

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Percorso Supply chain e sistemi di trasporto



Tesi di Laurea Magistrale

**Valutazione dell'impatto del 3D Concrete
Printing sulla Construction Supply Chain: focus
sulla distribuzione edile**

Relatore

Prof.ssa Alfieri Arianna

Correlatore

Ing. Pastore Erica

Candidato

Cosso Umberto

Anno Accademico 2023/2024

Abstract

La presente tesi analizza l'impatto che una tecnologia innovativa come il 3D Concrete Printing potrebbe avere sul settore delle costruzioni, il quale si presenta storicamente come un settore avverso al cambiamento e caratterizzato da scarsa produttività.

L'analisi è focalizzata sulle ripercussioni che tale tecnologia porterebbe alla Supply Chain del settore, con particolare attenzione alla figura del distributore edile, in quanto punto di intersezione del flusso di materiali da costruzione tra punto di produzione (produttore) e punto di consumo (cantiere).

Per effettuare tale analisi è stato eseguito uno studio tramite simulazione a eventi discreti con l'ausilio del software Rockwell Arena.

Sono state dunque modellate le due Supply Chain da confrontare, ovvero:

- Supply Chain con utilizzo di metodologia costruttiva tradizionale;
- Supply Chain con utilizzo di 3D Concrete Printing.

È stata effettuata un'analisi sia in funzione delle condizioni attuali del mercato, sia al variare di determinate condizioni, come la domanda.

La tesi conferma quanto già presente in letteratura riguardo i benefici che la tecnologia può portare a valle della filiera, soprattutto in termini di efficienza. Tuttavia, tali benefici si trasmettono solo in parte a monte della filiera, dimostrando ancora una non maturità della tecnologia per il settore in oggetto e una scarsa reattività dalla Supply Chain al cambiamento.

Indice

Introduzione	IV
1. Definizione del contesto	1
1.1 Situazione attuale e nuove sfide per il settore delle costruzioni	1
1.2 Construction Supply Chain	3
2. Review della letteratura	6
2.1 Additive Manufacturing in edilizia - 3D Concrete Printing	6
2.2 Impatto dell'Additive Manufacturing sulle filiere logistiche e sulla CSC	11
2.3 Gap della letteratura	14
2.4 Obiettivi dello studio	16

3.	Descrizione del modello	17
3.1	Ruolo del distributore edile	17
3.2	Metodologia di ricerca	18
3.3	Descrizione della filiera	18
3.3.1	Supply Chain con metodologia di costruzione tradizionale	19
3.3.1.1	Avanzamento del cantiere	19
3.3.1.2	Ordine di materiale al Builders' Merchant	22
3.3.1.3	Ordine di materiale al produttore	25
3.3.2	Supply Chain con utilizzo di 3DCP	26
3.3.2.1	Avanzamento del cantiere	26
3.3.2.2	Ordine di materiale al Builders' Merchant	28
3.3.2.3	Ordine di materiale al produttore	29
3.4	Dati di input	29
3.4.1	Processi	29
3.4.2	Domanda	32
3.4.3	Calcolo di Q e R	38
3.5	Modellizzazione sul software	41
3.6	Misure di performance	43
4	Analisi dei risultati	48
4.1	Domanda reale	48

4.2	Aumento della domanda	52
4.3	Aumento della tolleranza del costruttore	62
5.	Conclusioni	64
	Appendice	67
	Elenco delle figure	67
	Elenco delle tabelle	68
	Link	69
	Bibliografia e Sitografia	70

Introduzione

L'unicità del settore delle costruzioni costituisce una sfida per l'adattamento di tecnologie già utilizzate in molti altri settori industriali, come l'automotive, l'aeronautica e l'aerospaziale, i quali hanno già subito radicali cambiamenti di processo adottando tecnologie digitali per migliorare la qualità e la produttività.

Il settore delle costruzioni affronterà nel futuro prossimo grandi sfide caratterizzate dall'adozione di tecnologie digitali, sistemi di sensori, macchine automatizzate e materiali innovativi. Questa trasformazione, che per analogia al settore manifatturiero è stata chiamata "Construction 4.0", consentirà alle aziende del settore edile di ottenere diversi benefici in termini di efficienza.

Fra tali tecnologie digitali, il 3D Concrete Printing è una tecnica costruttiva, appartenente alla famiglia delle tecnologie di Additive Manufacturing, tramite quale la struttura in calcestruzzo della costruzione viene costruita depositando il calcestruzzo strato per strato.

La presente tesi analizza l'impatto che una tecnologia innovativa come il 3D Concrete Printing potrebbe avere sul settore delle costruzioni, il quale si presenta storicamente come un settore avverso al cambiamento e caratterizzato da scarsa produttività.

L'analisi è focalizzata sulle ripercussioni che tale tecnologia porterebbe alla Supply Chain del settore, con particolare attenzione alla figura del distributore edile (Builders' Merchant – BM).

Nel primo capitolo viene definito il contesto della ricerca, tramite un'analisi delle condizioni attuali del settore.

Nel secondo capitolo viene eseguita una review della letteratura esistente inerente all'argomento, ovvero l'analisi dell'impatto dell'Additive Manufacturing sulla Construction Supply Chain, focalizzandosi su ruoli diversi da quello dell'appaltatore.

Nel terzo capitolo viene descritta la modellazione del problema, sia qualitativa che quantitativa. Inizialmente viene identificato il ruolo del distributore all'interno della Supply Chain e vengono definiti gli obiettivi dello studio, quali:

- valutazione dell'impatto del 3D Concrete Printing sull'attività del BM, tramite il confronto tra Supply Chain con costruzione tradizionale e Supply Chain con utilizzo di 3DCP, in condizioni di domanda reali;
- definizione delle condizioni per cui le due Supply Chain a confronto risultano essere ugualmente efficienti;
- valutazione di quale delle due filiere in oggetto risulta più efficiente rispetto all'altra, in termini temporali, economici e di livello di servizio, al variare delle condizioni del mercato, quali per esempio la domanda.

In seguito, viene descritta la metodologia di ricerca, ovvero uno studio con simulazione a eventi discreti, tramite l'utilizzo del software Rockwell Arena, e il modello concettuale delle due filiere ipotizzate. Infine, vengono analizzati i dati di input utilizzati per la simulazione (inerenti ai processi, alla domanda e alla politica di gestione delle scorte ipotizzata) e vengono definite le misure di performance calcolate.

Nel quarto capitolo vengono analizzati i risultati trovati: dapprima in condizioni di domanda reale e in secondo luogo all'aumentare del livello di domanda.

Infine, nell'ultimo capitolo, vengono tratte le conclusioni dello studio effettuato.

1. Definizione del contesto

1.1 Situazione attuale e nuove sfide per il settore delle costruzioni

Il settore delle costruzioni è una delle industrie più grandi al mondo, che contribuisce globalmente a circa il 13% del prodotto interno lordo (PIL) globale [1]. Il settore è dunque un importante motore di crescita economica, ma anche un'industria ad alta intensità di risorse e un importante contributore alle emissioni di gas serra [2]. L'utilizzo di risorse in edilizia è notevolmente elevato e consuma da solo il 50% delle risorse complessive del mondo. L'ambiente edile è storicamente estremamente avverso al cambiamento e mantiene un forte legame a diversi valori tradizionali, portando debolezza nell'innovazione e scarsa produttività [1]. Al contrario di altre industrie dove la digitalizzazione e l'automazione hanno permesso una rapida crescita, la produttività nel settore delle costruzioni è stagnante e in alcuni paesi e ambiti è addirittura diminuita. Questa tendenza negativa è allarmante, in particolare se vista sullo sfondo di una domanda mondiale in continua crescita, ma con sempre più carenza di manodopera qualificata per lavori operativi [3]. L'indagine del 2016 "Sustainability in the Supply Chain" condotta da Scape Group [4] ha concluso che il 58% di tutti i fornitori e appaltatori edili intervistati ha identificato la carenza di manodopera qualificata come un ostacolo per un futuro settore edile modernizzato.

La produttività stagnante e la diminuzione della forza lavoro qualificata sono fattori limitanti per lo sviluppo, non solo nei paesi industrializzati e sviluppati, ma anche nella maggior parte delle economie emergenti. Mentre la professione dell'operaio edile diventa sempre meno ricercata, l'aumento del grado di automazione e digitalizzazione nell'edilizia sembra essere l'unica opzione fattibile per padroneggiare le sfide attuali e future dell'industria [3].

Dal momento che il calcestruzzo risulta essere il materiale di utilizzo dominante nel settore e poiché non si prevede che ciò cambierà nei decenni a venire, la digitalizzazione e l'automazione delle costruzioni in calcestruzzo dovrebbero avere la massima priorità [3].

Già oggi tecnologie avanzate e comunemente utilizzate nel settore manifatturiero vengono esportate per applicazioni edilizie e architettoniche [5]. Diverse aziende si stanno orientando verso tecnologie moderne e stanno stimolando l'innovazione; ciò si verifica in diversi ambiti del settore quali progettazione, ingegneria, manutenzione e operazioni, nonché infrastrutture, architettura, arredo urbano, stampi industriali, intelligenza artificiale e scultura [1]. Al contrario degli strumenti di progettazione e pianificazione digitale (CAD, BIM, ecc.) che sono relativamente ben sviluppati e vengono sempre più commercializzati, i mezzi di fabbricazione digitale e automatizzata sono ancora carenti nella pratica edilizia effettiva [3].

L'unicità del settore delle costruzioni costituisce una sfida per l'adattamento diretto di tecnologie utilizzate in molti altri settori industriali, come l'automotive, l'aeronautica e l'aerospaziale, i quali hanno già subito radicali cambiamenti di processo adottando tecnologie digitali per migliorare la qualità e la produttività. Questa trasformazione digitale, solitamente descritta come Industria 4.0, collega le tecnologie di produzione in sistemi integrati con i processi di produzione, trasformando radicalmente le Supply Chain e i modelli di business dell'industria e della produzione [5].

Il settore delle costruzioni sta dunque per affrontare grandi sfide caratterizzate dall'adozione di tecnologie digitali, sistemi di sensori, macchine automatizzate e materiali innovativi. Questa trasformazione, che per analogia al settore manifatturiero è stata chiamata "Construction 4.0", consentirà alle aziende del settore edile di ottenere diversi benefici: miglioramento della produttività, riduzione dei ritardi nei progetti, riduzione degli sforamenti dei costi, semplificazione nella gestione delle complessità, maggiore sicurezza, maggiore qualità e miglior efficienza delle risorse [5]. Secondo un recente rapporto del Boston Consulting Group, entro dieci anni la digitalizzazione su vasta scala nell'edilizia non residenziale porterà a risparmi sui costi globali annuali dal 13% al 21%

nelle fasi di ingegneria e costruzione e dal 10% al 17% nella fase operativa [5]. Inoltre, secondo un sondaggio condotto da Roland Berger, il 93% degli stakeholder del settore edile concorda sul fatto che la digitalizzazione influenzerà ogni processo, ma meno del 6% delle aziende edili sta sfruttando appieno gli strumenti di pianificazione digitale [5].

1.2 Construction Supply Chain

Il Supply Chain Management è uno dei processi principali di un progetto di costruzione [6]. In particolare, la gestione degli approvvigionamenti di materiale risulta essere l'ambito di maggior interesse all'interno della Construction Supply Chain. Ciò si evince dal fatto che circa il 64% del costo totale di progetto viene speso in materiali: qualsiasi risparmio sul costo dei materiali può quindi essere di grande importanza nel migliorare la redditività di progetto [7]. Si stima che la produttività di un progetto potrebbe essere migliorata fino all'8-10% tramite una corretta gestione dei materiali, al fine di garantirne la disponibilità in cantiere prima dell'avvio dei lavori [8].

A oggi, la gestione dei materiali da costruzione ha la sua importanza e complessità, che si riflette principalmente nel fatto che:

- il costo dei materiali da costruzione rappresenta il 50-60% del capitale circolante del progetto;
- il progetto spesso non può essere completato in tempo a causa del ritardo nella fornitura dei materiali;
- definire la quantità di materiali necessaria nella fase iniziale di costruzione aumenta l'incertezza dell'acquisto e della fornitura stessa [9].

Al fine di ridurre l'occupazione di capitale di magazzino dei materiali da costruzione, la domanda delle imprese di costruzioni ha iniziato a tendere alla modalità di ordine di piccoli lotti e multi-lotti, il che ha reso la domanda di materiali soggetta a una maggiore incertezza e volatilità. Pertanto, come gestire efficacemente la Construction Supply Chain è una sfida importante che deve affrontare il settore [9].

La filiera dei materiali edili è composta da fornitori di materie prime, produttori, grossisti e rivenditori di materiali da costruzione e dal

costruttore finale. La complessità dell'ingegneria nel processo di costruzione e l'incertezza della domanda fanno sì che ogni membro della filiera affronti l'importante problema di come ordinare e produrre in modo accurato e ragionevole [9].

Quanto appena esposto può essere riassunto con la seguente affermazione: l'obiettivo primario del "material management" è "avere materiali della giusta qualità, dalla giusta fonte, al giusto prezzo, nella giusta quantità e al momento giusto" [10].

Inoltre, all'interno del costo dei materiali, competono i vari costi logistici, come trasporto e stoccaggio, che vengono affrontati dai vari attori della filiera di fornitura. Si può notare come, per il settore edile, i costi di trasporto rappresentino una percentuale significativamente più alta dei costi operativi rispetto ad altri settori: in effetti, la maggior parte delle materie prime e dei materiali da costruzione sono ad alto volume e basso valore [11] e quindi si possono generare elevate incidenze di trasporto [12].

In funzione di questa considerazione, assume dunque importanza, all'interno della filiera logistica, il ruolo delle organizzazioni intermedie. In effetti, i commercianti e i fornitori di materiali edili rappresentano il collegamento tra produttori di materiale e gli appaltatori: questi intermediari distribuiscono la stragrande maggioranza dei prodotti e dei materiali forniti ai cantieri. Di conseguenza, la competenza della Construction Supply Chain dipende inevitabilmente dalle prestazioni di queste organizzazioni intermedie e dall'efficacia delle loro operazioni logistiche, che rappresentano le attività di collegamento tra produttori e appaltatori [12].

L'approccio del Supply Chain Management ha spostato l'enfasi dalla struttura interna degli operatori della filiera ai collegamenti tra l'organizzazione e il suo ambiente esterno: ciò si traduce con l'adeguamento delle decisioni strutturali logistiche e degli obiettivi operativi ai requisiti del settore [12].

Le decisioni strutturali logistiche che competono ai commercianti di materiale edile includono la selezione del numero di depositi, la loro posizione e capacità, così come la gamma di prodotti commercializzati e la modalità di trasporto. Gli obiettivi operativi si riferiscono a posizione,

inventario e accordi di trasporto che possono minimizzare i costi rilevanti soddisfacendo al contempo i requisiti di servizio clienti. Tuttavia, tali obiettivi possono essere compromessi dall'incertezza di domanda che caratterizza il settore [12].

Le strutture delle organizzazioni intermediarie rappresentano punti di consolidamento naturali, fungendo da buffer tra la fase di produzione e quella di costruzione della Supply Chain, gestendo al contempo la variabilità del flusso di lavoro. Pertanto, l'incertezza della domanda di settore impone agli intermediari di mantenere elevati livelli di inventario, il che può portare chiari benefici in termini di gestione delle discrepanze tra tassi di domanda e offerta, ma può anche contribuire ad aumentare gli sprechi in tutte le Supply Chain del settore. Questa è stata una delle principali preoccupazioni dei sostenitori della "lean construction" che hanno evidenziato che i sistemi di controllo dell'inventario devono includere non solo le attività svolte in loco, ma anche quelle che costituiscono l'intera catena di fornitura in cui sono trattenute scorte in eccesso. Pertanto, tenendo presente che le decisioni di inventario degli intermediari sono fortemente influenzate dalle caratteristiche della domanda di costruzioni, la gestione dell'inventario in condizioni di incertezza è una delle principali sfide nell'affrontare l'efficacia logistica [12].

2. Review della letteratura

2.1 Additive Manufacturing in edilizia - 3D Concrete Printing

L'Additive Manufacturing (AM) o produzione additiva, nota anche come stampa 3D, è una tecnologia digitale per la produzione di oggetti fisici a partire da un file CAD (Computer Aided Design) [13].

Divenuta a oggi una conosciuta tecnologia produttiva, questa si differenzia dagli approcci di "produzione tradizionale". L'Additive Manufacturing consente di creare oggetti aggiungendo materiale strato per strato, al contrario delle tecnologie di produzione tradizionale, le quali generano gli oggetti rimuovendo materiale oppure tramite l'utilizzo di stampi. Per questo motivo, l'AM si pone totalmente in contrapposizione alle tecnologie sottrattive tradizionali e il suo utilizzo richiede cambiamenti strategici [14].

Il processo di produzione inizia con la generazione di un modello CAD tridimensionale dell'oggetto con tutti i suoi dettagli e dimensioni [15].

Un software estrae dal modello CAD sottili sezioni trasversali bidimensionali le quali vengono poi inviate a una macchina AM per essere sovrapposte l'una all'altra [16]. La macchina AM produce l'oggetto costruendo ogni strato sopra quello precedente e, successivamente, vengono utilizzate diverse metodologie di solidificazione della materia prima per creare il prodotto finito [15]. In molti dei principali metodi AM, un laser viene utilizzato come fonte di calore; l'idea è di fondere ogni strato in modo accurato sugli strati precedenti, il tutto all'interno di una camera di produzione [16].

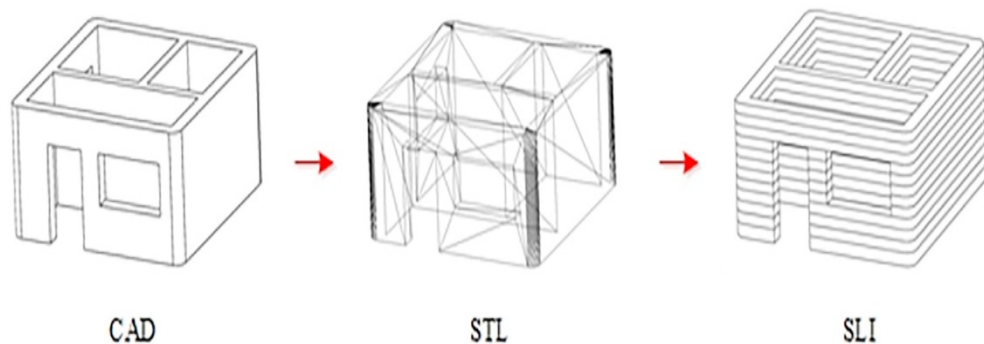


Figura 1: Fasi principali per produrre un oggetto fisico tramite AM [5]

Nel dettaglio, possiamo suddividere il processo di produzione di un prodotto o di un prototipo mediante tecnologia additive nei seguenti step [17]:

1. design (realizzazione del modello 3D CAD)
2. conversione del file CAD in file STL (Standard Triangle Language – formato di trasmissione dei dati nel progetto che approssima le superfici di un modello solido con triangolazioni [18])
3. posizionamento virtuale del componente all'interno della camera di produzione;
4. produzione delle strutture di supporto per creare le “sporgenze” del componente;
5. preparazione automatica della macchina;
6. produzione;
7. rimozione di eventuali parti aggiuntive;
8. rimozione dei supporti;
9. fase conclusiva (attività conclusive al fine di raggiungere il componente definitivo desiderato; possono comprendere trattamenti con calore o trattamenti della superficie finale).

