

L'ADDITIVE MANUFACTURING NEL SETTORE DELLE COSTRUZIONI: ANALISI DEI COSTI

Daniele Re*, Carla Di Biccari **, Angelo Corallo ***

*Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione - Università del Salento daniele.re@unisalento.it

** Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione - Università del Salento carla.dibiccari@unisalento.it

*** Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione - Università del Salento angelo.corallo@unisalento.it

SOMMARIO

L'industria Architecture, Engineering and Construction (AEC) affronta ogni giorno diverse sfide e criticità, sia a livello produttivo che ambientale, che premono questo settore ad avviare un processo di innovazione e digitalizzazione. Questa necessità di innovazione è ancor più messa in risalto dalla centralità e dall'influenza che questo settore riveste a livello globale. Basti pensare che l'industria delle costruzioni detiene il 6% del PIL globale, con un valore atteso in netta crescita negli anni a venire. Mentre altri settori industriali, come quello automobilistico, aerospaziale, aeronautico, hanno subito nel corso degli anni un processo di trasformazione digitale che ha permesso loro di aumentare produttività e qualità, il settore delle costruzioni sembra essere troppo lento a adattarsi alle nuove tecnologie e non ha mai subito una grande trasformazione. Però negli ultimi anni la tendenza sembra si stia invertendo, con sempre maggiori investimenti sulla digitalizzazione del settore. In questo contesto, l'Additive Manufacturing (AM) rappresenta una delle tecnologie più interessanti e ricche di potenzialità per perseguire l'obiettivo di innovazione nell'edilizia. In particolare, questo lavoro si concentra su una valutazione dell'AM come tecnologia abilitante per il settore delle costruzioni, mettendo in luce sfide e opportunità, con un particolare focus su un'analisi dei costi derivanti dall'impiego della tecnologia e sulla loro struttura, discutendo se l'uso della stampa 3D possa rappresentare una valida alternativa ai metodi costruttivi convenzionali.

INTRODUZIONE

L'industria Architecture, Engineering and Construction (AEC) affronta ogni giorno una serie di sfide, che spingono questo settore ad avviare un processo di innovazione. Certamente, i principali limiti legati all'industria delle costruzioni includono la mancanza di una forza lavoro qualificata, il lavoro in ambienti difficili, la mancanza di sicurezza nel processo costruttivo, la produzione di grandi quantità di materiale di scarto e problemi legati al trasporto dei materiali al cantiere (Carmacho, et al., 2018). Inoltre, il settore delle costruzioni ha subito un continuo declino nella produttività a partire dagli anni '60, aggravato proprio da una carenza di manodopera qualificata (Zhang, Flood, Zhang, Moud, & Hatami, 2019). A ciò si aggiunge come questo settore consumi una parte molto significativa delle materie prime prodotte a livello globale utilizzando, ad esempio, il 50% della produzione mondiale di acciaio, ed è la causa del 30% delle emissioni globali di gas serra e della produzione del 25% di materiale di scarto (Craiveiro, Duarte, Bartolo, & Bartolo, 2019). Questa necessità di innovazione è ancor più messa in risalto dalla centralità e dall'influenza che questo settore riveste a livello globale; infatti, secondo un report pubblicato dal World Economic Forum, il settore delle costruzioni rappresenta il 6% del Prodotto Interno Lordo (PIL) mondiale e si prevede che tale indicatore raggiungerà circa il 14,7% nel 2030.

In questo contesto, l'industria delle costruzioni, sebbene ancora agli inizi, sta vivendo una trasformazione di-

digitale adottando le tecnologie tipiche dell'industria 4.0, tra cui l'Additive Manufacturing (AM), o stampa 3D. In particolare, l'Additive Manufacturing rappresenta un'opportunità di innovazione e digitalizzazione per il settore delle costruzioni, soprattutto in relazione alle criticità sopramenzionate.

In generale, l'Additive Manufacturing (AM) è *"il processo di fusione dei materiali per creare oggetti a partire da modelli 3D, di solito con approccio strato su strato, in opposizione ai metodi produttivi di tipo sottrattivo tradizionali"* (ASTM [American Society for Testing and Materials] Standard).

