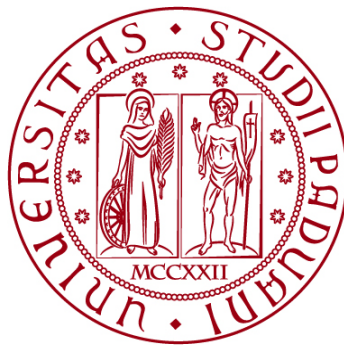


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea Magistrale a ciclo unico in Ingegneria edile-Architettura



TESI DI LAUREA

**PROGETTO STRUTTURALE DI UN EDIFICIO REALIZZATO
MEDIANTE STAMPA 3D**

Relatrice:
Prof.ssa FLORA FALESCHINI

Laureando: FRANCESCO LUTMAN
1236151

ANNO ACCADEMICO: 2024-2025

Abstract

Lo sviluppo e la rapida diffusione di nuove soluzioni tecnologiche e digitali di questi ultimi decenni ha trasformato radicalmente il contesto in cui viviamo.

In particolare nell'industria, l'automazione dei processi produttivi ha determinato una vera e propria rivoluzione rispetto ai modelli antecedenti.

Il mondo dell'edilizia, pur rappresentando un settore strategico, ha invece mantenuto un'identità più conservativa, nonostante siano evidenti le problematiche dovute alla carenza di manodopera e, al tempo stesso, si avverta la necessità di ridurre tempi, costi e impatto ambientale. Esistono però segnali di innovazione che dimostrano l'esigenza di apportare significativi cambiamenti. Un esempio riguarda proprio i processi di *Additive Manufacturing (AM)*, nati in ambito industriale e poi sviluppatisi rapidamente anche in campo edilizio.

In particolare si fa riferimento alla tecnica dell'*Extrusion Printing (EP)*, ossia alla stampa per estrusione del materiale cementizio, in cui la formazione dell'elemento avviene per deposizione di *layers* sovrapposti.

Nonostante gli attuali limiti dovuti alla mancanza di normative strutturali specifiche, costituisce una soluzione estremamente innovativa dal punto di vista tecnologico, con potenziali ripercussioni positive in termini temporali, economici ed ecologici.

Dopo un'analisi generale sull'EP, lo studio di progetti già realizzati e delle loro modalità realizzative, viene sviluppato un caso studio conforme sia alla tecnica costruttiva di un edificio mediante stampante 3D, sia alle normative vigenti in Italia.

Tale studio offre anche l'occasione per definire un *vademecum* delle diverse fasi procedurali.

La proposta sviluppata intende utilizzare le pareti stampate non come semplici tamponamenti, ma come componenti che contribuiscano alla resistenza strutturale, in combinazione con elementi di confinamento in calcestruzzo armato.

Dal momento che non esistono direttive tecniche per l'edilizia in stampa 3D su larga scala e tenuto conto delle analogie tra parete stampata e parete in muratura, il progetto e la verifica strutturale vengono eseguiti con riferimento alle normative nazionali (NTC2018 e C1) ed europee (EC6 e EC8) per le costruzioni in muratura confinata in zona sismica.

Ringraziamenti

Questa tesi rappresenta il completamento del mio percorso di laurea magistrale a ciclo unico in ingegneria edile – architettura, iniziato nel settembre 2019.

Ci tengo a ringraziare in primo luogo la Prof.ssa Flora Faleschini che mi ha permesso di scoprire e approfondire un argomento molto interessante, mostrandosi sempre competente e disponibile.

Desidero ringraziare inoltre l'Università degli Studi di Padova e i docenti che in questi anni mi hanno trasmesso insegnamenti con professionalità e passione.

Ringrazio i miei genitori, Claudia e Guido, e mio fratello Giovanni per avermi sempre sostenuto e motivato nelle mie scelte, rappresentando da sempre un esempio e una fonte di valori.

Ringrazio la mia fidanzata Songul che da quando l'ho conosciuta, in parallelo agli anni universitari, mi è sempre stata accanto portando con sé momenti di felicità.

Ci tengo a ringraziare i miei nonni e tutti i parenti che mi sono sempre stati vicini con affetto e sostegno.

Ringrazio gli amici di Pordenone che da sempre mi hanno accompagnato nei momenti felici. Infine, un ringraziamento speciale ai miei compagni di studi “padovani” con cui ho condiviso diverse ore di lavoro per i progetti universitari e altrettanti momenti felici.

Indice

ABSTRACT

INTRODUZIONE 1

CAPITOLO 1: ADDITIVE MANUFACTURING - applicazione su larga scala 3

- 1.1 Introduzione storica e normativa 3
- 1.2 Potenzialità e lacune dell'AM in applicazioni su larga scala..... 5
- 1.3 Processo tecnologico 9
- 1.4 Tecniche di AM per le costruzioni 10
 - 1.4.1 Metodo per estrusione/deposizione 11
 - 1.4.2 Metodo per iniezione selettiva su letto di particelle 12
 - 1.4.3 Altre tecniche e processi per la *Digital Fabrication* 15

CAPITOLO 2: METODO PER ESTRUSIONE/DEPOSIZIONE 20

- 2.1 Stampanti 3D: le macchine disponibili 20
 - 2.1.1 Le due tipologie più diffuse 20
 - 2.1.2 Altre tipologie di stampanti: versioni ibride e ricerche 21
- 2.2 Il materiale stampabile 24
 - 2.2.1 Modelli reologici 27
 - 2.2.2 Comportamento del materiale nelle fasi di stampa 28
 - 2.2.2.1 *Fresh state – modelli reologici* 28
 - 2.2.2.2 *Fresh state – fase di pompaggio* 30
 - 2.2.2.3 Fase di sviluppo 33
 - 2.2.3 Mix design..... 36
- 2.3 Key problems 40
 - 2.3.1 Interfaccia tra *layers* 40
 - 2.3.2 Meccanismi di collasso 43
 - 2.3.3 Fessurazione, ritiro ed essiccazione..... 45
- 2.4 Rinforzi e normativa strutturale 47
 - 2.4.1 Tipologie di armature e implementazione..... 47
 - 2.4.2 Sistemi strutturali: casi studio e ricerche 53

CAPITOLO 3: PROGETTO 61

- 3.1 Norme di riferimento 61
- 3.2 Descrizione del progetto..... 61
 - 3.2.1 Informazioni generali sul progetto..... 61

3.2.2	Criteri di progettazione: tecnica di stampa e normativa	63
3.3	Carichi e azioni sulla costruzione	65
3.3.1	Materiali utilizzati, carichi permanenti e carichi variabili	65
3.3.2	Azioni della neve	67
3.3.3	Azioni del vento.....	68
3.3.3.1	Azione del vento sulla copertura.....	71
3.3.3.2	Azione del vento sulle pareti	72
3.3.4	Azione sismica	73
3.4	Copertura: predimensionamento e verifiche.....	82
3.5	Analisi sismica.....	87
2.3.1	Ripartizione dell'azione sismica.....	88
3.6	Progetto e verifiche delle pareti.....	89
3.7	Giunto sismico.....	97
3.8	Armature negli elementi di confinamento.....	99
3.9	Connessione delle pareti 3D alle fondazioni e al solaio.....	101

CAPITOLO 4: LIMITAZIONI DELLO STUDIO E FUTURI SVILUPPI _____ 103

4.1	Limitazioni dello studio.....	103
4.2	Futuri sviluppi.....	104

CONCLUSIONI _____ 105

BIBLIOGRAFIA _____ 107

SITOGRAFIA _____ 112

Lista delle figure

Figura 1. <i>Pilaastro con sezione ottimizzata mediante topological optimization [3].</i>	6
Figura 2. <i>a) Case stampate 3D a norma sismicamente, Tabasco (Messico) [4]; b) Genesis collection, Georgetown (USA) [5].</i>	8
Figura 3. <i>Data preparation steps [2].</i>	10
Figura 4. <i>La macchina di Urschel [6].</i>	11
Figura 5. <i>Contour Crafting: processo e proposta costruttiva (Khoshnevis 2004).</i>	12
Figura 6. <i>CasaTuttaDiUnPezzo [8]; Struttura del ponte pedonale [8]; Stampante D-shape (Lowke et al. 2018).</i>	13
Figura 7. <i>Deposizione selettiva di cemento Portland layer by layer (Lowke et al. 2018).</i>	14
Figura 8. <i>Gradual transition printing e Inclined stacking layers printing (Lowke et al. 2024).</i>	15
Figura 9. <i>Injection 3DPC e Non-planar Granular Printing (Lowke et al. 2024).</i>	16
Figura 10. <i>Smart Dynamic Casting (Wangler et al. 2016); Montanti di facciata DFAB (Buswell et al. 2022).</i>	17
Figura 11. <i>Digital trowelling; Digital milling: green-state; Digital milling: risultato finale a materiale indurito (Lowke 2024).</i>	18
Figura 12. <i>Stampante robotic-based (Frank) [10].</i>	21
Figura 13. <i>Stampante gantry-based (BOD3) [11].</i>	21
Figura 14. <i>Processo di stampa CONPrint (Mectcherine et al. 2019).</i>	22
Figura 15. <i>Specifiche tecniche di alcune tra le principali stampanti in commercio [3] [12] [11] [13] [14] [10] [15] (Mectcherine et al. 2019).</i>	23
Figura 16. <i>Rappresentazione schematica del sistema di stampa (Perrot 2019).</i>	25
Figura 17. <i>Comportamento reologico del materiale tissotropico a una velocità di taglio costante (Zhang et al. 2021).</i>	26
Figura 18. <i>Modello a piastre per fluidi e deformazioni laminari (Schmidt e Link 2024).</i>	28

Figura 19. Curve di flusso secondo le leggi di flusso menzionate (Schmidt e Link 2024).	30
Figura 20. Profili di pressione P , shear stress τ , shear rate $\dot{\gamma}$, velocità v e portata Q del flusso di calcestruzzo all'interno di un tubo (Mechtcherine et al. 2020).	30
Figura 21. Illustrazione dello strato lubrificante: flusso a tappo e flusso per taglio durante il pompaggio del calcestruzzo, con raffigurata la migrazione delle particelle indotta dal flusso (Perrot et al. 2021); Distribuzione della forza in un'estrusione assialsimmetrica mediante pistone (Perrot 2019).	31
Figura 22. a) e c) Regimi asintotici di deposizione del materiale mediante estrusione; b) Esempio più realistico di estrusione: materiale sufficientemente rigido passante attraverso un ugello con riduzione geometrica (Mechtcherine et al. 2020).	33
Figura 23 Reti di particelle di cemento che interagiscono: evoluzione dello sforzo di snervamento e requisiti target (Roussel 2018).	34
Figura 24. Requisiti reologici contrastanti nei processi di stampa 3D del materiale cementizio (Zhang et al. 2021).	36
Figura 25. (a) Relazione tra il rapporto acqua-legante e la resistenza a compressione (b) Differenza tra la resistenza massima e minima del calcestruzzo stampato in 3D (Zhang et al. 2021).	37
Figura 26. Contenuto relativo di legante, cenere volante, fumo di silice, acqua e aggregati nella proporzione ottimale dei materiali cementizi per la stampa 3D. (Zhang et al. 2021)	40
Figura 27. Diagramma della tensione che agisce sullo strato inferiore e della sua resilienza in funzione del tempo. Definizione della finestra temporale tra due depositi (Perrot 2019).	41
Figura 28. Fessurazione da ritiro precoce in pareti stampate in 3D (Buswell et al 2022)	45
Figura 29 Shotcrete e implementazione delle armature nelle due direzioni (Buswell et al. 2022).	46
Figura 30. Metodo con ugello sdoppiato adottato da Huashang Tengda (Zhou et al. 2023).	47
Figura 31. Metodo di implementazione automatizzata di una mesh verticale (Marchment e Sanjayan 2020).	48
Figura 32. Mesh Mould (ETH) (Wangler et al. 2016).	48
Figura 33 Materiale di rinforzo in fibra di carbonio impregnata di minerali, posizionato tra layers adiacenti o all'interno del layer (Mechtcherine et al. 2021).	49

Figura 34. Implementazione di un tessuto 2.5D tra strati adiacenti (Mechtcherine et al. 2021).	50
Figura 35. Illustrazione schematica dell'allineamento delle fibre durante la stampa 3D (Hambach et al. 2017).	50
Figura 36. Classificazione dei processi per l'integrazione del rinforzo nelle tecnologie DFC (Mechtcherine et al. 2021).	52
Figura 37. Ponte stampato 3D a Gement: cavi di precompressione e cavi trasversali di rinforzo; Sezione trasversale; Stampa di un elemento (Buswell et al. 2022).	52
Figura 38. Fase di installazione dei pannelli stampati in 3D; Modello di un plinto di fondazione stampato in 3D (Capozzi et al. 2024).	55
Figura 39. a) e b) Ponte Striatus [16]; c) Prova su mock-up della Milestone House; d) Milestone house (Wolfs et al. 2023).	56
Figura 40. Planimetria della Beckum House (Weger et al. 2021).	57
Figura 41. Dubai Office: sistema con casseri a perdere ottenuti tramite EP [17]; Holstebro House: finitura superficiale [11].	58
Figura 42. Dettagli costruttivi della parete 3DPC proposta, con elementi di confinamento in calcestruzzo armato (Aghajani Delavar et al. 2024).	59
Figura 43. Connessione dei solai alle pareti 3DPC. a) strutture a telaio in calcestruzzo armato prefabbricato, b) strutture in legno (Aghajani Delavar et al. 2024).	59
Figura 44. Processo di costruzione della parete 3DPC (Aghajani Delavar et al. 2024).	60
Figura 45. Planivolumetra dello stato di fatto e zoom sul lotto di progetto.	62
Figura 46. Schema di progetto: tre sottostrutture indipendenti.	62
Figura 47. Planivolumetra di progetto e zoom sul lotto di progetto.	63
Figura 48. Valutazione della pericolosità sismica del sito tramite Spettri-NTCver.1.0.3 (Consiglio Superiore dei LLPP).	63
Figura 49. Le tre configurazioni di carico delle pareti stampate.	65
Figura 50. Zone di carico della neve (NTC2018-§3.4.2).	68

Figura 51. <i>Categorie di esposizione (NTC - Fig. 3.3.2).</i>	70
Figura 52. <i>Schema di riferimento per coperture piane (CI-Fig. 3.3.5).</i>	71
Figura 53. <i>Parametri caratteristici di edifici a pianta rettangolare: c_{pe} per facce sopravento, sottovento e laterali (CI-Fig.3.3.2 (a) e (b)).</i>	72
Figura 54. <i>Determinazione dell'azione di progetto agli SLV tramite Spettri-NTCver.1.0.3 (Consiglio Superiore dei LLPP).</i>	79
Figura 55. <i>Determinazione dell'azione di progetto agli SLD tramite Spettri-NTCver.1.0.3 (Consiglio Superiore dei LLPP).</i>	80
Figura 56. <i>Sezione trasversale solaio predalles.</i>	82
Figura 57. <i>Analogia tra parete in muratura e parete stampata 3D.</i>	89
Figura 58. <i>Rigidezza di una parete: schema a taglio.</i>	91
Figura 59. <i>Schema statico e diagramma di momento del travetto.</i>	93
Figura 60. <i>Limite di snellezza per una parete in muratura soggetta a carichi laterali</i>	97

INTRODUZIONE

Le rivoluzioni industriali portano a riflessioni e conseguenze, generando cambiamenti sociali e tecnologici. Di conseguenza, la disciplina architettonica e le teorie ingegneristiche divengono un mezzo di mediazione tra le esigenze dell'uomo e lo sviluppo scientifico.

Agli inizi del Novecento *Le Corbusier* esaltava la forza innovatrice dell'industria ed esortava gli architetti a prenderne ispirazione. Nel libro *Verso un'architettura*, infatti, presentava la sua teoria avanguardistica con il motto “una casa è una macchina da abitare”. L'architetto aspirava a seguire l'approccio industriale per ottimizzare il mondo delle costruzioni, apprezzando al tempo stesso i prodotti dell'industria anche da un punto di vista estetico. È noto il suo parallelismo tra la casa ed il piroscafo: esaltava le forme, i volumi e l'armonia della nave mercantile, contestando al tempo stesso la mummificazione del pensiero architettonico e dell'edilizia in generale.

L'idea di industrializzare il cantiere attraverso la produzione in serie di abitazioni trovò realizzazione nel villaggio operaio *Cité Frugès a Pessac*. Qui, partendo da una progettazione meticolosa basata sulla definizione di unità abitative minime e case-tipo - quindi su uno standard - mise in pratica concetti estremamente innovativi come la standardizzazione edilizia, realizzata compiutamente con la prefabbricazione.

Ancora oggi questo tipo di approccio rappresenta un metodo efficace per ottimizzare il processo di costruzione di un edificio. Tuttavia, per un cambiamento radicale è necessaria una vera e propria rivoluzione.

Nell'epoca del digitale e dell'automazione industriale è ragionevole pensare che anche il mondo delle costruzioni possa evolversi attraverso le nuove tecnologie. Sin dai primi anni del XX secolo, l'automazione è cresciuta e si è affermata in quasi tutti i settori produttivi, ad eccezione del campo delle costruzioni civili.

Recentemente, tuttavia, l'interesse nei confronti dei processi automatizzati si è intensificato, portando a numerose ricerche sull'analisi e lo sviluppo di tecniche per la *Digital Fabrication*. Si focalizza l'attenzione sui processi di *Additive Manufacturing*, in particolare l'*Extrusion Printing*, ossia la stampa tridimensionale di edifici tramite la deposizione di *layers* sovrapposti.

L'interesse per questa nuova tecnologia nasce dalla necessità di affrontare nuove sfide sociali. Una conoscenza diffusa della tecnologia e dell'intero processo di stampa può offrire soluzioni concrete a problematiche sociali, economiche ed ecologiche.

Esistono già alcuni edifici e persino interi quartieri realizzati tramite *Extrusion Printing*, i quali dimostrano le enormi potenzialità della “nuova” tecnologia. Tuttavia, in Italia, l'adozione di metodi automatizzati risulta ancora molto limitata.

Evidentemente gli studi sull'applicazione su larga scala dei processi di *Additive Manufacturing*, ed in particolare dell'*Extrusion Printing*, sono piuttosto recenti, di conseguenza permangono ancora diverse incertezze e molte lacune.

Uno degli aspetti fondamentali e necessari per lo sviluppo di una tecnica costruttiva riguarda la definizione di un metodo di calcolo strutturale. Per questo motivo il presente elaborato, dopo un'analisi generale della tecnologia e lo studio di progetti già realizzati con le relative modalità realizzative, mira a sviluppare un caso studio che sia conforme sia alla tecnica costruttiva di edifici mediante stampante 3D, sia alle normative vigenti in Italia.

La proposta sviluppata intende utilizzare le pareti stampate non come semplici tamponamenti, ma come componenti che contribuiscano alla resistenza strutturale, in combinazione con elementi di confinamento, verticali e orizzontali, in calcestruzzo armato. Dal momento che non esistono direttive tecniche per l'edilizia in stampa 3D su larga scala e tenuto conto delle analogie tra parete stampata e parete in muratura, il progetto e la verifica strutturale vengono eseguiti con riferimento alle normative nazionali (NTC2018 e C1) ed europee (EC6 e EC8) per le costruzioni in muratura confinata in zona sismica.

CAPITOLO 1: *Additive Manufacturing* – applicazione su larga scala

1.1 Introduzione storica e normativa

Le tecnologie di *Additive Manufacturing* (AM) hanno origine negli anni '80 e da subito sono state oggetto di ricerca e sperimentazione per le enormi potenzialità.

Lo standard terminologico ISO/ASTM 52900:2021 definisce col termine *Additive Manufacturing*: “*the process of joining materials to make parts from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing and formative manufacturing methodologies*”. [1] Non è scontato che i termini AM e *3D printing* coincidano, in quanto non tutti i processi di AM prevedono la costruzione per sovrapposizione di *layers*, anche se spesso è così.

Questi processi nascono con l'obiettivo di produrre oggetti unici, prototipi estremamente dettagliati, senza stravolgere la catena produttiva. Infatti, per mezzo di macchine che generalmente depositano il materiale strato per strato, è possibile ottenere prodotti dalle forme anche molto complesse.

Nel 1984 *Charles W. 'Chuck' Hull* deposita il brevetto US4575330: “apparecchiatura per la produzione di oggetti tridimensionali mediante stereolitografia (SL)”. Questo metodo utilizza la fotopolimerizzazione di resine fotosensibili ai raggi UV per creare elementi tridimensionali ed è considerato il primo processo di prototipazione rapida. Fin da subito la stereolitografia ha trovato applicazione nelle industrie aerospaziali, automobilistiche e dei beni di consumo (Whitaker 2014; Wong e Hernandez 2012).

Nel 1989 *Scott Crump* brevetta la tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM) - US5121329. Questa tecnica utilizza una macchina a controllo numerico (*computer numerical-controlled CNC*) per depositare strati successivi di materiale polimerico termoplastico. Il processo parte da un filamento solido che viene fuso nella testa di stampa e poi estruso attraverso un ugello, consentendo la realizzazione di oggetti dalle più svariate forme e dimensioni (Siemiński 2021).

In ambito industriale queste tecnologie hanno rappresentato da subito un trampolino di lancio per nuove applicazioni e ricerche, mentre la loro influenza nel mondo dell'edilizia richiederà più tempo per manifestarsi. Vedremo che la tecnica più utilizzata per la stampa su larga scala, ossia l'*Extrusion Printing* (EP) con materiale cementizio, si ispira proprio alla FDM. Tuttavia, sussistono notevoli differenze legate alla natura dei materiali adottati.

Tra la fine del XX e l'inizio del XXI secolo, si comincia a riflettere su come l'*Additive Manufacturing*, una tecnologia nata per la costruzione di prototipi di dimensioni limitate, possa essere estesa alla realizzazione di elementi edilizi su larga scala, come pareti o interi edifici.

Nel 1997 *J. Pegna* conduce i primi studi sull'utilizzo di materiali cementizi nelle tecniche di *AM*, in particolare in un processo che utilizza un letto di particelle sabbiose, su cui vengono depositati selettivamente un legante (*binder*) e un catalizzatore o reagente (acqua o vapore pressurizzato) per generare oggetti tridimensionali *layer by layer*. L'ispirazione proviene da un'antica tecnica pittorica degli indiani *Navajos*, i quali creavano opere d'arte uniche lasciando scivolare selettivamente polveri e pigmenti su un letto di sabbia. L'obiettivo di *J. Pegna* è indagare l'utilizzo dell'*AM* come potenziale approccio all'automazione delle costruzioni edili e, anche per mezzo di test quantitativi a compressione e trazione soddisfacenti, ne promuove la ricerca (Pegna 1997).

A partire dal 1998, *B. Khoshnevis* dell'*University of Southern California* approfondisce il tema dell'*AM* applicato su larga scala. Le ricerche di *B. Khoshnevis* nascono dalla constatazione di un'efficienza della manodopera molto bassa, di un tasso di incidenti nei cantieri elevato, di una qualità del lavoro scarsa e un controllo del cantiere insufficiente e difficile (Perrot 2019). Osservazioni che non sono poi così lontane dalla realtà dei giorni nostri.

In quegli anni, però, i metodi di automazione adottati nel settore manifatturiero non erano applicabili alle grandi opere edilizie vista l'inadeguatezza delle tecnologie di fabbricazione, la limitazione dei materiali utilizzabili ed il costo delle attrezzature. Nonostante ciò, si riconosceva comunque l'enorme potenziale dei processi di *AM*. In particolare *B. Khoshnevis* conia un metodo estrusivo chiamato *Contour Crafting*, capace di generare elementi con un alto grado di controllo sulla finitura superficiale. Ancora oggi rappresenta un modello di riferimento e, rispetto a quanto studiato da *Pegna*, risulta applicabile nella costruzione di grandi strutture, come le case. Addirittura *Khoshnevis* vede in questa nuova tecnologia la possibilità di espandere gli insediamenti umani in altri pianeti e, tra le possibilità proposte, vi è la costruzione di strutture in loco sulla luna utilizzando come materiale la regolite, direttamente prelevata dal suolo lunare (Khoshnevis et al. 2001; Khoshnevis e Bekey 2002; Khoshnevis 2004).

Parallelamente in Giappone vengono ideati diversi modelli di robot "a compito singolo", utilizzati per la rifinitura di pavimenti in calcestruzzo, verniciatura a spruzzo, ispezione di piastrelle e movimentazione di materiali. Nulla di rivoluzionario però, in quanto l'automazione dei processi convenzionali è comunque inevitabilmente costosa, offrendo quindi un risparmio minimo (Hwang e Khoshnevis 2005).

La ricerca quindi si focalizza sulla definizione di un processo integrato che interessi tutte le materie coinvolte nel settore delle costruzioni.

Quindi i processi di produzione additiva che conosciamo oggi sono il risultato di più di quarant'anni di ricerca e sperimentazioni.

La ISO/ASTM52900:2021 classifica i processi di *Additive Manufacturing* in 7 categorie:

- *Material Extrusion*: il materiale viene erogato selettivamente attraverso un ugello o un orifizio.
- *Binder Jetting*: un agente legante liquido viene depositato selettivamente per unire/legare materiali in polvere.
- *Material Jetting*: gocce di materiale (resina fotopolimerica e cera) vengono depositate selettivamente.
- *Vat Photopolymerization*: il fotopolimero liquido in una vasca viene polimerizzato selettivamente mediante polimerizzazione attivata dalla luce.
- *Power Bed Fusion*: l'energia termica fonde selettivamente regioni di un letto di polvere.
- *Sheet Lamination*: fogli di materiale vengono incollati per formare una elemento.
- *Directed Energy Deposition*: l'energia termica focalizzata viene utilizzata per fondere i materiali mentre vengono depositati. “Energia termica focalizzata” s’intende che una fonte di energia (ad esempio laser, fascio di elettroni o arco di plasma) viene focalizzata per fondere i materiali in fase di deposito.

L’applicabilità su larga scala delle tecniche *material extrusion*, *particle-bed binding* e *material jetting* è già stata dimostrata. Nei prossimi paragrafi queste tipologie di processi verranno analizzate nel dettaglio.

1.2 Potenzialità e lacune dell’AM in applicazioni su larga scala

La ISO/ASTM 52939/2023 definisce nello specifico *Additive Manufacturing for construction* come: “*Process to join materials to make structural and non-structural elements/components and systems from 3D model data usually by depositing material layer upon layer as opposed to subtractive and formative manufacturing methodologies*” [2]. Rispetto alla definizione generale dell’AM qui viene specificato che nel settore delle costruzioni tale processo può essere utilizzato per ottenere sia elementi non-strutturali che strutturali.

L’introduzione dell’AM nel settore delle costruzioni può rappresentare un cambiamento positivo sotto molteplici aspetti. I vantaggi riconosciuti alla produzione additiva di elementi su larga scala sono diversi e pluridisciplinari. Già numerosi studi hanno messo a confronto le tecniche di fabbricazione additiva con i processi convenzionali in calcestruzzo gettato.

- Libertà architettonica: la realizzazione di forme complesse con le tecniche tradizionali risulta complicata e piuttosto costosa. Infatti, per realizzare una parete curva è necessario produrre una cassaforma specifica che rappresenta un costo aggiuntivo per nulla trascurabile, nonché un potenziale scarto vista la particolarità della forma. Uno studio condotto da *Schmitt* mostra come le casseforme incidono in media per il 28% sul costo totale della struttura in calcestruzzo, con casi in cui tale valore può arrivare fino al 50% (De Schutter et al. 2018). Altre fonti attestano una percentuale compresa tra il 35 e il 60% (Perrot et al. 2016).

Molti processi di *AM* non necessitano di casseforme grazie alle proprietà reologiche del materiale, permettendo la costruzione di elementi complessi senza supporti e senza un aumento dei costi in proporzione alla complessità della geometria.

Quindi le scelte del progettista non risultano più fortemente condizionate dalla tecnica costruttiva, ampliando il campo architettonico a geometrie funzionali ed esotiche.

- Ottimizzazione topologica: attualmente le forme dei componenti architettonici e soprattutto strutturali sono vincolate dal fatto che a forme semplici corrispondono costi ridotti. Questo porta ad un utilizzo di materiale talvolta eccessivo e ad una limitazione in termini di scelte progettuali. Un tema interessante riguarda l'ottimizzazione della forma come metodo per risparmiare sui costi e sul materiale utilizzato.

Esistono già *software* avanzati che consentono di analizzare lo stato di tensione di un elemento ed eliminare le parti non funzionali, bisognerebbe quindi implementare un sistema costruttivo che ne consenta la realizzazione sicura e sostenibile su larga scala.

Un esempio di applicazione del principio “*form follows force*” si trova presso una scuola di *Aix-en-Provence*, dove *XtreeE* ha realizzato un complesso pilastro a forma di traliccio alto 4 metri a sostegno di una copertura. La geometria di questo elemento strutturale è stata progettata secondo il concetto di *topological optimization* (De Schutter et al. 2018), consentendo una distribuzione efficace del materiale. Il pilastro è costituito da tre porzioni distinte, stampate singolarmente e successivamente assemblate in loco.

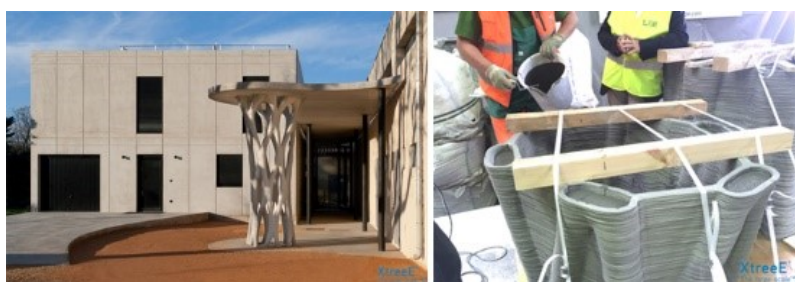


Figura 1. Pilastro con sezione ottimizzata mediante *topological optimization* [3].

- Scarti: le opere di *AM* utilizzano il materiale necessario, senza notevoli eccedenze e potenzialmente limitato grazie all'ottimizzazione topologica. Uno studio dell'Università di *Loughborough* ha evidenziato le cause maggiori di spreco nel processo di fabbricazione additiva di tre pannelli in materiale cementizio. Risulta che in media il 13% del materiale previsto viene scartato, principalmente durante la fase di stabilizzazione in cui il materiale viene estruso fino a garantire il rispetto delle proprietà reologiche di progetto, e nella transizione di stampa, quando la fabbricazione di due elementi distinti avviene senza interruzioni.

Occorre inoltre considerata l'elevata percentuale di scarti dovuta al margine d'eccesso prestabilito per tutelarsi e evitare l'esaurimento del materiale prima del completamento della stampa, alla fase di lavaggio che genera ulteriori scarti e alle eventuali interruzioni

del processo senza l'arresto dell'estrusore. Si sostiene che riciclando parte del materiale si possa raggiungere una percentuale di spreco attorno al 7% (Al Farhan et al. 2024).

Un vantaggio importante di questa tipologia di processi risiede nella produzione sistematizzata, quindi, producendo molti elementi continuativamente, è possibile ridurre notevolmente gli scarti. La gestione del riciclo dipende in gran parte dalla tipologia di materiale utilizzato, dal tasso di strutturazione e dalla presenza di additivi acceleranti (molto utilizzati nell'*EP*) che inibiscono la possibilità di riciclaggio.

- Tempi: il processo costruttivo e le proprietà reologiche del materiale stampabile permettono una significativa riduzione dei tempi di realizzazione. Le tecniche additive garantiscono una finitura superficiale di alta qualità, eliminando la necessità di ulteriori interventi per ottenere superfici lisce.

La mancanza di dati sperimentali, di informazioni relative ai progetti realizzati e in generale di conoscenze e competenze nel settore comporta tempi di preparazione del processo di stampa molto lunghi, in contrasto con un tempo di cantierizzazione estremamente ridotto (Bos et al. 2022).

- Costi: uno studio condotto da *García de Soto* ha dimostrato che la costruzione digitale in calcestruzzo non presenta un aumento dei costi proporzionalmente alla complessità delle geometrie. Quindi se per elementi complessi un processo di *AM* consente di risparmiare, lo stesso non vale, ad oggi, per pareti semplici (De Schutter et al. 2018).

La carenza di manodopera qualificata limita la crescita delle attività edilizie e contribuisce all'aumento dei costi.

- Impatto ambientale ridotto: da un lato l'eliminazione delle casseforme e l'ottimizzazione topologica rappresentano aspetti positivi per la riduzione dell'impatto ambientale, dall'altro i materiali stampabili presentano in genere aggregati piccoli ed un'alta percentuale di cemento. Quest'ultimo ha importanti ripercussioni sull'ambiente legate soprattutto alla prima fase di produzione del legante, durante la quale argilla e calcare subiscono la calcinazione, con conseguente liberazione di CO₂.

