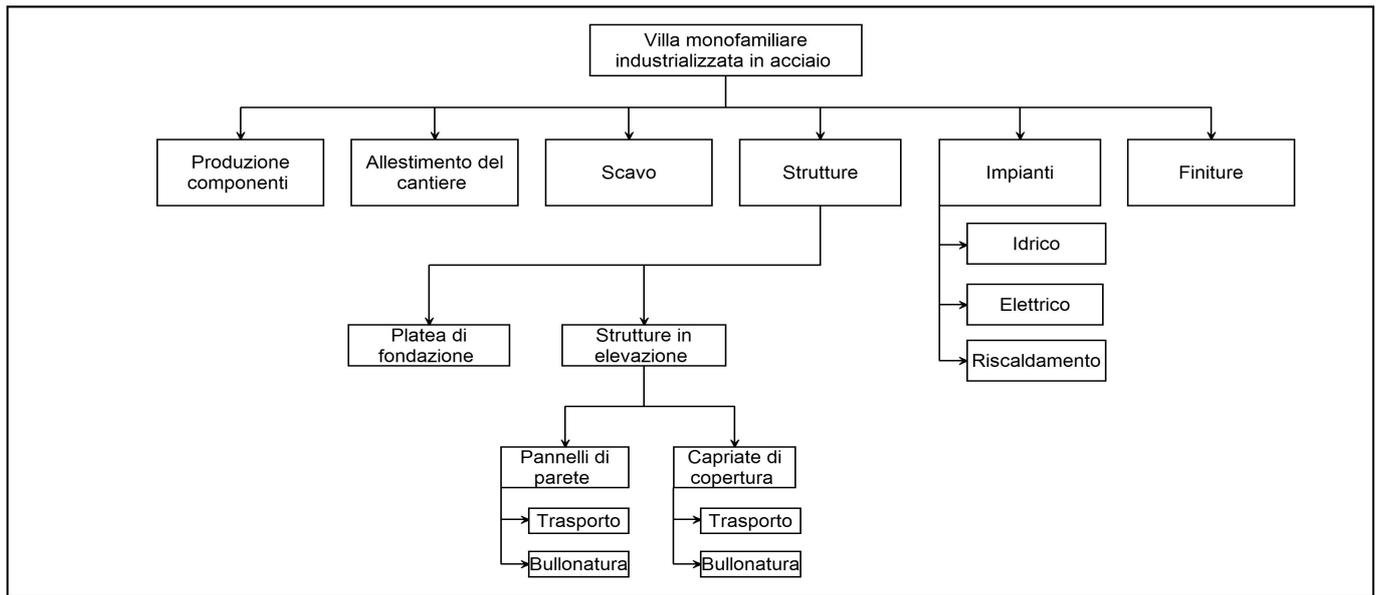


Figura 9 – Work Breakdown Structure

Tabella 11 - Ordinamento cronologico delle attività

N°	Attività	Codice	Attività strettamente precedenti
1	Fine progettazione	FP	–
2	Produzione elementi	PE	1
3	Installazione cantiere	IC	1
4	Scavo	SC	3
5	Platea	PL	4
6	Attesa getto	A1	5
7	Installazione Pareti	IP	2,5
8	Installazione Capriate	ICa	7
9	Finitura Copertura	FC	8
10	Impianti	Imp	10
11	Finiture	FI	11

1.b. Stima della durata di ciascuna attività

Tabella 12 - Applicazione del metodo delle tre stime

Attività i-j	Codice attività	Durata stimata [gg]			Media t_e [gg]	Deviazione standard s
		a	m	b		
1-2	PE	16	38	53	2	1.00
1-3	IC	1	2	4	1	0.10
3-4	SC	0.2	1	1	17	0.03
4-5	PL	5	13	32	19	0.77
5-6	A1	9	18	30	7	0.58
5-7	IP	0.6	1	4	19	0.10
7-8	ICa	0.4	1	3	23	0.07
8-9	FC	8	18	53	19	1.27
8-10	Imp	2	8	16	15	0.39
10-11	FI	15	42	102	47	2.43