La Figura 1 mostra il tipico flusso di informazioni di un processo AM [5]. La tecnologia dell'Additive Manufacturing è stata inventata e messa in uso nel corso degli anni '80 come metodo per produrre elementi grezzi da assemblare in prodotti finiti. Da allora, ha continuato a evolversi sotto diversi aspetti. Attualmente, questa tecnica produttiva sta raggiungendo elevate precisioni e qualità, tali da renderla adatta a fabbricare prodotti

finiti particolari per applicazioni speciali, come condotti di raffreddamento dell'aria per aeromobili o apparecchiature per protesi e apparecchi acustici [15].

In particolare, per quanto riguarda l'industria aerospaziale, l'Additive Manufacturing presenta diverse caratteristiche che risultano essere fondamentali per il settore appena citato: consente la produzione di componenti più solidi, oltre a maggior affidabilità, riduzione del peso e minori sprechi durante tutto il ciclo di vita del componente [19].

Inoltre, questi progressi, che hanno reso possibile lo sviluppo dell'AM, stanno anche ampliando la gamma di materiali da utilizzare per la fabbricazione dei prodotti, migliorando ulteriormente precisione e qualità, e riducendo i costi di acquisizione delle macchine. Negli ultimi decenni, le apparecchiature di produzione additiva hanno seguito il modello di progresso della tecnologia digitale, noto anche come "legge di Moore", in quanto macchine più capaci ed economiche sono state introdotte anno dopo anno [15].

Tuttavia, va notato anche che la produzione additiva presenta alcune limitazioni. Tali limitazioni sono correlate al software, alla disponibilità dei materie prime, alla qualità della finitura di produzione, alla velocità di produzione, alle dimensioni della camera di produzione, alla ripetibilità della produzione e al costo delle macchine e dei materiali [16].

L'industria delle costruzioni sta iniziando adesso a seguire i primi utilizzatori delle tecnologie AM. Le applicazioni sperimentali di Additive Manufacturing nel settore hanno iniziato ad apparire alla fine degli anni '90. Queste applicazioni iniziali hanno contribuito a identificare potenziali vantaggi e sfide per le tecnologie AM per l'edilizia [20].

Oggi l'Additive Manufacturing rappresenta un nuovo orizzonte nel campo delle costruzioni, in particolare modo per le costruzioni in calcestruzzo e con materiali cementizi [6].

L'attività di ricerca sulla manifattura additiva nel settore delle costruzioni ha sviluppato diverse tecnologie, le quali variano a seconda della tipologia di tecnologia AM adottata, a seconda del materiale utilizzato e a seconda dell'hardware che esegue la stampa [20].

Si può facilmente notare come i materiali edili di maggior utilizzo per le tecniche di produzione additiva del settore siano i materiali cementizi [20],

in particolar modo il calcestruzzo: ricadono dunque in questo ambito le tecniche di 3D Concrete Printing, ovvero la stampa 3D del calcestruzzo. Il 3DCP è una tecnica di Additive Manufacturing tramite quale la struttura in calcestruzzo viene costruita depositando il calcestruzzo strato per strato [21].

Tra le tecnologie di 3DCP, e più in generale, tra le tecniche di AM utilizzate nel settore delle costruzioni, quelle più diffuse risultano essere quelle basate sull'estrusione del materiale [20, 21]. Nel dettaglio, per quanto concerne il 3DCP, la miscela cementizia viene pompata attraverso un ugello controllato digitalmente. Sulla base del prototipo, la testina di stampa si muove per estrudere vari filamenti circolari o rettangolari di calcestruzzo a seconda della forma dell'ugello, con una velocità di stampa di 50-500 mm/s [21].

Come precedentemente accennato, le tecniche AM del settore differiscono anche per la tipologia di sistema hardware che si occupa di depositare il materiale strato per strato fisicamente: distinguiamo dunque sistemi "a portale" ("gantry" system) oppure a braccio robotico.

I sistemi a portale si basano su un sistema di coordinate cartesiane, in cui l'ugello o la piattaforma di costruzione si muove su tre assi x, y, z. Poiché è comunemente utilizzato per applicazioni AM su piccola scala, questo metodo di stampa è relativamente semplice da imitare o ingrandire per diverse applicazioni. Sebbene i sistemi a portale siano stati i più comunemente utilizzati, presentano delle limitazioni come trasporto, installazione, deposizione ortogonale e dimensioni del sistema. Quando si produce un componente su larga scala, un sistema a portale deve essere più grande del componente in costruzione, complicando non solo la progettazione del sistema a portale, in base alle dimensioni di costruzione massime, ma anche il trasporto e l'installazione. L'installazione in tal caso richiede un'alta intensità di manodopera. La deposizione ortogonale è un'altra limitazione, poiché un sistema a portale consente solo l'estrusione del materiale perpendicolare alla superficie di costruzione, limitando la curvatura al piano orizzontale [20].

I bracci robotici aumentano invece la libertà grazie al movimento a sei assi e alla flessibilità di programmare più attività. Inoltre, un braccio robotico richiede meno spazio di un sistema a portale e può persino essere montato

su una piattaforma trasportabile per fornire mobilità in loco [20]. Inoltre, un sistema 3DCP basato su braccio robotico può essere spostato nel cantiere tramite un carrello elevatore e installato per la stampa in meno di un'ora, in contrasto con i sistemi 3DCP a portale, in cui l'installazione per la stampa richiede circa un giorno. Questo schema vale anche per lo smontaggio dei due sistemi [22].

Uno svantaggio del sistema 3DCP basato su braccio robotico rispetto al sistema 3DCP “gantry-based” è la sua portata limitata che richiede il montaggio e lo smontaggio del braccio robotico numerose volte durante la stampa di una singola costruzione a seconda delle sue dimensioni. Pertanto, il notevole tempo impiegato per il montaggio e lo smontaggio del braccio robotico può renderlo meno adatto per costruzioni di importanti dimensioni [22].

La Figura 2 mostra i componenti generici di una macchina AM utilizzata per l'edilizia. I componenti principali sono [22]:

- il braccio robotico a sei assi, che muove l'ugello del calcestruzzo utilizzato per la stampa;
- la betoniera e la pompa per calcestruzzo, che alimentano il calcestruzzo all'ugello;
- l'unità di controllo del braccio robotico.

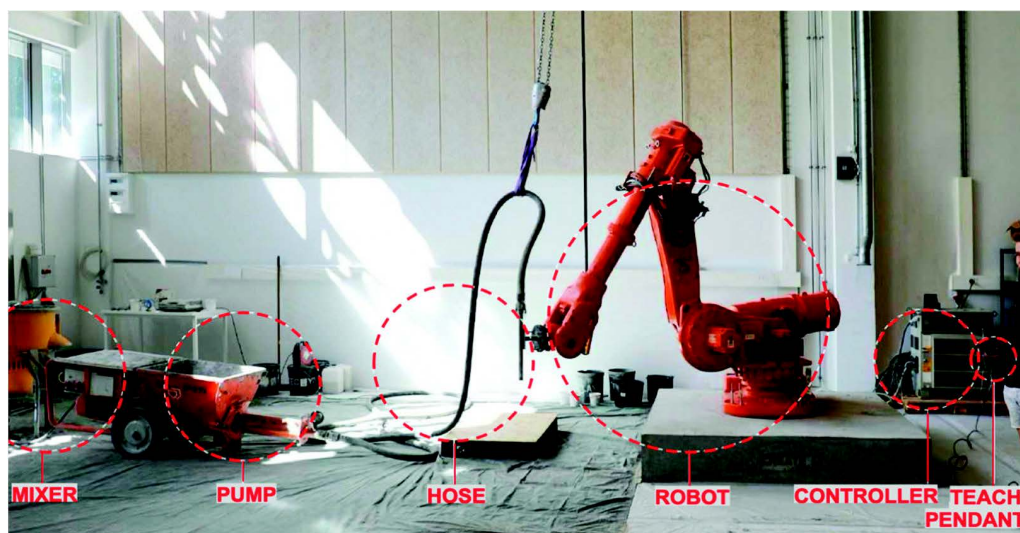


Figura 2: Componenti di un braccio robotico AM per la stampa di calcestruzzo [22]

La stampa 3D del calcestruzzo è generalmente menzionata per i suoi numerosi vantaggi rispetto ai metodi di costruzione tradizionali, tra i quali la semplificazione della Supply Chain, l'eliminazione della necessità di stampi nella produzione dei componenti, la riduzione del carico di lavoro di gestione in loco per le attività artigianali e l'eliminazione delle impalcature temporanee per la costruzione di muri [23].

La flessibilità di produzione, in particolare per geometrie complesse, aiuta ad aumentare la produttività e a ridurre costi e sprechi. Pertanto, il 3DCP è identificato come un gateway per la digitalizzazione del settore delle costruzioni, in tutta la procedura di costruzione, dalla progettazione alla produzione [23].

Tuttavia, la tecnologia è ancora in fase di sviluppo. Di conseguenza, le attrezzature e i materiali 3DCP non sono attualmente preferenziali rispetto alle rispettive controparti tradizionali in termini di costi, specialmente per la stampa di edifici su larga scala. Si prevede che tali costi diminuiranno man mano che verrà sviluppata una maggiore comprensione sulla tematica, grazie a un'implementazione della tecnologia continua nel tempo [23].

2.2 Impatto dell'Additive Manufacturing sulle filiere logistiche e sulla CSC

Ciò che rende l'Additive Manufacturing una tecnologia potenzialmente rivoluzionaria anche per la gestione della Supply Chain sono le sue caratteristiche [15]. Si possono evidenziare i seguenti vantaggi dei metodi AM rispetto ai metodi di produzione convenzionali [24]:

- non necessita di utensili (non esistono economie di scala, il che rende possibili personalizzazione e revisioni del design);
- fattibilità di produrre piccoli lotti di produzione in modo economico;
- possibilità di modificare rapidamente il design;
- ottimizzazione del prodotto, a seconda della funzione richiesta;
- produzione di prodotti personalizzati più economica;
- capacità di produrre geometrie complesse;

- potenziale per rendere le Supply Chain più semplici, con tempi di consegna più brevi e minori scorte.

Inoltre, secondo uno speciale rapporto dell'Economist sulla produzione additiva, grazie all'utilizzo di questa tecnologia, esiste la possibilità di ridurre lo spreco di materiale fino al 90% [15]. Queste caratteristiche possono consentire agli attori della Supply Chain di produrre qualsiasi parte, anche personalizzata, in qualsiasi momento, in diverse sedi e con diverse dimensioni di lotto, senza la necessità di preoccuparsi di eccessivi costi di attrezzaggio. La continua evoluzione della produzione additiva offrirà in futuro alle aziende produttrici di pezzi speciali l'opportunità di modificare le configurazioni della Supply Chain [15].

Diversi studi degli ultimi anni si sono concentrati proprio sull'analisi della configurazione della Supply Chain e dell'impatto derivante dall'adozione dell'Additive Manufacturing sulla configurazione stessa, in particolare per quei settori dove l'AM si è maggiormente diffuso, quali la produzione dei pezzi di ricambio per le industrie dell'automotive e dell'aerospaziale, e la produzione di pezzi speciali per l'industria biomedica.

In questi ambiti sono state spesso confrontate due tipologie di configurazione della Supply Chain: produzione centralizzata o produzione distribuita. La letteratura in questione concorda che sul fatto che, dato l'altro grado di personalizzazione richiesto per i settori citati, l'Additive Manufacturing porta a decentralizzare la produzione dei componenti: questo, se non già allo stato attuale della tecnologia [14], potrebbe avvenire man mano che la tecnologia diventerà più efficiente [15, 25].

Tuttavia, tali considerazioni non possono essere estese a qualsiasi settore, in particolare a quello delle costruzioni. Nella pratica edilizia comunemente diffusa si trova già una configurazione di tipo distribuito, dal momento che le costruzioni vengono realizzate direttamente in cantiere, a partire da materie prime o semilavorati che vengono assemblati o trasformati in sito [22]. Per quanto concerne invece la produzione centralizzata, all'interno dell'industria edile, si possono avere delle costruzioni prefabbricate: il prodotto finale viene dunque costruito grazie a componenti che vengono fabbricati da un determinato fornitore in uno stabilimento centralizzato [22]. In tal caso, il lavoro in cantiere diventa un'opera di solo assemblaggio e relativa finitura.

I primi elementi e moduli prefabbricati in calcestruzzo e muratura sono stati sviluppati intorno agli anni '80, durante la prima ondata di automazione industriale [26]. Produrre e costruire elementi prefabbricati significa assemblare componenti edilizi in una fabbrica o in una struttura specializzata e successivamente trasportare le strutture parzialmente o completamente assemblate nel sito di costruzione [27]. Tale modalità costruttiva ha avuto successo in quanto porta a standardizzazione e alla riduzione della manodopera [28]. Tuttavia, la prefabbricazione richiede un maggiore sforzo ingegneristico durante la fase di progettazione e un maggiore investimento iniziale. Inoltre, la progettazione è limitata alla combinazione di un set di elementi prefabbricati [22].

L'introduzione della stampa 3D nella costruzioni amplia lo scenario appena descritto, dal momento che, anche con l'utilizzo dell'Additive Manufacturing, è possibile sia costruire direttamente in cantiere, che generare elementi prefabbricati in uno stabilimento centralizzato.

Uno studio del 2021 [22] ha esaminato questa tematica tramite un'analisi di scenario. Gli elementi distinguenti per ogni scenario analizzato dallo studio risultano essere i seguenti:

- tecnologia produttiva
 - metodologia costruttiva tradizionale
 - 3D Concrete Printing
- configurazione della Supply Chain
 - produzione distribuita (costruzione diretta in cantiere)
 - produzione centralizzata (costruzione “off-site” di elementi prefabbricati)
- design della costruzione
 - casa rotonda
 - casa rettangolare

Combinando opportunamente le variabili citate, è stata dunque eseguita un'analisi su sette scenari diversi (non sono stati considerati tutti e otto gli scenari possibili, in quanto lo scenario di costruzione tradizionale “off-site” di una casa rotonda presenta evidenti svantaggi rispetto a tutti gli altri [22]). Lo studio dimostra la competitività del 3DCP, sia dal punto di vista dei costi che dei tempi. Per quanto concerne la produzione centralizzata, l'utilizzo del 3DCP inverte la tendenza per cui l'uso di elementi

prefabbricati sia maggiormente performante dal punto di vista economico rispetto alle costruzioni eseguite direttamente in cantiere. Anche dal punto di vista del design, contrariamente ai metodi costruttivi tradizionali, un design più complesso come una casa rotonda risulta avere degli impatti positivi su tempi e costi, grazie alla tecnologia 3DCP.

2.3 Gap della letteratura

In termini di ricerca logistica nell'edilizia, si possono identificare due approcci principali. Il primo approccio si concentra sulla logistica all'interno di un ambiente di progetto e mira a migliorare le prestazioni di costruzione attraverso una pianificazione efficiente delle consegne e della movimentazione dei materiali. Pertanto, questo primo approccio è principalmente associato al flusso di materiale all'interno dell'impianto di produzione, che nel caso dell'edilizia è il cantiere. Il secondo approccio considera più livelli della catena di fornitura al fine di migliorare le interazioni tra fornitori e clienti. I due diversi approcci identificati possono essere classificati come logistiche relative al singolo "impianto" (progetto) oppure relative alla Supply Chain. Sulla base della natura assemblata dei progetti di costruzione, lo studio della logistica relativa sia al singolo impianto che all'intera Supply chain potrebbe apportare importanti miglioramenti in termini di efficienza produttiva [12].

Tuttavia, quanto sopra riportato, non viene applicato sovente nel settore edile. La ricerca in materia di Supply Chain Management in edilizia tende a concentrarsi solo sulla parte finale della filiera, esaminando esclusivamente un unico elemento della catena, ovvero l'appaltatore [29]. Restringendo il campo di ricerca della letteratura agli articoli inerenti all'Additive Manufacturing in materia edilizia, l'affermazione sopra riportata trova riscontro, in quanto, data anche l'elevata specificità dell'argomento in un ambito in cui la tecnologia non è ancora matura, non si trovano articoli che analizzano l'impatto dell'Additive Manufacturing sulla Supply Chain e sugli attori a monte della filiera. Lo studio del 2021 [22], le cui specificità sono state evidenziate nel precedente paragrafo, esegue esattamente una ricerca in materia di Supply Chain Management focalizzandosi sulla logistica inerente al cantiere.

Avendo identificato un primo divario della letteratura nell'ambito della Construction Supply Chain su più livelli, senza concentrarsi esclusivamente sull'appaltatore, sono stati ricercati eventuali studi esistenti che potessero colmare tale gap. Si è notato che esistono studi inerenti all'argomento, che tuttavia non trattano l'utilizzo di tecnologie come l'Additive Manufacturing. Questi articoli analizzano l'ambiente logistico di attori della filiera diversi dall'appaltatore, come i commercianti di materiale edile. Gli studi citati [12, 29, 30] sono stati sviluppati con l'obiettivo di:

- valutare l'impatto delle variazioni di domanda su misure di performance generiche dei commercianti, come il numero di veicoli movimentati e il rapporto percentuale tra profitti e costi [12];
- valutare l'applicabilità della gestione logistica all'interno dei magazzini edili, studiando il loro ruolo all'interno della filiera [29]; in questo articolo viene identificata una fascia di domanda in cui il profitto del rivenditori viene massimizzato;
- valutare l'impatto delle variazioni di domanda sulle performance dei commercianti, al fine di analizzare la loro capacità di fornire un servizio tempestivo ed economicamente efficiente al settore delle costruzioni [30]; in questo caso vengono esaminati parametri come i costi logistici e i profitti per più livelli di domanda.

Di conseguenza, il secondo gap identificato è il seguente: studi esistenti sono riferiti alla Construction Supply Chain generica e non analizzano l'utilizzo di particolari tecnologie costruttive, come, per esempio, quelle di Additive Manufacturing.

In sintesi, il gap della letteratura risulta essere l'analisi dell'impatto di tecnologie innovative, come l'Additive Manufacturing, sulla Construction Supply Chain, focalizzandosi su ruoli diversi da quello dell'appaltatore.

La presente tesi si pone quindi l'obiettivo di valutare l'impatto di una tecnologia di Additive Manufacturing, come il 3D Concrete Printing, sulle misure di performance del distributore di materiale edile per più livelli di domanda, cercando di combinare gli articoli esistenti citati, inerenti ad argomenti diversi, in un unico studio.