Già diversi studi hanno valutato l'applicazione di materiali alternativi come cenere volante, scoria granulata d'altoforno, fumo di silice, polvere di calcare, geopolimeri, cemento a base di calcare e argilla calcinata, cemento di fosfato di magnesio e potassio e cemento a ossido di magnesio reattivo, in sostituzione al cemento Portland (Zhang et al. 2021).

Nell'*AM* il principale fattore che incide sull'impatto ambientale non è il processo o i macchinari impiegati (robot, riciclaggio delle batterie al litio ed energia necessaria per la fabbricazione), bensì il materiale da costruzione utilizzato. Per questo motivo le ricerche in atto si concentrano sul definire un materiale che abbia proprietà reologiche ottimali utilizzando *supplementary cementitious materials (SCM)* (De Schutter et al. 2018).

Quindi gli studi sui processi di *AM* ed in particolare sull'*EP*, mirano a minimizzare l'impatto ambientale di una tecnologia, ad oggi, non ancora perfezionata.

- Collaborazione tra i diversi professionisti del settore: tramite il sistema BIM è già possibile una collaborazione ottimizzata tra gli specialisti coinvolti nel progetto. Questa copresenza può essere migliorata grazie alla stampa 3D e la *functional hybridization*. L'integrazione di tubi, isolamento e impianti elettrici richiede geometrie complesse, che possono essere ottenute tramite processi di *Additive Manufacturing (AM)*, a condizione che il materiale utilizzato e le difficoltà di adeguamento e manutenzione non ne compromettano l'efficacia. L'intervento deve essere flessibile e mirato a sostituire fasi del cantiere particolarmente impattanti (De Schutter et al. 2018).
- Urbanizzazione rapida a basso costo: la riduzione dei tempi e dei costi pone l'attenzione sulle persone meno agiate e i paesi in via di sviluppo, nei quali è richiesta un'urbanizzazione mirata e sostenibile. Un progetto importante ha interessato la città di *Tabasco* (Messico) nel 2019, dove le aziende *ICON* e *New Story* hanno realizzato due case a norma sismicamente da 46 m² in appena 24 ore.

Recentemente è stato ultimato anche il progetto *Genesis Collection*, nato dalla collaborazione tra *ICON*, *Lennar* e *BIG-Bjarke Ingels Group*, che ha portato alla realizzazione di cento case stampate in 3D a *Georgetown, Texas*. Basandosi su prototipi precedenti, il tempo di costruzione di una casa che varia dai 90 ai 200 metri quadrati è di circa 5-7 giorni di stampa [4].



a)



b)



Figura 2. a) Case stampate 3D a norma sismicamente, *Tabasco (Messico)* [4]; b) *Genesis collection, Georgetown (USA)* [5].

- Nessun errore e sicurezza in cantiere: a seguito di una fase di progettazione digitale molto scrupolosa, l'ultima fase del cantiere non richiede particolari lavorazioni manuali.

Al tempo stesso, essendo una tecnologia in via di sviluppo, non è certamente perfetta e presenta alcuni limiti e lacune:

- Dimensioni limitate: ad oggi la superficie e l'altezza massima raggiungibile sono limitate. In particolare le stampanti disponibili hanno consentito sinora di ottenere al massimo un edificio alto 9,9 m, completamente stampato in 3D in sito.
- Costo delle stampanti e manutenzione, dei software e degli hardware elevato: spesso le stesse aziende produttrici delle stampanti forniscono insieme alla macchina un *software* ed il prezzo complessivo può variare da qualche migliaio di euro fino a mezzo milione per le stampanti più evolute (vedi paragrafo 2.1).

- Strutture orizzontali e a sbalzo: la realizzazione di elementi di questo tipo in cantiere richiede supporti aggiuntivi, eccezione fatta per alcune tecniche a letto di particelle, in cui gli strati inferiori di particelle possono fungere da supporti, ma non in sito.
- Cambiamento sociale: meno manodopera e più competenze tecniche non sono un aspetto negativo, però ad oggi non ci sono conoscenze diffuse per questa rivoluzione. Governeranno del cambiamento le aziende IT/Tech che utilizzano il sistema BIM e aziende in ambito robotico/automazione.
- Materiale: nonostante esistano in commercio già diversi prodotti specifici per la stampa, molti aspetti rimangono ancora oggetto di ricerca. Come detto l'alta percentuale di cemento aumenta il costo e l'impatto del materiale stampabile.
- Normativa e analisi strutturali: trattandosi della lacuna più grande e complessa da colmare verrà studiata singolarmente a partire dal secondo capitolo.

Prima di affrontare nel dettaglio queste problematiche è necessario fornire un quadro generale sull'*Additive Manufacturing for construction*, partendo dal processo e le tecniche di stampa, per arrivare alla definizione delle caratteristiche del materiale stampabile.

1.3 Processo tecnologico

Con le attuali tecniche costruttive la fase di esecuzione dei lavori in cantiere rappresenta un momento cruciale. È la fase in cui le imprese e gli operai, messi a conoscenza del progetto, avviano la cantierizzazione dell'opera con l'obiettivo di concludere i lavori in sicurezza, nei modi e nei tempi prestabiliti. È fondamentale in questo senso sensibilizzare sul fatto che non possa esistere un lavoro organizzato senza una progettazione di base meticolosa e completa. Su questo principio si fondano i processi di *AM* applicati alle costruzioni. Esistono infatti già alcuni esempi di cantieri in cui la manodopera risulta essere veramente minima; l'azienda *COBOD*, ad esempio, sostiene che per utilizzare la stampante *BOD2* siano sufficienti 4 operatori: un addetto alla stampante, due ai materiali ed un aiutante pratico. Infatti, per mezzo di una macchina e di una fase di progettazione molto attenta, è possibile ridurre le operazioni che richiedono l'intervento umano. Così facendo la sicurezza in cantiere è certamente maggiore e le possibilità di errore, che per natura è umana, viene drasticamente ridotta.

Tradizionalmente l'edilizia si è basata su specifiche ed elaborati grafici 2D per trasmettere le informazioni relative ad un progetto. Nonostante per molti aspetti il settore edilizio risulti arretrato rispetto a quello manifatturiero, la diffusione della tecnologia BIM (*Building Information Modeling*) rappresenta un buon punto di partenza per la digitalizzazione dei progetti. Come si intuisce dalla loro definizione (vedi §1.2), i processi di *AM* per le costruzioni si fondano su un modello informativo tridimensionale, quindi su un modello BIM.

Il processo segue degli step tecnologici e di stampa precisi (Perrot 2019):

- Tramite un *software CAD (computer-aided design)* viene creato un modello tridimensionale fedele in ogni suo dettaglio all'oggetto da realizzare. Quindi è di fondamentale importanza il grado di competenza del modellatore per evitare ogni tipo di errore.
- Viene esportato un *file STL (Stereo Lithography interface format o Standard Triangle Language o Standard Tessellation Language)*, quindi le superfici del modello vengono discretizzate in tanti più triangoli quanto più risulta complessa la sua forma ed il *file* ne riporta le coordinate dei vertici.
- Il file *.stl* dev'essere poi convertito in un file *G-code*, questo definisce la velocità, la traiettoria di movimento (il percorso dell'utensile) e la selezione dello specifico utensile in relazione alla lavorazione. Per ottenere un *G-code* bisogna attuare una "stratificazione" (*slicing*) del modello, passando da un modello digitale ai comandi per la stampante. Infatti viene "affettato" virtualmente, in base ai parametri dipendenti dalla stampante, e i dati di ciascuno strato vengono utilizzati per generare i codici macchina, passando quindi da un modello 3D a strati 2.5D (sovrapposizione di strati bidimensionali) (Buswell et al. 2008).
- Simulazioni del processo di *Additive Construction*.
- Stampa dell'oggetto fisico tridimensionale (le diverse fasi verranno definite nel paragrafo §2.2, in relazione alle caratteristiche del materiale stampabile).
- Eliminazione di eventuali supporti temporanei e aggiunta degli elementi non stampabili (infilssi e impianti).

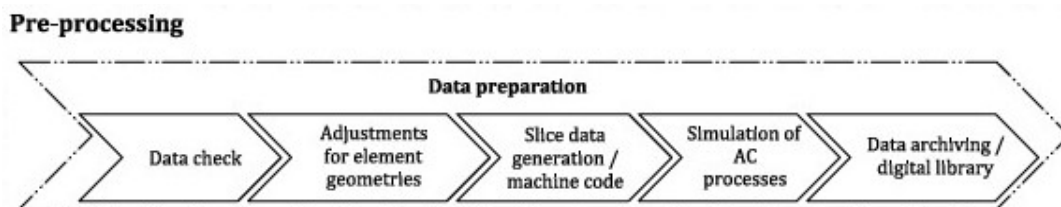


Figura 3. *Data preparation steps* [2].

Vedremo che, per quanto riguarda l'utilizzo di stampanti 3D per *Extrusion Printing*, il processo di costruzione si suddivide in tre sottoprocessi: il materiale miscelato viene pompato fino a raggiungere la testa di stampa, poi la testa di stampa si posiziona precisamente in conformità con le informazioni contenute nel *G-code* ed infine avviene l'estrusione del materiale.

1.4 Tecniche di AM per le costruzioni

I processi di *Additive construction* più diffusi nel mondo dell'edilizia derivano da tecnologie precedentemente studiate e applicate in ambito industriale, in particolare da processi additivi che utilizzano materiali quali polimeri, resine e metalli.

Ora l'attenzione si concentra sullo sviluppo in ambito edilizio, quindi prevalentemente su tecniche che adoperano materiali cementizi. I metodi più diffusi e studiati per costruzioni su media-larga scala possono essere raggruppati in due principali tipologie:

- Estrusione/deposizione (*extrusion-based*)
- Iniezione su letto di particelle (*powder-based*)

Vedremo che la tecnica di stampa è un fattore fondamentale anche nella definizione delle caratteristiche del materiale da utilizzare.

1.4.1 Metodo per estrusione/deposizione

L'AM su scala edilizia appare come una soluzione estremamente moderna. In realtà le sue origini rimandano addirittura al 1939, quando *William E. Urschel* costruisce la “*Wall Building Machine*”, anticipando molti aspetti che oggi consideriamo comuni nel metodo *Extrusion Printing*. Si tratta infatti di una tecnica costruttiva che non prevede casseforme e calcestruzzo gettato, bensì una macchina che opera radialmente attorno ad un asse centrale col fine di costruire muri *layer by layer*. *Urschel* brevetta soluzioni che risultano estremamente attuali, come un metodo di implementazione delle armature contemporaneamente alla deposizione del calcestruzzo, una forma dei *layers* che consente di limitare la formazione di *cold joints* tra gli strati e ricerche su materiali alternativi al calcestruzzo convenzionale (Curth 2019).

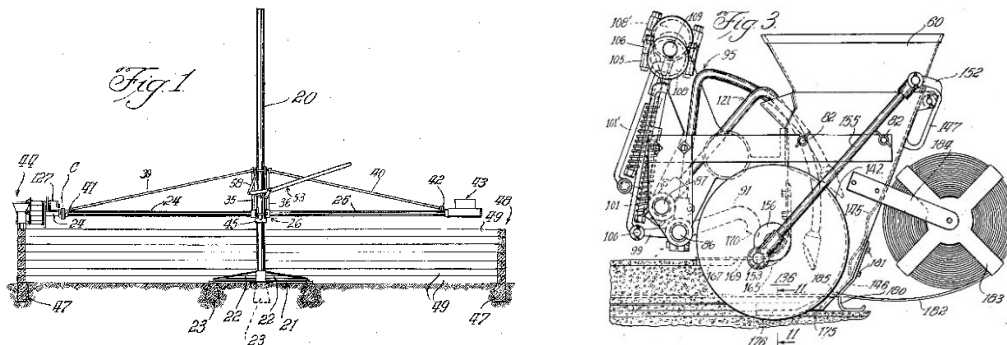


Figura 4. La macchina di Urschel [6].

Negli anni si è assistito ad uno sviluppo tecnologico e digitale importante, per questo motivo le innovazioni portate da *Urschel*, seppur per molti aspetti anticipatrici, risultano comunque lontane dalla ricerca attuale che fonda le radici su macchine dal grande sviluppo tecnologico (con testa di stampa che si muove nelle tre direzioni e non solo lungo un tracciato circolare) connesse a modelli digitali (requisito fondamentale nella definizione ASTM di *Additive Manufacturing*).

Spesso la nascita dell'EP viene quindi ricondotta a *B. Khoshnevis*, in particolare alla definizione del *Contour Crafting (CC)*, una tecnologia di fabbricazione additiva che utilizza il controllo computerizzato per creare superfici piane e a forma libera, lisce ed accurate.

Nelle prime macchine progettate ad hoc per il CC, per mezzo di un pistone collegato ad una “vite senza fine”, il materiale viene pompato fino a raggiungere la testa di stampa, da viene poi estruso, passando per un ugello che ne conferisce la forma e ne definisce la dimensione. Quindi il materiale estruso si deposita andando a formare un primo *layer*, continuamente vengono stampati altri *layers* coassiali fino a definire un perimetro chiuso costituito da cornici estruse formate da strati sovrapposti.

La macchina robotica descritta da *Khoshnevis* utilizza due spatole che permettono di ottenere superfici perfettamente lisce. La spatola centrale (*top trowel*) è fissa e allineata con l’ugello mentre la spatola laterale (*side trowel*) è mobile per consentire la variazione dello spessore. Quindi si unisce l’estrusione meccanica delle parti superficiali ai metodi tradizionali che già prevedono l’utilizzo di spatole e il getto o iniezione del calcestruzzo nel nucleo, il tutto automatizzato (Khoshnevis et al. 2001; Khoshnevis e Bekey 2002; Khoshnevis 2004).

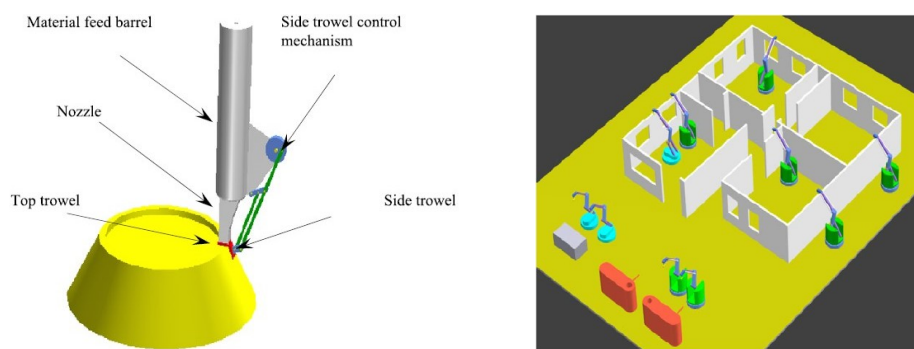


Figura 5. *Contour Crafting: processo e proposta costruttiva (Khoshnevis 2004).*

L’altezza del singolo *layer* può variare da 1 mm (per piccoli filamenti) a spessori dell’ordine dei 10 cm (per materiale cementizio) (Roussel 2018). Nella maggior parte dei processi di stampa viene utilizzata una malta cementizia che, rispetto alle dimensioni dell’oggetto da stampare, viene depositata in strati con una sezione trasversale relativamente piccola, circa 30-50 mm di larghezza e 10-30 mm di altezza (Mechtcherine et al. 2019). Queste misure sono utili per avere un’idea indicativa delle dimensioni degli strati, ma diversi progetti sono stati realizzati con *layers* che superano questi limiti.

Nel paragrafo §1.4.3 ci si soffermerà sulle varianti di questo metodo e successivamente, nel secondo capitolo, si approfondiranno le macchine e i materiali disponibili in commercio, nonché i principi teorici che caratterizzano le diverse fasi di stampa.

1.4.2 Metodo per iniezione selettiva su letto di particelle

Nel 1993 *E. Sachs* del *Massachusetts Institute of Technology* breveta una tecnologia che prevede la legatura di strati sottili di polvere tramite l’iniezione di un “inchiostro”. Nel 1997 *J. Pegna* riprende questa tecnica, in particolare attivando del materiale cementizio inserito in un letto di sabbia tramite vapore acqueo (Perrot 2019).

Nel 2007 *E. Dini* deposita il primo brevetto per il sistema di stampa *D-shape*, ossia una soluzione che consente di utilizzare il *Selecting Binding Method* su larga scala.

La tecnologia *D-shape* ha consentito di realizzare il primo prototipo di casa stampata in 3D: “CasaTuttaDiUnPezzo”. Esposta alla Triennale di Milano del 2010, si tratta di un blocco unico di 2,4x4x3,5 m stampato e completato in 14 giorni.

A Madrid nel 2017 è stato realizzato un ponte pedonale utilizzando sempre la tecnologia *D-shape*. Si tratta di una campata unica di 12 m, larga 1,75 m, costituita da due strutture metalliche laterali tipo *Vierendeel* e 8 blocchi stampati e poi collegati. La tecnologia ideata da *Dini* ha consentito di ottenere una struttura molto leggera, riducendo il materiale utilizzato tramite *topological optimization* [7]. Il materiale è costituito da sabbia e cemento attivato spruzzando una soluzione di acqua e additivi (*Selective binder (cement) activation*). La stampante consiste in un telaio orizzontale costituito da 100 ugelli a intervalli di 20 mm e una lama per distribuire la sabbia. Per riempire gli spazi tra gli ugelli e garantire una distribuzione uniforme del fluido sull’intera sezione, ogni strato viene prodotto con passate multiple, con un offset della testina di stampa di 5 mm (Buswell et al. 2022).

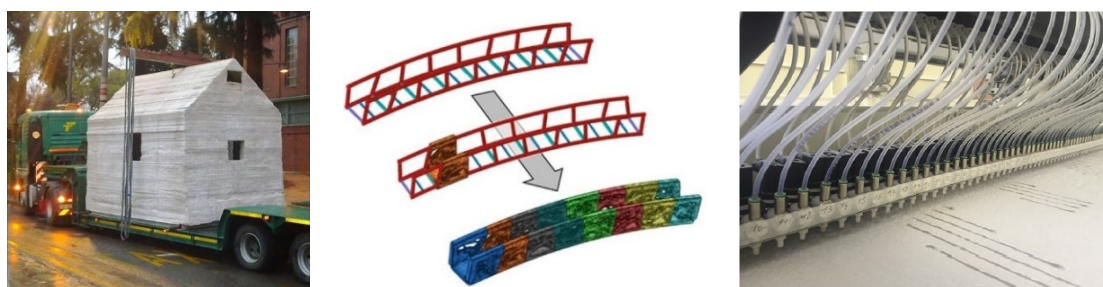


Figura 6. CasaTuttaDiUnPezzo [8]; Struttura del ponte pedonale [8]; Stampante D-shape (Lowke et al. 2018).

Il potenziale del *Particle-bed 3D Printing* risiede nella possibilità di generare elementi complessi ad altissima risoluzione (fino a 0.1 mm) e a sezione ottimizzata sulla base del flusso delle forze (*graphic statics*), il tutto a basso costo e senza la necessità di casseforme (Lowke et al. 2018).

È evidente che questa tipologia di operazione richiede una ambiente protetto e sicuro, per cui non viene eseguita in sito. Ne consegue che l’adozione di questa tecnologia nel settore edilizio riguarda prodotti prefabbricati e solamente installati in cantiere.

Come avviene nel metodo per estrusione/deposizione l’elemento finale è ottenuto per sovrapposizione di *layers*, senza alcuna limitazione di forma e in breve tempo, a prescindere dalla complessità.

La tecnica può essere schematizzata in due semplici step ripetuti:

- applicazione di uno strato rullato di particelle secche
- deposizione di un fluido per legare le particelle

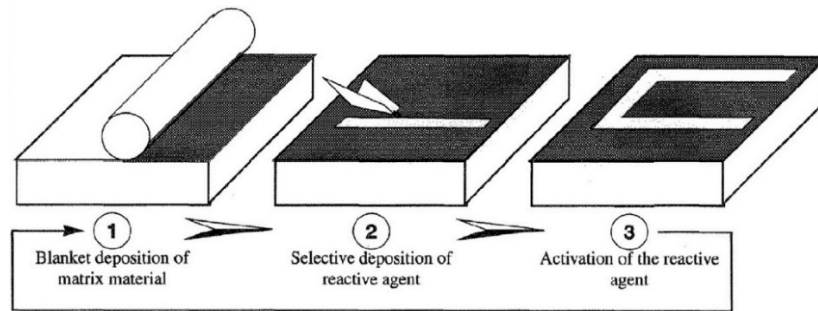


Figura 7. Deposizione selettiva di cemento Portland layer by layer (Lowke et al. 2018).

Si aggiunge un'opera di *de-powdering*, ossia la fase finale molto complessa ed energivora volta ad eliminare le particelle non legate.

Il metodo può essere poi suddiviso in tre strategie principali:

- stampa diretta del componente utilizzando un materiale cementizio
- stampa di una cassaforma, riempita con calcestruzzo fresco convenzionale e poi rimossa
- stampa di una cassaforma permanente (in materiale cementizio o sabbia+polimero), riempita con calcestruzzo fresco convenzionale

Poi, a seconda del materiale utilizzato e della tipologia di processo, esistono tre tecniche distinte di *Particle-bed 3D printing*:

- *Selective binder (cement) activation*: il letto di particelle è costituito da aggregati molto fini (solitamente sabbia <1mm) e legante in polvere (generalmente cemento). Il cemento viene attivato spruzzando o gettando acqua con eventuali additivi. Così facendo, per idratazione, si crea una matrice di pasta cementizia attorno alle particelle. Le proprietà finali dell'elemento dipendono sia dal materiale (rapporto acqua/cemento, composizione e granulometria), sia dal processo (spessore dei *layers*, pressione del getto) (Lowke et al. 2018).
- *Selective paste intrusion*: gli aggregati costituenti il letto hanno una dimensione <5mm e non è presente un legante in polvere. Tramite degli ugelli si deposita una pasta legante fluida costituita da acqua, cemento e additivi. È fondamentale, specialmente in questa tecnica, accertarsi che la pasta riempia i vuoti interstiziali tra le particelle per garantire resistenza e forma.
Una scoperta eccezionale mostra come all'aumentare del rapporto acqua/cemento aumenti la resistenza meccanica, ciò si verifica perchè per un materiale molto viscoso risulta più complicato occupare tutti gli interstizi tra gli aggregati (Lowke et al. 2015).
- *Binder jetting*: si applica un legante liquido (in genere una resina) su un letto di particelle (di dimensioni minori rispetto alle altre tecniche) contenente un attivatore indurente.

Uno dei principali limiti di questo metodo di stampa riguarda la dimensione dell'elemento stampato, per questo la tecnica *Extrusion Printing* si è affermata maggiormente. *D-shape* ha creato una stampante che consente di ottenere elementi in materiale cementizio con

dimensioni di 6x6x6 m, mentre per materiale polimerico e sabbia si arriva a dimensioni di 4,5x2,5x1,0 m, certamente inferiori rispetto alle stampanti che prevedono la deposizione di materiale autoportante in *layers*.

1.4.3 Altre tecniche e processi per la Digital Fabrication

Secondo la classificazione proposta da Buswell e al. è possibile distinguere innanzitutto tre processi primari (Buswell et al. 2020): additivo, formativo e sottrattivo. Nonostante il focus riguardi tecniche di fabbricazione additiva, è giusto considerare anche le lavorazioni di tipo formativo e sottrattivo automatizzate che interessano lo stesso materiale, in quanto vengono spesso ibridate con la stampa 3D. Quindi si parla più ampiamente di *Digital Fabrication with Concrete (DFC)* (Roussel e Lowke 2022).

Ai paragrafi §1.4.1 e §1.4.2 sono stati descritti i processi di *Additive Manufacturing* standard più diffusi nel campo edilizio, esistono però molte altre possibilità e varianti che rendono l'AM e la digitalizzazione dei processi di costruzione sempre più completi e competitivi.

- Tramite percorsi di stampa non orizzontali e/o *layers* non planari è possibile espandere le possibilità in termini di forma della tecnologia. Per ottenere superfici curve rispetto all'asse verticale si può agire in due modi: il primo è definito come *gradual transition shotcrete 3D printing* e prevede la deposizione di strati la cui inclinazione viene modificata progressivamente, il secondo invece, definito come *inclined stacking of non-planar layers*, prevede la sovrapposizione di strati perfettamente orizzontali ma leggermente traslati.

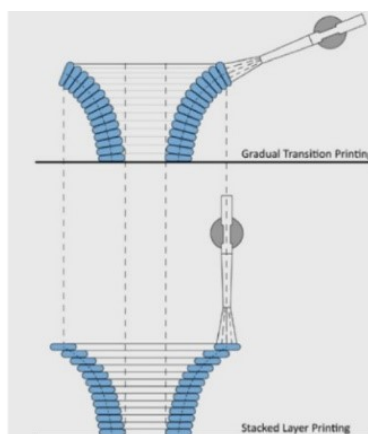


Figura 8. *Gradual transition printing e Inclined stacking layers printing (Lowke et al. 2024).*

Queste tecniche consentono di costruire geometrie funicolari che sfruttano la forma dell'elemento per un fine strutturale.

In genere per ottenere uno spessore dello strato variabile viene regolata la velocità di stampa, lasciando inalterato il flusso all'interno della stampante. Bisogna prestare attenzione al fenomeno per cui, a causa dell'inerzia della stampante, la velocità tende

a diminuire in curva; pertanto, o si accettano volumi di deposizione più grandi oppure, è necessario intervenire sul processo (Bos et al. 2022).

- Si è osservato che, per ottenere forme molto complesse, è possibile utilizzare il metodo per iniezione selettiva su letto di particelle. Si possono definire ulteriori processi:
 - *Injection 3DCP*, applicato in 3 varianti:
 - iniezione di calcestruzzo a grana fine in una sospensione liquida non-Newtoniana
 - iniezione di una sospensione indurente, poi rimossa, in calcestruzzo (*Topological Optimization*)
 - iniezione di calcestruzzo in calcestruzzo (per ottenere travi/solette rinforzate)
 - *Non-planar Granular Printing*: esplorata concettualmente tramite iniezione di una resina su un letto di sabbia.

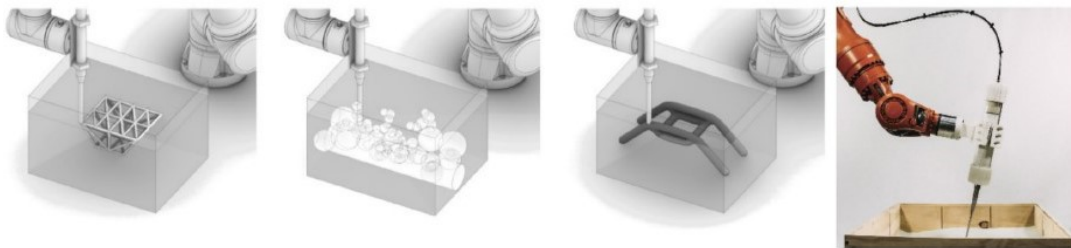


Figura 9. *Injection 3DPC e Non-planar Granular Printing (Lowke et al. 2024).*

- Talvolta la stampa di un elemento può interfacciarsi con una struttura esistente o richiedere la presenza di un supporto prefabbricato per ottenere la forma desiderata. Si riportano alcune tecniche interessanti:
 - *Add-On Printing*: si tratta di una tecnica estrusiva che consente di aggiungere componenti strutturali di rinforzo, anche di materiale differente, ad elementi esistenti. Ad esempio, uno studio dell'Università di *Braunschweig* mostra come sia possibile stampare delle nervature armate all'intradosso di una soletta prefabbricata, affinché ottimizzino il flusso delle forze. La sezione risulta variabile in relazione all'andamento del momento flettente, ne consegue quindi una diminuzione del materiale utilizzato.
 - Deposizione di intonaco tramite *Robotic Plaster Spraying (RPS)*: variando la velocità del braccio robotico, la distanza dalla superficie e la dimensione dell'ugello è possibile modificare lo spessore dell'intonaco e la forma in rilievo.
 - *Cover Layer Printing*: questa tecnica sfrutta la *Shotcrete 3D Printing* per la stampa dello strato superficiale volto a proteggere le armature e accrescerne la durabilità.

Queste tecniche possono portare benefici strutturali, di isolamento, durabilità, acustica ed effetti visivi, bisogna però valutare con attenzione la resistenza al distacco e la compatibilità chimico-fisica e meccanica (Lowke et al. 2024).

I processi di *Digital Fabrication with Concrete (DFC)* formativi richiamano per certi aspetti i metodi di costruzione tradizionali, in quanto il materiale viene gettato e non depositato *layer by layer*. Per automatizzare il processo di costruzione si adottano *Digital Casting Systems (DCS)*, ossia sistemi che consentono un controllo digitale in tempo reale del getto. In particolare il monitoraggio delle proprietà reologiche e del tasso di idratazione di un materiale *set-on-demand*, quindi con additivi *set-on-demand*, permette di utilizzare casseforme molto leggere e di incorporare facilmente l'armatura. Si distinguono tre tecnologie principali:

- *Smart Dynamic Casting*: sviluppata nel 2012 dall'Università di Zurigo (ETH) fonda le radici sul *vertical slipforming*, ossia la tecnica per la costruzione rapida di strutture verticali in calcestruzzo. Il materiale estruso, un calcestruzzo autocompattante con additivi acceleranti, passa attraverso una cassaforma mobile sospesa che ne determina la forma. Questa tecnica consente di ottenere un elemento verticale monolitico isotropico ad una velocità di 1 m/h, senza la sovrapposizione di *layers*, eludendo l'eventuale formazione di *cold joints* tra gli strati (Wangler et al. 2016). Quindi il suo utilizzo si adatta bene per elementi dalla forte verticalità come le colonne. Questa tecnica, col supporto di una cassaforma flessibile, è stata utilizzata per costruire i montanti di facciata rinforzati della casa *DFAB* a *Dübendorf*, in Svizzera (Buswell et al. 2022).

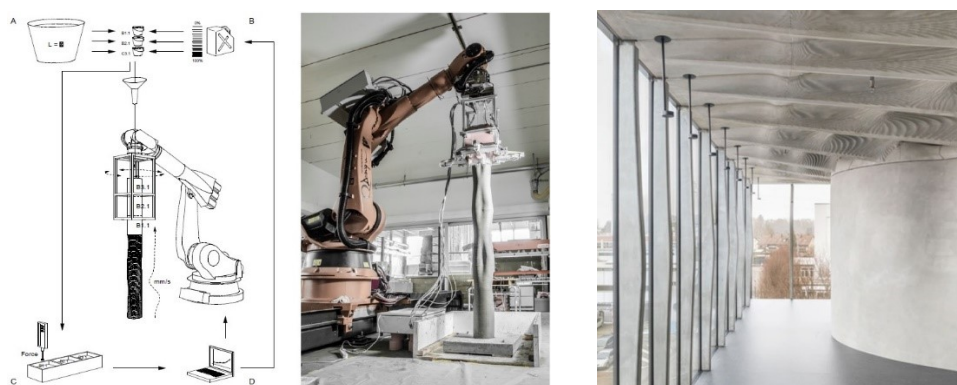


Figura 10. *Smart Dynamic Casting* (Wangler et al. 2016); Montanti di facciata *DFAB* (Buswell et al. 2022).

- *Thin formworks: Eggshell* utilizza una cassaforma ultrasottile ottenuta tramite *FDM*. Questa può assumere qualsiasi forma consentendo di realizzare elementi leggeri ottimizzandone la geometria. La lavorazione a controllo digitale permette di generare una pressione minima sulla cassaforma, il che consente spessori ridotti.
- *Admixture Controlled Digital Casting (ACDC)*: anche in questo caso si utilizzano casseforme leggere in tessuto, tavole di legno o carta.

- *Digital Trowelling*: tecnica che consente di ottenere un'ottima risoluzione superficiale. Quando il materiale si trova allo stato plastico è possibile modellarlo per ottenere superfici lisce o con *texture* particolari. È possibile ibridare questa tecnica con la stampa 3D: ad esempio si può stampare un elemento di dimensioni inferiori a quelle desiderato e successivamente aggiungere lo strato di materiale superficiale, tramite *digital trowelling*.

Il processo sottrattivo, infine, viene adottato per ottenere una superficie ad alta risoluzione dell'elemento finito.

- *Digital Milling*: anche questa tecnica viene utilizzata a seguito della stampa 3D. In questo caso però l'elemento stampato dev'essere di dimensioni maggiori, perché il processo prevede una rimozione di materiale.

Le tecniche *Digital Trowelling* e *Digital Milling* possono essere eseguite anche sul materiale indurito, è preferibile però intervenire nel *post-plastic* “*green state*” in modo da ridurre l'usura degli utensili, il consumo energetico e il calore generato (Lowke et al. 2024).



Figura 11. *Digital trowelling; Digital milling green-state; Digital milling: risultato finale a materiale indurito (Lowke 2024).*

Si tenga conto che solamente nell'ultimo anno sono stati pubblicati migliaia di articoli riguardanti le tecniche di *Additive Manufacturing* che utilizzano materiali cementizi e più in generale relativi alla *Digital Fabrication with Concrete (DFC)*, per cui ci si aspetta che negli anni a venire queste vengano ulteriormente ampliate e approfondite.