1.c. Determinazione del percorso critico del progetto

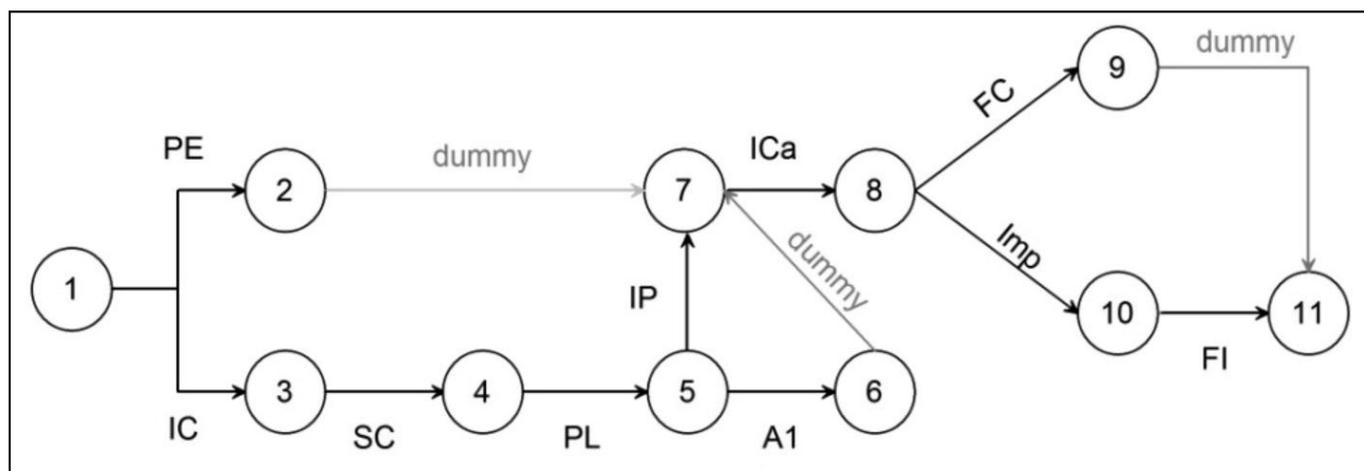


Figura 10 - Il grafico reticolare secondo le logiche PERT-CPM

Tabella 13 - Determinazione della durata normale del progetto

Attività i-j	Codice attività	Durata [gg]	(ES)n [gg]	(LS)n [gg]	(Sc)n [gg]	(ST)n,n+1 [gg]	Percorso critico	Durata normale
1-2	PE	37	37	37	0	0	SI	94
1-3	IC	2	2	3	1	1	NO	
3-4	SC	1	3	4	1	1	NO	
4-5	PL	15	18	19	1	1	NO	
5-6	A1	19	37	37	0	1	NO	
5-7	IP	2	37	37	0	17	NO	
7-8	Ica	1	38	38	0	0	SI	
8-9	FC	22	60	94	34	34	NO	
8-10	Imp	9	47	47	0	0	SI	
10-11	FI	47	94	94	0	0	SI	

2.a-2.b. Disaggregazione dei costi e costruzione delle curve costo-durata

Tabella 14 - Disaggregazione delle coordinate normale e di crash. Calcolo dell'IC

Attività	Condizioni normali			Condizioni accelerate			IC	Classifica
	Durata	Costi diretti	Costi indiretti	Durata	Costi diretti	Costi indiretti		
PE	37	48.042	-	16	82.241	-	1.662	-
IC	2	3.178	826	1	4.595	1.195	856	1
SC	1	3.825	995	0.2	4.496	1.169	1.087	2
PL	15	31.746	8.254	5	44.006	11.442	1.223	4
A1	19	-	-	9	-	-	-	-
IP	2	2.917	-	0.6	4.201	-	1.106	-
ICa	1	2.009	522	0.4	2.893	752	1.106	3
FC	22	29.845	-	8	46.818	-	1.144	-
Imp	9	16.070	4.178	2	25.164	6.543	1.435	5
FI	47	43.735	11,371	15	92.946	24.166	1.501	6
TOTAL		181.368	26.146		307.360	45.266		
		207.514			352.626			

2.c. Applicazione dell'accelerazione di Fondhal

Tabella 15 - L'accelerazione di Fondhal per il calcolo delle coordinate ottime di progetto