2.4 Obiettivi dello studio

Si possono ora definire chiaramente gli obiettivi della presente tesi:

1. valutare l'impatto del 3D Concrete Printing sull'attività del BM, tramite il confronto tra Supply Chain con costruzione tradizionale e Supply Chain con utilizzo di 3DCP, in condizioni di domanda reali; in entrambi i casi, è stata presa in considerazione la "produzione distribuita", ovvero la costruzione diretta in cantiere, sia che questa avvenga tramite metodologie costruttive tradizionali o con l'ausilio dell'Additive Manufacturing. Tale scelta deriva principalmente da due fattori. Innanzitutto, per quanto riguarda le metodologie costruttive tradizionali, la costruzione in cantiere risulta essere a oggi maggiormente diffusa. In secondo luogo, tale configurazione produttiva risulta essere più efficiente e attuabile anche dal punto di vista dell'Additive Manufacturing [22]. La tesi in oggetto si differenzia dall'articolo del 2021 precedentemente menzionato [22], il quale analizza più configurazioni di Supply Chain a confronto con e senza utilizzo di 3DCP. Come già accennato, l'articolo in questione esegue un'analisi di "progetto", ovvero inerente al solo appaltatore e non prende in considerazione attori a monte della Supply Chain; la tesi oggetto di trattazione esegue invece un'analisi sull'intera filiera;
2. definire le condizioni per cui le due Supply Chain a confronto risultano essere ugualmente efficienti;
3. valutare quale delle due filiere risulta più efficiente, al variare delle condizioni del mercato, quali per esempio la domanda. Come per altri studi citati [12, 29, 30], sono state quindi valutate le performance del BM per livelli di domanda crescenti, con la differenza che è stata inserita la valutazione della Supply Chain con utilizzo del 3DCP. Tuttavia, anche le performance valutate in condizioni di costruzione tradizionale, si differenziano degli studi menzionati, in quanto l'analisi verte su articoli e tipologie di costruzione non ancora considerate da articoli presenti in letteratura.

3. Descrizione del modello

3.1 Ruolo del distributore edile

I distributori edili (Builders' Merchant - BM) rappresentano il punto di intersezione del flusso di materiali da costruzione tra punto di produzione (produttore) e punto di consumo (cantiere). Pertanto, i BM gestiscono un flusso bidirezionale distinto, sia a monte della filiera (denaro e informazioni) sia a valle (materiali). Al contrario, gli appaltatori si trovano all'estremità del canale di fornitura e pertanto gestiscono un flusso bidirezionale, ma solo a monte nella catena di fornitura. I BM agiscono essenzialmente come una "valvola" bidirezionale che regola i flussi di denaro, informazioni e materiali tra le due estremità della catena di fornitura. Come parte di questo ruolo, i BM operano come un buffer di scorte per le aziende appaltatrici, controllando il flusso di materiali all'interno della Supply Chain. Inoltre, è il BM a sostenere il costo e il rischio di detenere scorte di emergenza. Ciò diventa cruciale se si considera la capacità di stoccaggio spesso limitata in loco. Tuttavia, c'è un flusso altrettanto forte che si sposta dall'appaltatore al fornitore sotto forma di informazioni su difetti, requisiti di mercato, livello di domanda e, in modo critico, denaro. È stato notato che questo posizionamento interstiziale nella catena di fornitura significa che i BM funzionano come "banchieri dei costruttori", fornendo termini di credito estesi per supportare le operazioni di appaltatori e subappaltatori e quindi il completamento con successo dei progetti [29].

In virtù di questa premessa inerente al ruolo del distributore di materiale edile nel settore, lo studio della presente tesi si concentra proprio sui processi attorno al Builders' Merchant, a partire dall'ordine al produttore, fino al completamento del cantiere. Sono stati analizzati:

- processi interni alla struttura del distributore edile, quali la gestione delle scorte degli articoli oggetto di studio (quali stampi di legno e armature in ferro) con relativi trasporti in ingresso e in uscita;
- processi a monte del distributore, quali la gestione degli ordini al produttore;
- processi a valle del distributore, quali i trasporti in arrivo al cantiere e il relativo avanzamento lavori.

Sono state quindi valutate misure di performance relative all'attività del BM, in particolare dal punto vista logistico, oltre ad altre inerenti ai cantieri, che risultano di particolare interesse per l'attività del BM.

3.2 Metodologia di ricerca

Per quanto concerne alla metodologia di ricerca utilizzata, è stata eseguito uno studio con simulazione a eventi discreti. Sono state modellizzate due Supply Chain: una con costruzione tramite metodologia tradizionale e una con costruzione con l'utilizzo del 3D Concrete Printing.

Data la complessità del sistema dovuta a particolari caratteristiche del settore edile e del progetto, tale tipologia di studio risulta essere un approccio ampiamente utilizzato per risolvere i problemi associati alle operazioni della catena di fornitura [12].

3.3 Descrizione della filiera

Per meglio comprendere quanto esposto in seguito, va definito il fatto che è stata modellizzata la filiera di un singolo distributore edile (o Builders' Merchant – BM), il quale gestisce oltre al proprio magazzino, le forniture per i diversi cantieri e gli ordini ai produttori dei prodotti oggetto di analisi. Tale assunzione permette di ottenere dei risultati direttamente tangibili per un singolo BM, riguardo la propria attività.

In funzione delle premesse effettuate sul ruolo del BM nella Supply Chain del settore, si può asserire che la Supply Chain è di tipo “Assembly to Order”: le scorte di materiale sono disponibili presso il magazzino del BM, che dunque gestisce le proprie scorte con logica “Push”. Il BM rappresenta

dunque il “decoupling point” della filiera dei materiali edili oggetto di analisi della presente trattazione.

3.3.1 Supply Chain con metodologia di costruzione tradizionale

Il modello concettuale è riportato in Figura 3. Tale modello è disponibile all'indirizzo corrispondente al *Link 1*, in Appendice. Questo diagramma di flusso è la rappresentazione della Supply Chain con metodologia costruttiva tradizionale.

Come si può notare, il modello è suddivisibile in tre sotto-processi.

3.3.1.1 Avanzamento del cantiere

Il processo di avanzamento del cantiere si attiva con l'inizio di un nuovo cantiere. Tale evento iniziale è poi lo stesso che aziona a ritroso tutti i processi della Supply Chain. Quindi, congiuntamente all'inizio del cantiere, viene eseguita la richiesta di materiale al distributore edile, attivando di conseguenza il secondo sotto-processo.

Al fine di confrontare il processo di avanzamento cantiere con il 3D Concrete Printing, la tipologia di costruzione tradizionale prescelta è l'edificazione di un'intera abitazione tramite calcestruzzo armato gettato in opera.

Con tale metodologia costruttiva, vengono realizzate tramite “getto” del calcestruzzo, non solo le parti strutturali, ma anche pareti esterne e pareti divisorie interne. Non sono state dunque prese in considerazione tutte quelle fasi costruttive che non subirebbero variazioni con l'introduzione del 3DCP, quali opere preliminari, come la realizzazione delle fondazioni, e opere successive alla costruzione effettiva, come opere impiantistiche e di finitura.

Il processo di avanzamento del cantiere riguarda dunque la sola vera e propria “edificazione”, successivamente alle eventuali opere di fondazione, fino ad ottenere una costruzione “grezza”.

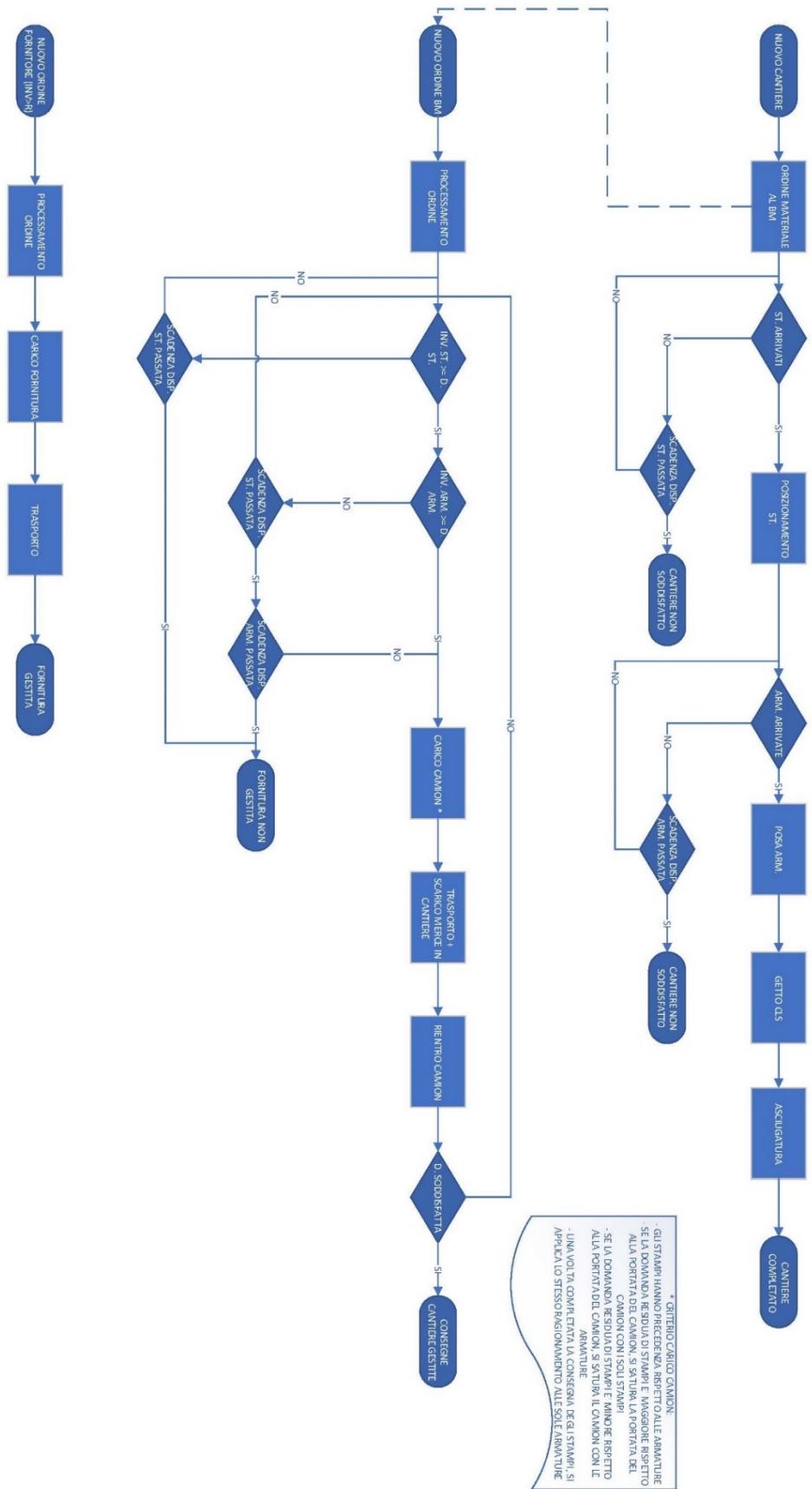


Figura 3: Diagramma di flusso della Supply Chain con metodologia costruttiva tradizionale [Link 1]

Con metodi costruttivi tradizionali, tale processo di edificazione avviene in tre fasi principali: posizionamento degli stampi, posa delle armature, getto del calcestruzzo.

L'avanzamento del cantiere è stato modellizzato secondo quanto già supposto nello studio del 2021 di Khajavi S.H. et al. [22], in quello che nell'articolo appena menzionato viene chiamato "Scenario 6" ("On-site conventional construction of rectangular house"). Si è quindi scelto di utilizzare come modello di partenza quello che sicuramente rappresenta la metodologia costruttiva più comune e diffusa, ovvero la costruzione diretta in cantiere di strutture di forma convenzionale (rettangolare).

L'utilizzo di costruzioni prefabbricate, modellizzate nello studio di Khajavi S.H. [22] come "off-site construction", non sono state prese in considerazione, in quanto tale metodologia costruttiva, oltre a essere meno diffusa, risulta essere anche di minor interesse per la distribuzione edile, che è invece l'entità principalmente analizzata nella presente trattazione.

A causa sempre della scarsa diffusione del giorno d'oggi, non è stata analizzata la costruzione di strutture di forme non convenzionali, come quelle rotonde, analizzata invece nello studio scelto come fonte di dati per l'avanzamento cantiere [22].

Una volta emesso l'ordine del materiale al distributore edile, il cantiere attende l'arrivo degli stampi, in quanto il primo processo dell'edificazione è il posizionamento degli stampi. Tuttavia, si è ipotizzato che il costruttore abbia una certa tolleranza per attendere gli stampi: se gli stampi non sono disponibili entro il termine prefissato, il BM non potrà più fornire materiale per quel determinato cantiere e il processo si conclude senza alcuna fornitura. Va precisato il fatto che la tolleranza del costruttore non riguarda l'arrivo effettivo in cantiere del materiale, ma si riferisce alla disponibilità dello stesso presso il magazzino del BM, in quanto lo stesso BM avrà un determinato numero di cantieri in coda da soddisfare e, nel momento in cui questo ha la disponibilità a magazzino di soddisfare la domanda del primo cantiere in coda, questa verrà sicuramente soddisfatta. Una volta arrivati tutti gli stampi necessari, si procede al posizionamento degli stessi. Conclusa questa attività, il cantiere si mette in attesa delle armature. Per le armature valgono le stesse considerazioni appena fatte per gli stampi, riguardo la tolleranza del costruttore e la disponibilità a

magazzino delle stesse da parte del distributore edile. Anche in questo caso, una volta arrivate tutte, avviene la posa delle armature.

Successivamente avviene subito il getto del calcestruzzo. Per quanto concerne il calcestruzzo, non valgono le considerazioni fatte per stampi e armature, in quanto si suppone che per il calcestruzzo sia sempre disponibile nel momento in cui serve. Tale assunzione avviene per ragioni logistiche reali riguardo le forniture di calcestruzzo presso i cantieri. Nella pratica, il calcestruzzo, dal punto di vista logistico, in presenza di ampio fabbisogno dello stesso, come per esempio nel caso di opere di nuova costruzione, viene fornito direttamente dal produttore al cantiere. Questo può avvenire con o senza l'intermediazione commerciale di un distributore edile, ma, in ogni caso, non interessa la logistica del BM. Ciò è dovuto al fatto che i produttori di inerti, di cui è composto il calcestruzzo, possiedono i mezzi per trasportare ampie quantità di calcestruzzo pronto per essere gettato, ovvero i camion betoniera, comunemente conosciuti come "beton car", i quali, nella pratica comune, non sono risorse di cui un normale distributore edile dispone.

Eseguito il getto, il processo dell'avanzamento cantiere si conclude con l'asciugatura del calcestruzzo.

3.3.1.2 Ordine di materiale al Builders' Merchant

Il secondo sotto-processo, come già anticipato, si attiva con la richiesta di materiale al distributore, in concomitanza con l'inizio di un nuovo cantiere.

Passato un tempo richiesto dal BM per il processamento dell'ordine, avviene una duplice verifica sulla disponibilità in inventario di stampi e armature.

Se il distributore edile ha disponibilità in magazzino di abbastanza stampi e armature per soddisfare la domanda del cantiere in processamento, si passa immediatamente al carico del camion del BM per consegnare il materiale e inizia così il processo di consegne al cantiere.

Il carico del camion, e di conseguenza la consegna, dal momento che il posizionamento degli stampi avviene prima di quello delle armature, segue

il principio per cui la fornitura degli stampi ha sempre precedenza su quella delle armature. Si possono definire dunque le seguenti regole:

- se, per il cantiere in questione, deve ancora essere soddisfatta domanda di stampi, e questa è maggiore della portata del camion, la portata del camion viene saturata con i soli stampi; di conseguenza, si riduce la domanda di stampi per il cantiere in oggetto di un valore pari a quanto caricato sul camion;
- se, per il cantiere in questione, deve ancora essere soddisfatta domanda di stampi, ma questa è minore della portata del camion, la portata del camion viene saturata con armature; di conseguenza, la domanda di stampi viene definitivamente soddisfatta, mentre si riduce la domanda di armature per il cantiere in oggetto di un valore pari a quanto caricato sul camion;
- una volta soddisfatta tutta la domanda di stampi per il cantiere in oggetto, si applicano le stesse regole alle armature rimaste da consegnare. Si arriverà sicuramente ad avere un ultimo carico con il camion non al massimo della sua portata, a meno che non ci si trovi nel caso fortuito per cui quest'ultimo sia esattamente uguale alla portata del camion.
- si è ipotizzata una portata del camion pari a 2600 kg, basandosi su quelle che sono le specifiche di un mezzo comunemente utilizzato nella pratica con tale funzione, ovvero un camion di modeste dimensioni con gru e cassone ribaltabile [31 – Trilaterale e gru].

In ogni caso, ogni volta che avviene il carico del camion, si procederà con la relativa consegna del materiale al cantiere e il successivo rientro dello stesso.

Trovandosi invece nel caso in cui in inventario non ci siano abbastanza scorte per soddisfare la domanda, si può ricadere in due casistiche diverse. Dal momento che gli stampi hanno sempre precedenza sulle armature, il primo caso in cui è possibile ritrovarsi è lo stock-out di stampi. In tal caso, non è di interesse quale sia il livello di inventario di armature, in quanto si suppone che, finché il costruttore non ha posizionato gli stampi, questo non si interessi alla fornitura di armature. Nel caso in cui il processo ricadesse in tale casistica, il BM attende fino a che non si abbiano abbastanza scorte in inventario per soddisfare la domanda di stampi e

andrà quindi successivamente a verificare il livello di inventario di armature. Tuttavia, se durante l'attesa del rifornimento di stampi da parte del produttore, il BM si trovi a superare la tolleranza di attesa degli stampi da parte costruttore, il BM stesso perde la possibilità di fornire il cantiere in oggetto e anche il processo di ordine al BM termina senza altre forniture per il cantiere processato.

L'ultima casistica rimasta da analizzare è dunque il caso in cui si abbiano a magazzino abbastanza stampi per soddisfare la domanda del cantiere in fase di processamento, ma non abbastanza armature. Anche in questo caso il BM attende fino a che non si abbiano abbastanza scorte disponibili per soddisfare la domanda di armature e, nell'istante in cui queste diventano disponibili, avviene il processo di carico e consegna precedentemente descritto. Tuttavia, dal momento che il costruttore esegue la posa della armature successivamente a quella degli stampi, è possibile che questo accetti di avere le armature disponibili anche in un secondo momento rispetto alla disponibilità degli stampi.

Definita come "tolleranza" del costruttore la tempistica entro la quale quest'ultimo sia disposto ad aspettare la disponibilità di un determinato prodotto, il processo prosegue in funzione di quanto esposto nell'affermazione che segue: nel caso in cui il costruttore non abbia più tolleranza sulla disponibilità di stampi, ma abbia ancora tolleranza sulla disponibilità di armature, il BM procederà al carico del camion e conseguente consegna della domanda di stampi richiesta e di tutte le armature che esso possiede in inventario, secondo le regole di carico e consegna già precedentemente definite. Una volta completata l'ultima consegna richiesta, il BM si rimetterà in attesa della fornitura di armature dal produttore per poter completare la fornitura al cantiere.

In ogni caso, anche in questa eventualità, se durante l'attesa del rifornimento di armature da parte del produttore, il BM si trovi a superare la tolleranza per l'attesa di armature da parte del costruttore, il BM stesso perde la possibilità di fornire il cantiere in oggetto e anche il processo di ordine al BM termina senza altre forniture per il cantiere processato.

3.3.1.3 Ordine di materiale al produttore

Il terzo sotto-processo gestisce la fornitura di articoli dal produttore al distributore. Gestendo forniture di due prodotti, si è ipotizzato di avere due produttori separati, uno per gli stampi e uno per le armature. Tale supposizione è comunque ragionevole, dal momento che trova anche riscontro nella realtà: gli stampi, in legno, vengono prodotti da aziende esperte nella lavorazione del legno, mentre le armature vengono fabbricate da appositi stabilimenti siderurgici.