Nonostante le prime applicazioni dell'AM, negli anni '90, fossero legate soprattutto a scopi di Rapid Prototyping per l'industria manifatturiera, oggi questa tecnologia è applicata nella produzione di prodotti finiti in molti settori come il biomedicale, il sanitario, l'aerospaziale, il meccanico, l'aeronautico, l'automotive, l'Oil&Gas. Nello specifico, l'AM si autopromuove come tecnologia abilitante di fronte a un alto livello di complessità di prodotto, un alto grado di personalizzazione e un basso volume produttivo (Conner, et al., 2014). In questo contesto, anche il settore delle costruzioni è stato interessato dalla diffusione delle tecnologie AM, anche se il loro utilizzo in questo ambito è ancora agli inizi. Negli ultimi anni la ricerca di nuovi metodi di stampa per l'edilizia è aumentata notevolmente; tra essi hanno ottenuto particolare attenzione e applicazione i processi di estrusione di calcestruzzo come il 3D Concrete Printing (Università di Loughborough ed Eindhoven), il Contour Crafting (Università della Cali-

fornia del Sud) e il CONPrint3D (Università Tecnica di Dresden). La Figura 1 dà un'idea di applicazione del CONPrint3D, con l'esecuzione che avviene direttamente in situ.

Questa spinta verso l'utilizzo della stampa 3D può essere attribuita ai vantaggi offerti dalla tecnologia rispetto ai metodi costruttivi più tradizionali.

In particolare, questo studio analizza le potenzialità di utilizzo delle tecnologie additive nell'edilizia con un focus sui costi e sulla loro struttura, discutendo se l'uso della stampa 3D nell'edilizia possa rappresentare un'alternativa alle tecnologie convenzionali.

OPPORTUNITÀ E SFIDE

Prima di analizzare la struttura dei costi dell'Additive Manufacturing nelle costruzioni, è importante affrontare opportunità e sfide legate all'adozione di questa tecnologia.

In particolare, l'AM permette alle imprese di costruzione di produrre strutture geometricamente complesse, migliorando la funzionalità e l'aspetto dell'edificio, di variare i materiali all'interno di un componente in base alle funzionalità che quel componente deve garantire, e di automatizzare il processo di costruzione partendo da un modello digitale, facilmente modificabile in base alle esigenze, garantendo una maggiore diversificazione della progettazione. I processi di costruzione convenzionali come la muratura, l'installazione di armature e la colata di cemento comportano un pesante lavoro manuale e sono spesso caratterizzati da un'intrinseca pericolosità. Aumentando il grado di automazione, l'AM può ridurre il carico di lavoro fisico e migliorare la sicurezza sul posto di lavoro (Paolini, Kollmannsberger,

& Rank, 2019). Pertanto, grazie all'automazione, l'uso della stampa 3D può portare a una riduzione della manodopera necessaria e dei costi associati e, in situazioni particolari, a una riduzione dei tempi di costruzione (Wu, Wang, & Wang, 2016). Ulteriori benefici includono la riduzione degli sprechi di materiale (fino anche al 30%), il minor consumo di energia, la minore richiesta di risorse e le minori emissioni di CO₂ durante l'intero ciclo di vita del prodotto (Ghaffar, Corker, & Fan, 2018). Inoltre, la stampa 3D potrebbe anche essere la soluzione per progetti di costruzione in ambienti difficili, per esempio in luoghi colpiti da disastri naturali o zone di guerra (Paolini, Kollmannsberger, & Rank, 2019).