Attività	Nuova durata del progetto [gg]	ΔC [€]	Nuovo costo diretto [€]	Nuovo costo indiretto [€]	Nuovo costo totale [€]
IC	94	856	182.224	25.783	208.007
SC	93	1.087	183.311	25.543	208.855
ICa	92	1.106	184.417	25.060	209.477

6. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI. IL PROBLEMA DELLA QUALITÀ EDILIZIA

L'applicazione del protocollo di studio evidenzia che le tecnologie edili industrializzate registrano una durata rispettivamente del 25% e del 39% minore rispetto all'esecuzione dello stesso manufatto edile eseguito in opera con tecniche tradizionali. A ciò si accompagna una diminuzione dei costi dell'11% circa, come fa vedere la Tabella 16 che sintetizza i risultati. Nelle tecniche industrializzate la produzione delle componenti avviene parallelamente alle attività di preparazione del sito, così contraendo le dilazioni temporali tipiche di un cantiere tradizionale. La diminuzione della durata, oltre che in un vantaggio per la committenza, si traduce anche in minor costo indiretto per l'impresa.

Appare importante dare cenno anche ad un terzo aspetto che concorre alla scelta finale del decisore sulla tecnologia edile, cioè la qualità del costruito. In ambito edile la componente qualitativa è di difficile definizione. Oggi la qualità edilizia si rifà alla normativa esigenziale-prestazionale UNI EN 10838:1999, che la descrive come un parametro relativo da configurare in base alle necessità dell'utenza di destinazione. La formulazione di un giudizio qualitativo può effettuarsi attraverso valutazioni multicriteriali [26-30]. Evidentemente, però, l'adozione di tali strumenti non è sistematica e i giudizi a cui si giunge sono spesso frammentati, tanto che risulta estremamente complesso costruire un *plateau* di riferimento. In sostanza, ogni studio sulla qualità edilizia finisce per costituire un caso a sé stante [31].

La formulazione del giudizio qualitativo sul manufatto si basa sulla valutazione di tre elementi determinanti: la qualità dei prodotti edili utilizzati, la qualità del progetto e la qualità del processo edilizio adottato. Anche la sola defi-

nizione di tali elementi non è semplice e può condurre a conclusioni divergenti soprattutto quando ogni commessa è una singolarità non ripetibile. Ma proprio dietro questo aspetto si cela il possibile vantaggio dell'edilizia industrializzata. L'edilizia *off-site*, grazie al serrato controllo della filiera di produzione, offre la possibilità di accertare con sicurezza lo standard produttivo raggiunto, come non risulterebbe possibile in realizzazioni in sito che sono singolarità irripetibili e, in secondo luogo, consente di strutturare un protocollo univoco di valutazione della qualità.

In quest'ottica l'edilizia industrializzata può attingere a piene mani dall'apparato normativo già predisposto per il comparto manifatturiero, dove la componente qualitativa costituisce fattore definito in maniera quasi scientifica. D'altra parte, la prefabbricazione pesante degli anni '60 ha completamente ignorato questo aspetto, sia per una mancata sensibilità di fondo, sia per le circostanze che richiedevano di accelerare la produzione sacrificando spesso ogni altro attributo. E ciò ha contribuito fortemente al suo fallimento [14].

7. LA STIMA DEGLI INDICI DI PRODUTTIVITÀ

L'implementazione delle tecniche reticolari proprie della Ricerca Operativa ha permesso di individuare le coordinate tempo-costo rappresentative della massima potenzialità esecutiva per ognuna delle tre tecnologie costruttive in esame. Si procede ora ad aggregare questi risultati in un unico indicatore significativo. In coerenza con le premesse sul fallimento produttivo del settore edile, laddove la metà circa delle ore lavorate non produce valore economico, appare corretto identificare tale indicatore con un parametro di produttività: "La produttività, con riferi-

Tabella 16 - Gli esiti del protocollo di analisi

Tecnologia edile	Durata ottima di progetto [gg]	Costo diretto ottimo [€]	Costo indiretto ottimo [€]	Costo ottimo di progetto [€]	Costo ottimo unitario [€/m ²]
Tradizionale in opera	156	189.145	42.023	231.168	1.778
Parzialmente industrializzata in c.a.	117	175.972	31.963	207.935	1.599
Industrializzata in acciaio	94	181.368	26.146	207.514	1.596

mento a un'impresa, a un insieme di imprese e, in via estensiva, al complesso di un'intera economia, è data dal rapporto tra i risultati conseguiti nel processo produttivo e i mezzi impiegati per realizzarli" [32]. Essa misura la capacità dell'entità economica di trasformare risorse economiche in beni e servizi.