CAPITOLO 2: METODO PER ESTRUSIONE/DEPOSIZIONE

Ci si sofferma ora sulla tecnica più diffusa e con maggiori potenzialità in tema di *Additive Manufacturing* su larga scala: l'*Extrusion Printing (EP)*, basato sulla deposizione *layer by layer* di un materiale cementizio. Poiché l'interazione tra le macchine utilizzate nel processo di stampa e il materiale stampabile è di fondamentale importanza, è opportuno cominciare con un'analisi del mercato e dalle caratteristiche tecniche, per poi approfondire i *key problems* del processo di stampa.

2.1 Stampanti 3D: le macchine disponibili

Considerando le aziende più influenti nel mercato [9], le macchine più citate e le informazioni disponibili, è stata eseguita un'indagine volta a valutare le caratteristiche delle stampanti e quindi le possibilità e i limiti in fase di progettazione. Sebbene esistano molti altri modelli rilevanti, per garantire un quadro affidabile verranno riportate solo le stampanti di cui sono pubblicate online le specifiche tecniche.

2.1.1 Le due tipologie più diffuse

Le macchine adatte alla stampa per estrusione si suddividono in due categorie principali:

- *robotic-based*
- *gantry-based*

La stampanti *robotic-based* sono costituite da una base di sostegno, un braccio robotico ed una testa di stampa. È importante considerare l'ingombro della base che può limitare il raggio d'azione della macchina, e la lunghezza del braccio che determina un'area stampabile circoscritta in pochi metri.

Per costruzioni non eccessivamente estese e dalle forme complesse questa macchina è ideale, altrimenti è necessario riposizionare la macchina tramite gru ogni qualvolta si completi un settore dell'edificio, o utilizzare più bracci robotici connessi per ottimizzare e velocizzare la costruzione.

Le aziende specializzate nella progettazione e produzione di macchine robotiche propongono soluzioni con:

- bracci robotici su base fissa, utilizzati ad esempio per la realizzazione il ponte *Striatum* e il *Dubai Office*;
- bracci robotici su binario, impiegati per prove, ricerca, prototipazione e prefabbricazione, come nel progetto *Milestone House* o, eccezionalmente, per costruzioni in cantiere;

- bracci robotici su cingoli, specifici per la costruzione in situ.

I progetti citati vengono trattati al paragrafo §2.4.2.

Tra le macchine più diffuse di questa tipologia: *MAXI (Constructions-3D)*, *CyBe R/RC/RT 3DP (CyBe)*, *Frank (ApisCor)*.



Figura 12. Stampante robotic-based (Frank) [10].

Con la definizione del *Contour Crafting* nasce anche la prima stampante *gentry-based* che utilizza un sistema a più portali e una testa di stampa montata su una gru aerea per costruire, *layer by layer*, le pareti.

Il metodo *EP*, impiegato per la realizzazione di progetti complessi su larga scala, richiede l'utilizzo di una stampante *gantry-based*, o meglio spesso risulta la scelta più efficiente in termine di tempi e organizzazione del cantiere. Tuttavia, va considerato che il trasporto di un braccio robotico risulta molto più semplice, mentre l'installazione di una struttura a portale in cantiere richiede tempi di *setup* significativamente più lunghi. Quest'ultima prevede movimenti simili a quelli di un carroponte, in cui la testa di stampa ha la possibilità di muoversi lungo gli assi x, y e z senza eccessive limitazioni relativamente all'area stampabile.

Tra le macchine più diffuse di questa tipologia: *BOD2* e *BOD3 (COBOD)*, *Vulcan II (ICON)*, *CyBe GR 3DP (CyBe)*



Figura 13. Stampante gantry-based (BOD3) [11].

2.1.2 Altre tipologie di stampanti: versioni ibride e ricerche

Esistono ulteriori macchine progettate per la tecnica *Extrusion Printing* ed in particolare per ampliare il campo d'azione verso edifici più grandi.

Esistono soluzioni di stampante robotica in cui la testina sospesa viene movimentata da cavi.

L'azienda italiana *WASP* propone due soluzioni di stampanti su larga scala: *Crane WASP* che utilizza un telaio in acciaio a cui si collega un braccio girevole (gru), e *Delta WASP 3MT CONCRETE*, una soluzione più compatta che sfrutta delle cinghie indeformabili caricate in acciaio per movimentare la testa di stampa e formare componenti edilizi. La dimensione massima degli aggregati nei materiali compatibili con queste stampanti è rispettivamente 4 mm e 1 mm.

Un'altra soluzione interessante è il processo *CONPrint 3D* dell'Università Dresda. Nasce con l'obiettivo di conformarsi alle normative architettoniche, ai codici di progettazione esistenti, alle classi di calcestruzzo e ai vincoli economici del settore. Per rispettare questi paletti si prevede l'estrusione di strati di grandi dimensioni cosicchè il materiale stampabile possa contenere aggregati di dimensioni maggiori (fino a 10mm), con minor percentuale di cemento. Questo può limitare il carattere estetico e innovativo dell'*Additive Manufacturing* dando priorità ad aspetti funzionali e strutturali. Il processo *CONPrint 3D* prevede l'utilizzo di una pompa per calcestruzzo montata su un camion ed è indicato soprattutto per strutture dagli angoli acuti e pareti rettilinee (Mectcherine et al. 2019).

L'azienda statunitense *ICON* ha progettato *Phoenix*: una stampante di tipo *crane-based*, simile a quella adottata nel sistema *CONPrint 3D*, capace di superare addirittura i 20 m di altezza.

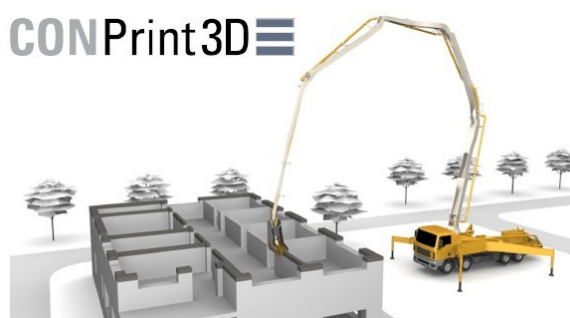


Figura 14. Processo di stampa *CONPrint* (Mectcherine et al. 2019).

È evidente che la stampa 3D tramite Extrusion Printing per edifici di grandi dimensioni richieda un approfondito studio preliminare sulle sollecitazioni ambientali. Di conseguenza, è necessario adottare tecnologie adeguate per gestire aspetti critici come l'instabilità del braccio robotico.

I produttori di stampanti 3D sviluppano spesso software specifici per lo *slicing* del modello tridimensionale, consentendo di trasferire le informazioni del modello *CAD*, tradotte in movimenti della stampante, alla testa di stampa (vedi §1.3).

Visto l'elevato grado di automazione raggiungibile, le aziende produttrici sostengono che il numero di operatori sufficienti in cantiere vari generalmente da 2 a 6.

Le stampanti attualmente in commercio possono raggiungere velocità di movimento molto elevate. Ad, la *BOD2* di *COBOD* è in grado di operare a una velocità massima di 1000 mm/s. Tuttavia, è importante sottolineare che, senza adeguati sistemi di sicurezza, processi di

stampa che superano i 250 mm/s possono risultare pericolosi, considerando le proprietà reologiche del materiale e la sicurezza in cantiere.

Un altro aspetto fondamentale riguarda le tipologie e le dimensioni degli ugelli utilizzati. Spesso non vengono riportate specifiche a riguardo in quanto si tratta di un elemento molto variabile e flessibile; deve comunque essere in grado di soddisfare le sezioni dei *layers* definite nel progetto, che generalmente variano tra 10-50 mm in altezza e 30-70 mm in larghezza. Fatta eccezione per il processo *CONPrint 3D* che raggiunge 150 mm.

STAMPANTE 3D	AZIENDA	TIPOLOGIA	LUNGHEZZA [m]	LARGHEZZA [m]	ALTEZZA [m]	VELOCITÀ [mm/s]	GRANULOMETRIA MAX [mm]	NOTE AGGIUNTIVE
BOD2	COBOD	GANTRY	50,52	14,6	8,1	250 (1000)	8	a settembre 2024 è stata lanciato il modello BOD3 finalizzato a automatizzare interi insediamenti urbani.
VULCAN II	ICON	GANTRY	∞	11,6	3,2	127-254	8	lunghezza infinita in quanto alla base sono presenti rotaie
CYBE GR 3DP	CYBE	GANTRY	10	7	4	250 (500)	10	-
FRANK	APISCOR	ROBOTIC ARM	18,288 (raggio)	18,288 (raggio)	3,048	-	8-10	Braccio robotico fisso e facilmente trasportabile
CYBE R 3DP	CYBE	ROBOTIC ARM	2,65 (raggio)	2,65 (raggio)	3,2	250 (500)	8	esiste anche la versione su cingoli e su rotaie (prefabbricazione e ricerca) per ampliare l'area di stampa
MAXI	CONSTRUCTIONS-3D	ROBOTIC ARM	12,25 (raggio)	12,25 (raggio)	7	250	10	-
DELTA WASP 3MT CONCRETE	WASP	A CINGHIE INDEFORMABILI	1	1	1	200	1	Dimensioni molto ridotte, quindi per componenti prefabbricati
CRANE WASP	WASP	TELAIO+GRU	8,2 (raggio)	8,2 (raggio)	3,2	200	4	Possibilità di connessione tra diversi moduli per ampliare l'area di stampa.
CONPrint 3d	UNIVERSITÀ DI DRESDA	POMPA + CAMION	-	-	-	165	10	strati di dimensioni maggiori rispetto alle altre tecniche

Figura 155. Specifiche tecniche di alcune tra le principali stampanti in commercio [3] [12] [11] [13] [14] [10] [15] (Mechtcherine et al. 2019).

Le dimensioni definite si riferiscono alle misure del volume massimo stampabile del modello standard (non sono riportate le dimensioni delle macchine). Molte aziende offrono la possibilità di modificare le dimensioni delle stampanti sulla base delle richieste del progetto.

Le macchine in commercio hanno raggiunto negli anni un livello di accuratezza e precisione molto alto, rientrando ampiamente nelle tolleranze richieste nell'industria delle costruzioni. Bisogna però tenere conto delle caratteristiche del materiale depositato e delle eventuali deviazioni dimensionali, con particolare attenzione a quelle in altezza. In alcuni casi, tali

deviazioni possono essere dell'ordine di 1-5 mm su elementi di 3-4 m (come nel ponte *Striatus* e *Dubai Office*). In altri casi invece le deviazioni sono più significative tanto da richiedere la stampa di un ulteriore *layer* per compensare la deviazione (come nella *Holstebro House*) (Bos et al. 2022).

2.2 Il materiale stampabile

Già nelle prime ricerche condotte da *Khoshnevis* veniva definito un *mix design* adatto alla tecnica *Contour Crafting*: Cemento *Portland* plastico idraulico di tipo II (4309,13 g), Sabbia (4762,72 g), Plastificante (362,874 g), Acqua (2177,24 g). Si nota immediatamente che la dimensione degli aggregati è piuttosto contenuta e che sono presenti additivi (Hwang et al. 2005).

Si è visto che la norma ISO/ASTM52900:2021 distingue sette categorie di processi di *AM*. I singoli approcci differiscono notevolmente per materiali, attrezzature e fasi di produzione, ma condividono un aspetto cruciale: la stretta interazione tra materiale e macchina lungo l'intero processo. Pertanto, padroneggiare questa interconnessione è un requisito essenziale per definire processi efficienti e garantirne il controllo.

La norma ISO/ASTM 52939:2023 definisce i seguenti termini chiave relativi al materiale stampabile:

- *Printability*: “Ability of the material to be easily delivered to the print head, processed by the print head, e.g. extrudability, and meet consistent layer shape stability, buildability requirements, and if applicable pumpability”.
- *Extrudability*: “Ability of the material to smoothly be ejected through the printing nozzle without inducing any blockage of the conduits or significant damage to the material quality”.
- *Buildability*: “Ability of a print to preserve vertical and lateral stability under increasing loads coming from superposed/subsequent layers with controlled deformation”.
- *Pumpability*: “material paste criterion that is related to the concrete extrusion and workability, as it is important to ensure that the materials have a continuous easy-flowing behaviour from the source to the printing material deposition device/nozzle. Pumpability ensures the materials can be pumped easily and continuously without creating clogging issues inside the delivery system”.

Nonostante esistano diverse sperimentazioni alternative, in questa sezione ci si concentra sui materiali stampabili a base cementizia.

Per caratterizzare un materiale stampabile, è innanzitutto necessario considerare le fasi del processo di stampa. Nel metodo per estrusione/deposizione (*EP*), il processo si articola nei seguenti passaggi:

1. Il materiale secco viene depositato in un silos

2. Miscelazione con acqua ed eventuali additivi in un apposito *mixer*
3. La miscela ottenuta, malta cementizia, viene pompata nel sistema di stampa. Affinchè non si generino attriti eccessivi all'interno del tubo di stampa è necessario che il materiale non sia eccessivamente viscoso.
4. Una volta raggiunta la testa di stampa, il materiale viene depositato in *layers* sovrapposti.

Alcuni processi prevedono l'utilizzo di una tramoggia direttamente connessa alla testa di stampa, evitando così la fase di pompaggio del materiale; tuttavia questa soluzione risulta limitante.

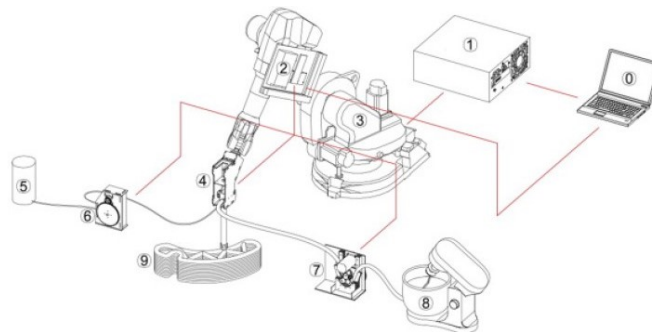


Figura 166. Rappresentazione schematica del sistema di stampa (Perrot 2019).

La definizione del materiale ideale per i processi di *Additive Manufacturing* applicati su larga scala è ancora in fase di studio. Nonostante ciò è possibile trovare in commercio già diverse proposte, come premiscelati secchi che differiscono per molti aspetti dal calcestruzzo tradizionale. Non è corretto parlare di “calcestruzzi” poiché i prodotti in commercio sono miscele confezionate asciutte costituite da cemento e aggregati di piccole dimensioni (generalmente sabbia con dimensioni inferiori a 8 mm). A questi, come detto, possono essere aggiunti in fase di miscelazione additivi superplasticizzanti ed acqua per garantire una sufficiente *pumpability*. Successivamente, in corrispondenza della testa di stampa, si possono aggiungere additivi acceleranti per velocizzare l'indurimento.

La scelta di aggiungere acceleranti solamente alla fine del processo di pompaggio è legata al fatto che i requisiti reologici ottimali del materiale durante il pompaggio sono in competizione con quelli necessari dopo la deposizione dello strato. Infatti un materiale che in poco tempo sviluppa una struttura interna può risultare deleterio durante la fase di pompaggio.

Uno studio condotto da *De Schutter e Feys* ha evidenziato come brevi interruzioni durante la fase di pompaggio possono portare a conseguenze molto importanti. Ad esempio, interrompendo il flusso per 20 minuti per una miscela con $A_{thix} = 0,3 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ (tasso di strutturazione), si osserva un aumento della perdita di pressione del 50%. Quindi anche applicando pressioni molto elevate (35,000 kPa) non è possibile riattivare il processo (De Schutter et al. 2016).

I materiali cementizi sono considerati fluidi omogenei, per i quali sono fondamentali due proprietà: la tensione di snervamento, ovvero la tensione che deve essere superata per passare dal comportamento elastico al flusso, e la viscosità, che rappresenta la resistenza ad un aumento della velocità di flusso (Sonebi et al. 2024).

Si definiscono due tipi di tensioni di snervamento:

- Tensione di snervamento statica, $\tau_{0,s}$: è legata al taglio necessario per passare dallo stato solido a fluido, consentendo così il flusso del materiale.
- Tensione di snervamento dinamica, $\tau_{0,d}$: è responsabile dell'arresto del flusso, quindi per passare da fluido ad solido. Pertanto $\tau_{0,s} \geq \tau_{0,d}$.

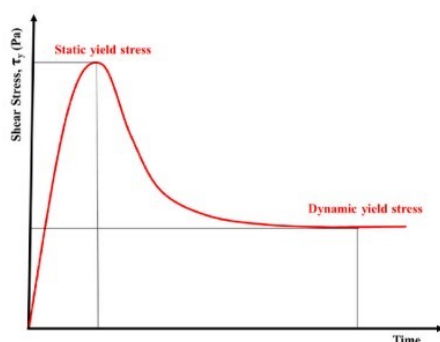


Figura 177. Comportamento reologico del materiale tissotropico a una velocità di taglio costante (Zhang et al. 2021).

I materiali stampabili devono quindi presentare proprietà reologiche simili a quelle dei calcestruzzi autocompattanti, in termini di viscosità e tensione di snervamento (De Schutter et al. 2018).

La stabilità di forma richiesta durante la fase di deposizione del primo *layer* è determinata dalla tensione di snervamento, che dev'essere in grado di sostenere le sollecitazioni gravitazionali. Successivamente, con l'aggiunta di ulteriori *layers*, la tissotropia del materiale diventa fondamentale. Quest'ultima rappresenta la diminuzione nel tempo della viscosità quando lo sforzo di taglio o la velocità di taglio aumenta, seguita da un recupero graduale della viscosità quando lo sforzo o la velocità di taglio vengono rimossi o ridotti (Schmidt e Link 2024).

Di particolare interesse è la capacità da parte del materiale stampabile di costruire una struttura interna quando si trova in stato di riposo (Roussel 2018).

Si vedrà in seguito che un rapido indurimento del materiale non necessariamente rappresenta un aspetto positivo, infatti, affinché i *layers* leghino (*bonding*) tra loro creando una struttura monolitica, è necessario che gli strati aderiscano perfettamente. La formazione di *cold joints* rappresenterebbe una grossa vulnerabilità dell'elemento stampato, soprattutto se sollecitato da forze orizzontali (De Schutter et al. 2018).

2.2.1 Modelli reologici

Nelle tecniche di stampa quali *FDM* e fotopolimerizzazione, che utilizzano rispettivamente polimeri e resine, viene sfruttata l'esposizione selettiva a laser o raggi UV per indurre un cambiamento di fase. Nel caso del materiale cementizio questi processi non hanno effetto in quanto il materiale non presenta la stessa sensibilità ai cambiamenti di temperatura (Perrot 2019). Di conseguenza, è necessario concentrarsi sulle caratteristiche reologiche del materiale.

La reologia è un ramo della meccanica che studia il flusso e la deformazione delle sostanze. Tutti i modelli reologici dei materiali pratici possono essere descritti utilizzando tre modelli reologici fondamentali: il modello solido di *Hooke*, il modello solido di *St. Venant* e il modello liquido di *Newton*.

Partendo dalla legge di *Hooke*, si può ottenere una formula per la tensione di snervamento in relazione alle proprietà fisiche del materiale:

$$\tau = G \cdot \gamma$$

dove G è il modulo di elasticità tangenziale e γ il coefficiente di scorrimento angolare.

Differenziando rispetto al tempo si ottiene:

$$\frac{d\tau}{dt} = G \frac{d\gamma}{dt}$$

Maxwell sostiene che lo sforzo diminuisca nel tempo con una certa velocità. Tale velocità non è solo proporzionale allo sforzo ma dipende anche dalle proprietà del corpo. Pertanto, la velocità di variazione dello sforzo può essere espressa come segue:

$$\frac{d\tau}{dt} = G \frac{d\gamma}{dt} - \frac{\tau}{T}$$

dove T è il periodo di rilassamento relazionato alla viscosità.

Quando $t = t_0$ e $\tau = \tau_0$, integrando l'equazione si ottiene:

$$\tau = GT \frac{d\gamma}{dt} + \tau_0 e^{-\frac{t}{T}}$$

Moltiplicando da entrambi i lati per y , la distanza del liquido nei due strati paralleli, si ottiene:

$$\tau y = GT y \frac{d\gamma}{dt} + y \tau_0 e^{-\frac{t}{T}}$$

Si definisce la velocità di deformazione v come:

$$v = y \frac{d\gamma}{dt} = \frac{dx}{dt}$$

Impostando $GT = \eta$ il coefficiente di viscosità plastica, e derivando rispetto a y si ottiene:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dt} + \tau_0 e^{-\frac{t}{T}} \quad (1)$$

Questa formula, che include i tre parametri principali (viscosità, tensione di snervamento e tempo di rilassamento), sarà utile per individuare i modelli reologici dei materiali stampabili (Deng et al. 2007).

Ora si definisce nel dettaglio il comportamento del materiale nelle diverse fasi di stampa.

2.2.2 Comportamento del materiale nelle fasi di stampa

2.2.2.1 Fresh state – modelli reologici

In questa prima fase il materiale cementizio ha un comportamento elastico-viscoplastico, fluisce solo quando viene applicata una sollecitazione maggiore di un valore critico, noto come tensione di snervamento.

Per studiare questa fase è possibile utilizzare il criterio plastico di *Von Mises*:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6 \cdot (\tau_{12}^2 + \tau_{13}^2 + \tau_{23}^2)}$$

$$\sigma_{eq} \leq \sigma_0$$

dove σ_{ij} e τ_{ij} sono i componenti del tensore delle tensioni, σ_{eq} la tensione equivalente di *Von Mises* e σ_0 la tensione plastica di snervamento.

Se il criterio non è verificato il comportamento è solido-elastico, quindi governato dai moduli elastici E e G ; questi consentono di stimare le deformazioni del materiale, nello specifico del primo *layer*, sotto l'effetto del peso proprio.

$$E = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_c} \quad G = \frac{\tau_0}{\gamma_c}$$

Con ε_c e γ_c rispettivamente la deformazione critica assiale e a taglio.

Si osserva che, col passare del tempo, la tensione di snervamento e il modulo elastico tangenziale G crescono, mentre γ_c diminuisce, rendendo il materiale più resistente (maggiore tensione di snervamento) e più rigido (maggiore modulo elastico) (Roussel 2018).

Se il criterio è verificato il comportamento è fluido-viscoso. I fluidi in flusso laminare possono essere descritti tramite un modello a piastre in cui una piastra è fissa e l'altra viene spostata ad una velocità v_i , generando un gradiente di velocità di taglio dv/dh tra le due.

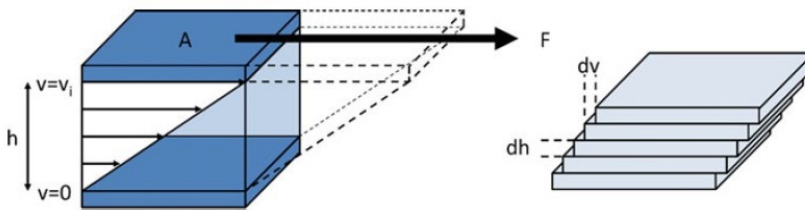


Fig. 2.2 Plate model for fluids and laminar deformations

Figura 188. Modello a piastre per fluidi e deformazioni laminari (Schmidt e Link 2024).

Si definisce lo sforzo di taglio tra i piani di taglio τ :

$$\tau = \frac{F}{A}$$

dove τ è la tensione di taglio (Pa), F è la forza (N) e A è l'area del piano di taglio (m²).

La derivata della funzione di velocità di deformazione rispetto all'altezza di deformazione è la velocità di taglio (*shear rate*) $\dot{\gamma}$:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dh}$$

dove $\dot{\gamma}$ è la velocità di taglio (s^{-1}), v è la velocità di deformazione (m/s) e h è l'altezza di deformazione (m).

Il coefficiente che descrive la resistenza di un fluido alla deformazione di taglio è la viscosità dinamica η (Pa·s):

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

I fluidi che seguono quest'ultima equazione, con η costante, sono chiamati fluidi newtoniani e iniziano a fluire immediatamente quando viene applicato carico. Essi mostrano una relazione lineare tra la tensione di taglio τ e la velocità di taglio $\dot{\gamma}$, $\tau = \eta\dot{\gamma}$. Esempi tipici di fluidi newtoniani sono l'acqua, molti oli e gas.

Al contrario, le sospensioni costituite da una fase liquida e una solida, come il calcestruzzo, tipicamente non fluiscono immediatamente all'applicazione di uno sforzo di taglio (Schmidt e Link 2024).

Il comportamento di flusso di taglio dei materiali cementizi è solitamente caratterizzato dai modelli di *Bingham* e *Herschel-Bulkley*, validi solo quando il materiale non è strutturato, quindi i legami tra i grani sono rotti. Richiamando l'equazione (1), con $\eta \neq 0$, $\tau_0 \neq 0$ e $t = \infty$:

$$\tau = \tau_0 + \eta \frac{dv}{dt} \quad (2)$$

Considerando che nel caso del calcestruzzo, quando si verificano alte velocità di taglio, le differenze tra viscosità apparente η (dinamica) e viscosità plastica μ_p sono minimizzate, si può definire lo sforzo di taglio con la relazione lineare di *Bingham*:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma}$$

dove τ è lo shear stress, τ_0 la tensione di snervamento (Pa), $\dot{\gamma}$ lo shear rate, μ_p la viscosità plastica (Pa s).

Tuttavia, è importante considerare che molti fluidi non mantengono la viscosità costante. Per questi fluidi si considera la relazione di *Ostwald-de-Waele*:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n$$

dove K è il fattore di consistenza ($Pa s^n$) e n l'indice adimensionale di consistenza.

- Nei fluidi con indice $n < 1$ la viscosità diminuisce con l'aumento della velocità di taglio, poichè le particelle si orientano nella stessa direzione del flusso (*rheo-fluidifying behavior*).
- Nei fluidi con indice $n > 1$, al contrario, la viscosità aumenta con l'aumento della velocità di taglio; questo è dovuto alla diversa inerzia tra le fasi eterogenee. Risulta

complicato trovare un processo in cui questa caratteristica possa essere vantaggiosa (*rheo-thickening behavior*).

Dalla relazione di *Ostwald-de-Waele* deriva la legge di *Herschel-Bulkley*:

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$$

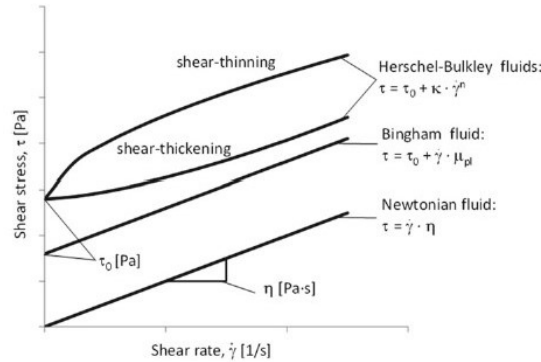


Fig. 2.4 Qualitative flow curves following the aforementioned flow laws, see Eqs. (2.5, 2.6), and (2.7) from [16]

Figura 199. Curve di flusso qualitative secondo le leggi di flusso menzionate (Schmidt e Link 2024).

Il coefficiente di viscosità è una costante nell'equazione reologica sia per il liquido di *Newton* che per il liquido di *Bingham*, pertanto si ottiene una curva di flusso lineare.

2.2.2.2 Fresh state – fase di pompaggio

Nel valutare il comportamento del materiale stampabile durante la fase di pompaggio si può considerare il modello di flusso di un liquido di *Bingham* in un tubo.

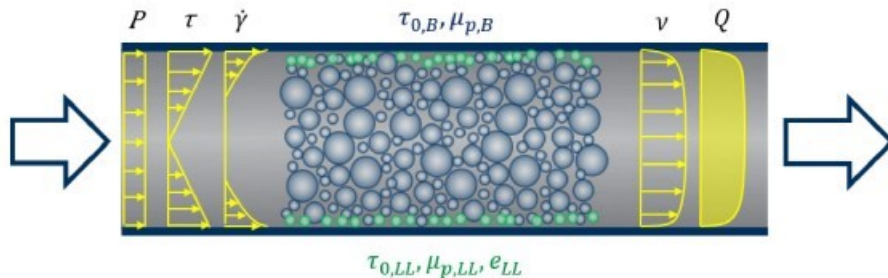


Figura 20. Profili di pressione P , shear stress τ , shear rate $\dot{\gamma}$, velocità v e portata Q del flusso di calcestruzzo all'interno di un tubo (Mechtcherine et al. 2020).

Durante la fase di pompaggio il materiale allo stato fluido si trova all'interno di un condotto e inevitabilmente si genera attrito con le superfici. È quindi fondamentale che in questa prima fase la tensione di snervamento e la viscosità del materiale siano le più basse possibili.

Risulta importante studiare la tribologia del materiale, ovvero valutare la forza d'attrito agente e l'eventuale formazione di un *layer* lubrificante. Infatti, complice anche l'eterogeneità dei materiali cementizi, con una frazione di grani ridotta, è possibile che si formi uno strato a contatto con le superfici del condotto a bassa viscosità, facilitando così il pompaggio e l'estrusione. Si definisce *shear-induced particle migration (SIPM)* il

meccanismo che, influenzato dalle forze di taglio, porta alla formazione del *layer* lubrificante (Mechtcherine et al. 2020).

Le miscele a basso contenuto d'acqua, oltre a presentare elevate tensioni di snervamento e alta viscosità plastica, difficilmente vedono la formazione di uno strato lubrificante o comunque risulterebbe eccessivamente viscoso.

Nella fase di pompaggio si possono definire due modelli di flusso opposti:

- il *plug flow*, ossia il flusso a tampone, è un modello del profilo di velocità di un fluido che scorre in un tubo, in cui il taglio è localizzato in una zona molto ristretta di interfaccia col tubo, mentre la maggior parte del materiale non è soggetta a taglio, formando la *plug zone*. Questo modello è applicabile a miscele con elevata tensione di snervamento.
- "flusso libero" si associa a un flusso per taglio dovuto alla bassa tensione di snervamento del calcestruzzo (Roussel 2018).

Bisogna considerare che in corrispondenza delle superfici si generano forze d'attrito F_{fr} , rendendo necessaria una forza di spinta superiore affinché il materiale possa scorrere. Una forza di pompaggio eccessivamente intensa non è ideale, è preferibile favorire la formazione di un *layer* lubrificante per ridurre la viscosità (dell'ordine di pochi Pa·s).

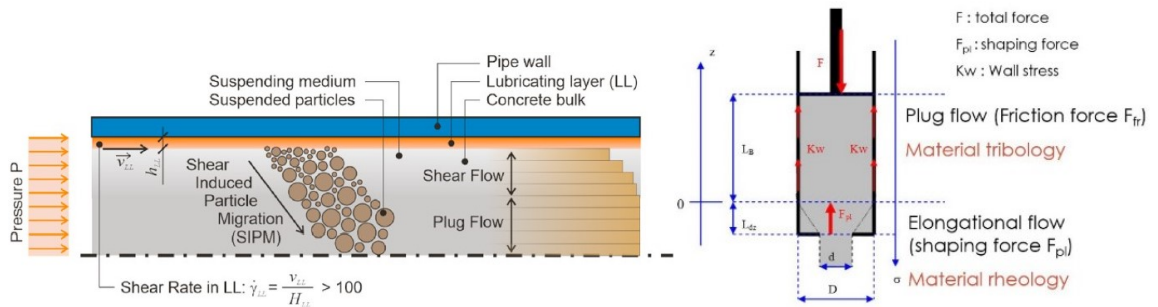


Figura 211. Illustrazione dello strato lubrificante: flusso a tappo e flusso per taglio durante il pompaggio del calcestruzzo, con raffigurata la migrazione delle particelle indotta dal flusso (Perrot et al. 2021); Distribuzione della forza in un'estrusione assialsimmetrica mediante pistone (Perrot 2019).

Kaplan ha validato due modelli analitici che correlano la pressione ΔP e la portata Q_P , utilizzando i parametri di Bingham per la miscela e parametri simili a quelli di Bingham per lo strato lubrificante.