Gli ordini dal BM al produttore vengono effettuati in funzione della politica di gestione delle scorte prescelta per il distributore edile, ovvero la politica Q-R. È stata scelta tale politica di gestione delle scorte in quanto politica di gestione delle scorte a revisione continua. Questa assunzione è dovuta al fatto che, nella pratica, i distributori edili si trovano a gestire migliaia di differenti prodotti e, di conseguenza, una revisione periodica delle scorte risulta inattuabile. È dunque importante che l'inventario di ogni prodotto sia sempre aggiornato dopo ogni vendita. Avendo un controllo continuo sulle giacenze, la politica di inventario che più si presta a tale casistica è la politica Q-R: ogni qual volta la giacenza di un certo prodotto va al di sotto del livello di riordino R, viene emesso un ordine di dimensione Q al rispettivo fornitore.

Di conseguenza, avendo rispettivamente predeterminato Q e R per gli stampi e per le armature, il processo di fornitura al rispettivo produttore viene attivato nel momento in cui l'inventario del prodotto diventa minore del proprio livello R.

Superato un tempo richiesto per il processamento dell'ordine da parte del produttore, avviene direttamente il carico del camion del produttore e il trasporto della merce, di quantità Q, al BM.

Vengono dunque eseguite le seguenti assunzioni:

- il produttore ha sempre merce disponibile;
- il produttore ha sempre un mezzo disponibile per effettuare il trasporto;
- il mezzo del produttore può trasportare tutta la quantità Q con una sola consegna.

3.3.2 Supply Chain con utilizzo di 3DCP

Il modello concettuale è riportato in Figura 4. Tale modello è disponibile all'indirizzo corrispondente al *Link 2*, in Appendice. Questo diagramma di flusso è la rappresentazione della Supply Chain con utilizzo di 3DCP.

Anche in questo caso, come si può notare, il modello è suddivisibile in tre sotto-processi.

3.3.2.1 Avanzamento del cantiere

Il processo di avanzamento del cantiere si attiva sempre con l'inizio di un nuovo cantiere. Anche in questo caso, tale evento iniziale è lo stesso che aziona a ritroso tutti i processi della Supply Chain. Congiuntamente all'inizio del cantiere, viene eseguita la richiesta di materiale al distributore edile, attivando di conseguenza il secondo sotto-processo.

L'avanzamento del cantiere è stato modellizzato secondo quanto supposto nello studio del 2021 di Khajavi S.H. et al. [22], in quello che nell'articolo appena menzionato viene chiamato "Scenario 4" ("On-site printing of rectangular house"). Di conseguenza, sono state eseguite le stesse ipotesi riguardo le modalità di stampa della costruzione tramite 3D Concrete Printing. La stampante considerata è dunque la stampante con braccio robotico Kuka KR120 R3900.

Una volta emesso l'ordine del materiale al distributore edile, il cantiere attende la disponibilità dello stesso. Nel caso in questione, con l'utilizzo del 3DCP, l'unico materiale che il BM si trova a dover fornire sono le armature, in quanto gli stampi non risultano più necessari.

Rimane l'ipotesi che il costruttore abbia una certa tolleranza per attendere le armature: se queste non sono disponibili entro il termine prefissato, il BM non potrà più fornire quel determinato cantiere e il processo si conclude.

Verificata la disponibilità di armature presso il BM, il cantiere attende la disponibilità della stampante 3D. Anche riguardo la disponibilità della stampante, il costruttore ha una certa tolleranza, che, nel caso non venga rispettata, il processo di avanzamento del cantiere si conclude.

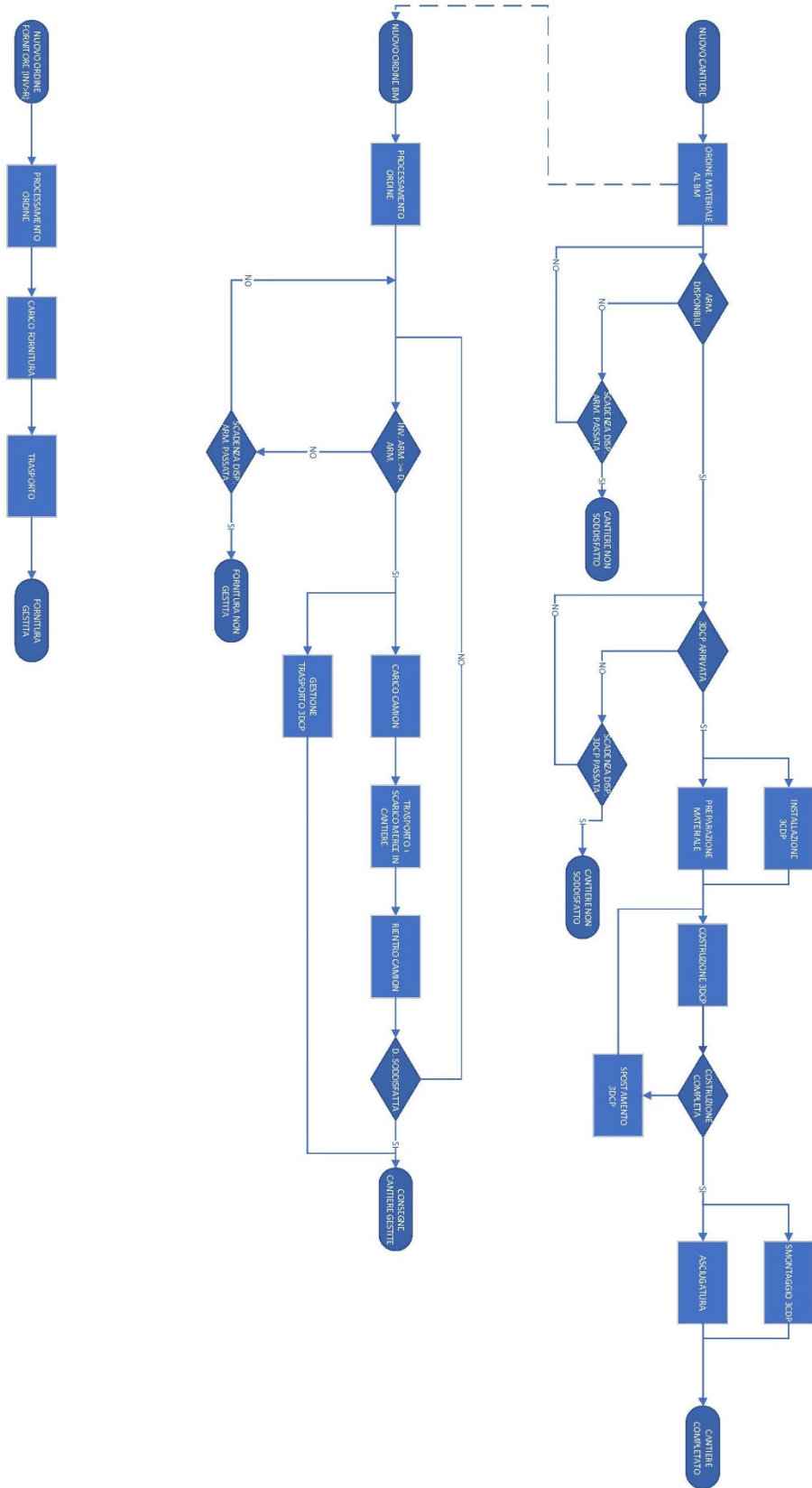


Figura 4: Diagramma di flusso della Supply Chain con 3DCP [Link 2]

Verificata la disponibilità della stampante, e dopo che questa e le armature sono arrivate presso il cantiere, avvengono in parallelo i processi di installazione della stampante e predisposizione del materiale. Come per le costruzioni tradizionali, non viene modellizzato il processo inerente alla fornitura del calcestruzzo, in quanto viene sempre considerato disponibile nel momento in cui serve.

Superata la predisposizione di stampante e di materiale, avviene il processo effettivo di costruzione. Dal momento che la stampante ha una capacità di costruzione limitata in funzione della dimensione del braccio robotico, in presenza di costruzioni di volume maggiore alla capacità della stampante, sarà necessario spostare e reinstallare la stampante un numero di volti pari al rapporto tra volume della costruzione e capacità della stampante.

Concluso il processo di costruzione, si procede alla disinstallazione della stampante, mentre avviene l'asciugatura della costruzione.

3.3.2.2 Ordine di materiale al Builders' Merchant

Il secondo sotto-processo si attiva sempre con la richiesta di materiale al distributore, in concomitanza con l'inizio di un nuovo cantiere.

Passato un tempo richiesto dal BM per il processamento dell'ordine, avviene la verifica sulla disponibilità in magazzino delle armature.

Il BM attende fino a che egli non abbia abbastanza scorte per soddisfare la domanda di armature. Se durante l'attesa del rifornimento di armature da parte del produttore, il BM si trovi a superare la tolleranza di attesa delle armature da parte costruttore, il BM stesso perde la possibilità di fornire il cantiere in oggetto e anche il processo di ordine al BM termina senza altre forniture per il cantiere processato.

Verificata la disponibilità di armature, si passa immediatamente al carico del camion del BM per consegnare il materiale e inizia così il processo di consegne al cantiere, secondo le regole di carico e consegna già presentemente definite per il processo senza 3DCP.

In parallelo al processo di carico del camion e di consegna del materiale, il BM si occupa anche delle gestione dei trasporti della stampante 3D tra i vari cantieri. Tale ipotesi deriva dal fatto che il distributore edile, non

potendo più fornire stampi, si pone come intermediario del servizio di 3D Concrete Printing: esso fornisce sia un'intermediazione commerciale, sia logistica ovvero, presumendo che al BM siano affidate un certo numero di stampanti 3D (maggiore o uguale di 1) per fornire i propri clienti, questo si occupa anche di organizzare gli spostamenti delle stampanti tra i vari cantieri. Tuttavia, ipotizzando che il fornitore a monte del servizio di 3DCP non si limiti a fornire semplicemente la stampante, data l'alta specificità del servizio, si suppone che questo fornisca anche le risorse qualificate per farlo funzionare, come installatori e trasporto. Di conseguenza, il trasporto della stampante non può avvenire con il mezzo del BM, il quale viene esclusivamente utilizzato per il trasporto di materiale. Il BM, in quanto intermediario, comunica al fornitore del servizio le informazioni sull'avanzamento del cantiere, e dunque, al momento opportuno, richiederà il trasporto della stampante da un cantiere ad un altro.

Dal punto del processo di fornitura al cantiere, una volta consegnate armature e verificata la consegna della stampante al cantiere in oggetto, il processo si conclude.

3.3.2.3 Ordine di materiale al produttore

Il processo di ordine del materiale al produttore è l'unico che, tra costruzione tradizionale e 3DCP, rimane invariato: valgono tutte le considerazioni precedentemente esposte per la Supply Chain tradizionale. L'unica differenza è rappresentata dal fatto che non si ha più un fornitore di stampi, ma solo più un unico fornitore per le armature.

3.4 Dati di input

3.4.1 Processi

Come già anticipato nel precedente paragrafo, i dati per costruire il processo di avanzamento cantiere sono tratti dall'articolo del 2021 di Khajavi S.H. et al. [22].

Nelle seguenti tabelle sono stati riportati i dati utilizzati per le attività di avanzamento del cantiere.

Tabella 1: Dati avanzamento cantiere con costruzione tradizionale [22]

Processo	Valore
Posizionamento degli stampi	9,905 m ² / ora
Posa delle armature	2,218 m ³ / ora (= 1 ora per posare le armature necessarie per armare 2,218 m ³ di calcestruzzo)
Getto del calcestruzzo	2,919 m ³ / ora
Asciugatura del calcestruzzo	20 giorni

Tabella 2: Dati avanzamento cantiere con 3DCP [22]

Processo	Valore
Installazione iniziale stampante	1 ora
Predisposizione materiali (armature e calcestruzzo)	10 minuti
Capacità stampante senza spostamenti	82,18 m ³
Smontaggio intermedio stampante	30 min
Spostamento intermedio stampante	30 min
Reinstallazione intermedia stampante	1 ora
Totale tempo necessario per uno spostamento intermedio della stampante	2 ore (= 30 min + 30 min + 1 ora)
Smontaggio finale stampante	1 ora
Asciugatura del calcestruzzo	3 giorni

Per quanto concerne invece i processi inerenti all'attività logistica del BM, la fonte di dati è rappresentata dall'articolo del 2013 di Vidalakis C. et al. [30].

Nelle seguenti tabelle sono stati riportati i dati utilizzati per le attività logistiche di BM e produttore.

Tabella 3: Dati attività logistiche BM [30]

Processo	Valore
Processamento ordine	3 ore
Carico del camion	3 ore
Distanza tra BM e cantiere	Weibull ($\beta = 2,42$; $\alpha = 40,6$) [miglia]
Distanza tra cantieri per trasporto stampante	Weibull ($\beta = 2,42$; $\alpha = 40,6$) [miglia]
Velocità camion	30 miglia / ora
Tempo trasporto merce tra BM e cantiere	= Distanza tra BM e cantiere * 30 [ore]
Tempo trasporto stampante tra due cantieri	= Distanza tra cantieri per trasporto stampante * 30 [ore]
Scarico merce in cantiere	Gamma (3,14; 7,58) [minuti]
Rientro del camion in magazzino	= Tempo trasporto tra BM e cantiere

Tabella 4: Dati attività logistiche produttore [30]

Processo	Valore
Processamento ordine	3 ore
Carico del camion	3 ore
Distanza tra produttore e BM	Gamma (1,7; 113) [miglia]
Velocità camion	30 miglia / ora
Tempo trasporto merce tra produttore e BM	= Distanza tra produttore e BM * 30 [ore]
Scarico merce al magazzino BM	Normale ($\mu = 18,4$; $\sigma = 11,4$) [minuti]

All'interno dei processi si sono previsti anche i seguenti vincoli, reputati non sottovalutabili.

- Durata giornata lavorativa: 8 ore

- Non è possibile effettuare un trasporto in cantiere da parte del BM se il trasporto e il conseguente rientro del mezzo presso il magazzino non vengono conclusi entro la giornata lavorativa. Di conseguenza, prima di effettuare un trasporto, vanno calcolati i tempi di consegna, scarico e rientro per verificare la fattibilità del trasporto. Se il trasporto non è fattibile bisognerà attendere l'inizio di una nuova giornata lavorativa.
- Durata settimana lavorativa: 5 giorni
- Non è possibile effettuare un trasporto da parte del produttore al BM se il trasporto e il conseguente scarico del mezzo presso il magazzino del BM non vengono conclusi entro la settimana lavorativa. Di conseguenza, prima di effettuare un trasporto, vanno calcolati i tempi di consegna e scarico per verificare la fattibilità del trasporto. Se il trasporto non è fattibile bisognerà attendere l'inizio di una nuova settimana lavorativa.

3.4.2 Domanda

Altro aspetto fondamentale per la modellazione del problema è la definizione del livello di domanda, che, nel caso in questione, si esprime attraverso:

1. tempo di inter-arrivo di nuovi cantieri, che, nell'ottica del singolo distributore edile, significa il tempo che intercorre tra due richieste di fornitura;
2. dimensione dell'ordine, ovvero, nel caso in questione, le quantità di stampi, armature o ore di stampante necessarie per completare il cantiere.

Per effettuare una prima analisi si è utilizzata una domanda reale e congruente con quello che è l'andamento del settore al giorno d'oggi. Per far ciò sono stati presi i dati ISTAT "Statistiche sui permessi di costruire – Anno 2023" [32]. All'interno della banca dati appena citata si possono trovare i dati sulle costruzioni effettuate nell'anno 2023 in Italia, divise anche per regione e tipologia di cantiere. In particolare, sono stati presi in considerazione i dati relativi ai permessi di costruire di abitazioni residenziali per la regione Piemonte.

Per definire il tempo di inter-arrivo tra due cantieri, sono stati estrapolati dalla banca dati ISTAT i seguenti dati, per l'anno 2023 e per la regione Piemonte:

- numero fabbricati residenziali nuovi;
- numero ampliamenti residenziali con abitazioni;
- numero ampliamenti residenziali con soli vani;
- numero ampliamenti residenziali per altri usi (tale numero non è direttamente disponibile nella banca dati, in quanto, per gli ampliamenti residenziali per altri usi, viene solo fornita la superficie totale di tutti questi ampliamenti. Il numero è stato stimato in funzione della superficie massima ammessa per legge per eseguire un ampliamento di un fabbricato residenziale, pari al 25% della superficie esistente - Art. 5, comma 3, Legge regionale n. 16 del 04 ottobre 2018 [33]. Grazie a tale assunzione si è potuto calcolare il volume teorico dei fabbricati residenziali oggetto di tale ampliamento e, dividendolo per il volume unitario medio per nuovo fabbricato residenziale, calcolabile tramite i dati presenti in banca dati ISTAT sui nuovi fabbricati residenziali, si è stimato il numero ampliamenti residenziali per altri usi).

Determinato il numero totale di cantieri per il 2023 nella regione Piemonte, si è potuto calcolare il numero medio di cantieri per distributore edile nel 2023, dividendo il numero totale di cantieri per il numero di punti vendita della distribuzione edile per la regione Piemonte [34].

Dato che nel 2023 ci sono stati 250 giorni lavorativi, esclusi sabati e domeniche, dividendo 250 per il numero medio di cantieri per distributore edile nel 2023, si è trovato il valore medio del tempo di inter-arrivo.

Tabella 5: Calcolo del tempo medio di inter-arrivo della domanda per la regione Piemonte, anno 2023

	Dati	Valore	Fonte o Calcolo
1	Numero punti vendita edilizia	169	[34]
2	Numero fabbricati residenziali nuovi	706	[32 - Tavola 1.07]

	Dati	Valore	Fonte o Calcolo
3	Numero ampliamenti residenziali con abitazioni	137	[32 - Tavola 1.23]
4	Numero ampliamenti residenziali con soli vani	1.792	[32 - Tavola 1.23]
5	Superficie ampliamenti residenziali per altri usi	24.597 m ²	[32 - Tavola 1.23]
6	% ampliamento superficie edifici residenziali	0,25	[33]
7	Superficie teorica fabbricati residenziali oggetto di ampliamento per altri usi	98.388 m ²	= 24.597 m ² * 0,25
8	Volume totale ampliamenti fabbricati residenziali	185.384 m ³	[32 - Tavola 1.23]
9	Superficie totale ampliamenti fabbricati residenziali	61.950 m ²	[32 - Tavola 1.23]
10	Altezza media ampliamenti residenziali	2,99 m	= 185.384 m ³ / 61.950 m ²
11	Volume teorico fabbricati residenziali oggetto di ampliamento per altri usi	294.424 m ³	= 98.388 m ² * 2,99 m
12	Volume fabbricati residenziali nuovi	959.074 m ³	[32 - Tavola 1.07]
13	Volume unitario medio per nuovo fabbricato residenziale	1.358 m ³	= 959.074 m ³ / 706
14	Numero ampliamenti residenziali per altri usi	217	= 294.424 m ³ / 1.358 m ³
15	Totale cantieri	2.852	= 706 + 137 + 1.792 + 217
16	Numero richieste annuali ipotizzate per punto vendita	16,87	= 2.852 / 169
17	Giorni lavorativi 2023 Italia	250	[35]
18	Numero medio di giorni lavorativi tra due richieste	14,82	= 250 / 16,87

La richiesta di una fornitura rimane comunque un evento il cui arrivo è casuale e rimane indipendente dall'evento precedente. Questi eventi stocastici si definiscono come processi di Poisson stazionari. Il tempo che intercorre tra due eventi stocastici segue una distribuzione "random", ovvero esponenziale. Il tempo di inter-arrivo tra due cantieri avrà un valore casuale, con valor medio pari a circa 14,82 giorni, quindi Expo(14,82). Definito il tempo di inter-arrivo delle richieste, va definita la quantità per ogni richiesta. Basandosi sempre sui dati ISTAT del 2023 [32], è stato assunto quanto segue: esistono quattro tipologie di cantieri, ovvero costruzione di fabbricati residenziali nuovi, costruzione di ampliamenti residenziali con abitazioni, costruzione di ampliamenti residenziali con soli vani, costruzione di ampliamenti residenziali per altri usi. Avendo estrapolato dalla banca dati citata [32], il numero di cantieri per ogni tipologia di costruzione e il relativo volume totale costruito per tipologia, per la regione Piemonte, si è potuto calcolare il volume medio di un cantiere per la rispettiva tipologia. In seguito, in funzione del numero di richieste per ogni tipologia, si è determinata la percentuale di possibilità che la singola richiesta appartenga a una determinata tipologia di cantiere. Tali dati sono visionabili nelle seguente tabella.