Nell'odierno mondo economico, l'unità di produzione è l'impresa, alla cui guida vi è l'imprenditore che acquista e gestisce i materiali e i servizi dei fattori produttivi, storicamente lavoro, capitale e terra (gli *input*), per produrre beni o servizi da immettere sul mercato (l'*output*). Per misurare la produttività è di cruciale importanza parametrizzare i risultati ottenuti e i mezzi utilizzati nel processo produttivo. L'*output* si identifica con il valore aggiunto della produzione: il valore che il lavoro di trasformazione industriale aggiunge a quello delle materie prime utilizzate. Come *input* si considera invece il solo lavoro immesso nella produzione [32, 33]. Questo significa che l'indice di misura coincide con la produttività del lavoro: "Poiché il lavoro umano, in un'impresa organizzata e in regolare funzionamento, è il fattore meno soggetto a variazione, la produttività del lavoro non tende, di solito, a porre in evidenza l'efficienza del lavoratore, bensì l'efficacia dell'utilizzazione della sua operosità" [19]. Tale indice viene valutato come:

$$\pi = \frac{Y_0 \cdot P_0}{H_0}$$

Dove:

- Y_0 è il valore aggiunto della produzione, stimato secondo uno studio di settore dell'Agenzia delle Entrate [34] per mezzo della formula [valore aggiunto/(numero di ore lavorate x numero di addetti)];
- P_0 è il prezzo per quantità del prodotto o ricavo unitario, noto a partire dalle elaborazioni condotte con tecniche reticolari. L'imprenditore ordinario suppone di ottenere un ricavo almeno pari al costo di costruzione calcolato come somma dei costi variabili, invariabili e dell'utile del costruttore, assunto pari al 10% dei costi sostenuti;
- H_0 è il numero di ore di lavoro effettuate presso un determinato reparto dell'entità economica considerata, calcolato una volta nota l'incidenza della manodopera in ciascuna attività.

Dalle elaborazioni discende che la pratica di tecniche edilizie industrializzate comporta, per il prototipo edile ogget-

to di studio, un aumento dell'indice di produttività del lavoro rispettivamente del 17% e del 32%, rispetto alla tradizionale esecuzione in opera. A questo si accompagna un fisiologico aumento del valore aggiunto orario per addetto, che passa da meno di 25 Euro per ora lavorata a più di 36. In Tabella 17 l'indice di produttività è normalizzato rispetto al valore ottenuto per la tecnologia edile tradizionale in opera.

8. CONCLUSIONI

Un operaio edile è dunque in grado di generare oggi non più di circa 25 € di valore aggiunto orario, con un margine di crescita sino ad oltre 32 € per l'edilizia parzialmente industrializzata in c.a. e sino ad oltre 36 € per l'edilizia industrializzata in acciaio. Così appare addirittura possibile quasi eguagliare il valore aggiunto orario di 37 € per addetto che si registra per l'intera economia mondiale. Com'è evidente, tali risultati assumono considerevole significato. L'edilizia *off-site* può cioè offrire al settore delle costruzioni la concreta possibilità di colmare il *gap* di prestazioni produttive con l'economia totale. Il che si tradurrebbe, globalmente, nella generazione di ulteriori 1,6 trilioni di dollari, pari a metà del fabbisogno di infrastrutture nel mondo. Quasi 1/3 di questa opportunità è in Europa [1].