La prima equazione è valida per il flusso a tampone/*plug flow*:

$$\Delta P = \frac{2L_{pipe}}{R_{pipe}} \left[\frac{Q_P \cdot \mu_i}{\pi R_{pipe}^2 k} + \tau_{0,i} \right]$$

La seconda equazione descrive il flusso per taglio, considerando le proprietà sia del calcestruzzo che dello strato lubrificante:

$$\Delta P = \frac{2L_{pipe}}{R_{pipe}} \left[\frac{\frac{Q_P}{\pi R_{pipe}^2 k} - \frac{R_{pipe}}{4\mu} \tau_{0,i} + \frac{R_{pipe}}{3\mu} \tau_0}{1 + \frac{R_{pipe}}{4\mu} \mu_i} \mu_i + \tau_{0,i} \right]$$

In prossimità dell'ugello si assiste ad un restringimento della sezione, quindi è richiesta una pressione di estrusione P_{ext} superiore. *Benbow* e *Bridgwater* hanno definito una formula per prevedere la pressione aggiuntiva necessaria a estrarre il materiale:

$$P_{ext} = 2(\sigma_0 + a_0 \cdot V_{ext}^{no}) \ln\left(\frac{D_{ext}}{d_{die}}\right) + 4 \frac{L_{die}}{d_{die}} \cdot (\tau_{0,i} + a_1 \cdot V_{ext}^m)$$

con σ_0 la tensione di snervamento in allungamento, $\tau_{0,i}$ la tensione di snervamento per taglio interfaciale, d_{die} il diametro dello stampo, D_{ext} il diametro dell'estrusore, V_{ext} velocità media del materiale, a_0 e a_1 sono coefficienti empirici usati per descrivere il comportamento dipendente dalla velocità di flusso dei materiali (Perrot et al. 2021).

Viene definita “*dead zone*” la porzione conica in cui il materiale rimane bloccato prima dell'uscita. Nel caso di miscele accelerate bisogna prestare attenzione in quanto potrebbero indurirsi formando un blocco per il processo.

La localizzazione delle forze di taglio è impedita qualora l'ugello di estrusione comporti una contrazione, una pompa a vite o una vite di miscelazione; in questi casi, infatti, il materiale viene “tagliato”.

Si possono quindi distinguere due casi, determinati dalla reologia del materiale stampabile, dalla portata e dalla geometria dell'ugello.

Nel primo il materiale estruso è “non tagliato” per la formazione del *layer* lubrificante, risultando già flocculato e con una tensione di snervamento sufficientemente elevata (alcune centinaia di Pa). Una volta estruso, assume la forma dell'ugello senza subire deformazioni significative. Infatti, se la tensione di snervamento del materiale è superiore allo stress indotto dalla gravità, lo strato di materiale cementizio non subirà deformazioni dopo la deposizione, dando origine a un “mattoncino rigido infinito” (Mechtcherine et al. 2020). Questo scenario si verifica quando il materiale viene collocato dolcemente e lentamente; in caso contrario, è necessario considerare effetti aggiuntivi.

Nel secondo caso il materiale viene “tagliato” prima della deposizione e inizia a sviluppare una struttura e la tensione di snervamento solo dopo l'estrusione. In questo processo la forma del *layer* è determinata dalla competizione tra la diffusione indotta dalla gravità e la flocculazione (Roussel 2018). In questo caso i valori della tensione di snervamento e della viscosità plastica sono di qualche decina di Pa e qualche decina di Pa·s (Kaplan et al. 2005). Nel contesto della *Additive Manufacturing* con materiali cementizi, la maggior parte dei flussi di estrusione si colloca tra questi due approcci asintotici di deposizione (Mechtcherine et al. 2020).

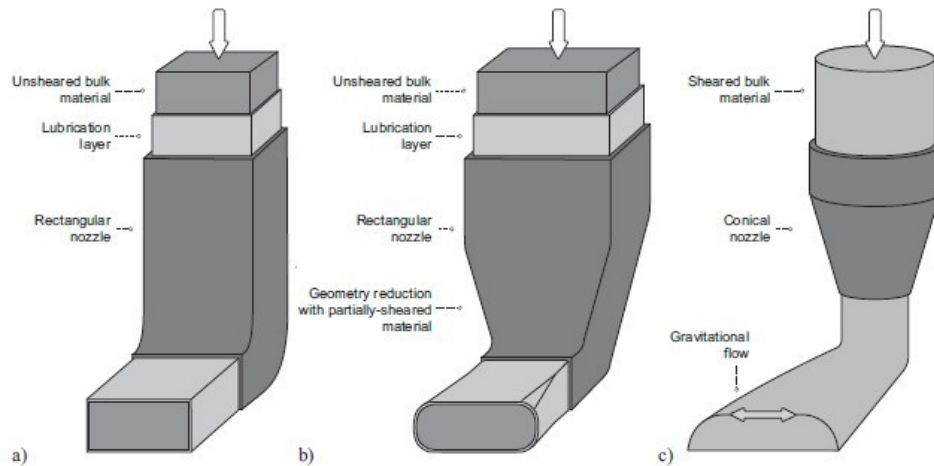


Figura 222. a) e c) Regimi asintotici di deposizione del materiale mediante estrusione; b) Esempio più realistico di estrusione: materiale sufficientemente rigido passante attraverso un ugello con riduzione geometrica (Mechtcherine et al. 2020).

Quindi, la forma finale dello strato dipenderà dalla tensione di snervamento del materiale, dalla sezione trasversale dell'apertura dell'ugello e dallo spazio tra l'ugello e gli strati stampati, aspetti che devono essere valutati caso per caso. Lo spazio tra l'ugello e la base di stampa può provocare forze di trazione e di compressione, rispettivamente nei casi di sotto-estrusione, quando la portata di estrusione è inferiore a $S \cdot v$, e di sovra-estrusione, quando la portata di estrusione è superiore a $S \cdot v$. Con S la sezione dell'ugello e v la velocità di movimento.

Per garantire la formazione del materiale è necessario superare una *shaping force* F_{pl} . Quindi complessivamente la forza di pompaggio risulta:

$$F = F_{fr} + F_{pl}$$

La pressione che si verifica in prossimità dell'ugello dev'essere moderata, in caso contrario l'acqua contenuta nel materiale viene drenata, causando l'essiccazione del materiale e riducendo l'adesione tra gli strati depositati. Se il tempo di drenaggio è inferiore a quello di estrusione, è probabile che si verifichi segregazione, inducendo l'indurimento del materiale. Questo fenomeno può causare difetti superficiali o, nel peggiore dei casi, l'interruzione del flusso. Pertanto, garantire una portata di estrusione sufficiente aiuta a ridurre l'effetto del drenaggio (Mechtcherine et al. 2020).

2.2.2.3 Fase di sviluppo

Il materiale stampabile nella maggior parte del processo si trova a riposo, per cui è importante studiare il comportamento visco-plastico, ma ancor più quello elasto-plastico (Roussel 2018).

Nel corso delle diverse fasi il materiale stampabile subisce cambiamenti reologici, fisici e chimici. In particolare, la formazione progressiva di legami tra le particelle conferisce una maggiore rigidità.

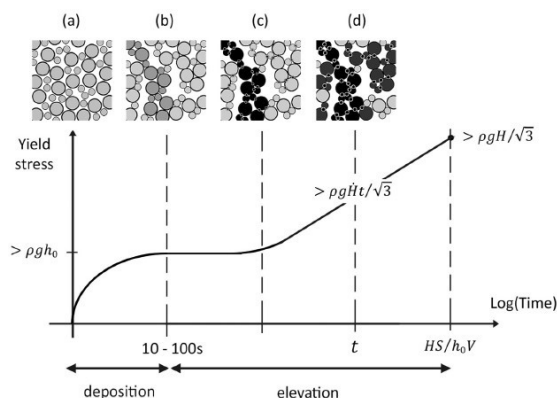


Figura 233. Reti di particelle di cemento che interagiscono: evoluzione dello sforzo di snervamento e requisiti target (Roussel 2018).

Inizialmente il materiale è completamente destrutturato a causa del mescolamento intenso all'interno del *mixer*, quindi le particelle di cemento risultano disperse.

Successivamente, in condizioni statiche, a causa delle forze colloidali attrattive, i grani del cemento si flocculano generando un reticolo che conferisce più resistenza e rigidità (crescono i moduli elastici e la tensione di snervamento). Questo processo può essere favorito da additivi flocculanti organici o nano-particelle incorporate a livello della testa di stampa (Roussel 2018).

Nell'arco di tempo che porta all'indurimento del materiale, quindi contemporaneamente alla flocculazione, si assiste alla formazione di legami CSH nei punti di contatto tra i grani (nucleazione di idrati) ed un conseguente aumento della tensione di snervamento e del modulo elastico (Perrot et al. 2016).

Le interazioni colloidali vengono rinforzate tramite nucleazione, diventando interazioni ad alta energia che possono essere considerate come "ponti solidi". Quindi, con l'aumento delle dimensioni e del numero di ponti idrati tra le particelle di cemento, durante la cosiddetta fase di strutturazione, si ha un ulteriore aumento del modulo elastico e della tensione di snervamento.

La fase di strutturazione può essere accelerata e amplificata aumentando la quantità di superfici di nucleazione disponibili nel sistema e/o accelerando la reazione chimica stessa (Roussel 2018). Per raggiungere questo obiettivo si può incorporare, a livello della testa di stampa, un acceleratore chimico in grado di modificare l'equilibrio silicato/alluminato e accelerare una di queste reazioni di idratazione, oppure, come già visto, un flocculante organico che promuove la formazione di legami tra particelle colloidali. In alternativa il materiale può essere miscelato con un legante alternativo, come sostanze a base di alluminato. La prima strategia (dispersione) prevede l'uso di quantità di prodotto in percentuali molto basse, mentre la seconda (miscelazione) richiede spesso quantità superiori al 10% in volume (Mechtcherine et al. 2020).

È interessante stimare la lunghezza di diffusione caratteristica, ossia la distanza media percorsa da una particella di aggregato durante il processo di diffusione:

$$L = \sqrt{D \cdot t}$$

con D coefficiente di diffusione e t il tempo.

Il coefficiente di diffusione può essere espresso tramite l'equazione di *Stokes-Einstein*:

$$D = \frac{kT}{6\pi r\mu}$$

dove k è la costante di Boltzmann, T la temperatura in *Kelvin*, r la dimensione della molecola dell'acceleratore e μ è la viscosità del solvente.

Si ottengono lunghezze di diffusione caratteristiche comprese tra alcuni micrometri e alcune centinaia di micrometri. Pertanto, anche per testine di stampa di dimensioni ridotte, è necessaria una miscelazione convettiva in quanto quella naturale non risulta sufficiente. L'obiettivo è ottenere una distanza tra due strati di materiale "tagliato" dell'ordine della lunghezza di diffusione tipica stimata. Nella pratica vengono utilizzati miscelatori statici o dispositivi di miscelazione a vite.

Col tempo, quindi, cambiano le proprietà del materiale e il carico agente dovuto alla sovrapposizione di nuovi *layers*. Si osserva un aumento della tensione di snervamento a taglio lineare (Roussel 2006):

$$\tau_0(t) = \tau_{0,t=0} + A_{thix} \cdot t$$

con $\tau_{0,t=0}$ la tensione nello stato destrutturato e t la durata del *resting period*.

A_{thix} rappresenta lo *structural build-up rate* o *structuration rate* [$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$]. Si tratta del tasso di crescita della tensione di snervamento, e il pedice "thix" richiama la "thixotropy", ossia la proprietà reologica del materiale che esibisce cambiamenti nella viscosità o fluidità in risposta all'applicazione di sforzi.

Definendo con $\dot{H}$ la velocità con cui l'oggetto viene costruito in verticale e trascurando la tensione di snervamento iniziale del materiale, il valore minimo di A_{thix} è definito come:

$$A_{thix,min} = \rho g \dot{H} / \sqrt{3}$$

Tuttavia, la tensione di snervamento spesso non è trascurabile risultando (Roussel 2018):

$$A_{thix} > \dot{H} \cdot \left(\frac{\rho g}{\sqrt{3}} - \frac{\tau_{0,t=0}}{H} \right)$$

Da notare che il tasso di strutturazione, nonostante sia una caratteristica del materiale stampabile, dipenda fortemente dal processo di stampa. Infatti $\dot{H}$ dipende dalla velocità di estrusione, dallo spessore dei *layers* e dalla lunghezza del contorno L .

Un modello lineare per la tensione di snervamento a taglio è valido in un primo momento, circa per 40-60 minuti (Perrot et al. 2016). Successivamente, con l'inizio del periodo di presa e l'interpolazione dei legami CSH, la cinetica dello *structural build-up*, ovvero la crescita della tensione di snervamento nel tempo, diviene esponenziale (Legge di Perrot):

$$\tau_0(t) = A_{thix} \cdot t_c \cdot (e^{\frac{t}{t_c}} - 1) + \tau_{0,t=0}$$

dove t_c è il tempo critico, prevedendo l'istante di tempo in cui il modello lineare diventa impreciso. Il suo valore è stato regolato per ottenere la migliore corrispondenza con i valori sperimentali (Perrot 2019).

2.2.3 Mix design

Il mix design di un materiale stampabile deve soddisfare precisi requisiti, basati sui diversi comportamenti che la miscela assume durante la stampa.

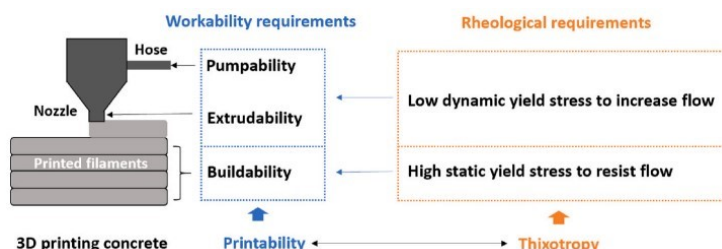


Figura 244. Requisiti reologici contrastanti nei processi di stampa 3D del materiale cementizio (Zhang et al. 2021).

Fatta eccezione per il materiale adottato nel sistema *CONPrint* (Mechtcherine et al. 2019), la maggior parte delle composizioni in commercio è caratterizzata da un alto contenuto di pasta legante e da una dimensione degli aggregati relativamente piccola, poichè aggregati di grandi dimensioni potrebbero complicare il processo di stampa.

- Leganti: cemento *Portland*, cemento sulfoaluminato, cementi compositi e geopolimeri. La percentuale di legante influisce sulla costruibilità in relazione alla sua cinetica di idratazione. Infatti, aumentando il volume di pasta utilizzando cemento o altri leganti a reazione rapida, è previsto un miglioramento nella costruibilità.
- Aggregati: sabbia naturale, aggregati leggeri e aggregati basati su rifiuti solidi (scarti di rame, scarti di ferro e aggregati riciclati). Aumentando la frazione volumetrica degli aggregati il materiale risulterà più viscoso, richiedendo quindi più pressione di pompaggio. L'utilizzo di aggregati più fini incrementa la tensione di snervamento e la costruibilità ma riduce l'estrudibilità se si utilizza un estrusore a vite.

È preferibile ottimizzare le proprietà reologiche della pasta per ottenere bassi valori di tensione di snervamento e viscosità plastica con un'elevata velocità di reflocculazione, garantendo così pompabilità, estrudibilità e costruibilità (Zhang et al. 2021).

- Additivi e fibre

In genere il materiale cementizio stampabile ha un basso contenuto d'acqua, con un rapporto acqua/legante medio di 0,3. Pertanto, l'uso di superfluidificanti, in particolare polycarbossilati, è necessario per garantire la pompabilità ed l'estrudibilità.

Per migliorare la costruibilità, come anticipato al paragrafo §2.2, si aggiungono acceleranti di presa e idratazione, aumentando così la tensione di snervamento.

Il cloruro di calcio, sebbene sia il più efficiente tra gli acceleranti inorganici per calcestruzzo, provoca corrosione delle armature d'acciaio. Perciò spesso si

preferiscono acceleranti a base di semi di C-S-H o additivi come l'attapulgitte nanoclay e la nanosilice, migliorando la costruibilità senza ripercussioni negative.

La presenza di fibre riduce pompabilità, estrudibilità e uniformità della superficie. Al tempo stesso, per piccole dosi, migliorano la resistenza al ritiro e la costruibilità del materiale fresco (Zhang et al. 2021).

Nella progettazione della miscela, il rapporto acqua/legante riveste un ruolo importante, influenzando sia le proprietà meccaniche che la lavorabilità del materiale.

Rispetto al calcestruzzo convenzionale, la resistenza a compressione finale del materiale stampabile (anisotropo) è condizionata anche dalla resistenza dell'adesione tra strati.

Esperimenti recenti hanno dimostrato che la resistenza a compressione del materiale cementizio stampato è circa pari al 70-80% della resistenza del materiale gettato (Aghajani Delavar et al. 2024).

Un rapporto acqua/cemento alto migliora l'adesione ma favorisce ritiro plastico.

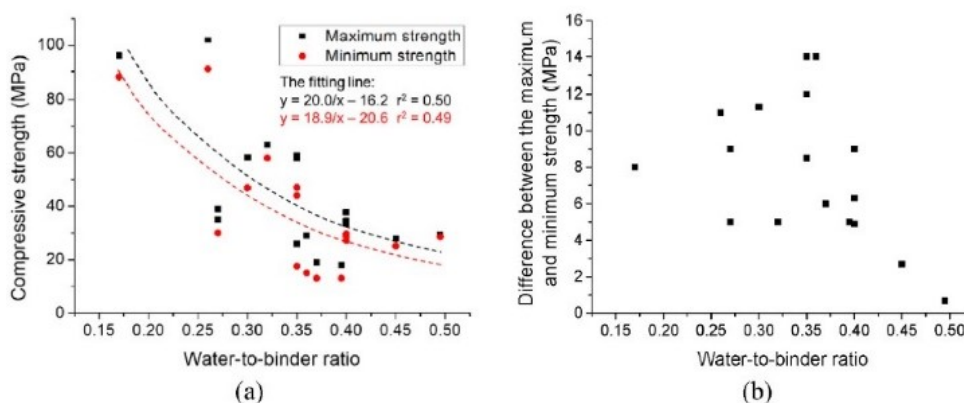


Figura 255. (a) Relazione tra il rapporto acqua-legante e la resistenza a compressione (b) Differenza tra la resistenza massima e minima del calcestruzzo stampato in 3D (Zhang et al. 2021).

Nei diagrammi viene illustrato l'effetto del rapporto acqua/legante sulla resistenza alla compressione a 28 giorni di un materiale cementizio stampabile. La resistenza varia a seconda della direzione di carico a causa dell'anisotropia e tende a diminuire con l'aumento del rapporto acqua/legante.

Se si considera la differenza tra i valori massimi e minimi di resistenza come indicatore di anisotropia, si osserva che tale differenza tenda a ridursi con l'aumento del rapporto acqua/cemento, suggerendo che un rapporto acqua/legante elevato possa ridurre l'anisotropia.

La combinazione di ceneri volanti di classe F e fumo di silice riduce il coefficiente di perdita, aumentando al contempo la pompabilità, l'estrudibilità e la tissotropia. Anche l'aggiunta di resina epossidica, lattice di cloroprene e fibre cellulosiche ha effetti positivi.

Il concetto di coefficiente di perdita di resistenza consente di progettare le caratteristiche di resistenza del 3DPC utilizzando la formula di *Bolomey*, ampiamente accettata per il calcestruzzo convenzionale (Zhang et al. 2021).

Per definire il *mix design* del materiale stampabile si può procedere in due modi:

- Metodo “tentativo ed errore”: in questo caso lo sforzo necessario per trovare la miscela ottimale aumenta notevolmente con l’aumento del numero di variabili indipendenti. Spesso si conduce un’analisi di regressione multivariabile per esaminare la correlazione tra variabili indipendenti e dipendenti (utile ma limitante). Ad es. *Weng et al.* definiscono la resistenza al flusso, la tissotropia e la viscosità (variabili dipendenti) correlandole ad alcuni rapporti tra i componenti della miscela (variabili indipendenti) (Weng et al. 2018). Può essere utile in questo senso definire delle percentuali di composizione medie:

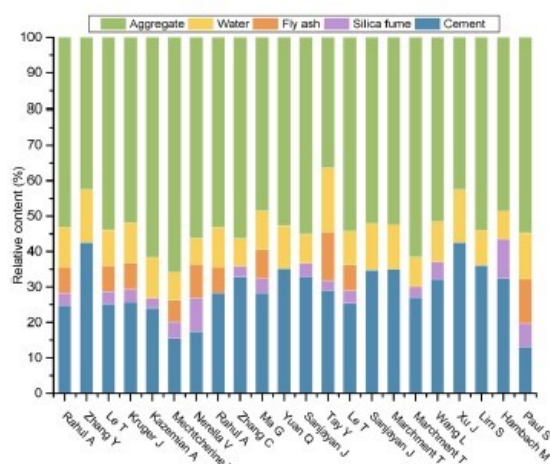


Figura 266. Contenuto relativo di legante, cenere volante, fumo di silice, acqua e aggregati nella proporzione ottimale dei materiali cementizi per la stampa 3D. (Zhang et al. 2021)

Sulla base dei calcoli e dell'analisi statistica, le proporzioni di massa medie di aggregato, acqua e legante sono rispettivamente $53\% \pm 13\%$, $11\% \pm 5\%$ e $36\% \pm 10\%$.

Successivamente alla determinazione dei parametri principali, i diversi tipi e dosaggi di additivi chimici, modificatori reologici e fibre possono essere scelti preliminarmente in base alle prestazioni iniziali della miscela di riferimento e alle prestazioni richieste per il materiale stampabile, per poi essere determinati definitivamente tramite prove.

- Metodo basato su modelli reologici
Esiste un modello predittivo di *Coussot* che identifica la tensione di snervamento statica in base ai componenti della malta:

$$\tau_m = \tau_f \cdot \left(1 - \frac{\emptyset}{\emptyset_{max}}\right)^{-m}$$

con τ_m la tensione di snervamento della malta, τ_f la tensione di snervamento della pasta, $\emptyset$ la frazione di aggregato e $\emptyset_{max}$ la frazione massima di imballaggio.

Partendo dal modello *Chateau–Ovarlez–Trung* che definisce il rapporto tra la tensione di snervamento delle particelle rigide e quella del fluido di sospensione in relazione alla frazione volumetrica di sfere in vetro, si è ottenuto un modello applicabile alle miscele cementizie:

$$\frac{\tau_c(\emptyset)}{\tau_c(0)} = \sqrt{\frac{1 - \emptyset}{\left(1 - \frac{\emptyset}{\emptyset_{RLP}}\right)^{5.1\emptyset_{RLP}}}}$$

con $\emptyset_{RLP}$ la frazione di imballaggio casuale dell'aggregato (Zhang et al. 2021).

Come detto, esistono già molti articoli relativi allo sviluppo di nuove miscele stampabili, si riporta come esempio una ricerca molto recente legata al problema dello smaltimento dei rifiuti da costruzione e demolizione (CDW). I CDW rappresentano il 25-30% del totale globale dei rifiuti solidi, con una generazione annuale stimata che supera i 3 miliardi di tonnellate.

Tudela et al. hanno studiato le proprietà di due miscele:

- NFAC: aggregati 100% sabbia naturale
- RFAC: aggregati 100% CDW.

Si riportano i mix design analizzati:

Tipo di miscela	Cem. Portland di tipo I	Sabbia	CDW	Acqua	Fumo di silice	Super-plasticizzante	Fibre di polipropilene
	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]
NFAC	839	1099	0	314	84	0.63	1
RFAC	839	0	1099	314	83.9	1.33	1

Una differenza sostanziale tra la sabbia naturale e i CDW risiede nella capacità di assorbimento d'acqua, che è molto maggiore nei CDW (12,83%) rispetto alla sabbia (0,64%), probabilmente a causa della presenza di malta residua.

Per garantire la *printability* è necessario eseguire prima il *Flow Table Test* sulla miscela NFAC, poi, definito un diametro target, è possibile stabilire la quantità di superplasticizzante necessaria nella miscela RFAC. I test mostrano che l'RFAC esibisce una riduzione di fluidità più rapida nel tempo, per cui bisogna prestare attenzione durante il processo di stampa.

Sono stati stampati quindi due muri di scala media verificando la stabilità durante tutto il processo. Oltre ad essere stabile, la parete in RFAC mostrava una qualità superiore.

Le proprietà reologiche dei materiali (tensioni di snervamento statica τ_{0s} e dinamica τ_{0d} e viscosità plastica μ) sono state definite tramite un reometro dotato del sistema *BMS*. L'

RFAC presenta un valore inferiore di τ_{0d} (ossia meno difficoltà nel mantenere il flusso durante il movimento del materiale), un valore più alto di μ (ossia una migliore coesione) e un valore simile di τ_{0s} (ossia la capacità di sostenere il peso degli strati in uno stato non disturbato).

Infine sono stati estratti alcuni campioni dalle pareti stampate per effettuare prove a compressione, ottenendo una resistenza a compressione inferiore nei campioni RFAC del 30%. (Tudela et al. 2024).

L'alta percentuale di cemento nei materiali stampabili è in contraddizione con gli obiettivi ecologici ed economici della EP e in generale della stampa 3D.

Molte ricerche mirano a sostituire il cemento *Portland* con leganti meno impattanti.

In maniera simile a quanto proposto da Tudela et al., Reißig et al. hanno valutato l'utilizzo di aggregati riciclati, però in un materiale costituito da un legante a base di argilla calcinata in cui la frazione di Cemento *Portland* è inferiore (Reißig et al. 2024).

Per risolvere la tensione tra le esigenze di sostenibilità e il successo del processo di stampa, è necessario progettare materiali stampabili sostenibili con un alto tasso di accumulo strutturale.

La prima ricerca condotta da Reißig ha indagato la sostituzione di una percentuale di cemento *Portland* con polvere di calcare e argilla calcificata (in rapporto 1:4). La miscela di maggior successo ha visto una sostituzione pari al 62,5%.

Tramite reometro rotazionale e test di penetrazione sono stati misurati rispettivamente il tasso di strutturazione A_{thix} e riflocculazione R_{thix} , e la tensione di snervamento $\tau_{s/d}$.

La miscela analizzata ha portato ad un comportamento reologico conforme col processo di stampa, buoni valori di resistenza e miglioramenti nei confronti del ritiro e alla tendenza a fessurarsi, il tutto riducendo l'impatto ambientale (Reißig et al. 2022).

2.3 Key problems

I problemi che si individuano nel processo di stampa derivano dalla complessità nell'integrare le proprietà reologiche del materiale con il processo di stampa.

In primo luogo verrà descritta la vulnerabilità derivante dall'interfaccia tra gli strati, per poi indagare i meccanismi di collasso e l'insorgere di difetti superficiali.

2.3.1 Interfaccia tra layers

La fase che ha inizio immediatamente dopo la deposizione del primo *layer* è complessa e a tratti paradossale. Infatti da un lato è richiesta stabilità meccanica, dall'altro è necessario che i *layers* adariscano e si leghino tra loro creando una struttura monolitica.

L'interfaccia rappresenta un punto debole per la struttura, anche per l'attacco da parte di agenti esterni (De Schutter et al. 2018) (Perrot et al. 2016).

La debolezza in termini di resistenza tra strato e strato dipende sia dalla composizione del materiale che dai parametri di processo (Zhang et al. 2021).

È quindi necessario individuare una finestra temporale, ossia il periodo ottimale che deve intercorrere tra l'estrusione di *layers* successivi.

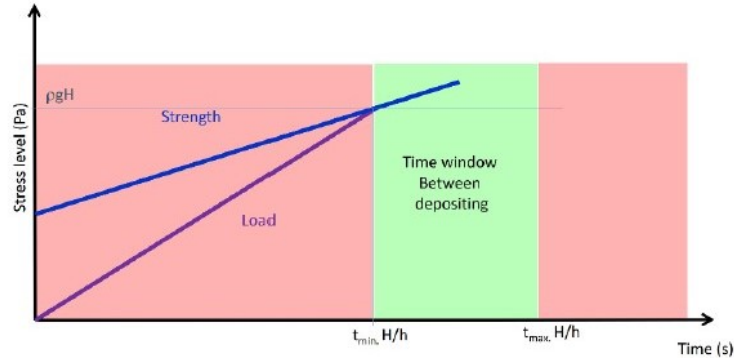


Figura 277. Diagramma della tensione che agisce sullo strato inferiore e della sua resilienza in funzione del tempo. Definizione della finestra temporale tra due depositi (Perrot 2019).

Si definiscono quindi un t_{min} ed un t_{max} , che determinano l'intervallo di tempo ideale tra due strati.

t_{min} si ottiene intersecando la curva dello sforzo applicato sul *layer* di base con la resistenza del materiale.

t_{max} è il tempo limite oltre il quale non si ottiene più un'adeguata adesione tra gli strati. È evidente che se risulta $t_{max} > t_{min}$ è necessario riprogettare il *mix design*.

Si definiscono $\tau_{0,0}$ e $\tau_{0,f}$ le tensioni di snervamento iniziali e finali del *layer* di base (Wangler et al. 2016):

$$\tau_{0,0} = \rho \cdot g \cdot h / \sqrt{3}$$

$$\tau_{0,f} = \rho \cdot g \cdot H_m / \sqrt{3}$$

dove H_m è l'altezza totale dell'elemento e $t_{H_m,min}$ il tempo minimo per raggiungere l'ultimo *layer*. Con queste informazioni è possibile calcolare il tasso di crescita della tensione di snervamento A_{thix} :

$$A_{thix} = \rho g H_m / \sqrt{3} t_{H_m,min}$$

Il tempo minimo necessario per completare la stampa di un *layer*, $t_{h,min}$, può quindi essere calcolato come:

$$t_{h,min} = \rho g h / (\sqrt{3} A_{thix}) \quad (3)$$

con h lo spessore del singolo *layer*.

È evidente che una maggiore tissotropia, che implica un rafforzamento nel tempo della microstruttura, potrebbe ridurre la resistenza interstrato dell'elemento ottenuto tramite 3DPC (Zhang et al. 2021).

A questo punto è possibile calcolare la velocità orizzontale V in funzione della lunghezza di contorno L ($L \cong 3 \cdot \text{lunghezza elemento}$): (2)

$$V < \sqrt{3} L A_{thix} / \rho g h \quad (4)$$

Come accennato al paragrafo §2.1 la velocità massima è dell'ordine di qualche decina di centimetri al secondo. Bisogna prestare attenzione ai processi di deposizione molto veloci

in quanto le sollecitazioni di inerzia potrebbero diventare predominanti andando ad influire sulla forma finale degli strati (Roussel 2018).

È fondamentale definire un tempo massimo e una velocità minima che prevengano la formazione di *cold joints*, generati da un processo di stampa troppo lento o se il materiale presenta un'elevata tissotropia. (3)

$$t_{h,max} = \frac{\sqrt{\frac{(\rho gh)^2}{12} + \left(\frac{2\mu_p V}{h}\right)^2}}{A_{thix}} \quad (5)$$

con μ_p la viscosità plastica.

La velocità di estrusione dev'essere superiore rispetto a quella che causerebbe la formazione di *cold joints*: (4)

$$V > \frac{\rho gh^2}{4\mu_p} \quad (6)$$

Quindi è possibile determinare una finestra operativa in relazione al tempo massimo e al tempo minimo e rispetto alla velocità orizzontale di estrusione massima e minima. Questo consente di definire un processo di estrusione tale da consentire ai *layer* di raggiungere una tensione di snervamento sufficiente a sostenere lo strato successivo senza però formare *cold joints*.

Le equazioni (3), (4), (5) e (6) consentono di determinare la lunghezza L minima affinché i tempi e le velocità di estrusione siano rispettati, limitando così la costruzione di elementi snelli:

$$L > \frac{\sqrt{2/3} (\rho g)^2 h^3}{8 A_{thix} \mu_p}$$

È evidente che le proprietà del materiale e i parametri del processo sono interconnessi, per questo motivo un aumento della scala di un processo di *AM* richiede necessariamente un'analisi approfondita del materiale utilizzato (Wangler et al. 2016).

La presenza di superfici di contatto tra gli strati può rappresentare un problema significativo per la durabilità, sia del materiale cementizio che delle armature, se presenti. Le interfacce tra strati costituiscono infatti vie di facile accesso per i fluidi esterni.

Materiali cementizi pozzolanici, come la cenere volante e la microsilice, possono ridurre i *cold joints* e migliorare la resistenza complessiva, poiché riducono la porosità e favoriscono la formazione di una microstruttura più densa all'interfaccia degli strati. L'obiettivo è utilizzare materiali di *curing* interno (additivi) che migliorino il legame tra strati, favorendo lo sviluppo di prodotti di idratazione, riducendo la perdita di umidità e il ritiro (Zhang et al. 2021). In alternativa si utilizza un materiale adesivo tra gli strati (es. *dual bond silicone*).

In molte situazioni l'interruzione della stampa è inevitabile. Ad esempio, nella realizzazione della *Beckum House* non si prevedevano turni notturni, quindi per risolvere il problema relativo ai giunti freddi è stata utilizzata una resina epossidica tra i due *layers*.

2.3.2 Meccanismi di collasso

Come già accennato molte tecniche di *AM* non prevedono l'utilizzo di casseforme, rendendo possibile il collasso dell'elemento stampato già durante il processo di fabbricazione.

Il collasso di una struttura stampata in 3D può avvenire principalmente in due modi:

1. Sforzo sul *layer* di base superiore alla tensione di snervamento a compressione.

Si definisce *buildability* la capacità del materiale stampato di supportare il peso dei *layers* soprastanti, evitando il collasso durante il processo di stampa e garantendo la stabilità verticale e laterale. Per assicurare *buildability*, è fondamentale un confronto tra la resistenza meccanica del primo *layer* col carico derivante dagli strati superiori (Perrot et al. 2016). Tuttavia, questa proprietà non dipende unicamente dalle caratteristiche del materiale ma anche dalla geometria dell'elemento e dai parametri del processo di stampa, come la velocità di deposizione (Mechtcherine et al. 2020).