Tuttavia, l'uso dell'AM nell'edilizia non è caratterizzato solo da punti a favore; ci sono diverse sfide e criticità che ostacolano la piena diffusione. Infatti, i principali svantaggi includono un costo elevato delle stampanti 3D su larga scala, un risultato finale in termini di rugosità superficiale, di precisione e di qualità del componente prodotto che potrebbe non essere all'altezza delle aspettative e che richiederebbe trattamenti di finitura successivi la stampa, possibili problemi legati alla mancanza di politiche, regolamenti e standard che devono ancora essere adattati a questa tecnologia (Ghaffar, Corker, & Fan, 2018). A ciò si aggiunge una limitatezza della tecnologia nella realizzazione di edifici di grandi dimensioni e possibili vincoli nella scelta dei materiali stampabili e dei processi (Wu, Wang, & Wang, 2016). Con riferimento a ciò, i principali materiali usati nella stampa di componenti finali sono materiali a base di aggregati (come il calcestruzzo), metalli e polimeri mentre tra i processi i più utilizzati si annove-



Figura 1:
CONPrint3D process
(Università Tecnica di Dresden,
Iniziativa di ricerca "Future
Building"). Research on Build-
ing, Urban Affairs and Spatial
Development

Fonte:
<https://tu-dresden.de>

rano il material extrusion, il binder jetting e il powder bed fusion (Paolini, Kollmannsberger, & Rank, 2019). Questi sono elementi da tenere sicuramente in considerazione nella valutazione dell'utilizzo della tecnologia additiva. A ciò si aggiunge, come accennato nel paragrafo precedente, una discussione sui costi, dal momento che non si sa se l'adozione dell'AM porti ad un aumento o ad una riduzione dei costi rispetto a metodi convenzionali. In questo senso, è importante che il costo del ciclo di vita dell'AM sia valutato in base alle materie prime e ai sistemi di stampa disponibili (Ghaffar, Corker, & Fan, 2018). La tabella 1 riassume i principali benefici e le principali sfide dell'AM nell'edilizia.

Tabella 1: Opportunità e sfide dell'AM nelle costruzioni

Opportunità dell'AM	Sfide dell'AM
Libertà di forme e geometrie	Costo stampanti di grandi dimensioni
Automazione	Rugosità superficiale e finitura non all'altezza
Maggiore sostenibilità	Possibili problemi legali
Ambiente di lavoro più sicuro	Limiti nella realizzazione di grandi edifici
Adattamento in ambienti difficili	Vincoli nella scelta dei materiali e dei processi di stampa
Possibilità di variare materiale all'interno di un componente	
Riduzione dei costi di manodopera	

STRUTTURA E ANALISI DEI COSTI

Diversi studi hanno analizzato la struttura dei costi dell'AM in applicazioni legate all'edilizia, prendendo quasi sempre in considerazione la costruzione di un singolo muro in cemento armato come esempio applicativo (Zhang, Flood, Zhang, Moud, & Hatami, 2019), (Soto, et al., 2018), (Krimi, Lafhaj, & Ducoulombier, 2017). Gli studi citati mettono in evidenza quanto i benefici dell'AM, dal punto di vista della produttività e dei costi, diventino più tangibili all'aumentare della complessità di forma e di geometria delle murature da realizzare. In particolare, il getto di murature curve, e quindi con un alto grado di complessità, con stampa 3D non necessita più del montaggio e smontaggio di casseri speciali ma soltanto di un diverso file di input al macchinario di stampa, eliminando così un'importante voce di costo. In poche parole, l'AM rende possibile una gestione più flessibile di eventuali varianti in cantiere del percorso delle murature.

(Bataev, 2019) ha analizzato l'implementazione della stampa 3D nell'edilizia, proponendo una valutazione economica di progetti riguardanti la costruzione di abitazioni utilizzando l'Additive Manufacturing, con un focus sul mercato russo. A tal fine l'autore ha utilizzato

un approccio finanziario ed economico, cioè il modello per la stima del valore attuale netto (VAN). Secondo Bataev, la produzione di abitazioni utilizzando le tecnologie di stampa 3D può essere redditizio solo nel segmento della produzione di massa. In particolare, la modellazione ha mostrato che nella costruzione di massa di case nel mercato russo, il costo di un metro quadrato di abitazione potrebbe essere ridotto del 61-68% utilizzando la stampa 3D.

Per una valutazione di fattibilità economica dell'utilizzo di tecnologie additive nell'industria delle costruzioni in alternativa a tecnologie più tradizionali, è importante analizzare le singole componenti di costo e il loro impatto.