Il presente lavoro, che pure rileva profili d'interesse per quanto attiene al protocollo d'indagine delineato, rigoroso sul piano degli strumenti computativi implementati e replicabile per studi con medesime finalità, non vuole comunque rinnegare il contributo sostanziale sinora offerto al comparto dalla tradizionale edilizia in sito, né intende prevedere un abbandono futuro. Tuttavia, sembra indubitabile che diverse tecnologie di costruzione possano adattarsi con minore o maggiore efficacia a differenti circostanze e vale di certo la pena conoscere con dettaglio le alternative che il progresso tecnologico mette a disposizione.

Lo studio trova nei limiti delle sue ipotesi di base interessanti prospettive di ricerca futura. Difatti, a partire dal prototipo edile considerato, cioè la soluzione abitativa monofamiliare su un solo livello, è possibile replicare gli schemi d'analisi con riguardo ad altre dissimili tipologie edilizie. Con il fine di valutare l'incidenza delle nuove prospettazioni sui risultati dell'indagine.

Tabella 17 - La stima degli indici di produttività e del valore aggiunto orario per addetto

Tecnologia edile	Prezzo P_0 [€]	Valore aggiunto Y_0 [€]	Indice di produttività	Valore aggiunto orario per addetto \bar{Y} [€/h]
Tradizionale in opera	254.284	92.578	100	24,73
Parzialmente industrializzata in c.a.	228.728	90.376	117	32,19
Industrializzata in acciaio	228.265	81.859	132	36,29

* **Antonio Nesticò**, Ricercatore in Estimo presso il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Salerno.

e-mail: anesticò@unisa.it

** **Rosalia Moffa**, Responsabile Progetto Ricerca&Sviluppo presso G.G. Costruzioni Srl.

e-mail: rosaliamoffa@gmail.com

Questa ricerca è il risultato del lavoro congiunto di entrambi gli Autori, a cui l'articolo va attribuito in parti uguali.

Bibliografia

BARBOSA F., WOETZEL J., MISCHKE J., RIBEIRINHO M.J., SRIDHAR M., PARSONS M., BERTRAM N., BROWN S. (2017). *Reinventing Construction: A Route To Higher Productivity*. McKinsey Global Institute, New York.

BETTS M., ROBINSON G., BURTON C., LEONARD J., SHARDA A., WHITTINGTON T. (2015). *Global Construction 2030. A global forecast for the construction industry to 2030*. Global Construction Perspective and Oxford Economics, London.

MIORIN T. (2017). *Rebuild 2017. Edilizia off-site*. Outlook Re-Lab, Trento.

MERROW E.W. (2011). *Industrial Megaprojects: Concepts, Strategies, and Practices for Success*. Wiley. DOI: 10.1002/9781119201045.

OECD (2014). *OECD Foreign Bribery Report. An analysis of the crime of bribery of foreign public officials*. OECD Publishing, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264226616-en>.

PASSELL JEFFREY S., COHN D'VERA (2015). *Share of Unauthorized Immigrant Workers in Production, Construction Jobs Falls Since 2007: In States, Hospitality, Manufacturing and Construction are Top Industries*. Washington, D.C., Pew Research Center.

CPWR – The Center for Construction Research and Training (2010). *Immigrant Workers in U.S. Construction: Sharing Lessons Learned in Our Unions*. Labor Occupational Health Program (LOHP), University of California, Berkeley.

MENCHES C.L., CHEN J., HULL K.A. (2012). *Factors that Differentiate Reimbursable Contracting from Lump Sum Contracting*. Research Report 260-11, Austin, TX, Construction Industry Institute.

AGARWAL R., CHANDRASEKARAN S., SRIDHAR M. (2016). *Imagining construction's digital future*, McKinsey& Company, New York.

NG THOMAS W.H., FELDMAN, DANIEL C. (2012). *Evaluating Six Common Stereotypes About Older Workers with Meta Analytical Data*. Journal of Personnel Psychology, 65(4), <https://doi.org/10.1111/peps.12003>.

FEDERAZIONE DELLE COSTRUZIONI (2017). *Rapporto 2016. Il Sistema delle costruzioni in Italia*, Federcostruzioni, Roma.

BERNSTEIN H.M. (2011). *Prefabrication and Modularization: Increasing Productivity in the Construction Industry*. McGraw-Hill Construction.