Dato che gli strati stampati sono generalmente piatti, le sollecitazioni indotte della gravità possono essere considerate come sollecitazioni di taglio. Quindi, con la sovrapposizione progressiva degli strati, le sollecitazioni iniziali di taglio si trasformeranno in sollecitazioni “estensionali” negli strati sottostanti (Roussel 2018).

Perrot et al. hanno sviluppato un approccio alla *buildability* basato sulla tensione di snervamento reologica τ_c del materiale stampabile, utilizzata come criterio di cedimento del materiale. La sollecitazione verticale sul primo *layer* può essere espressa in funzione del tempo come segue:

$$\sigma_v = \rho \cdot g \cdot h(t) = \rho \cdot g \cdot R \cdot t$$

con ρ il peso specifico, R il tasso medio di costruzione e $h(t)$ l'altezza sopra al primo *layer* in funzione del tempo trascorso dal suo deposito (Perrot et al. 2016).

Lo snervamento si verifica quando le tensioni indotte dalla gravità raggiungono il valore della tensione di snervamento del materiale:

$$\rho \cdot g \cdot \frac{H}{\sqrt{3}} = \tau_0$$

La resistenza del primo *layer* dipende dalle proprietà del materiale e dalla geometria:

$$\sigma_c = \alpha_{geom} \cdot \tau_0(t)$$

Come già discusso nella §2.2, solamente nella fase iniziale è possibile approssimare la tensione di snervamento con un andamento lineare nel tempo.

Il calcolo del parametro geometrico α_{geom} dipende dalle caratteristiche geometriche dell'elemento. Ad esempio, per una colonna di diametro D , è possibile calcolare α_{geom} richiamando la teoria del flusso di compressione di materiali plastici:

$$\alpha_{geom} = 2 + \left(1 + \frac{D}{2\sqrt{3}h}\right)$$

Questo ragionamento è valido per una colonna, ma per altre tipologie di elementi il parametro α_{geom} può essere determinato tramite analisi statica o adattamento empirico.

Ricollegandosi alla relazione lineare per la tensione di snervamento proposta da *Roussel* (Roussel 2006), è possibile stimare un tempo critico di fallimento, notato nei test attraverso l'insorgenza di fratture sulla superficie e un aumento del tasso di spostamento:

$$t_f = \frac{\tau_{0,0}}{\frac{\rho g R}{\alpha_{geom}} - A_{thix}}$$

Se t_f è dell'ordine del tempo di presa del materiale stampato, ci si aspetta che la struttura rimanga stabile durante la stampa.

Un altro approccio, proposto da *Wangler et al.*, si basa sul criterio di plasticità di *Von Mises*, introducendo un fattore numerico al posto di quello geometrico:

$$\tau_0(t) \geq \rho \cdot g \cdot \frac{h(t)}{\sqrt{3}}$$

2. Instabilità della struttura

Affinché la struttura mantenga la stabilità, è essenziale evitare eccentricità tra i *layers* e garantire che la presenza di elementi a sbalzo non comprometta l'equilibrio dell'insieme. Si definisce un'altezza critica in funzione della sezione del piano orizzontale, oltre la quale la parete instabilizzerebbe sotto il solo peso proprio:

$$h_c = \left(\frac{8EI}{\rho g A} \right)^{1/3}$$

con A l'area della sezione del piano orizzontale, I il momento d'inerzia ed E il modulo elastico.

Se si considera un metro lineare di una parete di spessore δ , risultano:

$$I = \frac{\delta^3}{12} \quad A = \delta$$

E quindi:

$$h_c = \left(\frac{2E\delta^2}{3\rho g} \right)^{1/3} \quad (*)$$

Di conseguenza, per garantire stabilità il modulo elastico E dev'essere superiore ad un valore critico E_c :

$$E_c = 3\rho g H^3 / 2\delta^2$$

Ci si aspetta quindi che al di sotto di una certa altezza sia critica la prima tipologia di cedimento, mentre al di sopra di un'altezza H_T diventi critica l'instabilità.

Utilizzando la relazione tra i moduli E e G , ovvero $E = 2G(1 + \nu)$, insieme alla relazione $G = \tau_0/\gamma_c$, si può definire il requisito del modulo elastico di *Young* derivante da un criterio di rottura basato sulla resistenza, ossia la prima tipologia di collasso descritta: (4)

$$E > \frac{2\rho g H}{\sqrt{3} \cdot \gamma_c} (1 + \nu) \quad (**)$$

Eguagliando (*) e (**), si ottiene l'altezza di transizione tra i due criteri H_T :

$$H_T = 2\delta \sqrt{\frac{1+\nu}{3\sqrt{3} \cdot \gamma_c}}$$

(Perrot 2019).

In tecnologie quali *EP*, *Contour Crafting*® e *CONPrint3D*® viene spesso sfruttata la forma per ottenere un momento d'inerzia più elevato, garantendo quindi maggior stabilità e riducendo al contempo la quantità del materiale impiegato ed i relativi costi.

2.3.3 Fessurazione, ritiro ed essiccazione

L'assenza di casseforme, l'uso di elevate quantità di cemento, con una ridotta o nulla presenza quantitativa di aggregati grossolani, aumenta la probabilità di fessurazioni da ritiro plastico allo stato fresco e di fessurazioni da ritiro per essiccamento allo stato indurito.

Oltre a rappresentare un problema estetico, tali fenomeni riducono la resistenza dell'elemento e la durabilità (De Schutter et al. 2018). L'essiccazione degli strati depositati può comportare una netta riduzione di aderenza e indebolendo i legami d'interfaccia.

Inoltre, la presenza di acceleranti, che favorisce un rapido incremento della struttura e resistenza del materiale, può provocare un aumento della temperatura, con conseguente crescita del tasso di essiccazione. Questo rende il materiale particolarmente sensibile alle condizioni ambiente durante il processo di stampa (umidità e temperatura) (Roussel 2018).



Figura 288. Fessurazione da ritiro precoce in pareti stampate in 3D (Buswell et al 2022)

Per mitigare la fessurazioni da ritiro nel 3DPC l'aggiunta di fibre è una scelta comune (Zhang et al. 2021). Diverse ricerche hanno impiegato fibre d'acciaio e microfibre polimeriche, mentre altri studi hanno sperimentato la stagionatura interna ed esterna per ridurre il ritiro plastico. La stagionatura esterna in acqua ha dato buoni risultati, così come la stagionatura interna ottenuta includendo polimeri superassorbenti (SAP) nella miscela (Roussel et al. 2022).

In alcuni casi eccezionali, come per il progetto *Dubai Office*, sono state previste sessioni di lavoro notturne per evitare le alte temperature diurne.

Nella stampa di materiali cementizi è fondamentale considerare la curvatura dello strato depositato dall'ugello e, più in generale, la possibile presenza di tensioni di trazione. A causa della scarsa resistenza a trazione dei materiali cementizi si possono generare fessure o lacerazioni, specialmente in *layers* molto larghi.

Per ridurre tale rischio è necessario definire un raggio di curvatura minimo ed eventualmente aggiungere nella miscela fibre organiche flessibili o polimeri leganti per aumentarne la duttilità (Roussel 2018).

Il drenaggio, ovvero la filtrazione della fase liquida attraverso lo scheletro granulare, oltre a limitare l'adesione tra gli strati può portare alla fessurazione degli strati.

Alcuni metodi sfruttano la vibrazione locale del materiale cementizio per ridurre la tensione di snervamento apparente, consentendo di ridurre la pressione di estrusione dovuta al flusso contratto. In questo modo si ottiene una portata di estrusione sufficiente per minimizzare l'effetto del drenaggio.

Sono stati condotti dei test su una malta impiegando:

- estrusore a pistone circolare con vibratore pneumatico rotativo esterno
- estrusore a vite, in cui è stata introdotta una camera di vibrazione tra il corpo dell'estrusore e l'area della matrice.

La tensione di snervamento è stata stimata tramite *vane test* e test di penetrazione, confermando che esiste una relazione tra reologia, qui tensione di snervamento, e velocità di vibrazione. Quest'ultima deve avere un valore ottimale tale da diminuire la tensione di snervamento per facilitare l'estrusione, ma non eccessiva per garantire il mantenimento della forma una volta depositata la malta. Tale approccio migliora anche la resistenza meccanica a compressione e flessione (Perrot et al. 2009).

La velocità di vibrazione è correlata anche all'aspetto superficiale dell'elemento estruso, infatti, un flusso costante indisturbato limita il drenaggio e di conseguenza i difetti superficiali.

Il drenaggio può essere controllato anche tramite polimeri super assorbenti o additivi viscosi come gli eteri di cellulosa (Perrot 2019).

Le ispezioni degli edifici costruiti tramite *Extrusion Printing* hanno spesso evidenziato la presenza di fessurazioni, la maggior parte delle quali dovute al ritiro. Questo problema è particolarmente critico, poiché le sezioni degli elementi stampati tendono a essere snelle e anche piccole fessure possono compromettere le prestazioni strutturali.

Molti progetti hanno cercato di contrastare questo fenomeno adottando strategie di controllo artificialmente dell'umidità, applicando ad esempio acqua spray e fogli protettivi per rallentare l'essiccazione.

Durante la costruzione della *Holstebro House*, ad esempio, sono state notate delle fessure poco dopo la stampa del primo *layer* quindi, aggiungendo fibre alla miscela, gli strati successivi non hanno più presentato fessurazioni (Bos et al. 2022).

2.4 Rinforzi e normativa strutturale

2.4.1 Tipologia di armature ed implementazione

A differenza del calcestruzzo tradizionale, che presenta un comportamento isotropico, gli elementi realizzati tramite stampa *layer by layer* sono ortotropici, ovvero possiedono proprietà meccaniche differenti a seconda della direzione. Questa caratteristica deriva dalla loro struttura stratificata, che influenza la risposta meccanica del materiale sotto carico.

Dal punto di vista della resistenza, i materiali cementizi stampabili, come i calcestruzzi convenzionali, offrono buone prestazioni a compressione e un'elevata durabilità, ma presentano una resistenza a trazione molto bassa, spesso trascurabile. Nelle costruzioni tradizionali, tale limitazione viene compensata con barre in acciaio, talvolta supportate da fogli in FRP, fibre, cavi di precompressione o reti metalliche. Tuttavia, nell'ambito dell'*Extrusion Printing* (e del *Material Jetting*), l'integrazione delle armature deve avvenire senza interferire con il processo di stampa, rendendo necessaria l'adozione di soluzioni alternative (Mechtcherine et al. 2021).

- Barre “tradizionali”

L'implementazione di un'armatura analoga a quella adottata nelle costruzioni in calcestruzzo armato può essere una soluzione. Può essere posizionata in direzione longitudinale, parallelamente agli strati estrusi, o inserita verticalmente quando il materiale è ancora allo stato fresco.

L'Università di *Braunschweig* ha adottato il metodo *Shotcrete*, descritto nella sezione relativa alle tecniche di stampa, per realizzare una struttura circolare armata sia in orizzontale che in verticale. Il progetto ha previsto l'applicazione di barre incurvate nella superficie *interlayer* e al tempo stesso, definendo un perimetro ondulato, il posizionamento di barre verticali nelle parti concave. Al termine di questa fase l'armatura esterna è stata coperta e protetta da uno strato di materiale cementizio spatolato.

Il risultato è una struttura costituita da *layers* da 1 cm con armatura verticale e rinforzi orizzontali posizionati ogni 40 strati (Buswell et al. 2022).



Figura 299. Shotcrete e implementazione delle armature nelle due direzioni (Buswell et al. 2022).

Questa è solo una delle molteplici soluzioni che prevedono l'utilizzo di barre metalliche.

Già nelle prime ricerche sull'*AM* con materiali cementizi si studia la possibilità di un posizionamento automatizzato dell'armatura (Khoshnevis 2004). Tuttavia, l'integrazione delle barre metalliche nei *layers* stampati risulta ancora oggi complessa e di difficile applicazione su larga scala.

Una possibile alternativa è rappresentata dalla tecnologia *WAAM* (*Wire Arc Additive Manufacturing*) che consente la fabbricazione delle barre goccia a goccia, permettendo così di ottenere svariate forme. Questo processo risulta però piuttosto lento rispetto alla stampa del materiale cementizio, la saldatura è costosa e le alte temperature potrebbero provocare danni al calcestruzzo. Test di laboratorio hanno evidenziato che l'armatura stampata mediante *WAAM* presenta una tensione di snervamento e una resistenza a trazione inferiori di circa il 20% rispetto alle armature convenzionali. Invece la capacità di deformazione è più prolungata nell'acciaio stampato e l'aderenza tra materiale cementizio ed armatura risulta pressoché identica (De Schutter et al. 2018).

- Griglie, *mesh* e gabbie in acciaio

Un'altra strategia per l'implementazione dell'armatura consiste nell'uso di griglie, reti metalliche o gabbie prefabbricate. Alcune soluzioni sperimentate includono:

- Posizionamento di una griglia dopo l'indurimento del calcestruzzo (Università di *Dresda*): in un esempio pratico è stato costruito un muro *layer by layer* e orizzontalmente sono state inserite delle barre metalliche ogni due *layers*. Una volta indurito il calcestruzzo, è stata applicata una griglia in acciaio sulla superficie, collegata alle barre, e successivamente coperta con un ulteriore strato di calcestruzzo protettivo
- Stampa tramite *Shotcrete 3D Printing* su una gabbia esistente (Università di *Brunschweig*)
- Reti di armatura tradizionali e deposizione in strati del calcestruzzo dai lati tramite un ugello sdoppiato (*Huashang Tengda*) (Perrot 2019).

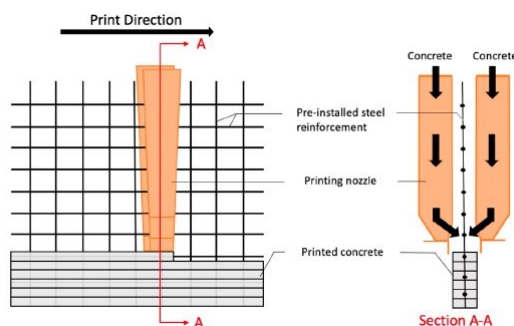


Figura 30. Metodo con ugello sdoppiato adottato da Huashang Tengda (Zhou et al. 2023).

Esistono anche possibilità più automatizzate:

- *Marchment* e *Sanjayan* hanno sviluppato un metodo che prevede l'implementazione di una rete metallica verticale per mezzo di una bobina al centro dello strato depositato, contemporaneamente alla stampa. Dal momento che i componenti della *mesh* vengono saldati progressivamente si rischia una collisione con l'ugello di stampa (Marchment e Sanjayan 2020).

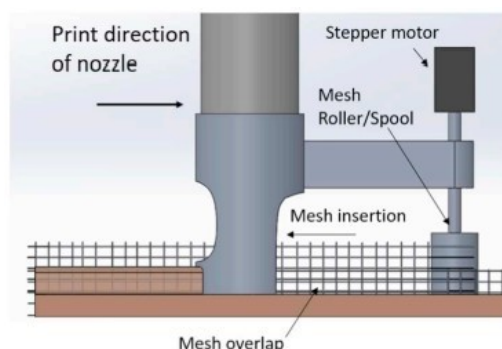


Figura 301. Metodo di implementazione automatizzata di una mesh verticale (Marchment e Sanjayan 2020).

- *Mesh Mould (ETH)*: rete polimerica o armature d'acciaio piegate e saldate per creare forme molto complesse utilizzando una macchina robotica. Successivamente viene spruzzato o gettato il calcestruzzo.

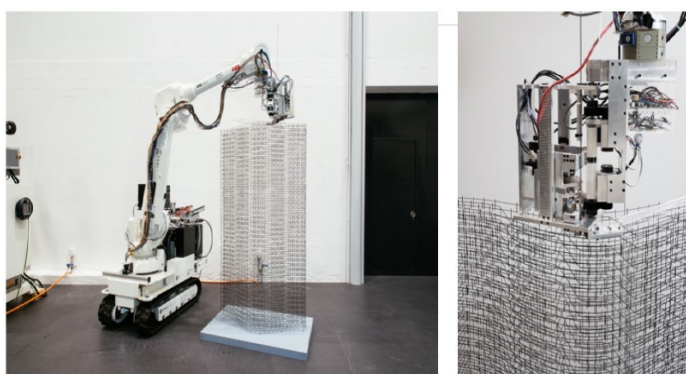


Figure 32. Mesh Mould (ETH) (Wangler et al. 2016).

Queste tipologie di rinforzi possono essere anche in carbonio, un materiale più flessibile e potenzialmente in grado di formare una maglia più stretta.

- Precompressione e post-tensione

Queste tecniche di rinforzo consentono di eliminare gli sforzi di trazione sul materiale cementizio. Nello specifico la post-tensione risulta più adatta alla tecnica *Extrusion Printing*, poichè ha un impatto minimo sul sistema di stampa (Zhou et al. 2023).

Questo metodo di implementazione dell'armatura può essere strettamente legato all'ottimizzazione topologica, poichè quest'ultima non solo determina la forma del calcestruzzo ma anche la posizione dei cavi di precompressione. Esistono già diversi esempi di ponti ottenuti tramite *3DPC* che sfruttano questa tecnica.

- Cavi e filamenti

Avendo un diametro contenuto la resistenza a trazione massima di cavi e filamenti è limitata. Inoltre un aspetto importante riguarda l'aderenza tra il rinforzo e il materiale cementizio che dipende specialmente dall'interazione chimica tra i materiali.

Presso l'Università di *Dresda* è stato definito un innovativo materiale di rinforzo in fibra di carbonio impregnata di minerali (*MCF*) che consente di ottenere un'ottima aderenza, costi ridotti e minore impatto ambientale.

Il rinforzo può essere collacato sopra il *layer*, oppure, per ottenere un'aderenza ancora migliore, viene integrato all'interno degli strati.

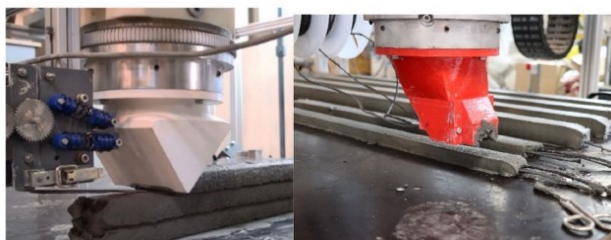


Figura 313. Materiale di rinforzo in fibra di carbonio impregnata di minerali, posizionato tra layers adiacenti o all'interno del layer (Mechtcherine et al. 2021).

Altri studi hanno indagato l'implementazione di cavi continui in acciaio (Ma et al. 2019; Bos et al. 2017).

- Tessuti

Possono essere in fibra di carbonio, vetro o basalto e permettono di “cucire” gli strati prevenendo la formazione di *cold joints*. Generalmente sono posti orizzontalmente e rinforzano l'elemento nella direzione di stampa. Ad esempio Mechtcherine e Nerella hanno studiato l'implementazione di un tessuto 2.5D tra due layers adiacenti per migliorare l'aderenza (Mechtcherine et al. 2021).

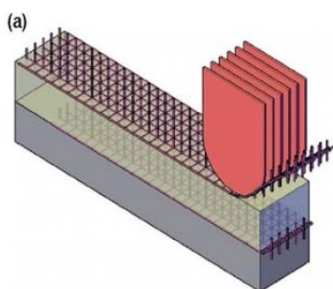


Figura 324. Implementazione di un tessuto 2.5D tra strati adiacenti (Mechtcherine et al. 2021).

- Casseforme stampate permanenti

Si tratta di una tecnica che si avvicina molto ai metodi convenzionali. Infatti prevede la formazione di casseforme stampate 3D permanenti e successivo getto di calcestruzzo

convenzionale all'interno, previo posizionamento delle armature. È il metodo ad oggi più utilizzato dalle grandi aziende costruttrici quali *ApisCor* e *Win Sun*.

- Fibre disperse di acciaio, vetro, carbonio, basalto, polipropilene

Le fibre disperse contrastano la tendenza a fessurarsi e aumentano rapidamente la resistenza nel piano di stampa. Tuttavia rendono il materiale fortemente anisotropico (Perrot 2019).

Le fibre possono essere inserite nella premiscela, durante la fase di mescolamento o direttamente nella testa di stampa. Si interviene in quest'ultimo modo quando non c'è compatibilità tra le fibre e la pompa di estrusione.

Membach e Volkmer hanno studiato una miscela contenente fibre di carbonio, vetro e basalto lunghe 3-6 mm in. Queste hanno portato a un'elevata resistenza a flessione e compressione dei campioni (fino a 30 Mpa e 82,3 Mpa rispettivamente). Inoltre, a materiale indurito, è stata osservata una disposizione delle fibre lungo la direzione di stampa (Hambach et al. 2017).

Fibre lunghe e rigide sono raramente utilizzate nel 3DPC a causa delle limitazioni del diametro dell'ugello e del loro effetto negativo sulla pompabilità ed estrudibilità del materiale stampabile (Zhang et al. 2021).

È possibile modificare la dimensione dell'ugello per determinare la direzione delle fibre dopo la deposizione. Nella Fig. 34 si mostra l'utilizzo di un ugello a diametro ridotto per allineare le fibre (Hambach et al. 2017).

Per elementi di grandi dimensioni le fibre non sono un rinforzo sufficiente e bisogna ricorrere anche ad altre soluzioni.

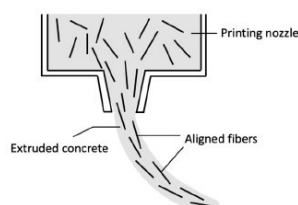


Figura 335. Illustrazione schematica dell'allineamento delle fibre durante la stampa 3D (Hambach et al. 2017).

- Rinforzi che penetrano verticalmente gli strati: chiodi, viti e barre

A. Perrot ha studiato l'influenza dell'implementazione di chiodi con diametro di 30 mm e 1,8 mm posizionati a diverse distanze e inclinazioni. È stato osservato che, sebbene l'aderenza non fosse ottimale, la disposizione di chiodi inclinati e incrociati porta ad un aumento della capacità a flessione del 50%.

È possibile anche utilizzare barre d'acciaio disposte perpendicolarmente agli strati o barre dal diametro ridotto (talvolta spinate) tra gli strati (Aghajani Delavar et al. 2024).

Mechtcherine et al. hanno definito una classificazione dei metodi di implementazione dell'armatura nella stampa 3D tramite *Extrusion Printing* o *Material Jetting*, seguendo la classificazione del RILEM relativa alle tecnologie *Digital Fabrication with Concrete (DFC)*. Come si vede schematizzato nella Fig.36 vengono distinti innanzitutto in base al tipo di processo (pre-processo, singola fase e doppia fase). Il pre-processo comprende anche la miscelazione, per questo motivo la tipologia di rinforzo utilizzabile in questa fase è limitata alle *short fibre*.

Il secondo livello di classificazione si basa sul momento in cui l'armatura viene posizionata rispetto al materiale stampato (durante, prima e dopo la formazione).

Durante la formazione del calcestruzzo l'implementazione delle armature può avvenire per intrappolamento all'interno del materiale (simultaneamente alla stampa del materiale cementizio), tra i *layers* (processo contiguo), incapsulamento tra strati (il nuovo *layer* non ne copre la sommità per collegare ulteriore armatura), armatura che penetra strati freschi.

Se collocata prima della stampa l'armatura può fungere da supporto come no.

Quando si prevede l'implementazione successiva alla stampa del calcestruzzo le possibilità sono due: si inserisce/si appoggia l'armatura nel/ materiale indurito, oppure si utilizza per assemblare più parti di una struttura rinforzata.

Infine per ogni caratteristica chiave dell'armatura vengono esplicitate le tipologie di rinforzi esistenti e utilizzabili, già descritti in precedenza (Mechtcherine et al. 2021).

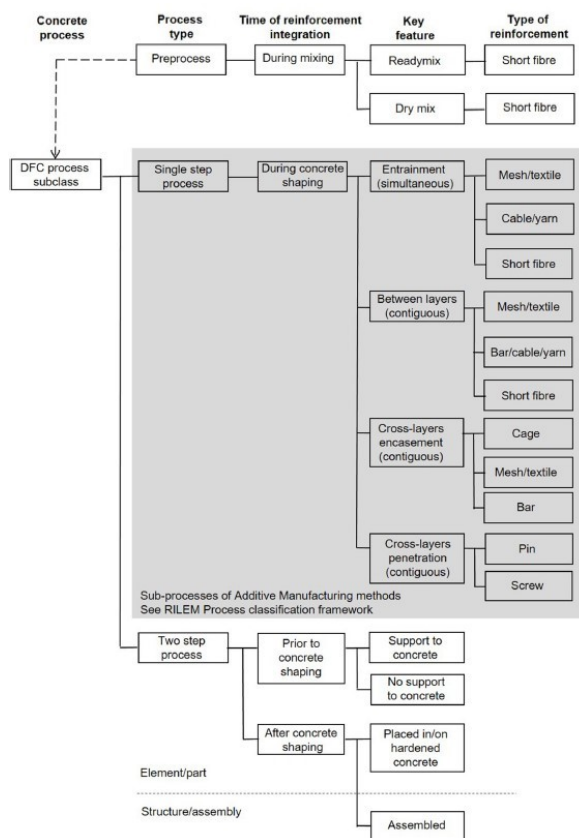


Figura 346. Classificazione dei processi per l'integrazione del rinforzo nelle tecnologie DFC (Mechtcherine et al. 2021).

Esistono già studi e documenti normativi, come l'ICC-ES AC509 contenuto nell'*International Building Code*, che forniscono informazioni utili relative alla resistenza, durabilità, sicurezza strutturale e resistenza al fuoco di pareti 3DPC. Tuttavia non esistono codici di progettazione universali che definiscano una procedura dettagliata né equazioni in grado di correlare le proprietà del materiale e la geometria con la resistenza dell'elemento.

2.4.2 Sistemi strutturali: casi studio e ricerche

Tramite un'indagine su casi studio significativi e ricerche scientifiche, vengono analizzati i sistemi strutturali adottati fino ad oggi per ottenere l'approvazione di progetti basati sull'*Extrusion Printing*. Si osserva che al momento molti progetti servono principalmente allo sviluppo della tecnologia, piuttosto che il contrario. Infatti, la stampa 3D di materiali cementizi (3DCP) è stata spesso utilizzata per mostrare le possibilità offerte dalla tecnologia, prevalentemente a livello nazionale, oppure per studiare aspetti specifici delle applicazioni su larga scala.

I codici di progettazione esistenti non coprono tutte le caratteristiche tecniche specifiche del nuovo metodo costruttivo. Pertanto, è necessario sviluppare procedure di prova supplementari e adattate, così come standard di progettazione dedicati. Le principali lacune individuate riguardano la mancanza di dati e di un quadro normativo. Una prima iniziativa volta a definire degli standard per l'*Additive Construction (AC)* è stata avviata nel 2020 con una collaborazione tra ISO e ASTM (International Additive Manufacturing Center of Excellence). Nel 2023 è stata pubblicata una norma che specifica i requisiti per la garanzia della qualità nell'ambito dell'*AC*, indipendentemente dai materiali e dalla metodologia *AC* utilizzata (Kreiger et al. 2024).

È evidente che, affinché avvenga l'approvazione da parte degli enti preposti, è necessario che l'opera rispetti le norme vigenti. Da questa considerazione ovvia risulta che molti edifici realizzati tramite *Extrusion Printing*, data la mancanza di un quadro normativo specifico per un'approvazione rapida, siano frutto del “*design by testing*”, oppure vengano progettati ricorrendo all'analogia con altre tecniche costruttive già regolamentate.

I diversi progetti realizzati prevedono o elementi stampati che assumono una funzione strutturale, o casseforme stampate a perdere, o ancora elementi stampati incorporati in un telaio in calcestruzzo armato convenzionale. Gli ultimi due approcci facilitano le verifiche e l'accettazione applicando le normative esistenti ed evitando la necessità di test su larga scala.

Di seguito vengono quindi presentati alcuni dei progetti più rilevanti tra quelli studiati, organizzati in base alla loro complessità sperimentale: si parte da quelli che hanno richiesto il maggior numero di prove e validazioni fino ad arrivare a quelli che, oltre a esplorare possibili analogie con altre tecniche costruttive, mirano a definire equazioni di resistenza per descrivere analiticamente il comportamento degli elementi stampati.

- Ponte ciclopedonale, Gement (Olanda), 2017

L'approccio adottato dalla *Eindhoven University of Technology (TU/e)* segue il metodo "design by testing".

Il ponte è costituito da sei elementi identici realizzati per mezzo di una stampante a portale, che sono stati successivamente ruotati di 90 gradi, uniti e compressi con cavi non aderenti post-tesi. In questo modo il calcestruzzo rimane sempre in compressione, evitando l'adozione di metodi di rinforzo spesso limitati e non completamente approfonditi.

Alle estremità del ponte sono presenti due paratie in calcestruzzo massiccio per applicare le forze di precompressione. Quest'ultima viene ottenuta tramite il post-tensionamento di 16 cavi del sistema *Dywidag* a un carico iniziale P_0 di 150 kN.

È inoltre previsto un rinforzo passivo trasversale per contrastare cedimenti fragili dovuti alla torsione: consiste in cavi sottili di acciaio ad alta resistenza che vengono incorporati all'interno del materiale stampato durante la deposizione.

In 48 ore sono stati realizzati tutti gli elementi costituenti il ponte. La campata ha una lunghezza complessiva di 6,5 m e larghezza di 3,5 m.

Il materiale utilizzato è la malta *Weber 3D 115-1*, composta da cemento *Portland*, aggregati (dimensione massima delle particelle 1 mm), riempitivi e additivi, modificatori di reologia e una piccola quantità di fibre in PP. Per questo materiale sono state determinate la resistenza a compressione, a flessione e a trazione uniassiale, il modulo di elasticità, la densità e la dipendenza direzionale.

Il progetto è stato valutato in un primo momento tramite un'analisi agli elementi finiti. Successivamente, il ponte in scala 1:2 è stato sottoposto ad un test distruttivo a flessione a quattro punti. Durante il carico è stato aumentato da 120 kN fino ad arrivare a 300 kN, incrementando ogni volta di 30 kN. La prima fessura è apparsa a circa 300 kN ed è indotta dalla flessione, il che è positivo perché indica un tipo di rottura più duttile rispetto a quella a taglio.

Infine il ponte è stato testato anche in situ raggiungendo il carico allo stato limite di servizio, senza rilevare deflessioni significative (Buswell et al. 2022) (Salet et al. 2018).

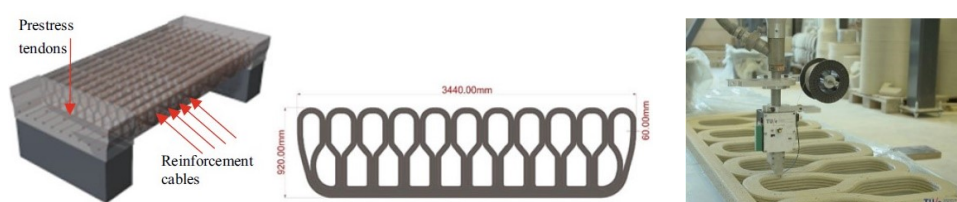


Figura 357. Ponte stampato 3D a Gement: cavi di precompressione e cavi trasversali di rinforzo; Sezione trasversale; Stampa di un elemento (Buswell et al. 2022).

- Primo edificio antisismico stampato in 3D in Italia, Montalto di Castro, 2024

Questo progetto nasce dalla collaborazione tra *Enel Green Power*, l'Università Federico II di Napoli e lo *spin-off Etesias*.

Si tratta di un edificio di dimensioni contenute, con pareti alte 2,8 m, costituite da 11 moduli prefabbricati.

L'approccio basato sul “*design by testing*” ha richiesto molte prove data la natura anisotropa degli elementi stampati. Inizialmente sono stati condotti test di compressione e flessione sia su campioni di materiale che su pannelli stampati, ottenendo una resistenza a compressione $R_c = 45 \text{ MPa}$, una resistenza a flessione $R_f = 6 \text{ MPa}$ ed un modulo elastico $E = 25 \text{ GPa}$. Successivamente, sono state eseguite prove su larga scala sui pannelli stampati, valutando le prestazioni strutturali sotto carichi nel piano (attraverso prove cicliche e di compressione diagonale) e fuori piano. È stata quindi condotta un'analisi approfondita dei meccanismi di taglio, pressoflessione e ribaltamento.

I modelli analitici e numerici, sviluppati con il metodo agli elementi finiti (*FEM*), includono le proprietà ottenute tramite le prove sperimentali, garantendo risultati quanto più attendibili possibile.

Oltre alle pareti, sono stati stampati anche i plinti di fondazione ($1,4 \times 1,4 \times 1 \text{ m}$), testati sia sotto i carichi di progetto, sia tramite prove di tiro.