Una delle voci cruciali, è il costo legato al macchinario, comprendente l'acquisto e il funzionamento (costi di setup, di processing) dello stesso. Ad esempio, l'acquisto di una stampante 3D (in questo caso la stampante BOD 5-8-4, Figura 2), con un volume di installazione di 15.02 m x 20.20 m x 11.60 m e un'area totale di stampa di 2345.74 m² comporta una spesa di 527.735€ (informazioni ottenute per gentile concessione dell'azienda danese COBOD INTERNATIONAL, leader dell'applicazione della tecnologia nel settore dell'edilizia). Al costo fisso di acquisto del macchinario bisogna considerare in aggiunta il costo di set up e di processing della stampante, e il costo legato agli operatori necessari per gestire il macchinario durante il processo di realizzazione.

Altra voce di costo fondamentale è il costo del materiale creato appositamente per essere utilizzato nel processo di stampa. Infatti, per assicurare un buon risultato del componente stampato, nei processi di estrusione, il materiale (in genere calcestruzzo) deve garantire la pompabilità, l'estrudibilità, l'adesione tra gli strati e la costruibilità (Paolini, Kollmannsberger, & Rank, 2019). Per poter garantire ciò è importante far riferimento al materiale consigliato dal produttore della stampante.

Inoltre, nel caso specifico della stampa 3D, ai costi di progettazione tradizionali vanno aggiunti i costi di produzione dei file di stampa (costi di design) e i costi impliciti di aggiornamento della formazione del progettista.

Rispetto ai processi di costruzione tradizionale, bisogna tener conto, in un approccio di stampa 3D, dei costi legati alle attività di post processing (ad esempio levigatura e finitura), in virtù del fatto che i risultati in termini di rugosità superficiale, precisione e qualità del componente prodotto potrebbero non essere all'altezza delle aspettative. A tal proposito, (Canou, Uhart, & Diaz, 2021) hanno proposto un metodo sottrattivo, nel rispetto dei vincoli geometrici, e a basso costo per eseguire le fasi di finitura e levigatura necessarie dopo il processo di stampa. I risultati mostrati dagli autori

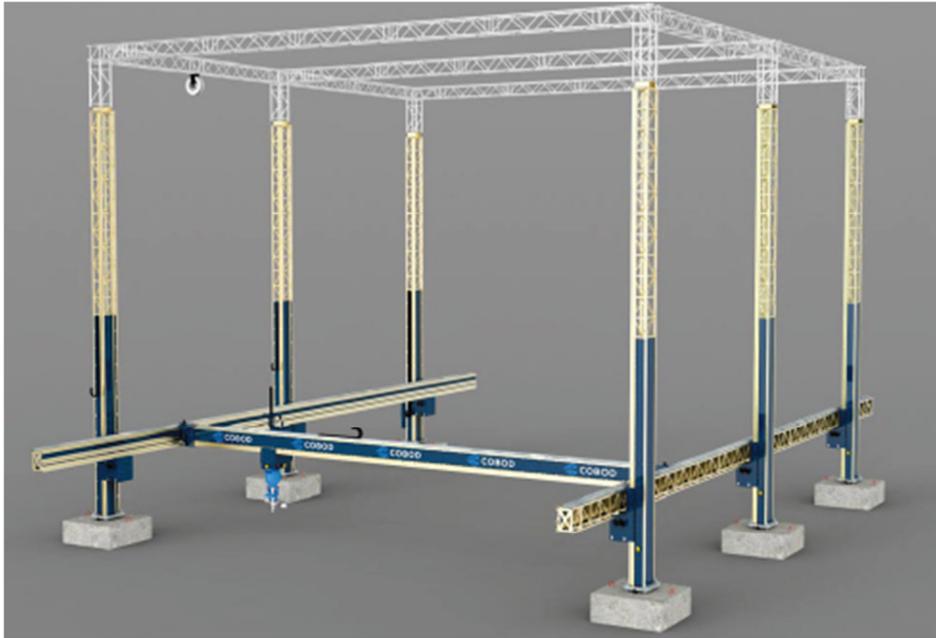


Figura 2:
Stampante 3D BOD 5-8-4

Fonte:
COBOD International A/S
Concrete Printer Catalogue –
2021 – www.cobod.com.

sono molto promettenti in quanto aprono una strada per la lavorazione a basso costo del calcestruzzo, e permettono anche di prevedere nuove applicazioni per le strutture in calcestruzzo stampato.