Tabella 6: Valore medio domanda e probabilità per tipologia di cantiere

Tipologia cantiere	%	Valore medio domanda
Nuovo fabbricato residenziale	24,76%	1.358,46 m ³
Ampliamenti residenziale con abitazione	4,80%	217,48 m ³
Numero ampliamenti residenziali con abitazioni	62,84%	45,75 m ³
Numero ampliamenti residenziali con soli vani	7,60%	339,62 m ³
Totale	100%	

In sintesi, quando arriva una nuova richiesta:

- viene assegnata una tipologia di cantiere, con una probabilità pari a quella riportata in tabella;
- a seconda della tipologia, viene assegnato il volume della costruzione, calcolato da una distribuzione normale con media uguale al valor medio riportato in tabella e deviazione standard pari al 25% del valor medio [30].

Definito anche il valore della domanda in metri cubi, questo dovrà poi essere convertito in:

- peso di stampi richiesto, in kg;
- peso di armature richiesto, in kg;
- numero di spostamenti della stampante 3D necessari per completare la costruzione.

La conversione del volume in numero di spostamenti della stampante 3D risulta di facile calcolo, ovvero basta semplicemente dividere il volume per 82,18 m³, ovvero la capacità della stampante 3D, precedentemente definita.

Per quanto riguarda invece stampi e armature sono necessarie ulteriori considerazioni. In primo luogo, va notato che, come unità di misura di contabilizzazione dei materiali, è stato scelto il peso, in kg, per poterlo così confrontare facilmente con la portata del camion. Nel dettaglio, per convertire il volume di una costruzione nel peso degli stampi richiesti, il calcolo è il seguente:

$$Peso\ stampi = \sqrt{(Volume/2,7)} * 4 * 2,7 * 2 * 12,3 \quad (1)$$

dove:

- il volume viene diviso per 2,70 m (altezza locali abitabili in Italia, Decreto ministeriale Sanità 5 luglio 1975, Art. 3 [36]), trovando così la superficie della costruzione;
- viene calcolata la radice della superficie della costruzione per trovare la lunghezza di un lato della costruzione (ipotizzando una costruzione quadrata);
- il lato viene moltiplicato per 4, per trovare il perimetro della costruzione (sempre ipotizzando una costruzione quadrata);
- il perimetro viene moltiplicato per 2,70 m (altezza locali abitabili in Italia, Decreto ministeriale Sanità 5 luglio 1975, Art. 3 [36]), per trovare la superficie laterale della costruzione;

- per trovare la superficie di stampi necessaria per la costruzione, bisogna moltiplicare la superficie laterale della costruzione per 2, in quanto gli stampi vanno posizionati internamente ed esternamente al muro in calcestruzzo che dovrà poi essere gettato;
- infine, trovata la superficie di stampi necessaria, questa va moltiplicata per 12,3 kg/m² ovvero il peso specifico degli stampi [37], per convertirlo definitivamente in peso.

Va precisato il fatto che, come stampi, si sono considerati i cosiddetti “pannelli da armatura” in legno [37], ovvero tavole in legno con determinate specifiche tecniche, appositamente prodotte per essere utilizzate come stampi per i getti di calcestruzzo, le quali risultano essere il tipo di stampo più comunemente diffuso nella pratica edilizia odierna. Inoltre, lo stesso studio del 2021 di Khajavi S.H. [22] ipotizza il legno come materiale utilizzato per creare gli stampi.

Per quanto invece concerne la conversione del volume della costruzione nel peso delle armature richieste, il calcolo è il seguente:

$$Peso\ armature = \sqrt{(Volume/2,7)} * 4 * 2,7 * 0,23 * 100 \quad (2)$$

dove:

- il volume viene diviso per 2,70 m (altezza locali abitabili in Italia, Decreto ministeriale Sanità 5 luglio 1975, Art. 3 [36]), trovando così la superficie della costruzione;
- viene calcolata la radice della superficie della costruzione per trovare la lunghezza di un lato della costruzione (ipotizzando una costruzione quadrata);
- il lato viene moltiplicato per 4, per trovare il perimetro della costruzione (sempre ipotizzando una costruzione quadrata);
- il perimetro viene moltiplicato per 2,70 m (altezza locali abitabili in Italia, Decreto ministeriale Sanità 5 luglio 1975, Art. 3 [36]), per trovare la superficie laterale della costruzione;
- la superficie laterale della costruzione viene moltiplicata per lo spessore del muro pari a 0,23 m [22], per trovare il volume del calcestruzzo gettato o stampato;
- infine, trovato il volume del calcestruzzo, questo va moltiplicato per l’incidenza al metro cubo delle armature, ovvero 100 kg/m³

[37], per convertirlo definitivamente nel peso delle armature richieste.

Si precisa che con “armature” si intende l’insieme di tutti gli elementi in acciaio, opportunamente sagomati e posizionati, che sono inglobati nel calcestruzzo al fine di migliorarne il comportamento statico di tutto il sistema costruttivo [37].

3.4.3 Calcolo di Q e R

Per completare l’analisi dei dati necessari, rimane da analizzare il calcolo dei livelli Q e R dell’inventario del BM, rispettivamente per stampi e armature.

La formula per il calcolo di R, considerato il fatto che il Lead Time della fornitura dal produttore è variabile, è la seguente:

$$R = AVG * AVGL + z * \sqrt{AVGL * STD^2 + AVG^2 * STDL^2} \quad (3)$$

dove:

- AVG è la domanda media del prodotto;
- AVGL è il valor medio del Lead Time della fornitura;
- STD è la deviazione standard della domanda del prodotto;
- STDL è la deviazione standard del Lead Time della fornitura.

Per quanto concerne il Lead Time, AVGL e STDL sono di facile determinazione dal momento che, come precedentemente analizzato:

- la distanza tra produttore e BM è data da una distribuzione Gamma (1,7; 113) con valor medio uguale a 192,10 miglia e deviazione standard uguale a 147,33 miglia;
- il camion trasporta a una velocità di 30 miglia all’ora;
- il tempo di scarico del camion al magazzino del BM segue una distribuzione normale con media uguale a 18,4 min e una deviazione standard uguale a 11,4 min;
- la giornata lavorativa è pari a 8 ore.

Di conseguenza:

$$\begin{aligned} AVGL &= ((192,10 \text{ miglia} / 30 \text{ miglia/ora}) * 60 \text{ min/ora}) + 18,4 \text{ min} = \\ &= 402,60 \text{ min} = 0,84 \text{ giorni} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} STDL &= RADQ(((147,33 \text{ miglia} / 30 \text{ miglia/ora}) * 60 \text{ min/ora})^2 + \\ &+ (11,4 \text{ min})^2) = 294,89 \text{ min} = 0,61 \text{ giorni} \end{aligned}$$

Avendo un tempo medio di inter-arrivo della domanda significativamente maggiore del Lead Time medio (14,82 giorni >> 0,84 giorni), la domanda media AVG sarà quindi rappresentata dal valore atteso della richiesta di stampi o armature del singolo cantiere.

Per calcolare tale valore atteso, si è proceduto come segue:

- partendo dal volume medio unitario calcolato per ogni tipologia di costruzione (fabbricato residenziale nuovo, ampliamento residenziale con abitazione, ampliamento residenziale con soli vani, ampliamento residenziale per altri usi), questo è stato convertito nella rispettiva quantità in kg di stampi e armature, applicando le regole per la composizione dei valori medi delle distribuzioni statistiche alla formule specificate nel precedente paragrafo (1) e (2);
- lo stesso è stato fatto, applicando le regole per la composizione di deviazioni standard delle distribuzioni statistiche, considerando la deviazione standard del volume unitario per ogni tipologia di costruzione pari al 25% del suo valore medio, come analizzato nel precedente paragrafo;
- per trovare il valore medio e la deviazione standard della domanda di stampi e armature per singola richiesta, sono stati combinati i rispettivi quattro valori diversi calcolati per ogni tipologia di cantiere e pesati per la probabilità riferita alla tipologia stessa.

Sono stati dunque trovati i valori:

- AVG (stampi) = 2.484,03 kg
- AVG (armature) = 2.322,47 kg
- STD (stampi) = 205,90 kg
- STD (armature) = 192,51 kg

Applicando tali valori alla formula (3), si trovano $R(\text{stampi}) = 3.544$ kg e $R(\text{armature}) = 3.314$ kg.

La formula per il calcolo del valore Q, dedotta tramite il modello dell'Economic Order Quantity, risulta invece essere:

$$Q = \sqrt{2K * AVG/h} \quad (4)$$

dove:

- K è il costo di ordinazione al fornitore;
- AVG è la domanda media del prodotto, già determinata;

- h è il costo di mantenimento dell'inventario.

Per eseguire una stima ragionevole di quello che può essere il costo di ordinazione K , questo è stato calcolato a partire dalla tabella dei “costi minimi di riferimento” per il mese di gennaio 2024, pubblicata dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti [39]. La tabella riporta i costi indicativi al km per il trasporto merci.

Tra i costi proposti dalla presente, è stato selezionato un costo chilometrico pari a 1,452 €/km, il che rappresenta il costo minimo per i veicoli di categoria C, ovvero con una portata da 12 a 26 tonnellate. La scelta di utilizzare tale costo chilometrico deriva dal fatto che, come esposto successivamente, le quantità Q , utilizzando tale parametro di costo, hanno un valore che arriva a essere di poco maggiore alle 12 tonnellate e ciò risulta essere coerente con la scelta effettuata.

Dal momento che il valore medio della distanza tra produttore e distributore edile è pari a 192,10 miglia, che corrispondono a 309,15 km, e che tale distanza viene percorsa dal trasportatore per consegnare e per ritornare al produttore, si trova un costo totale pari a € 897,78.

Di conseguenza, si assume che, ogni qual volta viene emesso un ordine al produttore, il BM deve sostenere un costo fisso di ordinazione pari a € 897,78.

Per il calcolo del costo di mantenimento dell'inventario h , si formula l'ipotesi che l'incidenza annuale di tale costo per un singolo pezzo sia pari al 20% del costo del prodotto [30]. Si avranno dunque due costi di inventario separati per stampi e armature. In Tabella 7 si possono consultare assunzioni e calcoli effettuati per determinarli.

Tabella 7: Calcolo del costo di inventario annuale h

Dati	Valore	Calcolo
Prezzo di vendita degli stampi, iva compresa (al m ² , 12,3 kg/m ²)	33,50 €/ m ²	Fonte: [40]
Prezzo di vendita degli stampi, iva esclusa (al kg)	2,23 €/kg	= (33,50 €/ m ² / 1,22) / 12,3 kg/m ²

Dati	Valore	Calcolo
Rapporto ipotizzato tra prezzo di vendita BM su costo di acquisto	1,25	
Costo di acquisto stampi, iva esclusa (al kg)	1,94 €/kg	= 2,23 €/kg / 1,25
Prezzo di vendita delle armature, iva compresa (al pezzo, peso 1,90 kg)	4,50 €/pezzo	Fonte: [41]
Prezzo di vendita delle armature, iva esclusa (al kg)	1,94 €/kg	= (4,50 € / 1,22) / 1,90 kg
Costo di acquisto armature, iva esclusa (al kg)	1,55 €/kg	= 1,94 €/kg / 1,25
Rapporto tra costo di stoccaggio annuale e costo del prodotto	0,20	Fonte: [30]
h (stampi)	0,357 €/kg	= 1,94 €/kg * 0,20
h (armature)	0,311 €/kg	= 1,55 €/kg * 0,20

Avendo determinato AVG, K e h, si può calcolare Q con l'utilizzo della formula (4). Si trovano Q (stampi) = 14.516 kg e Q (armature) = 15.051 kg.

3.5 Modellizzazione sul software

Definito il modello concettuale e le informazioni quantitative da inserire nello stesso, avviene l'implementazione del modello operativo sul software di simulazione a eventi discreti che, nel caso in oggetto, è il software Rockwell Arena.

Sono stati creati due modelli separati sul software: uno per la modellazione della Supply Chain con metodologia costruttiva tradizionale e uno per la modellazione della Supply Chain con utilizzo di 3D Concrete Printing.

Sul modello della Supply Chain con metodologia costruttiva tradizionale si hanno quattro flussi principali, ovvero avanzamento cantiere, gestione dell'ordine ordine del BM e i due flussi di gestione dell'ordine al

produttore, uno per gli stampi e uno per le armature; sul modello della Supply Chain con 3DCP si ha un flusso di entità in meno in quanto non si ha la gestione dell'ordine al fornitore degli stampi.

Si è scelto di eseguire delle simulazioni della durata di due anni.

Per inizializzare le simulazioni sono stati fissati i seguenti dati:

- livello di domanda ipotizzato nel sotto-paragrafo 3.4.2, ovvero
 - tempo di inter-arrivo della domanda casuale, il cui valore segue una distribuzione esponenziale con media pari a 14,82 giorni,
 - volume della singola richiesta variabile in funzione della tipologia di cantiere (con relativa probabilità di verificarsi riportata in Tabella 6), il cui valore segue una distribuzione normale con valore medio riportato in Tabella 6 (a seconda della di tipologia di cantiere) e deviazione standard pari al 25% del valore medio;
- Q e R calcolati nel sotto-paragrafo 3.4.3, ovvero
 - $R(\text{stampi}) = 3.544 \text{ kg}$,
 - $R(\text{armature}) = 3.314 \text{ kg}$,
 - $Q(\text{stampi}) = 14.516 \text{ kg}$,
 - $Q(\text{armature}) = 15.051 \text{ kg}$;
- giacenze iniziali in inventario pari al rispettivo livello di riordino R;
- tolleranza minima del costruttore, ovvero pari alle 3 ore di processamento iniziale dell'ordine (tale assunzione porta di conseguenza il fatto che il BM perda la fornitura se non ha abbastanza inventario nel momento della richiesta oppure, per il 3DCP, se non si ha la stampante 3D disponibile immediatamente);
- per la Supply Chain con il 3DCP, una sola stampante 3D a completa disposizione per i cantieri del BM.

Prima di procedere con la simulazione effettiva per trarne le misure di performance da analizzare, sono state eseguite delle simulazioni preliminari, al fine di trovare il numero di repliche e il transitorio. Sono stati quindi determinati:

- un numero di repliche pari a 23, da ripetere per ogni simulazione;

- un periodo di transitorio pari a un anno; per avere una simulazione con output corretti per due anni, sarà necessario eseguire simulazioni della durata di tre anni, con un anno di transitorio.

3.6 Misure di performance

L'ultima fase preliminare dello studio è la definizione dei KPI (Key Performance Index).

Avendo focalizzato lo studio sulla figura del distributore edile, si è scelto di valutare misure di performance di particolare interesse per l'attività di tale operatore logistico. Si elencano di seguito tutti gli output calcolati durante le simulazioni con Supply Chain con metodologia costruttiva tradizionale:

1. volume totale di armature acquistate, espresso in kg;
2. volume totale di stampi acquistati, espresso in kg;
3. giacenza media delle armature a magazzino;
4. giacenza media degli stampi a magazzino;
5. chilometri percorsi del camion del BM;
6. numero di cantieri non soddisfatti, a causa della mancanza di armature, suddivisi a seconda della tipologia di cantiere;
7. numero di cantieri non soddisfatti, a causa della mancanza di stampi, suddivisi a seconda della tipologia di cantiere;
8. numero di consegne effettuate dal camion del BM;
9. numero di ordini effettuati al fornitore di armature;
10. numero di ordini effettuati al fornitore di stampi;
11. livello di servizio, calcolato come il numero di cantieri serviti sul totale dei cantieri processati;
12. livello di servizio, calcolato come il volume costruito sulla somma totale del volume da costruire di tutti i cantieri processati;
13. volume di armature vendute, espresso in kg;
14. volume di stampi venduti, espresso in kg;
15. volume totale di abitazioni costruite;
16. tempo di completamento del cantiere, calcolato sia sul totale dei cantieri processati, sia a seconda della tipologia di cantiere;
17. numero di cantieri soddisfatti, totale e per tipologia di cantiere;

18. costo totale di acquisto del materiale del BM, di sole armature, dei soli stampi e totale;
19. costo totale di ordinazione del materiale del BM (K), di sole armature, dei soli stampi e totale;
20. costo totale di stoccaggio del materiale del BM (h), di sole armature, dei soli stampi e totale;
21. costo logistico per le forniture del BM, di sole armature, dei soli stampi e totale, calcolato come somma del costo di ordinazione più costo di stoccaggio;
22. costo totale di fornitura del BM, di sole armature, dei soli stampi e totale, calcolato come somma del materiale acquistato, più il costo di ordinazione, più il costo di stoccaggio;
23. costo dei trasporti in cantiere del BM;
24. costo logistico totale del BM, calcolato come somma dei costi logistici della fornitura più il costo dei trasporti in cantiere;
25. ricavi derivanti dalla vendita degli stampi;
26. ricavi derivanti dalla vendita delle armature;
27. costi totali del BM;
28. ricavi totali del BM;
29. margine del BM, calcolato come ricavi meno costi;
30. margine percentuale del BM, calcolato rapporto tra margine e ricavi.

Le stesse misure di performance si applicano alla Supply Chain con 3DCP, ad eccezione di quelle inerenti agli stampi, che di conseguenza non competeranno al calcolo di KPI derivati. Tuttavia, si aggiungono una serie di misure di performance relative all'utilizzo del 3D Concrete Printing, quali:

31. numero di cantieri non soddisfatti, a causa della non disponibilità della stampante 3D, suddivisi a seconda della tipologia di cantiere;
32. tempi operativi totali del 3DCP, calcolati sulla somma di tutti i cantieri processati, quali tempo effettivo in costruzione, tempo di setup della stampante, tempo per lo spostamento della stampante all'interno dello stesso cantiere, tempo di trasporto della stampante tra cantieri diversi;

33. numero di stampanti utilizzate (questa misura di performance è stata implementata in un secondo momento, ovvero quando si è scelto di valutare gli effetti dell'aumento della domanda sulla Supply Chain);
34. ricavi del BM, dovuti alla fornitura del servizio di 3DCP, calcolati in funzione dei tempi operativi (punto 32);
35. costi totali del 3DCP, dovuti alla fornitura del servizio, calcolati in funzione dei tempi operativi (punto 32).

Ovviamente, nel caso di Supply Chain con 3DCP, gli indicatori 34 e 35 competeranno al calcolo degli indicatori 27, 28, 29 e 30.