Il materiale utilizzato è *i.tech3d N* di *Heidelberg Materials*: una malta premiscelata secca.

Le pareti presentano un vincolo ad incastro alla base costituito da tirafondi in acciaio installati nella platea di fondazione, mentre il solaio *predalles* è collegato alle pareti mediante un cordolo.

Questo progetto ha dimostrato la fattibilità della stampa 3D per applicazioni industriali permanenti in zona sismica. Inoltre il piano di monitoraggio in atto, che ha previsto l'installazione di accelerometri e sensori per le microfratture, fornirà dati preziosi per future ricerche relative alla stampa 3D di materiali cementizi. Si stima una riduzione dei tempi di costruzione del 50%, un minore utilizzo di materiale anche per merito della *topological optimization* e, a seguito dei lavori, è stata dimostrata un'alta sicurezza in cantiere (Capozzi et al. 2024).



Figura 368. Fase di installazione dei pannelli stampati in 3D; Modello di un plinto di fondazione stampato in 3D (Capozzi et al. 2024).

- *Ponte Striatus, Venezia, 2021* e *Milestone House, Eindhoven (Olanda), 2021*

Su progetto di *Block Research Group* e *Zaha Hadid Architects*, è stato realizzato un ponte pedonale temporaneo come parte della mostra *Time Space Existence*, durante la

biennale di Venezia. L'obiettivo consisteva nel realizzare un ponte ad arco, quindi caricato solamente a compressione e privo di armature a trazione.

Lo *Striatus* è costituito da 53 elementi unici stampati *off-site* e collegati in loco. La forma piuttosto inedita sia in pianta che in elevato è frutto di diverse analisi (*DEM* e *FEM* 3D e 2D). Grande attenzione è stata dedicata alla definizione della struttura di riempimento (*infill pattern*) atta a conferire stabilità durante la stampa e rigidezza dopo l'indurimento. Per ottenere l'approvazione sono state effettuate verifiche strutturali basate sull'analogia con la muratura non armata.

La stessa analogia è stata assunta per i calcoli strutturali della *Milestone House*, la prima di cinque case con pareti stampate prefabbricate, prive di telaio in calcestruzzo armato, che sfruttano la curvatura nel piano e fuori piano per incrementare la rigidezza. Anche in questo caso il materiale utilizzato è una malta composta da cemento Portland, con un rapporto acqua/miscela secca di circa il 13%. L'ugello rettangolare porta alla formazione di strati larghi 70 mm e alti 11,5 mm. In questo caso l'*infill pattern* per alcune pareti è stato omissso.

Entrambi i progetti hanno richiesto prove su larga scala, il ponte *Striatus* è stato sottoposto al caso di carico critico, fino al valore agli SLU, calcolandone le deformazioni. I test su *Milestone House*, invece, hanno previsto prove su mock-up su ogni elemento prefabbricato (1:1), sottoponendoli a carico verticale centrato ed eccentrico. Si è proceduto quindi coi calcoli strutturali ed il dimensionamento, effettuando le verifiche agli SLE e SLU dell'intera struttura (Bos et al. 2022) (Wolfs et al. 2023).

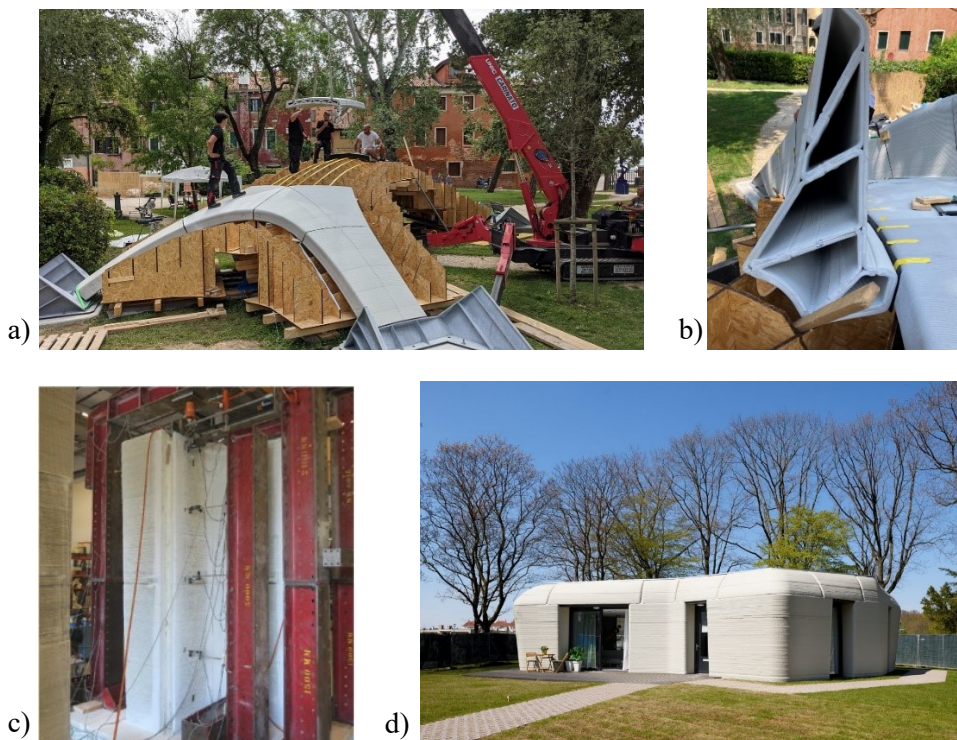


Figura 379. a) e b) *Ponte Striatus* [16]; c) Prova su mock-up della *Milestone House*; d) *Milestone house* (Wolfs et al. 2023).

- *Beckum House, Beckum (Germania), 2021*

Si tratta di una delle applicazioni più avanzate del 3DPC, sviluppata dallo studio *Mense-Korte ingenieure+parchitekten*. Il progetto esalta il concetto di “produzione” di un edificio stampato in 3D, basato sull’interazione reciproca tra il progetto, la tecnica di stampa e il materiale. *Beckum House* si sviluppa su due piani da 80 m² ciascuno e presenta tre tipologie di pareti:

- divisorie non portanti, costituite da due strati stampati adiacenti
- strutturali in casseri a perdere stampati e riempiti con calcestruzzo non armato
- a doppio involucro, in cui solo lo strato interno è portante. Quest’ultimo può essere composto o da due strati adiacenti o due strati distanziati che fungono da cassaforma.

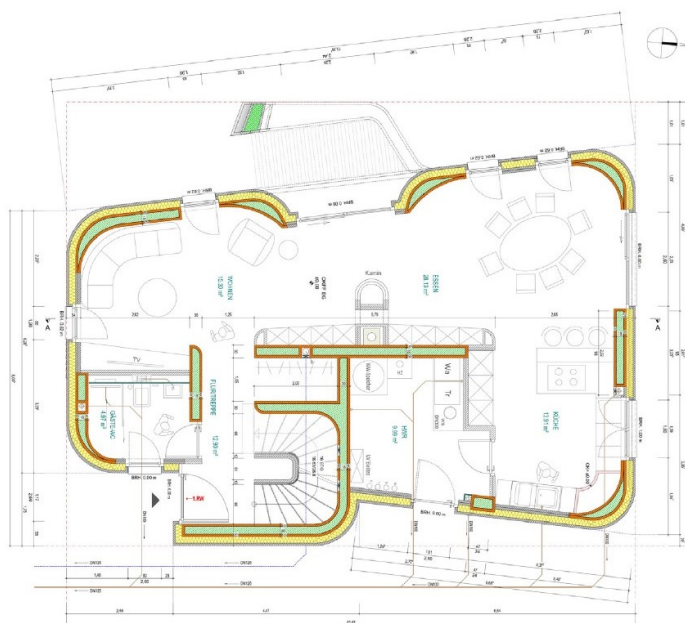


Figura 38. Planimetria della *Beckum House* (Weger et al. 2021).

Non sono previsti *infill patterns*. Il materiale utilizzato è la malta cementizia stampabile *i.tech3d NF* di *Heidelberg Materials*, mentre la stampante impiegata è la *BOD2* di *COBOD*.

Sono stati testati sia provini di materiale allo stato fresco (*slump flow*, tempi di presa iniziale e finale) sia allo stato indurito (resistenza a compressione e a flessione, modulo di elasticità, adesione tra strati dopo diversi impatti ambientali, resistenza al gelo-disgelo, resistenza al pull-out e push-out degli ancoraggi a parete). Successivamente sono stati analizzati elementi su larga scala.

L'approvazione del progetto si è basata sugli standard esistenti per le costruzioni in calcestruzzo e muratura, richiedendo comunque un numero significativo di test sperimentali (Weger et al. 2021).

- Dubai Office, Dubai, 2019 e Holstebro House, Holstebro (Danimarca), 2021

Dubai Office è l'edificio stampato in 3D più grande al mondo in termini di volume, sviluppandosi su due piani per un totale di 640 m². Il sistema costruttivo prevede pareti stampate in situ mediante la stampante *robotic-arm Frank*, riposizionata 22 volte durante la realizzazione. In questo caso gli elementi stampati fungono da casseri a perdere per il getto del calcestruzzo armato.

In pianta si possono osservare elementi regolari diagonali progettati per migliorare la stabilità delle pareti stampate. Inoltre le pareti sono parzialmente stuccate ed il telaio in calcestruzzo armato facilita il collegamento con le fondazioni e coi solai prefabbricati.

In maniera simile è stata realizzata *Holstebro House*. Anche in questo caso le pareti non sono strutturali ma fungono da casseri a perdere per ospitare le armature e successivamente il getto del calcestruzzo. Il materiale utilizzato, pur contenendo aggregati fino a 8 mm - una dimensione significativamente maggiore rispetto alle miscele convenzionali - garantisce comunque un'eccellente finitura superficiale. In questo caso le pareti non presentano *infill patterns*.

Questi esempi rappresentano soluzioni particolarmente interessanti in termini di ottimizzazione dei tempi di costruzione ed evoluzione della tecnologia 3DPC. Mantenendo alcuni elementi ricorrenti delle strutture convenzionali in calcestruzzo armato, si facilita anche il processo di accettazione normativa e si riduce la necessità di numerosi test sperimentali (Bos et al. 2022).



Figura 391. *Dubai Office: sistema con casseri a perdere ottenuti tramite EP [17]; Holstebro House: finitura superficiale [11].*

- Programma sperimentale per la convalida delle prestazioni di un nuovo sistema di parete per Additive Construction

Un gruppo di ricerca della *Texas A&M University* ha sviluppato un progetto volto all'analisi e alla validazione di una parete 3DPC per edifici bassi soggetti a forze sismiche, rinforzata mediante un "telaio" tradizionale in calcestruzzo armato.

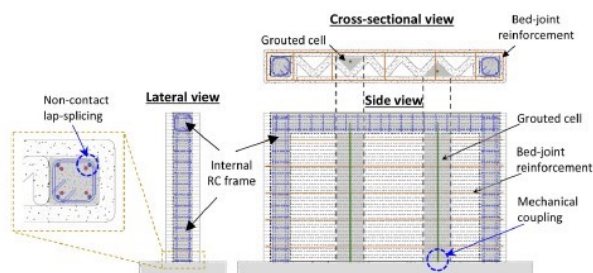


Figura 402. Dettagli costruttivi della parete 3DPC proposta, con elementi di confinamento in calcestruzzo armato (Aghajani Delavar et al. 2024).

L'analisi si basa sul principio secondo cui una parete costituita da strati estrusi sovrapposti possa essere assimilabile a una muratura in blocchi di cemento (*concrete block masonry CBM*) stampata in 3D. Entrambe le soluzioni sono realizzate attraverso la deposizione verticale di “blocchi edilizi”, presentano celle verticali “stuccabili” e la loro monoliticità dipende dall'interfaccia tra gli elementi costitutivi.

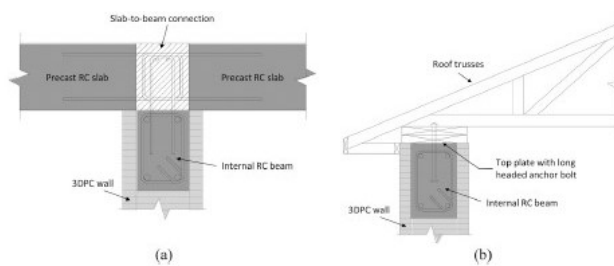


Figura 413. Connessione dei solai alle pareti 3DPC. a) strutture a telaio in calcestruzzo armato prefabbricato, b) strutture in legno (Aghajani Delavar et al. 2024).

I dettagli costruttivi dei nodi mostrano che il collegamento con solaio e copertura può avvenire in maniera analoga alle costruzioni in calcestruzzo armato convenzionali, oppure tramite perni inseriti nella trave. Vengono inoltre integrate armature nella sezione *interlayer* che contribuiscono alla resistenza al taglio e alla stabilità in fase di stampa.

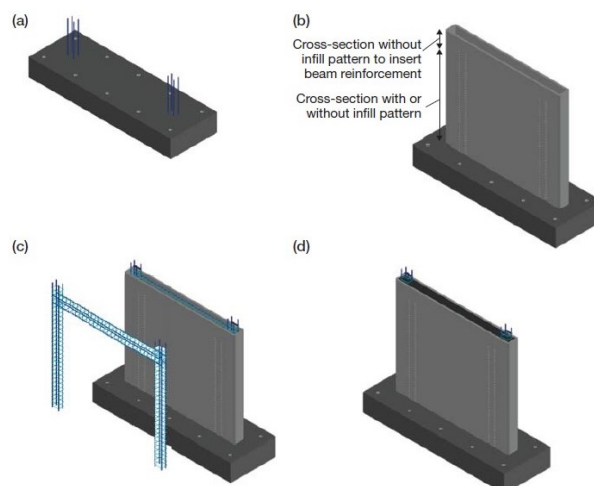


Figura 424. Processo di costruzione della parete 3DPC (Aghajani Delavar et al. 2024).

L'obiettivo dello studio è la definizione di equazioni di resistenza con un approccio agli stati limite, sulla base di principi meccanici e codici esistenti (*TMS 402/602-22*). L'applicabilità di tali equazioni viene successivamente verificata sia attraverso test su pareti *CBM* sia mediante *Finite Element Analysis*.

Sono state derivate equazioni di resistenza per tre meccanismi di cedimento delle pareti 3DPC sottoposte a carico nel piano: cedimento flessionale, cedimento diagonale a taglio e cedimento a taglio dell'interfaccia (include il cedimento per adesione tra gli strati e il cedimento per attrito del giunto di base all'interfaccia tra parete e fondazione).

Attraverso test di laboratorio sono state misurate alcune proprietà meccaniche delle pareti in esame e confrontate con quelle del calcestruzzo convenzionale gettato. Il modulo di rottura è risultato pari al 77-79% rispetto a quello del materiale gettato. La resistenza a compressione normale all'interfaccia e nella direzione parallela all'interfaccia risultano rispettivamente il 71-76% e il 73-78%, evidenziando così il comportamento anisotropico dell'elemento.

I test di validazione su elementi pareti reali *CBM* e su modelli agli elementi finiti, infine, dimostrano come le formule definite da questo studio risultino fedeli ai risultati sperimentali.

Questi risultati confermano come l'analogia con la muratura confinata possa costituire una base solida per lo sviluppo di una soluzione innovativa (Aghajani Delavar et al. 2024).

CAPITOLO 3: PROGETTO

I diversi sistemi di stampa, i materiali impiegati e le molteplici strategie costruttive e di rinforzo rappresentano un ostacolo alla definizione di un quadro normativo generale per l'*Extrusion Printing*. In questo contesto, escludendo l'opzione di utilizzare la parete stampata come semplice tamponamento o cassero a perdere, nonché l'approccio progettuale basato sul "*design by testing*", si sviluppa un progetto di una struttura monopiano in cui le pareti stampate vengono confinate mediante elementi in calcestruzzo armato. La capacità strutturale viene quindi valutata tramite analogia con la muratura confinata.

Questa forte somiglianza è dettata da diversi fattori, tra cui la possibile presenza di celle verticali che possono essere riempite o lasciate vuote, la realizzazione per strati sovrapposti in verticale ed infine la presenza di interfacce orizzontali deboli tra i *layers*.

Il dimensionamento e la geometria delle pareti vengono definiti in funzione della tecnica costruttiva adottata (*EP*). Quindi, per quanto disponibili online, si fa riferimento alle esperienze pregresse descritte in letteratura scientifica e in progetti già realizzati. Inoltre la progettazione rispetta le normative vigenti relative alla muratura confinata. Queste vengono trattate in parte nelle NTC2018 ma sono approfondite in maniera più esaustiva negli Eurocodici 6 e 8, rispettivamente relativi alle strutture in muratura e alle strutture per la resistenza sismica.

3.1 Normative di riferimento

NORMATIVA ITALIANA

- DM 17 gennaio 2018: *Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»*.
- Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP.: *Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»»* di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018".

NORMATIVA EUROPEA

- BS EN 1996-1-1:2022. "*Eurocode 6, Part 1-1. Design of masonry structures. General rules for reinforced and unreinforced masonry structures*"
- UNI EN 1998. "*Eurocode 8- Design of structures for earthquake resistance*"

3.2 Descrizione del progetto

3.2.1 Informazioni generali sul progetto

A seguito delle considerazioni relative alla tecnica di stampa e alle possibilità applicative, si progetta un edificio ad uso residenziale in conformità alle normative esistenti sulla muratura

confinata. Il progetto viene previsto in un lotto con preesistenza situato nella provincia di Pordenone, nel rispetto dei parametri edificatori definiti nelle NTA (zona B1.5).

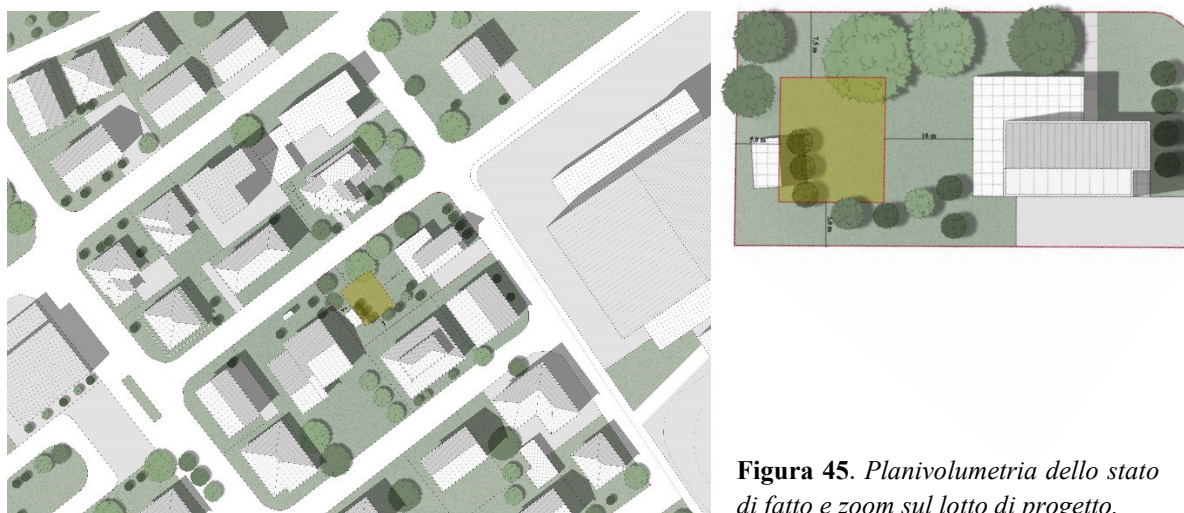


Figura 45. Planivolumetria dello stato di fatto e zoom sul lotto di progetto.

L'edificio, sviluppato su un unico piano, presenta una superficie utile di 78 m². Dal momento che la struttura risulta irregolare in pianta (NTC-§7.2.1), per semplificare l'analisi strutturale l'edificio viene suddiviso in tre sottostrutture indipendenti: A e B costituite da pareti stampate in situ con elementi di confinamento e C in carpenteria metallica.

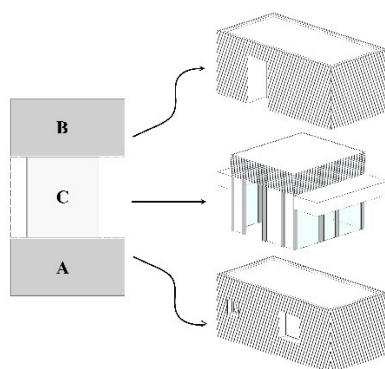


Figura 46. Schema di progetto: tre sottostrutture indipendenti.

Ai fini del presente elaborato si focalizza l'attenzione sul dimensionamento e le verifiche strutturali dell'unità A. Quest'ultima è regolare in pianta e in elevazione, con un'area di base di 32 m², considerando il filo esterno dei muri strutturali,. Le pareti sono costituite da *layers* stampati in loco ed elementi di confinamento in calcestruzzo armato. Il solaio di copertura è costituito da predalles prefabbricate in calcestruzzo armato (5-12-4), con casseri stampati 3d a perdere per il getto della lastra superiore.

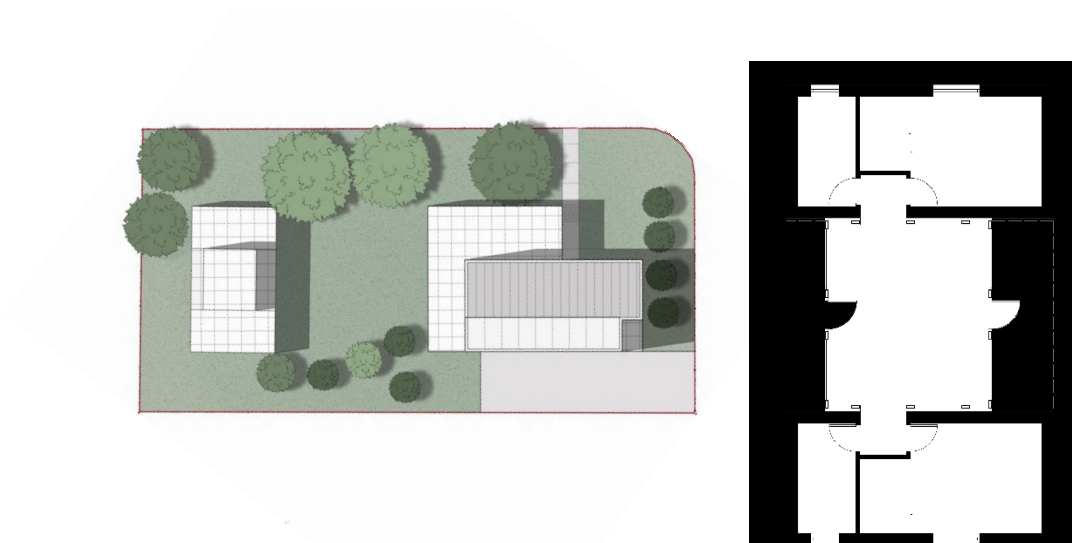


Figura 437. Planivolumetria di progetto e planimetria del nuovo edificio.

Come detto l'edificio è ubicato a **Pordenone** (38 m s.l.m.; longitudine: 12.6563, latitudine: 45.9626). Il comune di Pordenone ricade nella **Zona Sismica 2**: "Zona con pericolosità sismica media dove possono verificarsi forti terremoti".

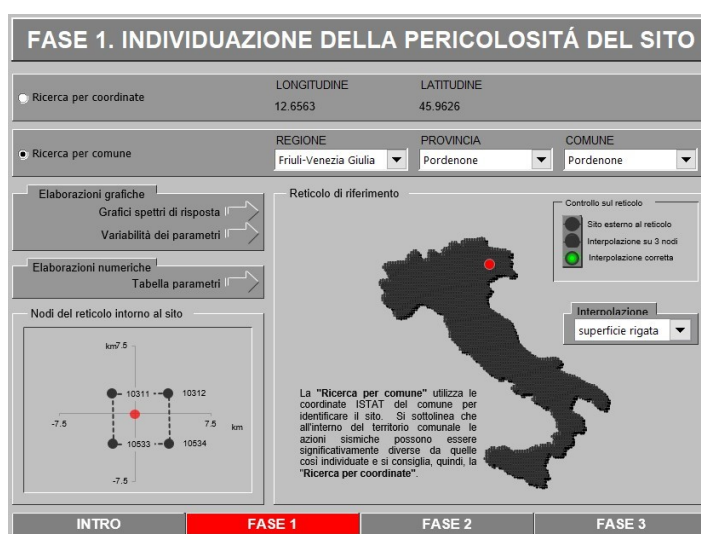


Figura 48. Valutazione della pericolosità sismica del sito tramite Spettri-NTCver.1.0.3 (Consiglio Superiore dei LLPP).

3.2.2 Criteri di progettazione: tecnica di stampa e normativa

Prima di procedere alla determinazione dei carichi e delle azioni sulla costruzione è doveroso soffermarsi sui criteri che hanno guidato la progettazione, dalle pareti all'assetto in pianta.

Innanzitutto la definizione del progetto non può prescindere dai vincoli dettati dalla tecnica di stampa e dalle caratteristiche della stampante. Per cui gli elementi stampati sono costituiti da *layers* sovrapposti la cui dimensione è legata alla dimensione standard dell'ugello di una

stampante 3D esistente. La definizione della sezione trasversale della parete prende spunto invece da uno studio condotto presso la *Texas A&M University* (Aghajani Delavar et al. 2024).

Il progetto è condizionato anche dai requisiti geometrici e dalle regole di dettaglio presenti nelle normative italiane ed europee relative alla muratura confinata.

- Le NTC2018 e la C1 trattano le costruzioni di muratura ai paragrafi §4.5 e §7.8, con il secondo paragrafo specificamente dedicato alla progettazione sismica.

Vengono rispettati i criteri di progetto e i requisiti geometrici delle pareti resistenti al sisma di cui al paragrafo NTC2018-§7.8.1.4 e le regole di dettaglio relative alla muratura confinata di cui al paragrafo NTC2018-§7.8.6.3. Inoltre, come definito al paragrafo C1-7.8.6.3, il cordolo di piano deve essere realizzato nel rispetto di quanto riportato al paragrafo NTC-§7.8.6.1, in analogia con le costruzioni in muratura ordinaria e in muratura armata.

- L'EC6 tratta specificamente le costruzioni in muratura, in particolare la parte 1-1 fornisce le regole generali per le strutture in muratura armata e non armata, inclusa la muratura confinata.

Durante la fase di progettazione sono state rispettate le regole di dettaglio relative alla muratura confinata presenti al paragrafo §10.4.

- L'EC8 tratta la progettazione delle costruzioni di muratura in zona sismica al capitolo 14, il quale dev'essere applicato come un complemento dell'EC6 parte 1-1. L'edificio proposto rispetta le regole di progettazione per la muratura confinata definite al paragrafo §14.7.3.

La muratura confinata richiede un collegamento efficace tra gli elementi di confinamento e la muratura stessa. Per garantire tale collegamento è necessario realizzare prima la muratura, nel caso in esame le parti stampate, e successivamente eseguire il getto degli elementi di confinamento in calcestruzzo così da assicurare l'adesione tra i componenti.

Si ottiene una struttura compatta e simmetrica, in cui le pareti presentano continuità in elevazione (al netto delle aperture). La copertura non è spingente ed il solaio assolve funzione di ripartizione delle azioni orizzontali tra le pareti strutturali, oltre a costituire un vincolo contro le azioni fuori piano delle pareti, garantendo un adeguato funzionamento a diaframma. Pertanto, la struttura è progettata per ottenere un comportamento scatolare dell'edificio.

La minima dimensione trasversale degli elementi di confinamento orizzontali e verticali è pari a 150 mm, con una sezione trasversale sempre superiore a 0,02 m², in conformità con l'EC6-§10.4.

Nel rispetto dell'EC8-§14.7.3 e del paragrafo NTC-§7.8.6.3, gli elementi verticali di confinamento vengono posizionati:

- lungo i bordi liberi di ogni parete strutturale;

- su entrambi i lati delle aperture aventi area maggiore di 1,5 m², quindi delle finestre più grandi rivolte a nord e sud;
- all'interno delle pareti con passo non maggiore di 5 m;
- all'intersezione delle pareti strutturali, in tutti i casi in cui gli elementi di confinamento più vicini siano ad una distanza superiore a 1,5 m;

La progettazione delle armature in conformità con le normative sarà trattata al paragrafo §3.7.

3.3 Carichi e azioni sulla costruzione

3.3.1 Materiali utilizzati, carichi permanenti e carichi variabili

• MALTA STAMPABILE

La resistenza caratteristica a compressione e la densità vengono definite considerando il materiale stampabile *i.speed 3D R* di *Heidelberg Materials*.

$$f_{ck,materiale} = 55 \text{ MPa}$$

La resistenza caratteristica a compressione si riferisce al materiale, quindi, essendo l'"elemento parete" anisotropo, è necessario introdurre dei coefficienti di riduzione che tengano conto della composizione in *layers*. Una ricerca recente ha verificato sperimentalmente la validità di alcune formule per il calcolo della resistenza a compressione e a taglio media dell'elemento stampato (Liu et al. 2025). L'Eurocodice 6 fornisce una formula simile per il calcolo della resistenza a compressione caratteristica di un'elemento in muratura, considerando però anche il contributo dato dagli strati di malta interposti tra gli elementi resistenti, che evidentemente non sono presenti nella tecnica *EP* (EC6-§ 5.7.1).

Nella scheda tecnica della malta *i.speed 3D R* sono riportate direttamente le proprietà meccaniche degli elementi stampati in relazione alle diverse configurazioni di carico, quindi non è necessario calcolarle.

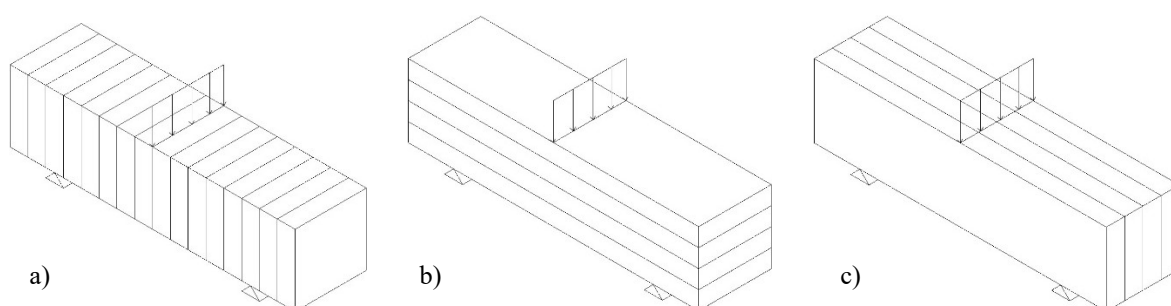


Figura 449. Le tre configurazioni di carico delle pareti stampate.

Viene fornita la resistenza a compressione media f_{cm} dell'elemento nelle tre configurazioni, quindi, per normativa, si moltiplicano i valori medi per un fattore riduttivo, ricavando così la resistenza caratteristica f_{ck} dell'elemento (NTC-§11.10.3.1.2).

La resistenza a compressione di progetto f_{cd} viene poi calcolata dividendo f_{ck} per il coefficiente parziale di sicurezza γ_M (NTC-§4.5.6.1).

Configurazione	f_{cm} [MPa]	f_{ck} [MPa]	f_{cd} [MPa]	γ_M
Conf. a)	40	32	12,8	2,5
Conf. b)	30	24	9,6	2,5
Conf. c)	25	20	8	2,5

Il coefficiente parziale di sicurezza si determina in funzione della classe di esecuzione e della categoria degli elementi resistenti (NTC-Tab. 4.5.II). Cautelativamente è stata assunta una classe di esecuzione 1 e una categoria del materiale II.

Allo stesso modo vengono determinate le resistenze a taglio di progetto nelle tre configurazioni.

Configurazione	f_{vm} [MPa]	f_{vk} [MPa]	f_{vd} [MPa]	γ_M
Conf. a)	3	2,4	0,96	2,5
Conf. b)	5	4	1,6	2,5
Conf. c)	9	7,2	2,88	2,5

$\gamma = 2150 \text{ kg/m}^3 = 21,50 \text{ kN/m}^3$ è il peso specifico del materiale.

Il modulo di elasticità normale secante e modulo di elasticità tangenziale secante, vengono calcolati secondo NTC-§11.10.3.4:

$$E = 1000 \cdot f_{ck}$$

$$G = 0,4 \cdot E$$

quindi, per le tre configurazioni, si ottiene:

Configurazione	E [MPa]	G [MPa]
Conf. a)	32000	12800
Conf. b)	24000	9600
Conf. c)	20000	8000

Risultano soddisfatti i limiti sui valori di resistenza definiti al paragrafo NTC-§7.8.1.2.

- **CALCESTRUZZO C35/45 (ELEMENTI di CONFINAMENTO)**

Si assume come peso dell'unità di volume del calcestruzzo armato $\gamma_c = 25,0 \text{ kN/m}^3$ (NTC-Tab. 3.1.I).