In aggiunta, tra i costi legati all’utilizzo di tecnologie additive rientrano sicuramente i costi di trasporto del macchinario (stampante 3D) e di altre attrezzature ad esso collegate dagli uffici al cantiere.

In particolare, per la costruzione di una volumetria portante in calcestruzzo armato messa in opera (266.85 m² totali di muratura portante) di una villa singola a due piani, utilizzando tecnologie additive, e con riferimento specifico alla stampante BOD 5-8-4, è stato possibile calcolare i costi di costruzione relativi al materiale, al costo della macchina (comprendente costo

di acquisto, di funzionamento e di gestione del macchinario), alle attività di design, alle attività di post processing, al costo di trasporto e alle spese generali di produzione e amministrative. I risultati sono riportati nel bar chart in Figura 3, da cui può dedurre come le voci di costo di maggiore impatto siano quelle legate ai materiali, al macchinario utilizzato e alle attività di post processing.

CONCLUSIONI

L’obiettivo di questo lavoro è stato quello di discutere l’applicazione delle tecnologie di Additive Manufacturing nel settore delle costruzioni, evidenziando opportunità e sfide, e concentrandosi, su una discussione della struttura dei costi legata all’applicazione di que-

COMPONENTI DI COSTO ADDITIVE MANUFACTURING

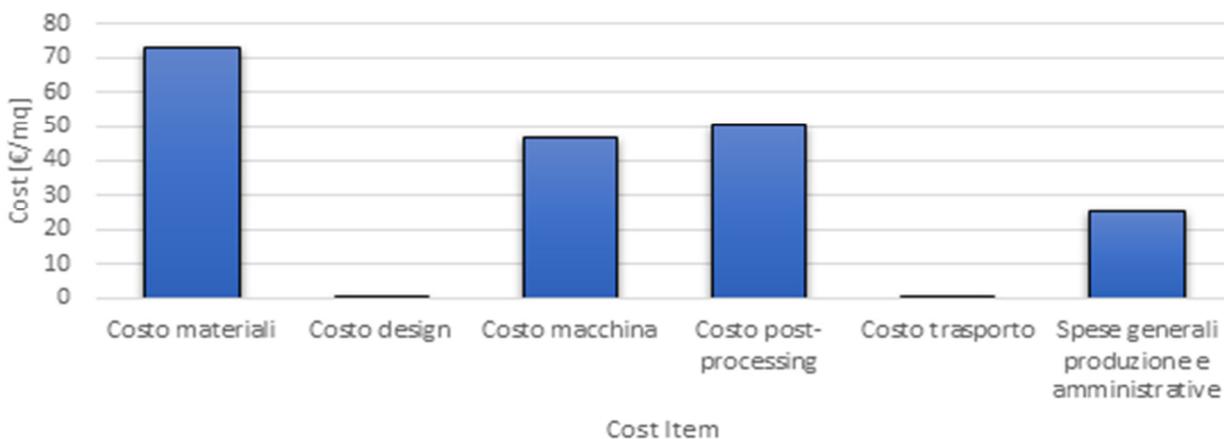


Figura 3: Componenti di costo per l’Additive Manufacturing nelle costruzioni

sta tecnologia.