Di seguito alcune precisazioni sul calcolo degli indici performance economici:

- I costi in input per il calcolo di tali parametri della Supply Chain con metodologia costruttiva tradizionale, quali costo del materiale, prezzo del prodotto, costo di ordinazione e costo di stoccaggio sono già stati ipotizzati nel sotto-paragrafo 3.4.3. L'unico costo mancante è il costo chilometrico unitario per i trasporti effettuati dal BM in cantiere, al fine di calcolare l'indicatore 23: anche in questo caso, tale dato è stato prelevato dalla tabella dei "costi minimi di riferimento" per il mese di gennaio 2024, pubblicata dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti [39]. Avendo ipotizzato per il BM un camion con portata inferiore alle 3,5 tonnellate (2600 kg [31]), e quindi compreso nella categoria A definita dal MIT, è stato ipotizzato un costo chilometrico pari a 0,859 €/km; tale costo chilometrico viene utilizzato per lo stesso scopo anche per la simulazione della Supply Chain con 3DCP, così come i costi di ordinazione, stoccaggio, acquisto e vendita delle armature;
- per quanto riguarda la Supply Chain con utilizzo del 3DCP, si è dovuto ipotizzare il costo e corrispondente ricavo per la fornitura del servizio di 3DCP. I dati in questione sono stati derivati dal già citato studio del 2021 di Khajavi S.H. et al. [22] e sono riassunti in Tabella 8 (in **neretto**, i costi unitari da moltiplicare per gli output della simulazione). La combinazione di tali costi con i parametri di output della simulazione fornisce l'indicatore 34 (ricavi del BM,

dovuti alla fornitura del servizio di 3DCP). Il calcolo dell'indicatore 35 (costi totali del 3DCP) avviene dividendo l'indicatore 34 per 1,10: su un servizio di tale entità economica, abbinato al fatto che per il BM la fornitura di tale servizio non impegna nessuna risorsa, si ipotizzata una sola differenza del 10% tra acquisto e vendita del servizio stesso da parte del BM.

Tabella 8: Costi del 3D Concrete Printing

Dati	Valore	Calcolo
Costo per l'utilizzo operativo della stampante	4,11 €/ora	Fonte: [22 – Tabella A5]
Costo per il mantenimento della stampante durante la costruzione	0,55 €/ora	Fonte: [22 – Tabella A5]
Costo del personale durante la costruzione, a persona	42 €/ora	Fonte: [22 – Tabella A5]
Numero di persone impiegate	2	Fonte: [22 – Tabella A5]
Costo del personale durante la costruzione	84 €/ora	= 42 €/ora * 2
Costo totale durante la costruzione	88,66 €/ora	= 4,11 + 0,55 + 84
Costo del personale per il set-up (Installazione + Disassemblaggio finale)	42 €/ora	Fonte: [22 – Tabella A5]
Costo del personale durante uno spostamento intermedio della stampante in cantiere	42 €/ora	Fonte: [22 – Tabella A5]
Costo della stampante durante uno spostamento intermedio della stampante in cantiere	1,17 €/ora	Fonte: [22 – Tabella A5]

Dati	Valore	Calcolo
Costo totale spostamento intermedio della stampante in cantiere	43,17 €/ora	= 42 + 1,17
Costo spostamento della stampante tra cantieri	1,17 €/cantiere	Fonte: [22 – Tabella A5]
Costo trasporto stampante tra cantieri	500 €/ora	Fonte: [22 – Tabella A5]

4. Analisi dei risultati

Nel presente capitolo vengono presentati i dati raccolti tramite un'analisi dei relativi Key Performance Index. Tra tutte le misure di performance calcolate, si sono approfondite nel dettaglio quelle repute maggiormente significative. Tali misure considerate sono:

- livello di servizio, calcolato sia come la percentuale di cantieri serviti sul totale dei cantieri processati, sia come la percentuale di volume costruito sulla somma totale del volume da costruire di tutti i cantieri processati;
- tempo di completamento del cantiere;
- volume totale di abitazioni costruite;
- numero totale di cantieri soddisfatti;
- indicatori economici, quali costi logistici, costi totali e margine ipotizzato.

Vengono analizzati prima i KPI relativi allo scenario di domanda reale (paragrafo 4.1) e poi quelli che si otterrebbero in caso di aumento della domanda (paragrafo 4.2).

4.1 Domanda reale

Nella seguente tabella sono riportati i KPI oggetto di analisi, calcolati come il valore medio dell'indicatore sulle 23 repliche.

Tabella 9: Confronto tra Supply Chain tradizionale e con 3DCP in condizioni di domanda reali

KPI	Trad.	3DCP	Diff. %
% cantieri soddisfatti	91,45 %	38,18 %	- 58 %
% volume costruito	73,02 %	36,85 %	- 50 %
Volume totale costruito	9.342 m ³	5.107 m ³	- 45 %
Numero cantieri soddisfatti	31	14	- 56 %

KPI	Trad.	3DCP	Diff. %
Tempo completamento cantiere	464 ore	240 ore	- 48 %
Costi logistici totali BM	€ 24.696	€ 13.524	- 45 %
Costi totali BM (prodotti/servizi + logistica)	€ 264.747	€ 247.818	- 6 %
Margine BM	€ 53.372	€ 30.108	- 44 %

Da una prima analisi, si nota come il livello di servizio con l'utilizzo del 3DCP sia sensibilmente diminuito. Dal punto di vista del costruttore, si nota una significativa riduzione in termini di capacità costruttiva, sia dal punto di vista del volume che del numero di cantieri. Inoltre, l'apparente riduzione del tempo di completamento del cantiere che si avrebbe utilizzando la stampa 3D, non sembra portare i benefici sperati.

Anche dal punto di vista del BM, il 3DCP sembra ridurre sensibilmente il relativo guadagno. Tuttavia, dal momento che il calcolo del margine è sensibilmente influenzato dalle percentuali di margine ipotizzate, il BM può trarre dei benefici in termini di costo. Tale vantaggio economico è prevalentemente legato alla gestione delle forniture di stampi che, con l'utilizzo della stampa 3D, non avviene.

Da un'analisi più attenta delle misure di performance, divise per tipologie di cantiere, si nota quanto segue:

- la riduzione del livello del servizio è essenzialmente legata alla mancanza della stampante 3D nel momento in cui questa viene richiesta; tale disservizio non accade sulla filiera tradizionale, in quanto, avendo definito la politica di gestione delle scorte e opportunamente dimensionato gli inventari (sotto-paragrafo 3.4.3), la non saturazione del livello di servizio è solamente correlata alla variabilità della domanda;
- il 3DCP riduce sensibilmente il tempo di completamento dei cantieri di modesta entità (che risultano essere la maggioranza), ma aumenta il tempo di completamento dei cantieri con grandi volumi, probabilmente a causa dei molteplici processi di spostamento intermedio richiesti;

- nel momento in cui la stampante 3D inizia a lavorare su un cantiere di grande volume (che richiede dunque un grosso impegno anche dal punto di vista temporale), il BM è costretto a rinunciare alla fornitura di tutte le richieste, anche di cantieri di modesta entità, che arrivano in quell'arco temporale e ciò risulta essere il fatto che più penalizza il livello di servizio e, di conseguenza, tutti gli altri KPI. Questo fatto è una peculiarità intrinseca della fornitura del servizio del 3DCP da parte del BM, che invece non si pone quando costui si limita semplicemente a fornire materiali. In tal caso, esso può perdere la fornitura solo a causa di una momentanea situazione di stock-out, che viene comunque risolta in un arco temporale molto più breve rispetto al completamento di un cantiere di grandi dimensioni con 3DCP.

Per le motivazioni appena discusse, il confronto delle due Supply Chain non può essere considerato esaustivo. A tal proposito, è necessario modificare tali condizioni al fine di rendere i due scenari maggiormente confrontabili.

Per ovviare il problema dell'eccessiva perdita di servizio che avviene con l'utilizzo del 3DCP, viene modificata la Supply Chain con l'utilizzo di tale tecnologia, aumentando il numero di stampanti 3D a disposizione del BM, affinché tale scenario raggiunga un livello di servizio simile a quello che si ottiene sulla Supply Chain tradizionale. In particolare, si è notato che con tre stampanti 3D a disposizione si riesce a raggiungere lo stesso livello di servizio. Nella seguente tabella sono riportati i KPI calcolati con l'utilizzo di tre stampanti, a confronto con quelli già precedentemente ottenuti sulla Supply Chain con metodologia costruttiva tradizionale.

Tabella 10: Confronto tra Supply Chain tradizionale e con 3DCP, avendo tre stampanti 3D a disposizione, in condizioni di domanda reali

KPI	Trad.	3DCP	Diff. %
% cantieri soddisfatti	91,45 %	86,94 %	- 5 %
% volume costruito	73,02 %	75,58 %	+ 3 %
Volume totale costruito	9.342 m ³	10.410 m ³	+ 11 %
Numero cantieri soddisfatti	31	30	- 3 %

KPI	Trad.	3DCP	Diff. %
Tempo completamento cantiere	464 ore	181 ore	- 61 %
Costi logistici totali BM	€ 24.696	€ 12.854	- 48 %
Costi totali BM (prodotti/servizi + logistica)	€ 264.747	€ 366.597	+ 38 %
Margine BM	€ 53.372	€ 40.396	- 24 %

Dal punto di vista del costruttore si nota un'ulteriore significativa riduzione del tempo di completamento del cantiere. Considerando solo livello di servizio e tempi di completamento, il 3D Concrete Printing porterebbe benefici significativi al costruttore. Un'importante riduzione del tempo di completamento del cantiere rappresenta un vantaggio non indifferente, soprattutto in un settore come l'edilizia, dove spesso si ha a che fare con ritardi sui progetti oppure con penali di importante entità. La riduzione di tale tempistica può portare di conseguenza a una maggiore soddisfazione del cliente finale, così come maggiori opportunità di business per il costruttore stesso, fornendogli la possibilità di gestire un maggior numero di cantieri. In funzione di ciò (oltre alle varie considerazioni legate all'innovazione che una tale tecnologia porterebbe al settore), il costruttore potrebbe preferire tale metodologia costruttiva, anche se fosse più dispendiosa economicamente. Va tuttavia specificato che un contributo significativo alla diminuzione del tempo è dato dal fatto che, con il 3DCP, si riduce il tempo di asciugatura del calcestruzzo da 20 a 3 giorni [22]. Questo fattore può sicuramente ridurre i tempi di consegna al cliente, ma tale fase costruttiva non porta impiego di risorse, permettendo così al costruttore di poterle muovere su altre attività.

Dal punto di vista del BM, lo scenario non sembra portare particolari benefici. Il principale vantaggio che si può notare è la riduzione dei costi logistici, derivante sempre dal fatto che non si ha più da gestire la fornitura di stampi. Valutando anche la stima dei costi totali e del guadagno, si nota come il maggior costo legato alla fornitura del servizio di 3DCP non si traduca in un guadagno di egual misura. Tuttavia, dal momento che si è ipotizzato che per il BM la fornitura del 3DCP non rappresenta un'attività ad impiego di risorse, ma solo un'attività di intermediazione commerciale

e organizzazione logistica, questo si potrebbe trovare ad avere risorse libere in seguito alla dismissione degli stampi; le risorse libere (personale e deposito) potrebbero dunque essere destinati ad altri prodotti o attività, aprendo nuove opportunità di business anche al BM.

4.2 Aumento della domanda

In seguito all'analisi dei risultati in condizioni di domanda reali, si è scelto di effettuare una valutazione sulla capacità delle filiere analizzate di adattarsi alla variazione della domanda. Tale variazione è un fattore determinante per le prestazioni della Supply Chain, poiché può portare a inefficienze come scorte insufficienti o eccessive, scarse previsioni di prodotto, tempi di consegna incerti ed errata pianificazione della produzione. Nel settore delle costruzioni, l'incertezza della domanda è una delle caratteristiche chiave [30].

Vidalakis C. et al. [30] hanno effettuato questo tipo di valutazione considerando una filiera tradizionale.

L'obiettivo è quello di comprendere quale delle due situazioni logistiche ipotizzate sia maggiormente efficiente in caso di aumento della domanda. Sono stati quindi valutati diversi scenari ipotetici di domanda, a partire da un aumento della domanda del 50%, fino all'aumento del 12.700 %: ciò significa che si passa dall'aver un tempo medio di inter-arrivo delle richieste di 14,82 giorni (caso con domanda reale), fino ad un tempo di circa 1 ora (aumento del 12.700 %).

Inoltre, al fine di ottenere degli scenari il più possibile congruenti alla realtà, si sono dovuti opportunamente modificare i valori di Q e R, così come il numero di stampanti a disposizione nel caso di 3DCP. Tale assunzione viene fatta sotto l'ipotesi che il BM possa prendere le dovute "contromisure", sia dal punto di vista delle disponibilità di prodotti a magazzino che della disponibilità di stampanti, per affrontare l'aumento della domanda.

Di conseguenza, data la possibilità al BM di dimensionare opportunamente le disponibilità a magazzino al fine di garantire il livello di servizio più alto possibile (il disservizio si crea solo a causa dell'arrivo casuale della domanda e dell'alta variabilità intrinseca del volume della

richiesta), per lo scenario con 3DCP si rimuove il vincolo sulla disponibilità limitata delle stampanti. Per tale ragione, è stato introdotto l'indicatore "numero di stampanti utilizzate", il quale è calcolato come il numero massimo di stampanti utilizzate contemporaneamente, ovvero il numero di stampati di cui il BM necessiterebbe di avere a disposizione affinché possa sempre garantire il servizio di stampa 3D in qualsiasi momento.

Nelle seguente tabella sono riportati i valori di Q e R, ricalcolati per il rispettivo livello di domanda, e il numero di stampanti 3D utilizzate.

Tabella 11: Variazione di Q, R e numero di stampanti utilizzate, in funzione dell'aumento della domanda

$\Delta\%$	Ti	R(st)	R(arm)	Q(st)	Q(arm)	N. 3DP
0	14,81	3.544	3.314	14.516	15.051	2
50%	9,88	2.894	2.706	16.064	16.657	2
100%	7,41	2.506	2.343	17.262	17.899	2
200%	4,94	2.046	1.913	19.104	19.809	3
300%	3,71	1.772	1.657	20.528	21.286	4
500%	2,47	1.447	1.353	22.718	23.557	6
700%	1,85	1.253	1.172	24.413	25.313	8
1100%	1,24	1.023	957	27.017	28.014	12
1500%	0,93	957	895	29.032	30.103	26
2300%	0,62	1.172	1.096	32.129	33.314	230
3100%	0,46	1.353	1.265	34.525	35.799	427
4700%	0,31	1.657	1.550	38.208	39.618	780
6300%	0,23	1.914	1.789	41.057	42.572	1.160
9500%	0,15	2.344	2.191	45.437	47.113	1.756
12700%	0,12	2.707	2.531	48.825	50.627	2.242

$\Delta\%$ = riduzione percentuale del tempo di inter-arrivo

Ti = tempo di inter-arrivo, espresso in giorni (8 ore/giorno)

R(st) = livello di riordino degli stampi, espresso in kg

R(arm) = livello di riordino delle armature, espresso in kg

Q(st) = quantità dell'ordine di stampi, espressa in kg

Q(arm) = quantità dell'ordine di armature, espressa in kg

N. 3DP = numero di stampanti 3D utilizzate

Sono state eseguite 28 nuove simulazioni, 14 per la Supply Chain con metodologia costruttiva tradizionale, 14 per la Supply Chain con 3DCP, una per ogni livello di domanda.

Si noti come, data la proporzionalità inversa tra aumento della domanda e tempo inter-arrivo delle richieste:

- per livelli di domanda bassi, “piccoli” aumenti di domanda portano a una “grande” variazione del tempo di inter-arrivo;
- per livelli di domanda alti, “grandi” aumenti di domanda portano a una “piccola” variazione del tempo di inter-arrivo.

Nei figure dalla 5 alla 13, vengono riportati i grafici degli indici di performance analizzati:

- in **blu** si delineano i dati relativi alla **Supply Chain con metodologia costruttiva tradizionale**;
- in **arancione** si delineano i dati relativi alla **Supply Chain con utilizzo di 3DCP**.

Nelle figure 5 e 6, si può notare la diminuzione del livello di servizio percentuale al crescere della domanda. Si nota come tale indicatore sia, per livelli di domanda bassa, pressoché simile.

All’aumentare della domanda si crea un certo divario percentuale tra le due Supply Chain che rimane costante. Si può riscontrare una miglior prestazione della Supply Chain con 3DCP: da una prima analisi, tale riscontro sembra essere correlato al minor numero di cantieri insoddisfatti che si hanno in tale configurazione logistica, grazie alla non gestione della fornitura di stampi.

Quanto appena discusso risulta ancora più visibile analizzando i grafici degli indicatori del livello di servizio in termini assoluti, ovvero il numero totale di cantieri soddisfatti e il volume totale costruito (figure 7 e 8).

Per livelli di domanda bassi, si nota quanto tali indicatori siano simili: con l’aumento della domanda aumentano anche questi, con proporzionalità lineare. Il coefficiente angolare dell’aumento di tali indicatori risulta essere maggiore per la Supply Chain con 3DCP.