SOUTHERN J. (2016). *Smart Construction. How offsite manufacturing can transform our industry*. KPMG, United Kingdom.

IORI T., MARZO MAGNO A. (2011). *150 anni di storia del cemento in Italia. Le opere, gli uomini, le imprese*. Gangemi Editore, Roma.

IORE P., NESTICÒ A., MACCHIAROLI M. (2016). *The energy improvement of monumental buildings. An investigation protocol and case studies*. Valori e Valutazioni, (16), pp. 45-55.

BOTTERO M., MONDINI G. (2017). *Assessing socio-economic sustainability of urban regeneration programs: An integrated approach*. Green Energy and Technology, pp. 165-184. DOI: 10.1007/978-3-319-44899-2_10.

COPIELLO S., GABRIELLI L. (2017). *Analysis of building energy consumption through panel data: The role played by the economic drivers*. Energy and Buildings, 145, pp. 130-143. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.03.053.

MANGIARLDO A., MICELLI E. (2017). *Simulation models to evaluate the value creation of the grass-roots participation in the enhancement of public real-estate assets with evidence from Italy*. Buildings, 7(4), art. n. 100. DOI: 10.3390/buildings7040100.

ALAIMO G. (1986). *Organizzazione del lavoro e produttività in edilizia*. Co.Gra.S., Palermo.

DE MARE G., NESTICÒ A., MACCHIAROLI M. (2017). *Significant appraisal issues in value estimate of quarries for the public expropriation*. Valori e Valutazioni, (18), pp. 17-23.

NESTICÒ A., DE MARE G., FRUSCIANTE B., DOLORES L. (2017). *Construction costs estimate for civil works. A model for the analysis during the preliminary stage of the project*. In: Lecture Notes in Computer Science, 10408 LNCS, pp. 89-105. DOI: 10.1007/978-3-319-62404-4_7

SERAFINI P. (2009). *Ricerca Operativa*. Springer.

TADEI R., DELLA CROCE, F. (2010). *Elementi di Ricerca Operativa*. Esculapio.

BRAGADIN M.A. (2011). *La programmazione dei lavori con i metodi reticolari*, Maggioli Editore.

MODER J.J., PHILLIPS C.R., DAVIS E.W. (1983). *Project management with CPM, PERT, and precedence diagramming*. Van Nostrand Reinhold, New York.

D'ALPAOS C., MARELLA G. (2014). *Urban planning and option values*. Applied Mathematical Sciences, 8 (157-160), pp. 7845-7864. DOI: 10.12988/ams.2014.49744.

DEL GIUDICE V., DE PAOLA P., TORRIERI F. (2014). *An integrated*

[

choice model for the evaluation of urban sustainable renewal scenarios. *Advanced Materials Research*, 1030-1032, pp. 2399-2406. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1030-1032.2399.

NESTICÒ A., SICA F. (2017). *The sustainability of urban renewal projects: a model for economic multi-criteria analysis*. *Journal of Property Investment and Finance*, 35(4), pp. 397-409. DOI: 10.1108/JPIF-01-2017-0003.

GUARINI M.R., BATTISTI F., CHIOVITTI A. (2018). *A methodology for the selection of multi-criteria decision analysis methods in real estate and land management processes*. *Sustainability (Switzerland)*, 10 (2), art. no. 507. DOI: 10.3390/su10020507.

NESTICÒ A., MORANO P., SICA F. (2018). *A model to support the public administration decisions for the investments selection on historic buildings*. *Journal of Cultural Heritage*, DOI: 10.1016/j.culher.2018.03.008.

DE MARTIN M. (2010). *La valutazione del rendimento nel progetto della residenza. Per un'architettura di qualità fra innovazione e tradizione*. Gangemi Editore.

SANTEUSANIO A., STORTI G. (2002). *Statistica Economica*. Edizioni CUSL.

CAVALIERI D. (2009). *Teoria Economica. Un'introduzione critica*. Giuffrè Editore.

AGENZIA DELLE ENTRATE, DIREZIONE CENTRALE ACCERTAMENTO, UFFICIO STUDI DI SETTORE (2002). *Circolare n. 58/E del 27 giugno 2002*, Roma.