La classe del calcestruzzo viene scelta in conformità con quanto prescritto dall'EC6-§8.10.1, secondo cui la resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo degli elementi di confinamento non debba essere inferiore a 20 N/mm^2 o della resistenza a compressione della muratura, se superiore.

- **CALCESTRUZZO C25/30 (SOLAIO di COPERTURA)**

Si assume come peso dell'unità di volume del calcestruzzo armato $\gamma_c = 25,0 \text{ kN/m}^3$ (NTC-Tab. 3.1.I).

Resistenza caratteristica a compressione cubica $R_{ck} = 30 \text{ MPa}$

Resistenza caratteristica a compressione cilindrica $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$

Resistenza a compressione di progetto $f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c = 14,17 \text{ MPa}$

Coefficiente parziale di sicurezza relativo al calcestruzzo $\gamma_c = 1,5$

• ACCIAIO B450C

Le NTC2018 definiscono i valori nominali della tensione di snervamento e della tensione a carico massimo da utilizzare nei calcoli per l'acciaio B450C (NTC-§ 11.3.2.1):

Resistenza meccanica a rottura $f_{tk} = 540 \text{ MPa}$

Resistenza caratteristica di snervamento $f_{yk} = 450 \text{ MPa}$

Tensione di snervamento di progetto $f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s = 391,30 \text{ MPa}$

Coefficiente parziale di sicurezza relativo all'acciaio $\gamma_s = 1.15$

- **Carichi permanenti:** copertura con solaio in predalles prefabbricate e pareti stampate in 3D con elementi di confinamento gettati (definiti nello specifico in seguito).
- **Carichi variabili:** per la copertura si considera la categoria H "Coperture accessibili per sola manutenzione e riparazione" (NTC-Tab. 3.1.II).

Tabella 1: Valori dei sovraccarichi per le diverse categorie d'uso delle costruzioni (Tab. 3.1.II - NTC2018)

Cat.	Ambienti	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]	H_k [kN/m]
H-I-K	Cat. H Coperture accessibili per sola manutenzione e riparazione	0,50	1,20	1,00
	Cat. I Coperture praticabili di ambienti di categoria d'uso compresa fra A e D	secondo categorie di appartenenza		
	Cat. K Coperture per usi speciali, quali impianti, eliporti.	da valutarsi caso per caso		

3.3.2 Azioni della neve (NTC – § 3.4)

Il carico uniformemente distribuito provocato dalla neve sulla copertura (q_s) viene valutato mediante la seguente espressione (NTC-§3.4.1):

$$q_s = q_{sk} \cdot \mu_i \cdot C_E \cdot C_t$$

dove:

q_{sk} è il valore di riferimento del carico della neve al suolo

μ_i è il coefficiente di forma della copertura

C_E è il coefficiente di esposizione

C_t è il coefficiente termico

VALORE DI RIFERIMENTO DEL CARICO DELLA NEVE AL SUOLO (NTC-§3.4.2)

L'area di progetto ricade nella **Zona I – Alpina** ed è posta ad un'altezza di 38 m s.l.m., quindi inferiore ai 200 m. Viene assunto un valore di riferimento del carico della neve al suolo pari a $q_{sk} = 1,5 \text{ kN/m}^2$.

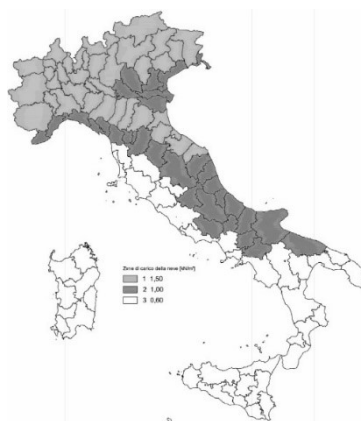


Figura 50. Zone di carico della neve (NTC2018-§3.4.2).

COEFFICIENTE DI FORMA DELLA COPERTURA (NTC-§3.4.3)

Il progetto prevede una copertura piana ($\alpha = 0^\circ$ l'angolo formato dalla falda con l'orizzontale), viene dunque assunto un valore di $\mu_i = 0,8$. (NTC-Tab. 3.4.II).

Tabella 1: Valori del coefficiente di forma (Tab. 3.4.II - NTC2018)

Coefficiente di forma	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_i	0,8	$0,8 \cdot \frac{(60 - \alpha)}{30}$	0,0

COEFFICIENTE DI ESPOSIZIONE (NTC-§3.4.4)

La topografia del luogo ove sorge il progetto è di tipo “Normale”, quindi si assume $C_E = 1,0$.

COEFFICIENTE TERMICO (NTC-§3.4.5)

In assenza di uno specifico e documentato studio, deve essere posto $C_t = 1,0$.

Quindi, il carico provocato dalla neve sulla copertura risulta pari a:

$$q_s = q_{sk} \cdot \mu_i \cdot C_E \cdot C_t = 1,5 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 1 = 1,2 \text{ kN/m}^2$$

3.3.3 Azioni del vento (NTC – § 3.3)

Il vento, la cui direzione si considera generalmente orizzontale, esercita sulle costruzioni azioni che variano nel tempo e nello spazio provocando effetti dinamici. Per le costruzioni usuali tali azioni sono convenzionalmente ricondotte alle azioni statiche equivalenti definite al paragrafo NTC-§ 3.3.3.

La pressione del vento è data dall'espressione (NTC-§3.3.4):

$$p = q_r \cdot c_e \cdot c_p \cdot c_d$$

dove

q_r è la pressione cinetica di riferimento

c_e è la coefficiente di esposizione

c_p è la coefficiente di pressione

c_d è la coefficiente dinamico

PRESSIONE CINETICA DI RIFERIMENTO (NTC-§3.3.6)

La pressione cinetica di riferimento q_r è data dall'espressione:

$$q_r = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2$$

dove

v_r è la velocità di riferimento del vento

ρ è la densità dell'aria, assunta convenzionalmente costante e pari a $1,25 \frac{kg}{m^3}$

Si calcola v_r , ovvero il valore medio su 10 minuti, a 10 m di altezza dal suolo su un terreno pianeggiante e omogeneo di categoria di esposizione II (NTC-Tab. 3.3.II), riferito al periodo di ritorno di progetto T_R .

$$v_r = v_b \cdot c_r$$

dove

v_b è la velocità base di riferimento

c_r è il coefficiente di ritorno, funzione del periodo di ritorno di progetto T_R . Assumendo un periodo di ritorno di 50 anni, $c_r = 1$

La velocità base di riferimento (v_b) è data dall'espressione (NTC-§3.3.1):

$$v_b = v_{b,0} \cdot c_a$$

La velocità base di riferimento al livello del mare $v_{b,0}$ è determinata in funzione della zona in cui sorge la costruzione: l'edificio oggetto di studio è situato nella zona 1 (NTC-Tab. 3.3.I), pertanto $v_{b,0} = 25 \frac{m}{s}$.

Il coefficiente di altitudine c_a è assunto pari a 1 in quanto $a_s = 38 \leq 1000 = a_0$ (NTC-3.3.1.b).

Risultano quindi:

$$v_b = 25 \frac{m}{s} \cdot 1 = 25 \frac{m}{s}$$

$$v_r = 25 \frac{m}{s} \cdot 1 = 25 \frac{m}{s}$$

Quindi, la pressione cinetica di riferimento è pari a:

$$q_r = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \frac{kg}{m^3} \cdot \left(25 \frac{m}{s}\right)^2$$

$$q_r = 0,391 \frac{kN}{m^2}$$

COEFFICIENTE DI ESPOSIZIONE (NTC-§3.3.7)

Il coefficiente di esposizione c_e dipende dall'altezza z sul suolo del punto considerato, dalla topografia del terreno e dalla categoria di esposizione del sito ove sorge la costruzione. In assenza di analisi specifiche che tengano in conto la direzione di provenienza del vento e

l'effettiva scabrezza e topografia del terreno che circonda la costruzione, per altezze sul suolo non maggiori di $z = 200 \text{ m}$, esso è dato dalla formula:

$$c_e(z) = k_r^2 \cdot c_t \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot \left[7 + c_t \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)\right] \quad \text{per } z \geq z_{\min}$$

$$c_e(z) = c_e(z_{\min}) \quad \text{per } z < z_{\min}$$

Per le zone pianeggianti, ondulate, collinose e montane, si pone il coefficiente di topografia $c_t = 1$.

I coefficienti k_r , z_0 e $z_{\min}$ sono assegnati in funzione della categoria di esposizione del sito. La categoria di esposizione è assegnata in funzione della classe di rugosità del terreno e della posizione geografica del sito ove sorge la costruzione.

La classe di rugosità del terreno può considerarsi di tipo B, in quanto l'edificio viene progettato in area urbana (non di classe A).

La costruzione sorge su un sito a più di 30 km dalla costa e a meno di 500 m di altitudine.

Si assume quindi la categoria di esposizione IV (NTC - Fig. 3.3.2).

Per cui, dalla NTC-Tab. 3.3.II, risultano $k_r = 0,22$, $z_0 = 0,30$ e $z_{\min} = 8$.

ZONE 1,2,3,4,5						
	costa					
	mare					
	2 km	10 km	30 km	500m	750m	
A	--	IV	IV	V	V	V
B	--	III	III	IV	IV	IV
C	--	*	III	III	IV	IV
D	I	II	II	II	III	**
* Categoria II in zona 1,2,3,4 Categoria III in zona 5						
** Categoria III in zona 2,3,4,5 Categoria IV in zona 1						

Tab. 3.3.II - Parametri per la definizione del coefficiente di esposizione

Categoria di esposizione del sito	K_r	z_0 [m]	$z_{\min}$ [m]
I	0,17	0,01	2
II	0,19	0,05	4
III	0,20	0,10	5
IV	0,22	0,30	8
V	0,23	0,70	12

Tabella 1: Parametri per la definizione del coefficiente di esposizione (NTC2018-Tab. 3.3.II)

Figura 51. Categorie di esposizione (NTC - Fig. 3.3.2).

L'edificio oggetto di studio ha un'altezza di $z = 3,25 \text{ m}$. Essendo $z < z_{\min}$, il coefficiente di esposizione c_e risulta quindi pari a:

$$c_e(z) = c_e(z_{\min}) = 0,22^2 \cdot 1 \cdot \ln\left(\frac{8}{0,30}\right) \cdot \left[7 + 1 \cdot \ln\left(\frac{8}{0,30}\right)\right] = \mathbf{1,634}$$

COEFFICIENTE DINAMICO (NTC-§3.3.9)

Il coefficiente dinamico tiene conto degli effetti riduttivi associati alla non contemporaneità delle massime pressioni locali e degli effetti amplificativi dovuti alla risposta dinamica della struttura.

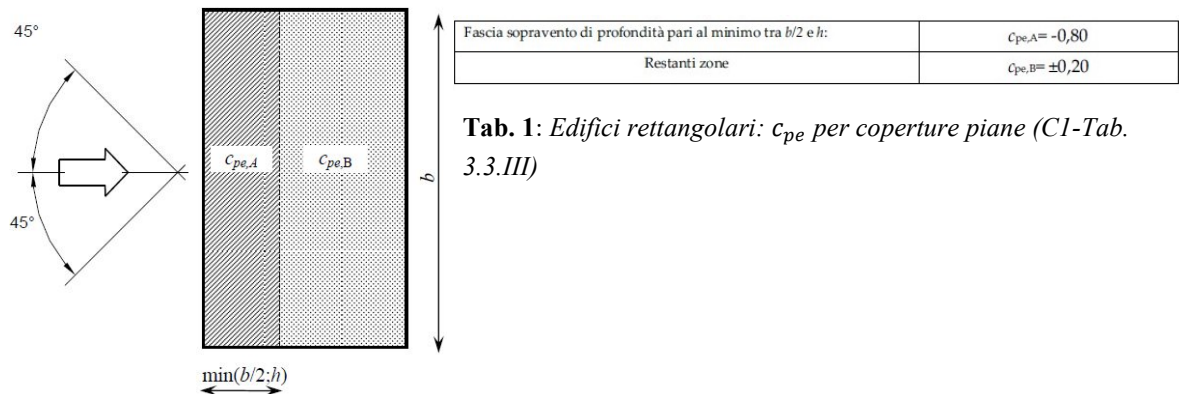
Esso può essere assunto cautelativamente pari ad **1** nelle costruzioni di tipologia ricorrente, quali gli edifici di forma regolare non eccedenti 80 m di altezza ed i capannoni industriali, oppure può essere determinato mediante analisi specifiche o facendo riferimento a dati di comprovata affidabilità.

COEFFICIENTE DI PRESSIONE (NTC-§3.3.8)

Il coefficiente di pressione c_p dipende dalla tipologia e dalla geometria della costruzione e dal suo orientamento rispetto alla direzione del vento. Per il calcolo di c_p si distingue tra azione del vento agente sulla copertura e azione del vento agente sulle pareti.

3.3.3.1 Azioni del vento sulla copertura

I coefficienti globali c_{pe} da assumere sulle coperture piane di un edificio a pianta rettangolare sono riportati nella Circolare2019 (C1) in Figura C3.3.5 e in Tabella C3.3.III.



Tab. 1: Edifici rettangolari: c_{pe} per coperture piane (C1-Tab. 3.3.III)

Figura 52. Schema di riferimento per coperture piane (C1-Fig. 3.3.5).

VENTO CHE SPIRA IN DIREZIONE X

$$h = 3,25 \text{ m}$$

$$b = 4 \text{ m} \text{ larghezza della faccia colpita}$$

$$\frac{b}{2} = 2 \text{ m}$$

$$\min\left(\frac{b}{2}; h\right) = 2 \text{ m}$$

Si individuano le seguenti zone:

- zona sovravento A: fascia di $2 \times 4 \text{ m}$
- zona sottovento B: fascia di $6 \times 4 \text{ m}$

La pressione del vento risulta quindi pari a:

- zona A: $p_A = q_r \cdot c_e \cdot c_{pe,A} \cdot c_d = 0,391 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1,634 \cdot (-0,80) \cdot 1 = -0,51 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
- zona B: $p_B = q_r \cdot c_e \cdot c_{pe,B} \cdot c_d = 0,391 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1,634 \cdot (\pm 0,20) \cdot 1 = \pm 0,128 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

VENTO CHE SPIRA IN DIREZIONE Y

$$h = 3,25 \text{ m}$$

$$b = 8 \text{ m}$$

$$\frac{b}{2} = 4 \text{ m}$$

$$\min\left(\frac{b}{2}; h\right) = 3,25 \text{ m}$$

Si individuano le seguenti zone:

- zona sovravento A: fascia di $3,25 \times 8 \text{ m}$
- zona sottovento B: fascia di $0,75 \times 8 \text{ m}$

La pressione del vento risulta quindi pari a:

- zona A: $p_A = q_r \cdot c_e \cdot c_{pe,A} \cdot c_d = 0,391 \frac{kN}{m^2} \cdot 1,634 \cdot (-0,80) \cdot 1 = -0,51 \frac{kN}{m^2}$
- zona B: $p_B = q_r \cdot c_e \cdot c_{pe,B} \cdot c_d = 0,391 \frac{kN}{m^2} \cdot 1,634 \cdot (\pm 0,20) \cdot 1 = \pm 0,128 \frac{kN}{m^2}$

3.3.3.2 Azioni del vento sulle pareti

Il coefficiente globale c_{pe} da assumere sulle pareti di un edificio a pianta rettangolare è riportato nella C1: Figura C3.3.2 e in Tabella C3.3.I.

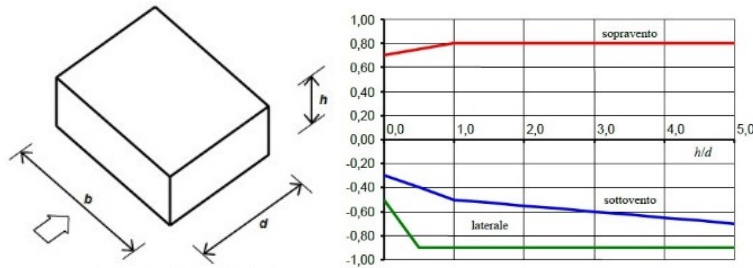


Figura 53. Parametri caratteristici di edifici a pianta rettangolare: c_{pe} per facce sopravvento, sottovento e laterali (C1-Fig.3.3.2 (a) e (b)).

Tabella 1: Edifici a pianta rettangolare: c_{pe} per facce sopravvento, sottovento e laterali (C1-Tab.3.3.1)

Faccia sopravvento	$C_U = 2,0$	$C_U = 1,5$
$h/d \leq 1$: $c_{pe} = 0,7 + 0,1 \cdot h/d$	$h/d \leq 0,5$: $c_{pe} = -0,5 - 0,8 \cdot h/d$	$h/d \leq 1$: $c_{pe} = -0,3 - 0,2 \cdot h/d$
$h/d > 1$: $c_{pe} = 0,8$	$h/d > 0,5$: $c_{pe} = -0,9$	$1 < h/d \leq 5$: $c_{pe} = -0,5 - 0,05 \cdot (h/d - 1)$

VENTO CHE SPIRA IN DIREZIONE X

$$h = 3,25 \text{ m}$$

$$d = 8 \text{ m} \text{ profondità parete colpita}$$

$$\frac{h}{d} = 0,406$$

Il coefficiente globale c_{pe} risulta quindi pari a:

- faccia sopravvento: $c_{pe,1} = 0,7 + 0,1 \cdot 0,406 = 0,741$
- faccia sottovento: $c_{pe,2} = -0,3 - 0,2 \cdot 0,406 = -0,381$
- facce laterali: $c_{pe,3} = -0,5 - 0,8 \cdot 0,406 = -0,825$

La pressione del vento risulta quindi pari a:

- faccia sopravvento: $p_1 = q_r \cdot c_e \cdot c_{pe,1} \cdot c_d = 0,391 \cdot 1,634 \cdot 0,741 \cdot 1 = 0,47 \frac{kN}{m^2}$
- faccia sottovento: $p_2 = q_r \cdot c_e \cdot c_{pe,2} \cdot c_d = 0,391 \cdot 1,634 \cdot (-0,381) \cdot 1 = -0,24 \frac{kN}{m^2}$
- facce laterali: $p_3 = q_r \cdot c_e \cdot c_{pe,3} \cdot c_d = 0,391 \cdot 1,634 \cdot (-0,825) \cdot 1 = -0,53 \frac{kN}{m^2}$

VENTO CHE SPIRA IN DIREZIONE Y

$$h = 3,25 \text{ m}$$

$$d = 4 \text{ m} \text{ profondità parete colpita}$$

$$\frac{h}{d} = 0.81$$

Il coefficiente globale c_{pe} risulta quindi pari a:

- faccia sopravvento: $c_{pe,1} = 0,7 + 0,1 \cdot 0.75 = 0,781$
- faccia sottovento: $c_{pe,2} = -0,3 - 0,2 \cdot 0.75 = -0,462$
- facce laterali: $c_{pe,3} = -0,9$

La pressione del vento risulta quindi pari a:

- faccia sopravvento: $p_1 = q_r \cdot c_e \cdot c_{pe,1} \cdot c_d = 0,391 \cdot 1,634 \cdot 0,781 \cdot 1 = 0,50 \frac{kN}{m^2}$
- faccia sottovento: $p_2 = q_r \cdot c_e \cdot c_{pe,2} \cdot c_d = 0,391 \cdot 1,634 \cdot (-0,462) \cdot 1 = -0,30 \frac{kN}{m^2}$
- facce laterali: $p_3 = q_r \cdot c_e \cdot c_{pe,3} \cdot c_d = 0,391 \cdot 1,634 \cdot (-0,9) \cdot 1 = -0,57 \frac{kN}{m^2}$

3.3.4 Azione sismica (NTC-§ 3.2)

Si segue quanto indicato ai paragrafi 2.4 e 3.2 delle NTC2018.

VITA NOMINALE DI PROGETTO (NTC-§2.4.1)

La vita nominale di progetto V_N di un'opera è convenzionalmente definita come il numero di anni nel quale è previsto che l'opera, purché soggetta alla necessaria manutenzione, mantenga specifici livelli prestazionali.

Tabella 1: Valori minimi della Vita nominale V_N di progetto per i diversi tipi di costruzioni (NTC-Tab.2.4.1)

TIPI DI COSTRUZIONI		Valori minimi di V_N (anni)
1	Costruzioni temporanee e provvisorie	10
2	Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari	50
3	Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	100

Per l'edificio in esame si assume una vita nominale $V_N = 50$ anni

CLASSE D'USO (NTC-§2.4.2)

Con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso. Per l'edificio in esame è stata considerata una **classe d'uso II**: “Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. [...]”

PERIODO DI RIFERIMENTO PER L'AZIONE SISMICA (NTC-§2.4.3)

Le azioni sismiche sulle costruzioni vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento V_R che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale di progetto V_N per il coefficiente d'uso c_u :

$$V_R = V_N \cdot c_u$$

Il valore del coefficiente d'uso c_u è definito, al variare della classe d'uso, come mostrato in Tab. 2.4.II. Considerando una classe d'uso II risulta $c_u = 1$.

Tabella 1: Valori del coefficiente d'uso c_u (NTC-Tab.2.4.II)

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE c_u	0,7	1,0	1,5	2,0

Per l'edificio in esame risulta quindi $V_R = 50 \text{ anni}$.

STATI LIMITE (NTC-§3.2.1)

Le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla “pericolosità sismica di base” del sito di costruzione e dipendono delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche che determinano la risposta sismica locale. La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima al sito a_g , nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{V_R} , nel periodo di riferimento V_R .

Ai fini delle NTC2018 le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento P_{V_R} nel periodo di riferimento V_R , a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

- a_g accelerazione orizzontale massima al sito;
- F_0 valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T_C^* valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Nel caso in esame si trascura l'azione sismica verticale. I parametri a_g , F_0 e T_C^* possono essere ottenuti come funzione del periodo di ritorno e delle coordinate geografiche utilizzando la tabella all'Allegato B delle NTC18. In questo studio è stato utilizzato il foglio Excel *Spettri-NTCver.1.0.3 (Consiglio Superiore dei LLPP)* (i valori sono riportati nelle tabelle riassuntive per gli stati limite di interesse).

Nei confronti delle azioni sismiche, sia gli Stati limite di esercizio (SLE) che gli Stati limite ultimi (SLU) sono individuati riferendosi alle prestazioni della costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali e gli impianti.

Gli Stati limite di esercizio (SLE) comprendono:

- Stato Limite di Operatività (SLO)
- Stato Limite di Danno (SLD)

Gli Stati limite ultimi (SLU) comprendono:

- Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV)
- Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC)

Le probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{V_R} , cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente in ciascuno degli stati limite considerati, sono riportate nella NTC-Tab. 3.2.I.

Tabella 1: Probabilità di superamento P_{V_R} in funzione dello stato limite considerato (NTC-Tab.3.2.I)

Stati Limite	P_{V_R} : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R	
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Per ciascuno stato limite e relativa probabilità di eccedenza P_{V_R} nel periodo di riferimento V_R si ricava il periodo di ritorno T_R del sisma utilizzando la relazione:

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{V_R})} = -\frac{V_N \cdot c_u}{\ln(1 - P_{V_R})}$$

Stato limite	Periodo di ritorno T_R [anni]
SLO	30
SLD	50
SLV	475
SLC	975

CALCOLO DELLO SPETTRO ELASTICO DI PROGETTO (NTC-§3.2.3.2.1)

Lo spettro di risposta elastico in accelerazione della componente orizzontale del moto sismico, S_e , è definito dalle espressioni seguenti:

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \cdot \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right)$$

$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right)$$

nelle quali:

- T è il periodo proprio di vibrazione;
- S è il coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche mediante la relazione seguente:

$$S = S_S \cdot S_T$$

con S_S il coefficiente di amplificazione stratigrafica e S_T il coefficiente di amplificazione topografica;

- η è il fattore che altera lo spettro elastico per coefficienti di smorzamento viscosi convenzionali ξ diversi dal 5%, mediante la relazione:

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0,55$$

dove ξ (espresso in percentuale) è valutato sulla base dei materiali, della tipologia strutturale e del terreno di fondazione;

- F_0 è il fattore che quantifica l'amplificazione spettrale massima, su sito di riferimento rigido orizzontale, ed ha valore minimo pari a 2,2;
- T_C è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro, dato dalla relazione

$$T_C = C_C \cdot T_C^*$$

dove C_C è un coefficiente funzione della categoria di sottosuolo;

- T_B è il periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante, dato dalla relazione

$$T_B = T_C/3$$

- T_D è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante dello spettro, espresso in secondi mediante la relazione:

$$T_D = 4,0 \cdot \frac{a_g}{g} + 1,6$$

CATEGORIE DI SOTTOSUOLO E CONDIZIONI TOPOGRAFICHE (NTC-§3.2.2)

Qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio V_s . Nel caso in esame il **sottosuolo** appartiene alla **categoria B** “Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s”. La categoria di sottosuolo è stata scelta consultando diverse relazioni geologiche effettuate nei pressi del lotto di progetto.

La tabella 3.3.IV delle NTC fornisce le formule per determinare S_s e c_c in funzione della categoria del sottosuolo.

Tabella 1: Espressioni di S_s e di C_C (NTC-Tab.3.2.IV)

Categoria sottosuolo	S_s	C_c
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_c^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_c^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$	$1,25 \cdot (T_c^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_c^*)^{-0,40}$

Per condizioni topografiche complesse è necessario predisporre specifiche analisi di risposta sismica locale. Per configurazioni superficiali semplici si può adottare la seguente classificazione:

Tabella 1: *Categorie topografiche (NTC-Tab.3.2.III)*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Nel caso in esame si assume la **categoria topografica T1**.

Tabella 1: *Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica S_T (NTC-Tab.3.2.V)*

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_T
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a 30°	1,2
T4	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di 30°	1,4

Dalla tabella 3.2.V risulta un valore massimo del coefficiente di amplificazione topografica $S_T = 1,0$.

ANALISI LINEARE E CALCOLO DEL FATTORE DI COMPORTAMENTO q (NTC-§7.3.1)

Nel caso di analisi lineare, la domanda sismica per strutture a comportamento sia non dissipativo, sia dissipativo, può essere ridotta utilizzando un opportuno fattore di comportamento q . Il fattore che altera lo spettro elastico $\eta = f(\xi)$, risulta pari a $\eta = 1/q$. I valori attribuibili a q variano in funzione del comportamento strutturale (dissipativo o non dissipativo) e dello stato limite considerati, legandosi all'entità delle plasticizzazioni, che a ciascuno stato limite si accompagnano.

Il limite superiore q_{lim} del fattore di comportamento relativo allo SLV è calcolato tramite la seguente espressione:

$$q_{lim} = q_0 \cdot K_R$$

dove:

- q_0 è il valore base del fattore di comportamento allo SLV, i cui massimi valori sono riportati in tabella 7.3.II in dipendenza della Classe di Duttività, della tipologia strutturale, del coefficiente λ di cui al §7.9.2.1 e del rapporto α_u/α_1 tra il valore dell'azione sismica per il quale si verifica la plasticizzazione in un numero di zone dissipative tale da rendere la struttura un meccanismo e quello per il quale il primo elemento strutturale raggiunge la plasticizzazione a flessione; la scelta di q_0 deve essere esplicitamente giustificata;
- K_R è un fattore che dipende dalle caratteristiche di regolarità in altezza della costruzione, con valore pari ad 1 per costruzioni regolari in altezza e pari a 0,8 per costruzioni non regolari in altezza.

Nel caso in esame si assume una classe di duttilità CD "B", per cui, secondo la tabella 7.3.II delle NTC, nel caso di "costruzioni di muratura confinata", risulta $q = q_0 = 2,0\alpha_u/\alpha_1 = 2,0 \cdot 1,6 = 3,2$. Con $\alpha_u/\alpha_1 = 1,6$ come definito al paragrafo NTC-§7.8.1.3. Cautelativamente, in assenza di pregresse conoscenze riguardanti il comportamento sperimentale di pareti realizzate tramite *Extrusion Printing*, viene assunto un fattore di comportamento inferiore: $q = q_0 = 2$. Questo valore rispetta anche quanto previsto dall'EC8 al paragrafo §14.4.

Tabella 1: Valori massimi del valore di base q_0 del fattore di comportamento allo SLV per diverse tecniche costruttive ed in funzione della tipologia (NTC-Tab.7.3.II)

Tipologia strutturale	q_0	
	CD "A"	CD "B"
Costruzioni di muratura (§ 7.8.1.3)		
Costruzioni di muratura ordinaria	$1,75 \alpha_u/\alpha_1$	
Costruzioni di muratura armata	$2,5 \alpha_u/\alpha_1$	
Costruzioni di muratura armata con progettazione in capacità	$3,0 \alpha_u/\alpha_1$	
Costruzioni di muratura confinata	$2,0 \alpha_u/\alpha_1$	
Costruzioni di muratura confinata con progettazione in capacità	$3,0 \alpha_u/\alpha_1$	

Ora si riassume quanto ottenuto per gli stati limite SLV e SLD.

SPETTRO ALLO STATO LIMITE ULTIMO SLV

AZIONE SISMICA DEL SUOLO	
accelerazione orizzontale massima al sito	$a_g = 0,197g$
valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale	$F_0 = 2,441$
valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale	$T_c^* = 0,333$
DATI PER LA DETERMINAZIONE DEGLI SPETTRI DI RISPOSTA	
Vita nominale	$V_N = 50 \text{ anni}$
Coefficiente d'uso	$c_u = 1,0$
Periodo di riferimento allo SLV	$V_R = 50 \text{ anni}$
Periodo di ritorno	$T_R = 475 \text{ anni}$
Categoria del sottosuolo	B
Categoria topografica	T_1
Coefficiente di amplificazione stratigrafica	$S_S = 1,2$
Coefficiente di amplificazione topografica	$S_T = 1,0$
Coefficiente comprendente categoria di sottosuolo e condizioni topografiche	$S = 1,2$
Coefficiente che dipende dalla categoria del sottosuolo	$c_c = 1,371$
Fattore di comportamento	$q = 2$
Smorzamento	$\xi = 5\%$
Periodo corrispondente all'inizio del tratto di spettro ad accelerazione costante	$T_B = 0,152$
Periodo corrispondente all'inizio del tratto di spettro a velocità costante	$T_c = 0,456$
Periodo corrispondente all'inizio del tratto di spettro a spostamento costante	$T_D = 2,388$

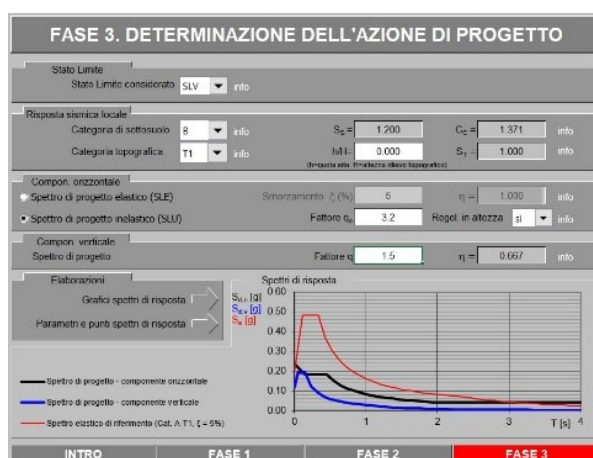


Figura 54. Determinazione dell'azione di progetto agli SLV tramite Spettri-NTCver.1.0.3 (Consiglio Superiore dei LLPP).