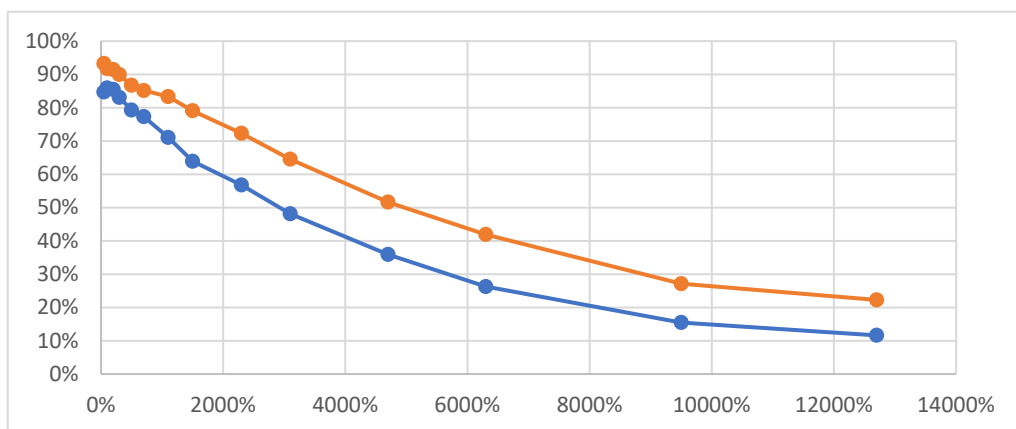


Figura 5: Variazione del livello di servizio (in percentuale del numero di cantieri) all'aumentare della domanda

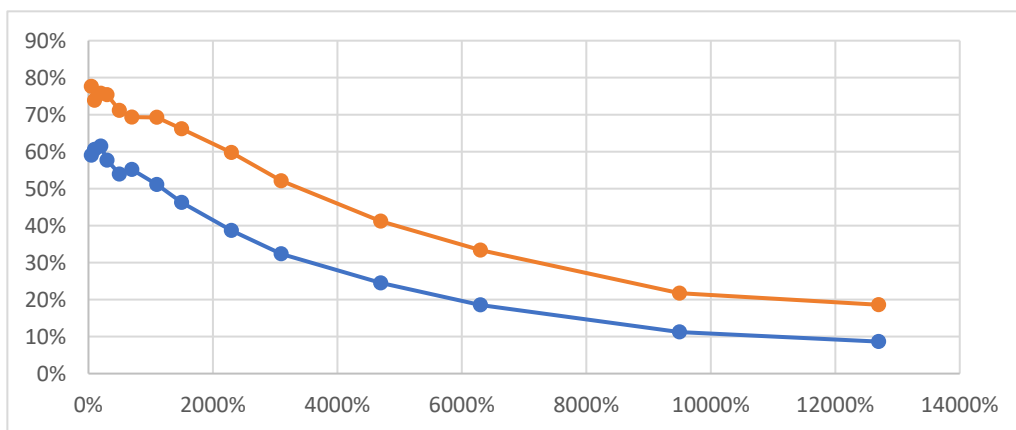


Figura 6: Variazione del livello di servizio (in percentuale del volume costruito) all'aumentare della domanda

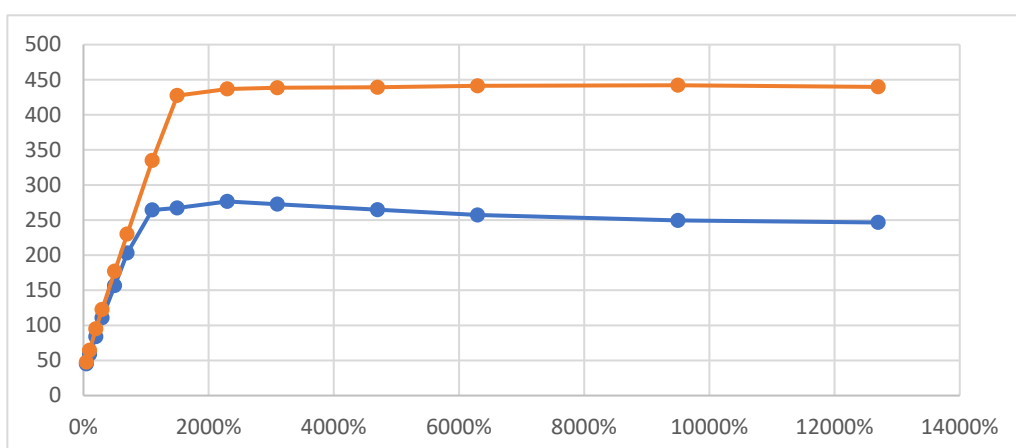


Figura 7: Variazione del numero di cantieri completati, all'aumentare della domanda

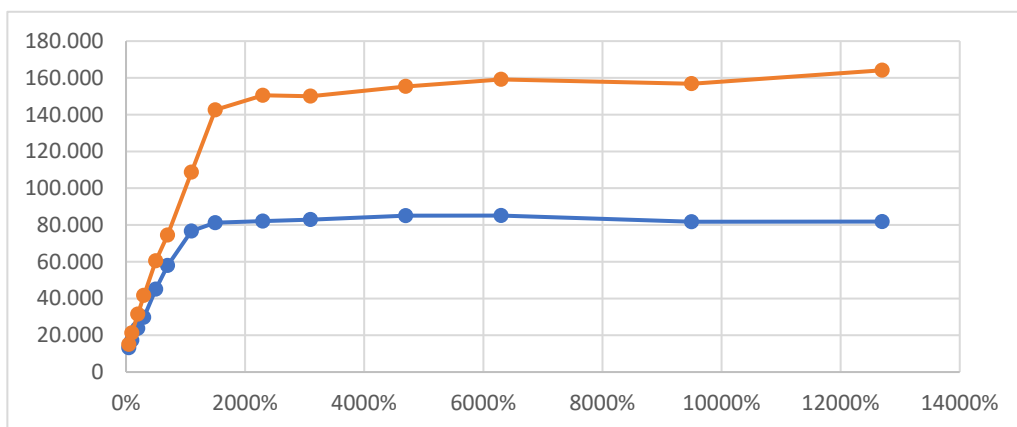


Figura 8: Variazione del volume di abitazioni costruito, all'aumentare della domanda

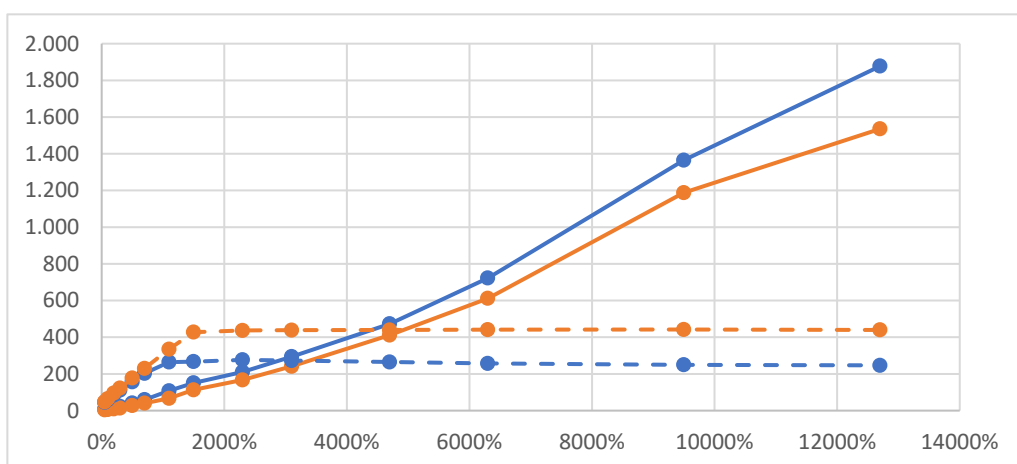


Figura 9: Variazione del numero di cantieri non completati a causa di stock-out, all'aumentare della domanda

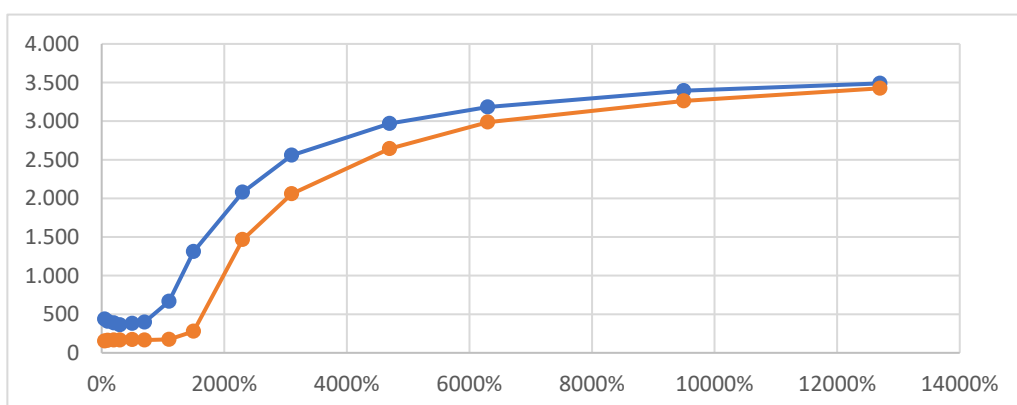


Figura 10: Variazione del tempo di completamento del cantiere all'aumentare della domanda

Tuttavia, la differenza principale tra le due filiere è rappresentata dal punto in cui il BM arriva a saturazione della propria capacità di servizio, il quale risulta essere visibilmente maggiore per la Supply Chain appena citata. Raggiunto il punto di saturazione, in entrambi i casi, gli indicatori in oggetto rimangono pressoché costanti. Il raggiungimento del punto di saturazione è la motivazione per cui, di conseguenza, diminuisce significativamente anche il livello di servizio percentuale all'aumentare della domanda.

Dai grafici presentati si osserva che il punto di saturazione corrisponde a un aumento di domanda pari a circa:

- 12 volte la domanda reale (aumento del 1100%), per la Supply Chain con metodologia costruttiva tradizionale, corrispondente a un tempo medio di inter-arrivo delle richieste pari a 1,24 giorni;
- 16 volte la domanda reale (aumento del 1500%), per la Supply Chain con utilizzo del 3DCP, corrispondente a un tempo medio di inter-arrivo delle richieste pari a 0,93 giorni.

Come si può notare dal grafico in Figura 9, la motivazione dietro a tale differenza della capacità di servizio è correlata al fatto che con il 3DCP non si hanno cantieri non soddisfatti a causa della mancanza di stampi: nonostante, tra le due configurazioni, la differenza del numero di cantieri non soddisfatti a causa di stock-out sia relativamente piccola, per livelli alti di domanda, una piccola differenza relativa si traduce in un'importante differenza di entità assoluta. La Figura 9 mostra proprio, all'aumentare della domanda, la variazione del numero di cantieri non completati a causa di stock-out, insieme al numero totale di cantieri completati (linee tratteggiate).

Con l'utilizzo del 3DCP, si creano delle efficienze anche dal punto di vista del livello di servizio degli inventari del BM:

- con la filiera tradizionale, il numero di stock-out è composto da quelli relativi alla mancanza di stampi e da quelli relativi alla mancanza di armature; in tal caso, per come è stata ipotizzata la filiera, eseguendo sempre il primo controllo sulla giacenza degli stampi, il numero di stock-out per la mancanza di stampi è significativamente maggiore rispetto a quello per la mancanza di armature;

- con il 3DCP, avendo solo più necessità di armature, gli stock-out avvengono eseguendo un unico controllo sulla giacenza in questione e, di conseguenza, il numero di tali eventi per mancanza di armature è maggiore; ci si potrebbe aspettare il fatto che il numero totale di questi eventi rimanga comunque costante tra le due configurazioni, ma ciò accade solo per livelli bassi di domanda. Man mano che aumenta il livello di domanda aumenta anche il divario tra il numero di stock-out delle due filiere; si può quindi asserire che la centralizzazione della domanda su un unico prodotto sembra rendere più efficiente il servizio fornito dal BM, soprattutto in condizioni di domanda critiche.

Va specificato comunque che la domanda effettiva di armature tra i due scenari rimane la stessa, ma viene meno la domanda di stampi: con il 3DCP le situazioni di stock-out si verificheranno direttamente tutte sulle armature, anziché essere divise tra i due prodotti.

In funzione di quanto appena esposto, si può giungere alla deduzione che la verifica delle giacenze su un solo prodotto produce meno stock-out rispetto a una duplice verifica in serie di due prodotti, anche se caratterizzati da stesso volume di domanda e stessa politica di gestione delle scorte: la differenza che si nota negli output in Figura 9 è la rappresentazione degli stock-out che avvengono quando mancano giacenze sul secondo prodotto, avendo in giacenza disponibilità del primo prodotto. Tale condizione aumenta linearmente con l'aumentare della domanda: andando ad analizzare i dati raccolti, per livelli di domanda bassi, non si hanno quasi mai situazioni di stock-out sulla seconda verifica delle giacenze che in questo caso è rappresentata dalla verifica della presenza a magazzino di armature, dopo aver verificato quella degli stampi.

Il tempo di completamento del cantiere risulta invece essere un beneficio strettamente legato all'introduzione del 3DCP. L'andamento dell'indicatore in questione viene mostrato in Figura 10. In tale grafico, si possono notare alcune peculiarità su entrambe le filiere:

- per livelli di domanda bassa, il tempo rimane costante;
- si arriva a un punto di “rottura”, ovvero un livello di domanda oltre il quale il tempo cresce esponenzialmente;

- per livelli di domanda molto alti, il tempo tende a convergere su un uguale valore;
- il punto di “rottura” si trova intorno a un livello di aumento della domanda pari al 700% per la Supply Chain tradizionale e pari al 1500 % per la Supply Chain con 3DCP.

Anche l'aumento della domanda conferma quanto già trovato per lo scenario base riguardo il tempo di completamento, ovvero che il fatto che il 3DCP porta benefici significativi dal punto di vista temporale, soprattutto per livelli di domanda medio-bassi. Come già analizzato nel precedente paragrafo, è necessario far presente che un impatto significativo su tale misura di performance è dovuto alla circostanza che, con il 3DCP, si riduce il tempo di asciugatura del calcestruzzo da 20 a 3 giorni [22].

Passando invece ad analizzare le misure economiche di interesse per il BM, il primo fattore che si può notare è la riduzione dei costi logistici che si ha, grazie all'utilizzo del 3DCP, con la non gestione degli stampi. Il grafico in Figura 11 mostra l'andamento dei costi logistici totali del BM, intesi come la somma dei costi di ordinazione al fornitore (R - costo fisso ogni volta che viene emesso un ordine), dei costi di mantenimento dei prodotti a magazzino (h - in funzione della giacenza media dei prodotti a magazzino) e dei costi di trasporto che questo deve sostenere per consegnare la merce in cantiere.

Come ci si può aspettare, il divario aumenta con il livello di domanda ed entrambi gli indicatori presentano lo stesso tipo di andamento, ovvero una variazione crescente, ma a tassi decrescenti. Tale fattore è una delle conseguenze naturali della saturazione del servizio.

Situazione più particolare si trova invece in Figura 12, ovvero il grafico con la variazione dei costi totali del BM, compresi, oltre ai costi logistici appena citati, anche i costi effettivi di acquisto dei prodotti e i costi per la fornitura del servizio del 3DCP; quest'ultimo è direttamente proporzionale al volume di abitazioni costruito e al numero di cantieri serviti (figure 7 e 8).

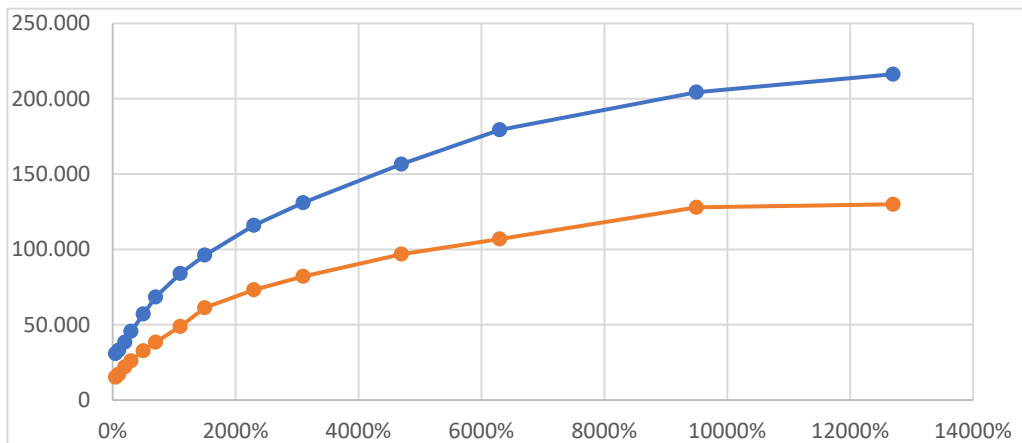


Figura 11: Variazione dei costi logistici del BM all'aumentare della domanda

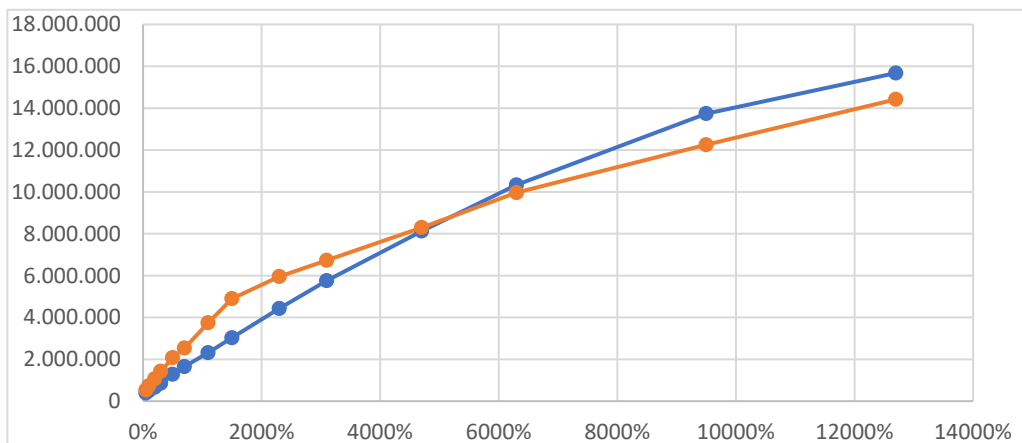


Figura 12: Variazione dei costi totali del BM all'aumentare della domanda

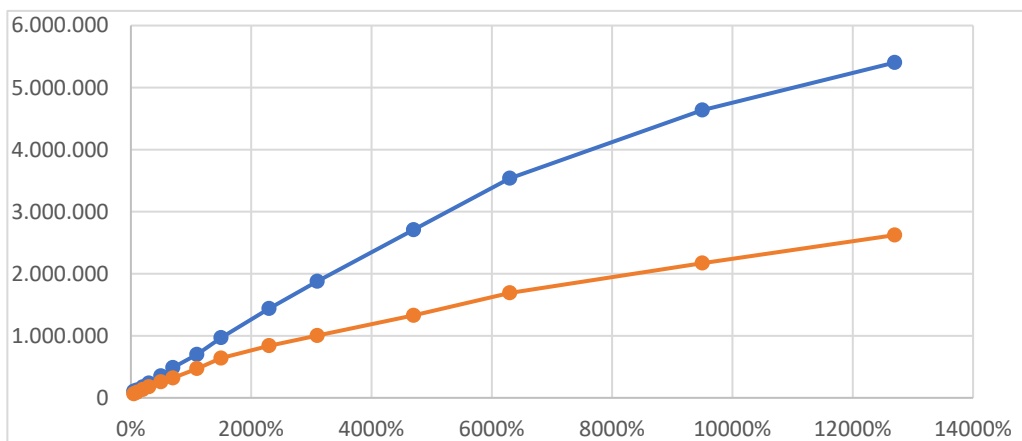


Figura 13: Variazione del margine del BM all'aumentare della domanda

Gli output presentano sempre variazioni crescenti a tassi decrescenti, ma con determinate peculiarità:

- se fino a questo momento si erano notati principalmente aspetti positivi con l'adozione del 3DCP, in questo grafico si nota invece come tale tecnologia rappresenti un servizio molto costoso, soprattutto per livelli di domanda medio-bassi. Su tali livelli, l'andamento della curva della Supply Chain in questione presenta un coefficiente angolare significativamente più elevato;
- in secondo luogo, si nota come, nonostante all'inizio della curva appena citata il coefficiente angolare sia maggiore, per livelli di domanda molto alti, l'effetto dei tassi decrescenti su tale curva è maggiore rispetto all'altra, tanto da portare costi totali minori con il 3DCP, rispetto alle costruzioni tradizionali.

Dal momento che i tassi decrescenti su tali curve sono l'effetto sui costi della saturazione del servizio, si può asserire che tale evento, al crescere della domanda, abbia maggior effetto sui costi specifici del 3DCP; in altre parole, i costi di acquisto del materiale e i costi logistici risentono meno dell'effetto della saturazione del servizio, continuando a crescere, seppur non linearmente, ma con tassi maggiori rispetto ai costi della tecnologia 3DCP.

Per concludere l'analisi dell'effetto della variazione di domanda, in Figura 13 è riportato l'aumento della marginalità del BM, calcolato come ricavo totale delle vendite dei prodotti o servizi trattati nel seguente lavoro, al netto di tutti i costi sopra citati. Analizzando tali output, si nota come tutti i benefici riportati nel presente paragrafo, portati dall'introduzione del 3DCP, non trovino poi un riscontro economico effettivo dal punto di vista del BM, in quanto si nota come il guadagno di quest'ultimo rimanga significativamente maggiore, sia in termini assoluti che percentuali, con le costruzioni tradizionali, anche al crescere della domanda. Anche il maggiore effetto sui costi della saturazione del servizio in caso di utilizzo del 3DCP non sembra essere percepito sul guadagno finale e tale beneficio viene più che assorbito dall'andamento dei ricavi.