In particolare, con riferimento alla stampante 3D BOD 5-8-4 dell'azienda danese COBOD INTERNATIONAL, e a una muratura portante in calcestruzzo di una costruzione a due piani, si è analizzato le voci di costo più impattanti, che includono il costo del materiale di stampa, del macchinario e delle attività di post processing. Alla luce dei risultati ottenuti, risulta evidente come elemento fondamentale per rendere le tecnologie additive più competitive, da un punto di vista dei costi, rispetto alle tecnologie convenzionali, sia quello di cercare di intervenire su quegli elementi di costo più impattanti. Sicuramente, l'introduzione sul mercato di stampanti 3D più performanti (in termini di tempi di set up e di building, di lunghezza, larghezza e altezza di stampa, e di accuratezza e precisione) e a dei costi più sostenibili rappresenta un'opportunità.

Una maggiore accessibilità in termini di costi è fondamentale per poter sfruttare appieno la maggiore sostenibilità ambientale (in termini di minori emissioni CO₂, minor utilizzo di risorse, minor speco dei materiali di costruzione), i maggiori gradi di libertà (in relazione a forme e geometrie ottenibili), e la maggiore automazione nel processo di costruzione che l'AM è in grado di garantire rispetto alle tecnologie di costruzione tradizionali.

BIBLIOGRAFIA

- 2021 *A "low-cost" subtractive method for freshly finished 3D concrete printed structures* - Procedia Computer Science, 32-39.
Canou, J., Uhart, M., & Diaz, P.
- 2019 *Efficiency Estimation Model of 3D Technology in the Construction Industry* - Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019, (pp. 1376-1381).
Bataev, A. V.
- 2019 *Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0* - Automation in Construction, 251-267.
- 2019 *Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods*. - Additive Manufacturing, 1-13.
Paolini, A., Kollmannsberger, S., & Rank, E.
- 2019 *A Cost Model to Evaluate the Economic Performance of Contour Crafting*. - Computing in Civil Engineering, 618-625.
Zhang, X., Flood, I., Zhang, Y., Moud, H. I., & Hatami, M.
- 2018 *Applications of additive manufacturing in the construction industry - A forward-looking review*. Automation in Construction, 100-119.
Camacho, D. D., Clayton, P., O'Brien, W. J., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R., & Salamone, S.
- 2018 *Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution* - Automation in Construction, 1-11.
Ghaffar, S. H., Corker, J., & Fan, M.
- 2018 *Productivity of digital fabrication in construction: Cost and time analysis of a robotically built wall*. - Automation in Construction, 297-311.
Soto, B. G., Agustí-Juan, I., Hunhevicz, J., Joss, S., Graser, K., Habert, G., & Adey, B. T.
- 2017 *Prospective study on the integration of additive manufacturing to building industry - Case of a French construction company*. - Additive Manufacturing, 107-114.
Krimi, I., Lafhaj, Z., & Ducoulombier, L.
- 2016 *A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry*. - Automation in Construction, 21-31.
Wu, P., Wang, J., & Wang, X.
- 2014 *Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services* - Additive Manufacturing, 1-13.
Conner, B. P., Manogharan, G. P., Martof, A. N., Rodomsky, L. M., Rodomsky, C. M., Jordan, D. C., & Limperos, J. W.
Craveiro, F., Duarte, J. P., Bartolo, H., & Bartolo, P. J.

IL LABORATORIO CORE Lab

Il CORE Lab è un laboratorio di ricerca del Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione dell'Università del Salento (www.core-lab.it). Il laboratorio è impegnato da anni in progetti di ricerca dal forte carattere innovativo in numerosi ambiti. L'attività di ricerca è svolta a partire dai fabbisogni del territorio e in stretta collaborazione con gli Enti territoriali e con il sistema produttivo e, in molte occasioni, riesce a fornire risposte concrete a esigenze di innovazione, di trasferimento tecnologico e di servizio in diversi settori applicativi e in collaborazione con differenti attori pubblici e privati.

Due le aree principali di ricerca del laboratorio:

- *ICT for Industry and Factory of the Future che punta a sviluppare e a ottimizzare soluzioni tecno-organizzative per la progettazione di prodotto e la gestione delle operations nei settori industriali complessi,*
- *EDITABLE, con focus sulla digitalizzazione del settore delle costruzioni (Building Information Modeling, automazione dei processi costruttivi, soluzioni tecnologiche e metodologiche per la gestione dell'ambiente costruito).*