Si noti come al crescere del livello di domanda, cresce notevolmente il divario tra i due output. Per fare alcuni esempi pratici:

- per ottenere un guadagno di circa € 175.000 con filiera tradizione è necessario un aumento della domanda pari al 200 % (tempo medio di inter-arrivo delle richieste pari a 4,94 giorni);
- per ottenere un guadagno di circa € 175.000 con filiera con 3DCP è necessario un aumento della domanda pari al 300 % (tempo medio di inter-arrivo delle richieste pari a 3,71 giorni);
- per ottenere un guadagno di circa € 2.000.000 con filiera tradizione è necessario un aumento della domanda pari al 3000 % (tempo medio di inter-arrivo delle richieste pari circa a 0,46 giorni);
- per ottenere un guadagno di circa € 2.000.000 con filiera con 3DCP è necessario un aumento della domanda pari al 8000 % (tempo medio di inter-arrivo delle richieste pari circa a 0,20 giorni).

Tale situazione deriva dalla proporzionalità inversa, già precedentemente analizzata, che esiste tra aumento della domanda e tempo di inter-arrivo delle richieste, i cui effetti si riscontrano anche sugli output.

Questa ampia differenza sui guadagni, in controtendenza con gli indicatori analizzati precedentemente, è dovuta essenzialmente alle percentuali di guadagno del BM che sono state ipotizzate, ovvero il 25% sulla vendita di materiali e il 10% sulla vendita di un servizio come il 3DCP, particolarmente oneroso e che non richiede impiego di risorse da parte del BM stesso. Tali percentuali ipotizzate potrebbero anche essere diverse, ma sono state comunque ipotizzate sulla base di un'esperienza personale diretta all'interno del settore di riferimento.

Da quanto esposto, il BM potrebbe non essere così incentivato all'introduzione del servizio di 3D Concrete Printing, al contrario di quanto potrebbe esserlo invece il costruttore.

4.3 Aumento della tolleranza del costruttore

Come ultima analisi, si è valutata la variazione delle prestazioni delle Supply Chain all'aumentare della tolleranza del costruttore.

La "tolleranza" del costruttore, definita nel sotto-paragrafo 3.3.1, è la tempistica entro la quale quest'ultimo sia disposto ad aspettare la disponibilità di un determinato prodotto presso il magazzino del BM.

A partire dall'ipotesi base valutata nel paragrafo 4.1, con una tolleranza di tre ore, sono stati ipotizzati i seguenti diversi scenari:

1. tolleranza di un giorno (8 ore);
2. tolleranza di metà settimana (20 ore);
3. tolleranza di una settimana (40 ore);
4. tolleranza di due settimane (80 ore);
5. tolleranza di un mese (160 ore);
6. tolleranza di un anno (2032 ore).

Per questi diversi scenari sono stati calcolati le varie misura performance, come eseguito nel precedente paragrafo per i diversi livelli di domanda. Si è potuto notare come tali variazioni non portino altrettante variazioni significative agli output già calcolati con condizioni iniziali.

Analizzando il livello di servizio, e altre misure strettamente a esso correlate, si nota una tendenza dello stesso ad aumentare in funzione della tolleranza; tuttavia, la variazione rimane costante per entrambi gli scenari e non porta a conclusioni diverse rispetto a quelle già analizzate nel paragrafo 4.1.

Migliorie significative a tali parametri, ma comunque di egual misura, si notano con la scadenza fissata a 2032 ore, ovvero pari a un anno. Tuttavia, oltre a essere di per sé uno scenario poco plausibile, tali migliorie risultano prive di significato in quanto la tolleranza di un anno risulta essere un margine troppo ampio, se rapportato a una simulazione effettiva di “soli” due anni.

In ogni caso, per come è stata ipotizzata la tolleranza in tale studio, ovvero:

- la scadenza da parte del BM per avere in inventario la domanda richiesta dal costruttore, nel caso di stampi e armature, oppure
- la scadenza da parte del BM per avere disponibile la stampante 3D in seguito alla richiesta del costruttore, in caso di utilizzo di 3D Concrete Printing,

le variazioni risultano essere le medesime per entrambi gli scenari.

Quanto appena osservato non porta ad effettuare considerazioni aggiuntive a riguardo oppure a considerare una Supply Chain più performante rispetto all'altra in diversi condizione di tolleranza.

5. Conclusioni

Il 3D Concrete Printing è una tecnologia che può portare benefici significativi al settore delle costruzioni, soprattutto in termini di efficienza. Tale affermazione trova riscontro nelle ricerche attuali in materia di Additive Manufacturing correlata al settore.

I benefici riscontrati nella letteratura riguardano soprattutto la competitività della tecnologia in termini di tempi e costi totali di progetto: questa competitività è stata riscontrata anche in questo lavoro, soprattutto al crescere del livello di domanda.

In particolare, si è discusso dell'impatto che una tecnologia innovativa come il 3D Concrete Printing può avere sulla Supply Chain del settore, con particolare attenzione alla figura del distributore edile (o Builders' Merchant – BM).

L'analisi è stata condotta sulle condizioni attuali del mercato e al variare del livello di domanda.

La tesi conferma quanto già presente in letteratura riguardo i benefici che la tecnologia può portare a valle della filiera: ne sono la dimostrazione, in termini di livello di servizio e in termini di tempi di completamento, i vantaggi riscontrati sulla Supply Chain grazie all'utilizzo del 3D Concrete Printing. In tali condizioni, la Supply Chain con l'utilizzo di tale tecnologia dimostra anche una maggiore reattività alle variazioni di domanda rispetto allo scenario tradizionale.

Benché non si siano analizzati i parametri economici del costruttore, l'efficienza in termini di costo è comunque confermata dalla letteratura.

Tuttavia, tali benefici si trasmettono solo in parte a monte della filiera.

Dal punto di vista della distribuzione edile, in quanto punto di intersezione del flusso di materiali da costruzione tra punto di produzione (produttore) e punto di consumo (cantiere), l'efficienza analizzata in fase costruttiva potrebbe non essere riscontrata dal distributore stesso in termini di guadagno economico.

In effetti, si è dimostrato che i vantaggi correlati al livello di servizio e ai tempi di completamento, non portano altrettanti vantaggi economici al BM: di conseguenza, lo scenario tradizionale risulta essere più redditizio, anche in funzione di più scenari di domanda.

Da quanto esposto, il distributore edile potrebbe non essere così incentivato a proporre un'introduzione del servizio di 3D Concrete Printing in cantiere, al contrario di quello che potrebbe invece essere il riscontro del costruttore. Tale fattore apporta di conseguenza una scarsa reattività dalla Supply Chain al cambiamento.

Tuttavia, è necessario considerare il fatto che spesso è il cliente stesso a suggerire le decisioni strategiche e commerciali al fornitore: di conseguenza, va presupposto che, se il cliente (il costruttore) richiede un certo servizio o prodotto, molto probabilmente questo verrà lo stesso fornito dal fornitore (il distributore edile), pur se per lui tale servizio risulta essere meno redditizio rispetto ad altri, pur di non perdere la quota di mercato. Ulteriori analisi sull'argomento potrebbero valutare se l'introduzione stessa del servizio di 3DCP da parte al BM possa portare ad un aumento della domanda dell'attività, sfruttando anche un ipotetico vantaggio sulla concorrenza in quanto "first mover".

Inoltre, per quanto nell'analisi oggetto della tesi si siano provate ad effettuare delle assunzioni il più possibili congruenti con la realtà, utilizzando anche dati di input da fonti autorevoli, queste non necessariamente trovano poi riscontro. Come già citato, l'analisi sui guadagni del BM risulta essere influenzata dalle percentuali di margine ipotizzate, che comunque sono frutto dell'esperienza personale all'interno del settore di riferimento.

In secondo luogo, l'analisi è stata effettuata considerando una sola tipologia costruttiva tradizionale ben specifica (costruzioni di calcestruzzo armato gettato in opera), così come è stato considerato un solo modello specifico di stampante 3D, il quale non necessariamente è il modello più adatto per effettuare tutti i tipi di costruzioni. A tal proposito, come citato nel capitolo 1, esistono più forme di stampa 3D del calcestruzzo, come i sistemi "a portale", più adatti a costruzioni di grande entità, così come esistono altri modelli di stampanti a braccio robotico più prestanti [3].

In tutto ciò, va anche considerato che tecnologie così innovative e, come dimostrato, potenzialmente “distruttive”, sia in positivo che in negativo, non siano ancora mature, a maggior ragione in settori scarsamente produttivi, come quello delle costruzioni. Inoltre, lo scenario potrebbe ancora variare con una maggiore maturità della tecnologia, man mano che questa acquisisce economie di scala e di apprendimento.

Infine, nell’analisi in oggetto sono solo stati considerati due scenari: costruzione tradizionale o stampa 3D. Ulteriori analisi potrebbero anche vertere su soluzioni “ibride”, con la possibilità da parte del BM di fornire entrambi i prodotti o servizi per massimizzare il proprio guadagno.

Sicuramente, almeno nel futuro immediato, non si prevede che tale tecnologia possa aver larga diffusione: tuttavia, una soluzione di tipo ibrido potrebbe essere la più plausibile con la realtà, anche in funzione del fatto che, a oggi, avere anche solo una stampante a completa disposizione di uno stesso intermediario, come ipotizzato nello scenario base, risulta già essere una situazione abbastanza utopica.

Appendice

Elenco delle figure

Figura 1: Fasi principali per produrre un oggetto fisico tramite AM [5]

Figura 2: Componenti di un braccio robotico AM per la stampa di calcestruzzo [22]

Figura 3: Diagramma di flusso della Supply Chain con metodologia costruttiva tradizionale [*Link 1*]

Figura 4: Diagramma di flusso della Supply Chain con 3DCP [*Link 2*]

Figura 5: Variazione del livello di servizio (in percentuale del numero di cantieri) all'aumentare della domanda

Figura 6: Variazione del livello di servizio (in percentuale del volume costruito) all'aumentare della domanda

Figura 7: Variazione del numero di cantieri completati, all'aumentare della domanda

Figura 8: Variazione del volume di abitazioni costruito, all'aumentare della domanda

Figura 9: Variazione del numero di cantieri non completati a causa di stock-out, all'aumentare della domanda

Figura 10: Variazione del tempo di completamento del cantiere all'aumentare della domanda

Figura 11: Variazione dei costi logistici del BM all'aumentare della domanda

Figura 12: Variazione dei costi totali del BM all'aumentare della domanda

Figura 13: Variazione del margine del BM all'aumentare della domanda

Elenco delle tabelle

Tabella 1: Dati avanzamento cantiere con costruzione tradizionale [22]

Tabella 2: Dati avanzamento cantiere con 3DCP [22]

Tabella 3: Dati attività logistiche BM [30]

Tabella 4: Dati attività logistiche produttore [30]

Tabella 5: Calcolo del tempo medio di inter-arrivo della domanda per la regione Piemonte, anno 2023

Tabella 6: Valore medio domanda e probabilità per tipologia di cantiere

Tabella 7: Calcolo del costo di inventario annuale h

Tabella 8: Costi del 3D Concrete Printing

Tabella 9: Confronto tra Supply Chain tradizionale e con 3DCP in condizioni di domanda reali

Tabella 10: Confronto tra Supply Chain tradizionale e con 3DCP, avendo tre stampanti 3D a disposizione, in condizioni di domanda reali

Tabella 11: Variazione di Q, R e numero di stampanti utilizzate, in funzione dell'aumento della domanda

Link

Link 1:

https://drive.google.com/file/d/130sg6XxTVjfJXUOf1_vEZb4fYA--y_Hi/view?usp=drive_link

Link 2:

https://drive.google.com/file/d/16nhdzvtmk9IfmA39aQ-rLv-QZUctSg70/view?usp=drive_link

Bibliografia e Sitografia

1. Valente, Marco, Abbas Sibai, and Matteo Sambucci. "Extrusion-based additive manufacturing of concrete products: revolutionizing and remodeling the construction industry." *Journal of composites science* 3.3 (2019): 88.
2. Adaloudis, Max, and Jaime Bonnin Roca. "Sustainability tradeoffs in the adoption of 3D Concrete Printing in the construction industry." *Journal of Cleaner Production* 307 (2021): 127201.
3. Mechtcherine, Viktor, et al. "Large-scale digital concrete construction—CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing." *Automation in construction* 107 (2019): 102933.
4. The Scape Group, Sustainability in the supply chain, https://www.scapegroup.co.uk/uploads/research/Supply-Chain-Report_Website.pdf, (2016).
5. Craveiro, Flávio, et al. "Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0." *Automation in construction* 103 (2019): 251-267..
6. Kulkarni, Ajinkya, and Srijeet Halder. "A simulation-based decision-making framework for construction supply chain management (SCM)." *Asian Journal of Civil Engineering* 21.2 (2020): 229-241.
7. Nanaware, M. R., and U. R. Saharkar. "Application of inventory control technique in construction." *International Journal of Engineering Research and General Science* 5.4 (2017): 49-54.
8. Soni, Harsh, Jayeshkumar Pitroda, and J. J. Bhavshar. "Analyzing inventory material management control technique on residential construction project." *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education* 2.3 (2016): 41-53.
9. Chen, Jianbiao, Jiezhi Zhong, and Baosheng Xie. "Research on system dynamics simulation of building materials supply

- chain." *Journal of physics: Conference series*. Vol. 1865. No. 4. IOP Publishing, 2021.
10. Prasad, KN Narasimha, et al. "Enhancing profitability through improved material management practices in construction projects." *i-Manager's Journal on Civil Engineering* 8.4 (2018): 13-20.
 11. Shakantu, Winston, John E. Tookey, and Paul A. Bowen. "The hidden cost of transportation of construction materials: an overview." *Journal of Engineering, Design and Technology* 1.1 (2003): 103-118.
 12. Vidalakis, Christos, John E. Tookey, and James Sommerville. "Logistics simulation modelling across construction supply chains." *Construction innovation* 11.2 (2011): 212-228.
 13. Li, Yao, et al. "Additive manufacturing technology in spare parts supply chain: a comparative study." *International Journal of Production Research* 55.5 (2017): 1498-1515.
 14. Rinaldi, Marta, et al. "The impact of Additive Manufacturing on Supply Chain design: a simulation study." *Procedia Computer Science* 180 (2021): 446-455.
 15. Khajavi, Siavash H., Jouni Partanen, and Jan Holmström. "Additive manufacturing in the spare parts supply chain." *Computers in industry* 65.1 (2014): 50-63.
 16. H. Khajavi, Siavash, Jan Holmström, and Jouni Partanen. "Additive manufacturing in the spare parts supply chain: Hub configuration and technology maturity." *Rapid Prototyping Journal* 24.7 (2018): 1178-1192.
 17. Khajavi, Siavash H., et al. "Risk reduction in new product launch: A hybrid approach combining direct digital and tool-based manufacturing." *Computers in Industry* 74 (2015): 29-42.
 18. Rajaguru, K., T. Karthikeyan, and V. Vijayan. "Additive manufacturing—State of art." *Materials today: proceedings* 21 (2020): 628-633.
 19. Mellor, Stephen, Liang Hao, and David Zhang. "Additive manufacturing: A framework for implementation." *International journal of production economics* 149 (2014): 194-201.

20. Camacho, Daniel Delgado, et al. "Applications of additive manufacturing in the construction industry–A forward-looking review." *Automation in construction* 89 (2018): 110-119.
21. Ahmed, Ghafur H., Nasih H. Askandar, and Ghazi B. Jumaa. "A review of largescale 3DCP: Material characteristics, mix design, printing process, and reinforcement strategies." *Structures*. Vol. 43. Elsevier, 2022.
22. Khajavi, Siavash H., et al. "Additive manufacturing in the construction industry: The comparative competitiveness of 3d concrete printing." *Applied Sciences* 11.9 (2021): 3865.
23. Ma, Guowei, et al. "Technology readiness: A global snapshot of 3D concrete printing and the frontiers for development." *Cement and Concrete Research* 156 (2022): 106774.
24. Holmström, Jan, et al. "Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment." *Journal of manufacturing technology management* 21.6 (2010): 687-697.
25. Emelogu, Adindu, et al. "Distributed or centralized? A novel supply chain configuration of additively manufactured biomedical implants for southeastern US States." *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 24 (2019): 17-34.
26. Girmscheid, Gerhard. "Industrialization in building construction: Production technology or management concept?." *Understanding the Construction Business and Companies in the New Millennium: Proceedings of the 11th Joint Cib International Symposium: Combining Forces-Advancing Facilities Management and Construction through Innovation*. Vol. 1. VTT Technical Research Centre of Finland and RILUniversity of West Indies, 2005.
27. Tam, Vivian WY, et al. "Towards adoption of prefabrication in construction." *Building and environment* 42.10 (2007): 3642-3654.
28. Haron, Nuzul Azam, Hamzah Abdul Rahman, and Mahanim Hanid. "A literature review of the advantages and barriers to the implementation of industrialised building system (IBS) in construction industry." *Malaysia Construction Research Journal* 2.1 (2009): 10-14.

29. Vidalakis, Christos, John E. Tookey, and James Sommerville. "The logistics of construction supply chains: the builders' merchant perspective." *Engineering, construction and architectural management* 18.1 (2011): 66-81.
30. Vidalakis, Christos, John E. Tookey, and James Sommerville. "Demand uncertainty in construction supply chains: a discrete event simulation study." *Journal of the Operational Research Society* 64.8 (2013): 1194-1204.
31. https://www.iveco.com/SouthAfrica/Prodotti/Documents/Iveco_DAI_LY.pdf.
32. <https://www.istat.it/tavole-di-dati/statistiche-sui-permessi-di-costruire-anno-2023/>.
33. http://arianna.cr.piemonte.it/iterlegcoordweb/dettaglioLegge.do?urnLegge=urn:nir:regione.piemonte:legge:2018-10-04;16@2022-06-01#ndr1096069_0%20.
34. <https://www.youtradeweb.com/mappa-distribuzione-edile/>.
35. <https://www.youmath.it/domande-a-risposte/view/6686-giorni-lavorativi-in-un-anno.html>.
36. https://www.bosettiegatti.eu/info/norme/statali/1975_dm_05_07.htm.
37. <https://www.gbmitaly.it/travi-pannelli/pannelli>.
38. <https://edilizia-in-un-click.starbuild.it/incidenza-acciaio-nel-cemento-armato/>.
39. <https://www.assotir.it/notizie/news-generiche/costi-minimi-di-riferimento-il-mit-pubblica-la-tabella-aggiornata-al-mese-di-gennaio-2024/>.
40. <https://www.leroymerlin.it/prodotti/falegnameria/legno-da-costruzione-battiscopa-e-listelli/legname-per-edilizia/pannelli-per-armatura/pannello-per-armatura-50-x-2-7-x-200-cm-82220947.html>.
41. https://www.tecnomat.it/it/tondo-pieno-ferro-10-mm-2-m-10006787/?kk=a4c6295-191b39571cf-1bad9&kgelid=CjwKCAjwxNW2BhAkEiwA24Cm9HXev3bYO80sPNkbrhdpV43mJLMEO9IW rDDDCGY4M1PLrsPsB_au0hoCye4QAvD_BwE&store=cerro-maggiore&utm_source=kelkoo&utm_medium=comparatore&utm_campaign=e-commerce

[prospecting&utm_content=productfeed&utm_source_platform=KelkooGroup.](#)