L'accelerazione spettrale di progetto, corrispondente graficamente al tratto in cui risulta $T_B \leq T_1 < T_c$, può essere calcolata nel seguente modo:

$$S_{d,maxSLV} = a_g \cdot S \cdot \frac{1}{q} \cdot F_0 = 0,197 \cdot 1,2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 2,441 = 0,289g$$

SPETTRO ALLO STATO LIMITE DI ESERCIZIO SLD

AZIONE SISMICA DEL SUOLO	
accelerazione orizzontale massima al sito	$a_g = 0,070g$

valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale	$F_0 = 2,453$
valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale	$T_c^* = 0,264$
DATI PER LA DETERMINAZIONE DEGLI SPETTRI DI RISPOSTA	
Vita nominale	$V_N = 50 \text{ anni}$
Coefficiente d'uso	$c_u = 1,0$
Periodo di riferimento allo SLV	$V_R = 50 \text{ anni}$
Periodo di ritorno	$T_R = 50 \text{ anni}$
Categoria del sottosuolo	B
Categoria topografica	T_1
Coefficiente di amplificazione stratigrafica	$S_S = 1,2$
Coefficiente di amplificazione topografica	$S_T = 1,0$
Coefficiente comprendente categoria di sottosuolo e condizioni topografiche	$S = 1,2$
Coefficiente che dipende dalla categoria del sottosuolo	$c_c = 1,436$
Smorzamento	$\xi = 5\%$
Periodo corrispondente all'inizio del tratto di spettro ad accelerazione costante	$T_B = 0,126$
Periodo corrispondente all'inizio del tratto di spettro a velocità costante	$T_C = 0,379$
Periodo corrispondente all'inizio del tratto di spettro a spostamento costante	$T_D = 1,880$

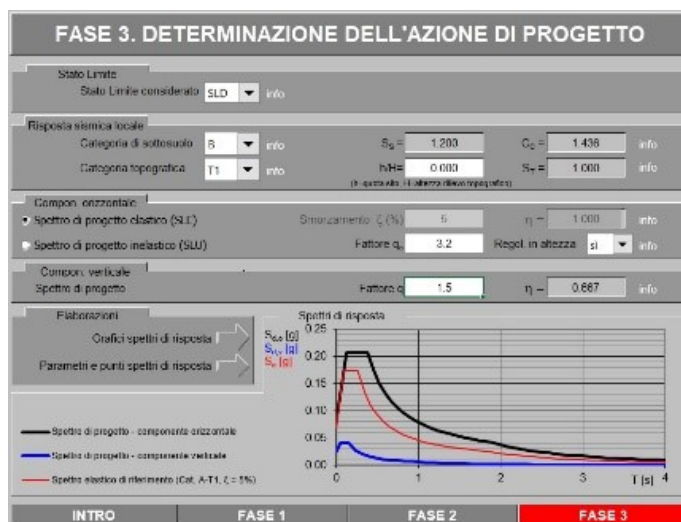


Figura 55. Determinazione dell'azione di progetto agli SLD tramite Spettri-NTCver.1.0.3 (Consiglio Superiore dei LLPP)

L'accelerazione spettrale di progetto, corrispondente graficamente al tratto in cui risulta $T_B \leq T_1 < T_c$, può essere calcolata nel seguente modo:

$$S_{a,maxSLD} = a_g \cdot S \cdot F_0 = 0,070 \cdot 1,2 \cdot 2,453 = 0,206g$$

COMBINAZIONI DELLE AZIONI

Le azioni sulle costruzioni vengono classificate a seconda della variazione della loro intensità nel tempo in: permanenti (G), variabili (Q), eccezionali (A) e sismiche (E). Ai fini delle verifiche degli stati limite, si definiscono al paragrafo NTC-§ 2.5.3 le seguenti combinazioni delle azioni.

- Combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi (SLU):

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$
[2.5.1]
 - Combinazione caratteristica, cosiddetta rara, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili:

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$
[2.5.2]
 - Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$
[2.5.3]
 - Combinazione quasi permanente (SLE), generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$
[2.5.4]
 - Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E:

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$
[2.5.5]
 - Combinazione eccezionale, impiegata per gli stati limite ultimi connessi alle azioni eccezionali A:

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$
[2.5.6]
- Gli effetti dell'azione sismica saranno valutati tenendo conto delle masse associate ai seguenti carichi gravitazionali:
- $$G_1 + G_2 + \sum_j \psi_{2j} Q_{kj}$$
- [2.5.7]

La tabella 2.5.I delle NTC18 riporta i coefficienti di combinazione da adottarsi per gli edifici civili e industriali di tipo corrente.

Tabella 1: Valori dei coefficienti di combinazione (NTC-Tab.2.5.I).

Categoria/Azione variabile	ψ_{0j}	ψ_{1j}	ψ_{2j}
Categoria A - Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B - Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C - Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D - Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E - Aree per immagazzinamento, uso commerciale e uso industriale Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F - Rimesse, parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6
Categoria G - Rimesse, parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H - Coperture accessibili per sola manutenzione	0,0	0,0	0,0
Categoria I - Coperture praticabili	da valutarsi caso per caso		
Categoria K - Coperture per usi speciali (impianti, eliporti, ...)	da valutarsi caso per caso		
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0

La tabella 2.6.I riporta i valori dei coefficienti parziali γ_F da assumersi per la determinazione degli effetti delle azioni nelle verifiche agli stati limite ultimi.

Tabella 1: Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU (NTC-Tab.2.6.I).

		Coefficiente γ_F	EQU	A1	A2
Carichi permanenti G_1	Favorevoli	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali $G_2^{(1)}$	Favorevoli	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevoli	γ_{Q8}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ Nel caso in cui l'intensità dei carichi permanenti non strutturali o di una parte di essi (ad es. carichi permanenti portati) sia ben definita in fase di progetto, per detti carichi o per la parte di essi nota si potranno adottare gli stessi coefficienti parziali validi per le azioni permanenti.

Per la progettazione di componenti strutturali che non coinvolgano azioni di tipo geotecnico, le verifiche nei confronti degli stati limite ultimi strutturali (STR) si eseguono adottando i coefficienti γ_F riportati nella colonna A1 della Tabella 2.6.I.

3.4 Copertura: predimensionamento e verifiche

Carichi	Stratigrafia	Spessore [m]	Peso specifico [kg/m³]	Peso [kg/m²]	Peso [kN/m²]
Carichi permanenti strutturali (g1)	Predalles prefabbricate 120 cm in calcestruzzo armato (5+12+4) (vedi sito T2D)	0,21	-	325	3,25
Carichi permanenti non strutturali (g2) (vedipro Padova)	Impianto fotovoltaico	0,05	-	-	0,50
	Copertura metallica	-	-	-	0,3
	Guaina bituminosa in doppio strato bianca	-	-	-	-
	Isolante termico	0,08	30	2,4	0,024
	Barriera a vapore	-	-	-	-
	Massetto alleggerito EPS (pendenza 1%)	0,05	500	25	0,25
	Intonaco interno	-	-	-	0,5
					1,574

Il solaio è ordito nella direzione di lato minore, con una campata di luce $l = 3,65 \text{ m}$. Lo spessore complessivo del solaio predalles è 21 cm. La lastra prefabbricata è stata progettata in modo tale che ogni nervatura del solaio abbia spessore di 20 cm, pertanto ogni lastra da 120 cm è costituita da una nervatura centrale di 20 cm e due nervature laterali da 10 cm. La soletta da 4 cm assicura il comportamento a diaframma del solaio (EC8-§10.12.1(2)).

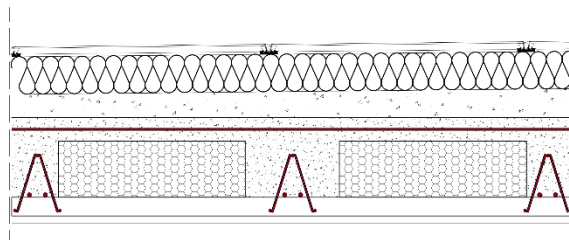


Figura 56. Sezione trasversale solaio predalles.

Si considera una fascia di solaio di larghezza pari a $i = 0,6 \text{ m}$, corrispondente alla dimensione massima della sezione a T. Utilizzando la combinazione agli SLU, si ottiene:

$$\begin{aligned}
 q_{SLU,sfav} &= i \cdot (\gamma_{G1} \cdot g1 + \gamma_{G2} \cdot g2 + \gamma_{Q1} \cdot q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot q_{k3}) \\
 &= 0,6 \cdot (1,3 \cdot 3,25 + 1,5 \cdot (1,574 + 1,2) + 1,5 \cdot 0 \cdot 0,5 + 1,5 \cdot 0 \cdot 0,128) = \mathbf{5,03 \text{ kN/m}}
 \end{aligned}$$

Si calcolano ora le sollecitazioni massime sul singolo travetto:

$$M_{Ed} = q_{SLU,sfav} \cdot \frac{l^2}{8} = 8,38 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} = 0.5 \cdot q_{SLU, sfav} \cdot l = 9,18 \text{ kN}$$

Si procede al calcolo dell'armatura integrativa in zona tesa, verificando che siano rispettati i limiti di duttilità.

A favore di sicurezza si considera solamente l'acciaio in zona tesa e viene trascurato l'acciaio del traliccio. Si impone l'equilibrio tra il momento sollecitante (M_{Ed}) e il momento resistente (M_{Rd}) rispetto al baricentro della zona compressa della sezione.

Ponendo come braccio $0,9d$ e ipotizzando di utilizzare barre di armatura longitudinale di diametro $\phi = 10 \text{ mm}$ poste sopra la lastra prefabbricata (spessore superiore rispetto al copriferro minimo) si ottiene:

$$A_{s,min} = \frac{M_{Ed}}{0,9 \cdot f_{yd} \cdot d} = \frac{8,38}{0,9 \cdot 391,3 \cdot 15,5} = 153,50 \text{ mm}^2$$

con:

M_{Ed} il momento massimo in mezzzeria

f_{yd} la resistenza di progetto a snervamento

$$d = h_{tot} - h_l - \frac{\phi}{2} = 21 - 4 - 0.5 = 15,5 \text{ cm}$$

Si dispongono quindi **2 ϕ 10** integrativi, per cui $A_{s,eff} = 2 \cdot (\pi \cdot 5^2) = 157,08 \text{ mm}^2 > A_{s,min}$

- Verifica allo stato limite ultimo di flessione (NTC-§ 4.1.2.3.4.2)

Il momento resistente viene calcolato sia seguendo le NTC2018, sia affidandosi al software di calcolo *VCA SLU*.

Si ipotizza che l'asse neutro della sezione cada all'interno della soletta. Quindi si impone l'equilibrio alla traslazione della sezione eguagliando la risultante delle forze di compressione con la risultante delle forze di trazione:

$$0,8 \cdot B \cdot x \cdot f_{c1} = A_s \cdot f_{yd}$$

Da cui:

$$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{0,8 \cdot B \cdot f_{c1}} = 11,3 \text{ mm}$$

con $f_{c1} = 0,8 \cdot f_{cd}$ nell'ipotesi di $x \leq 40 \text{ mm}$.

Si calcola ξ per verificare che siano rispettati i limiti di duttilità:

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,073 < \xi_{lim}$$

per $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ il rapporto $\frac{x}{d}$ non deve superare 0,45 (NTC-§4.1.1.1).

Nota la posizione dell'asse neutro è possibile calcolare il momento resistente imponendo l'equilibrio alla rotazione rispetto al baricentro delle compressioni:

$$M_{Rd} = 0,8 \cdot B \cdot d^2 \cdot \xi \cdot f_{c1} \cdot (1 - 0,4 \cdot \xi) = 9,25 \text{ kNm} > M_{Ed}$$

- Verifica di resistenza (SLU) a taglio (NTC-§ 4.1.2.3.5.1)

La resistenza a taglio della nervatura viene valutata sulla base della resistenza a trazione del calcestruzzo privo di armature specifiche a taglio, come prescritto nel paragrafo NTC-§4.1.2.3.5.1. la capacità resistente è affidata ai meccanismi di resistenza secondari (effetto arco, attrito del corrente compresso, effetto biella, effetto di ingranamento degli inerti, effetto pettine).

Con riferimento all'elemento fessurato da momento flettente, la resistenza di progetto a taglio si calcola mediante la seguente espressione:

$$V_{Rd} = \max \left\{ \left[0,18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} / \gamma_c + 0,15 \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d; (v_{min} + 0,15 \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \right\} = 17,34 \text{ kN} > V_{Ed}$$

con:

$d = 155 \text{ mm}$ altezza utile della sezione (in mm);

$b_w = 200 \text{ mm}$ larghezza minima della sezione (in mm);

$k = 1 + (200/d)^{1/2} = 2,14 \leq 2$;

$v_{min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} = 0,49$;

$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} = 0,005$ rapporto geometrico di armatura longitudinale tesa ($\leq 0,02$) che si estende per non meno di $(l_{bd} + d)$ oltre la sezione considerata, dove l_{bd} è la lunghezza di ancoraggio;

$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} = 0$ è la tensione media di compressione nella sezione ($\leq 0,2 f_{cd}$).

- Calcolo e verifica della rete elettrosaldata

Per prassi si fa riferimento al D.M. 09/01/1996, verificando la conformità alle prescrizioni delle NTC2018 e C1.

Affinchè sia assicurato il comportamento a piastra del solaio è necessario prevedere all'estradosso una soletta gettata in opera di spessore non inferiore a 4 cm munita di adeguata armatura, pari almeno al 20% dell'armatura longitudinale presente all'intradosso del solaio. Come già definito la soletta ha uno spessore di 4 cm, ora si calcola l'armatura minima:

$$A_{min} = 0,2 \cdot A_{long} = 0,2 \cdot \frac{A_s}{L} = 0,2 \cdot \frac{157,08}{0,6} = 52,36 \text{ mm}^2/m$$

L'area trasversale al metro lineare di rete elettrosaldata si calcola come:

$$A_{res} = \frac{\pi \cdot \varnothing^2}{4} \cdot \frac{1}{s}$$

Assumendo una rete elettrosaldata 30x30 cm $\varnothing 6$ risulta:

$$A_{res} = 94,25 > 52,36 = A_{min}$$

Il diametro delle armature calcolate rispetta i valori minimi definiti nella C1.

- Verifica di deformabilità (C1-§4.1.2.2.2)

La verifica di deformabilità agli SLE viene condotta in accordo con il paragrafo §4.1.2.2.2 della C1, mediante il criterio di verifica semplificata.

Per travi e solai con luci non superiori a 10 m è possibile omettere la verifica delle inflessioni, ritenendola implicitamente soddisfatta, se il rapporto l/h tra luce e altezza rispetta la limitazione:

$$\frac{l}{h} \leq K \cdot \left[11 + \frac{0,0015 \cdot f_{ck}}{\rho + \rho'} \right] \left[\frac{500 \cdot A_{s,eff}}{f_{yk} \cdot A_{s,calc}} \right]$$

Per sezioni a T aventi larghezza dell'ala almeno 3 volte maggiore dello spessore dell'anima, i valori della formula devono essere ridotti del 20%.

$$\frac{3,65}{0,21} \leq 0,8 \cdot 1 \cdot \left[11 + \frac{0,0015 \cdot 25}{0,00125} \right] \left[\frac{500 \cdot 1,02}{450} \right]$$

$$17,38 \leq 37,37$$

con:

$K = 1$ coefficiente correttivo che dipende dallo schema strutturale;

$\rho = \frac{A_s}{60 \cdot H_{tot}} = 0,125\%$ rapporto armatura tesa.

- Verifica di fessurazione (NTC-§4.1.2.2.4.5)

Le combinazioni di carico da considerare nella verifica a fessurazione agli SLE sono la combinazione frequente e la combinazione quasi permanente ($i=60$ cm):

$$q_{SLE,frequente} = i \cdot (g_1 + g_2 + \psi_{11} \cdot q_{k1} + \psi_{22} \cdot q_{k2} + \psi_{23} \cdot q_{k3}) = 3,04 \text{ kN/m}$$

$$q_{SLE,qp} = i \cdot (g_1 + g_2 + \psi_{21} \cdot q_{k1} + \psi_{22} \cdot q_{k2} + \psi_{23} \cdot q_{k3}) = 2,89 \text{ kN/m}$$

Si trova un momento massimo corrispondente:

$$M_{Ed,frequente} = q_{SLE,frequente} \cdot \frac{l^2}{8} = 5,06 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,qp} = q_{SLE,qp} \cdot \frac{l^2}{8} = 4,82 \text{ kNm}$$

Il valore limite di apertura della fessura viene definito in funzione delle condizioni ambientali e della sensibilità delle armature alla corrosione.

Tabella 1: Criteri di scelta dello stato limite di fessurazione (NTC-Tab.4.1.IV)

Gruppi di Esigenze	Condizioni ambientali	Combinazione di azioni	Sensibile Stato limite	Armatura	
				w_k	Poco sensibile Stato limite w_k
A	Ordinarie	frequente	apertura fessure	$\leq w_3$	apertura fessure $\leq w_3$
		quasi permanente	apertura fessure	$\leq w_1$	apertura fessure $\leq w_2$
B	Aggressive	frequente	apertura fessure	$\leq w_1$	apertura fessure $\leq w_2$
		quasi permanente	decompressione	-	apertura fessure $\leq w_1$
C	Molto aggressive	frequente	formazione fessure	-	apertura fessure $\leq w_1$
		quasi permanente	decompressione	-	apertura fessure $\leq w_1$

Con $w_3 = 0,4 \text{ mm}$ e $w_2 = 0,3 \text{ mm}$.

La verifica dell'ampiezza di fessurazione per via indiretta può riferirsi ai limiti di tensione nell'acciaio d'armatura definiti nelle Tabelle C4.1.II e C4.1.III. La tensione σ_s è quella nell'acciaio d'armatura prossimo al lembo teso della sezione calcolata nella sezione parzializzata per la combinazione di carico pertinente (Tab. 4.1.IV delle NTC).

Tabella 1: Diametri massimi delle barre per il controllo di fessurazione (C1-Tab.4.1.II)

Tensione nell'acciaio σ_s [MPa]	Diametro massimo ϕ delle barre (mm)		
	$w_3 = 0,4 \text{ mm}$	$w_2 = 0,3 \text{ mm}$	$w_1 = 0,2 \text{ mm}$
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	-

Dall'analisi effettuata con il software VCA SLU, la tensione dell'acciaio risulta pari a $\sigma_{s,frequente} = 151,9 \text{ MPa}$ per la combinazione frequente e $\sigma_{s,qp} = 144,7 \text{ MPa}$, per la combinazione quasi permanente. Quindi, considerando la combinazione quasi permanente (più restrittiva) e interpolando i valori, risulta che il diametro massimo dell'armatura tesa deve essere inferiore a 33 mm, condizione ampiamente verificata.

Tabella 1: Spaziatura massima delle barre per il controllo di fessurazione (C1-Tab.4.1.III)

Tensione nell'acciaio σ_s [MPa]	Spaziatura massima s delle barre (mm)		
	$w_3 = 0,4 \text{ mm}$	$w_2 = 0,3 \text{ mm}$	$w_1 = 0,2 \text{ mm}$
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	-
360	100	50	-

Anche il requisito relativo alla spaziatura massima delle barre tese risulta soddisfatto.

- Verifica delle tensioni (NTC-§4.1.2.2.5)

In base alle combinazioni caratteristica e quasi permanente delle azioni, si determinano le massime tensioni nel calcestruzzo e nelle armature. Si verifica quindi che tali tensioni siano inferiori ai massimi valori consentiti (SLE).

$$q_{SLE,caratteristica} = i \cdot (g_1 + g_2 + q_{k1} + \psi_{02} \cdot q_{k2} + \psi_{03} \cdot q_{k3}) = 3,66 \text{ kN/m}$$

$$q_{SLE,qp} = i \cdot (g_1 + g_2 + \psi_{21} \cdot q_{k1} + \psi_{22} \cdot q_{k2} + \psi_{23} \cdot q_{k3}) = 2,89 \text{ kN/m}$$

Al paragrafo NTC-§4.1.2.2.5.1 viene definita la tensione massima di compressione del calcestruzzo nelle condizioni di esercizio:

$$\sigma_{c,max} = 3,65 \leq 0,60f_{ck} = 15,0 \text{ per combinazione caratteristica}$$

$$\sigma_{c,max} = 2,885 \leq 0,45f_{ck} = 11,25 \text{ per combinazione quasi permanente}$$

Al paragrafo NTC-§4.1.2.2.5.2 viene definita la tensione massima dell'acciaio in condizioni di esercizio:

$$\sigma_{s,max} = 182,9 \leq 0,8f_{yk} = 360 \text{ per combinazione caratteristica}$$

- Lunghezza di ancoraggio (NTC-§4.1.2.3.10)

In assenza degli uncini la lunghezza di ancoraggio deve essere in ogni caso non inferiore di 20 diametri, con un minimo di 150 mm.

Poiché il diametro delle barre longitudinali del solaio di copertura è pari a 10 mm, quindi $l_{min} = 20 \cdot 10 = 200 \text{ mm}$, si assume come lunghezza di ancoraggio 200 mm.

3.5 Analisi sismica

Vista la regolarità in pianta e in elevazione dell'edificio in esame, si procede con un'analisi statica lineare. Si utilizza la combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E:

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$

Si trovano ora i pesi sismici degli elementi costituenti l'edificio e il peso sismico totale:

$$\begin{aligned} W_{copertura} &= A_{copertura} \cdot (g_1 + g_2 + \psi_{21} \cdot q_{k1} + \psi_{22} \cdot q_{k2} + \psi_{23} \cdot q_{k3}) + corona \text{ cls} = \\ &= 3,8 \cdot 7,8 \cdot (3,25 + 1,574 + 0 \cdot 1,2 + 0 \cdot 0,5 + 0 \cdot 0,128) + corona \text{ cls} = 177,35 \text{ kN} \end{aligned}$$

I valori di ψ_{2j} sono riportati nella tabella 2.5.I delle NTC2018.

Con "corona cls" si intende lo sporto verticale al di sopra del cordolo.

A questo si aggiungono i pesi degli elementi di confinamento verticali e orizzontali e delle pareti stampate:

$$\begin{aligned} W_{pareti} &= W_{stamp} + W_{conf} = \left(\frac{V_{stamp,eff}}{2} \cdot \gamma_{stamp} \right) + \left(\frac{V_{conf,v}}{2} + V_{conf,h} \right) \cdot \gamma_c \\ &= \frac{15,03}{2} \cdot 21,50 + 1,07 \cdot 25 = 188,35 \text{ kN} \end{aligned}$$

Facendo riferimento al materiale *i.speed 3D R* di *Heidelberg Materials* si assume come peso specifico $\gamma_{stamp} = 21,50 \text{ kg/m}^3$.

W_{stamp} e W_{conf} sono rispettivamente il peso delle sole parti stampate e il peso degli elementi di confinamento (comprendente sia gli elementi verticali sia il cordolo).

Il peso complessivo è quindi pari a:

$$W_{tot} = W_{copertura} + W_{pareti} = 365,70 \text{ kN}$$

Nel paragrafo §3.3.4 è stata definita l'azione sismica, in particolari i valori dell'accelerazione spettrale massima di progetto sono:

$$S_{d,maxSLV} = 0,289g$$

$$S_{d,maxSLD} = 0,206g$$

Si progetta la capacità in resistenza sulla base della domanda allo SLV.

L'analisi lineare statica consiste nell'applicazione di forze statiche equivalenti alle forze d'inerzia indotte dall'azione sismica e può essere effettuata per costruzioni che rispettino requisiti specifici, a condizione che il periodo del modo di vibrare principale nella direzione in esame (T_1) non superi $2,5 T_C$ o T_D e che la costruzione sia regolare in altezza.

La seconda condizione è verificata, mentre per la stima di T_1 si richiama il paragrafo §C7.3.3.2:

$$T_1 = C_1 \cdot H^{3/4} = 0,050 \cdot 3,8^{3/4} = 0,136 s$$

dove H è l'altezza della costruzione, in metri, dal piano di fondazione e C_1 vale 0,085 per costruzioni con struttura a telaio di acciaio o di legno, 0,075 per costruzioni con struttura a telaio di calcestruzzo armato e 0,050 per costruzioni di muratura o per qualsiasi altro tipo di struttura. Pertanto è rispettata anche la prima condizione.

La forza da applicare a ciascuna massa è data dalla seguente formula:

$$F_i = F_h \cdot z_i \cdot \frac{W_i}{\sum_j z_j \cdot W_j}$$

Trattandosi di un edificio ad un piano si assume che l'intera forza sismica orizzontale $F = F_h$ venga applicata al livello della copertura ($z = 3 m$):

$$F = F_h = m \cdot a = S_d(T_1) \cdot W_{tot} \cdot \lambda/g = 0,289g \cdot 365,7 \cdot 1,0/g = 105,5 kN$$

λ è un coefficiente pari a 0,85 se $T_1 < 2T_C$ e la costruzione ha almeno tre orizzontamenti, e uguale a 1,0 in tutti gli altri casi.

3.5.1 Ripartizione dell'azione sismica

A questo punto è possibile procedere con la ripartizione delle azioni sismiche in entrambe le direzioni, considerando le seguenti ipotesi:

- il sistema ha un comportamento elastico lineare;
- i solai sono indeformabili nel piano (infinitamente rigidi nel piano e rigidezza trascurabile fuori dal piano). Quindi la forza orizzontale viene ripartita tra gli elementi verticali in proporzione alle rigidezze;
- le pareti sono a sezione rettangolare sottile;
- le pareti sono dotate di rigidezza nel loro piano, mentre la rigidezza fuori dal piano e la rigidezza torsionale sono trascurabili;
- le pareti hanno sezione costante lungo tutta l'altezza dell'edificio;

- le pareti si possono considerare come mensole perfettamente incastrate al suolo (il collegamento con le fondazioni avviene per mezzo di tirafondi).

Si determinano in primis il centro di massa (CM) e il centro delle rigidezze (CR):

$$X_{CM} = \frac{\sum m_i \cdot x_i}{\sum m_i} = 0 \quad Y_{CM} = \frac{\sum m_i \cdot y_i}{\sum m_i} = 0$$

$$X_{CR} = \frac{\sum k_{yi} \cdot x_i}{\sum k_{yi}} = 0 \quad Y_{CR} = \frac{\sum k_{xi} \cdot y_i}{\sum k_{xi}} = 0$$

Ora si calcola la forza di taglio agente su ogni lama ripartendo l'azione orizzontale come segue:

$$F_i = \frac{F \cdot k_i}{\sum k_i}$$

dove F è la forza d'inerzia orizzontale totale e k_i è la rigidezza della parete i-esima.

FORZA SU OGNI LAMA		
1 (AB)	52.75	kN
2 (BE)	15.11	kN
3 (FC)	37.64	kN
4 (CD)	52.75	kN
5 (DG)	15.11	kN
6 (HA)	37.64	kN

3.6 Progetto e verifiche delle pareti

Le pareti stampate in 3D progettate possono essere valutate analogamente alle pareti in muratura confinata, in virtù della presenza di elementi di confinamento in calcestruzzo armato e per il comportamento simile dei *layers* stampati rispetto ai blocchi in muratura tradizionale.

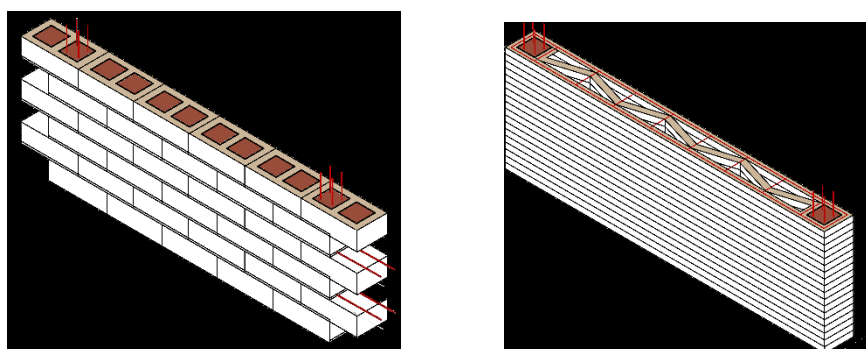


Figura 57. Analogia tra parete in muratura e parete stampata 3D.

Le principali normative italiane ed europee che disciplinano le costruzioni in muratura sono le seguenti:

- NTC2018 e C1 ai paragrafi §4.5 e §7.8, che trattano rispettivamente le costruzioni di muratura e le costruzioni di muratura per azioni sismiche;
- EC6 interamente dedicato alle costruzioni in muratura;
- EC8 al capitolo 14, che fornisce indicazioni sulla progettazione sismica delle strutture in muratura;

Nelle norme sopracitate si sottolinea in primis che una buona progettazione della muratura confinata debba considerare la muratura e gli elementi di confinamento come un'unica entità strutturale. Per questo motivo, qualora vengano rispettate tutte le regole geometriche e di dettaglio, non è necessaria una verifica separata degli elementi di confinamento.

Per il caso studio proposto, sono state adottate le prescrizioni più restrittive delle normative di riferimento, in conformità con le specifiche regole di dettaglio, poiché talvolta le normative nazionali differiscono da quelle europee.

La geometria delle pareti resistenti al sisma, deve rispettare i requisiti riportati nella tabella 7.8.I delle NTC:

Tabella 1: *Requisiti geometrici delle pareti resistenti al sisma (NTC-Tab.7.8.I)*

Tipologie costruttive	t_{min}	$(\lambda=h_0/t)_{max}$	$(l/h')_{min}$
Muratura ordinaria, realizzata con elementi in pietra squadrata	300 mm	10	0,5
Muratura ordinaria, realizzata con elementi artificiali	240 mm	12	0,4
Muratura armata, realizzata con elementi artificiali	240 mm	15	Qualsiasi
Muratura confinata	240 mm	15	0,3
Muratura ordinaria, realizzata con elementi in pietra squadrata, in siti caratterizzati, allo <i>SLV</i> , da $a_g \leq 0.15g$	240 mm	12	0,3
Muratura realizzata con elementi artificiali semipieni, in siti caratterizzati, allo <i>SLV</i> , da $a_g \leq 0.075 g$	200 mm	20	0,3
Muratura realizzata con elementi artificiali pieni, in siti caratterizzati, allo <i>SLV</i> , da $a_g \leq 0.075 g$	150 mm	20	0,3

dove t indica lo spessore della parete al netto dell'intonaco, h_0 l'altezza di libera inflessione della parete come definito al § 4.5.6.2, h' l'altezza massima delle aperture adiacenti alla parete, l la lunghezza della parete.

La parete è costituita in sezione da cinque *layers* dello spessore di 5 cm, per cui risulta:

$$t = 250 \text{ mm} > t_{min}$$

Questo consente di rispettare sia lo spessore minimo della parete sia l'area trasversale minima degli elementi di confinamento.

In relazione alla geometria della sezione trasversale delle pareti sono state valutate anche le rigidezze, risultando in tutti i casi superiori alla rigidezza della sezione rettangolare da 240mm (per unità di larghezza).

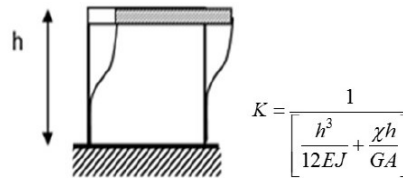


Figura 58. Rigidità di una parete: schema a taglio.

Per quanto riguarda il rapporto di snellezza, il caso più sfavorevole è rappresentato dalle pareti BE, FC, DG e HA, le quali, pur non presentando aperture, non vengono irrigidite con efficace vincolo da due muri trasversali. Di conseguenza, risulta:

$$h_0 = q \cdot h = 1 \cdot 2,75 = 2,75$$

Con questo valore dell'altezza libera d'inflexione, la snellezza risulta pari a:

$$\lambda_{max} = \frac{2,75}{0,35} = 7,86 < 15.$$

L'EC6 stabilisce un valore del rapporto di snellezza massimo λ_{max} di 27 (EC6-§ 7.5.4).

Infine, nel caso più sfavorevole delle pareti BE, il rapporto tra la lunghezza della parete e l'altezza massima delle aperture adiacenti alla parete è pari a:

$$l/h' = 2,2/2,75 = 0,8 > 0,3.$$

Tutte le pareti sono strutturali e resistono alle azioni orizzontali in quanto $l \geq 0,3 \cdot h$ (NTC-§ 4.5.4).

Inoltre la percentuale volumetrica dei vuoti non è superiore in nessun caso al 45% del volume totale del blocco (NTC-§ 7.8.1.2).

Si prosegue ora con le verifiche definite nel EC6, per gli SLU e gli SLE, per una parete in muratura confinata. Nei casi di muratura confinata soggetta principalmente a carichi verticali e a carichi orizzontali nel piano, si può assumere che i pilastri di confinamento lavorino insieme al pannello in muratura, considerando pertanto l'intera lunghezza della parete per la definizione della geometria (EC6-§7.5.4§7.5.5).

Le verifiche relative alla parete **BE** vengono esplicitamente riportate, mentre gli altri calcoli verranno sintetizzati in una tabella finale.

Verifiche agli SLU (carico assiale, taglio e pressoflessione)

- Muratura confinata soggetta principalmente a carichi verticali (EC6-§ 8.10.2)

$$N_{Ed} \leq N_{Rd}$$

$$N_{Rd} = \Phi \cdot f_{cd} \cdot A_t$$

con:

f_{cd} la resistenza a compressione di progetto della muratura (9,6 Mpa);

$A_t = 2,2 \cdot 0,35 = 0,682 \text{ m}^2$ l'area della sezione trasversale lorda della parete (inclusi gli elementi di confinamento).

Φ il fattore di riduzione, ottenuto secondo quanto indicato al paragrafo §8.2.2:

$$\Phi = 1 - \frac{2e_i}{t}$$

con:

$$e_i = \frac{M_{id}}{N_{id}} + e_{he} + e_{init} \geq 0,05t$$

Il carico assiale derivante dal solaio non è eccentrico rispetto all'asse della parete, per cui il primo termine è nullo.

Il secondo termine, e_{he} , rappresenta l'eccentricità risultante dal carico orizzontale (vento massimo) agli SLU. Esso si calcola come:

$$e_{he} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{\frac{1}{8} \cdot q_{lat} \cdot h^2}{N_{Ed}} = \frac{1,096}{47,93} = 0,023 \text{ m}$$

L'ultimo termine, e_{init} , è l'eccentricità iniziale dovuta alle imperfezioni di costruzione (EC6-§7.5.1.1):

$$e_{init} = \frac{h_{ef}}{450} = \frac{0,683 \cdot 2,75}{450} = 0,0042$$

dove $h_{ef} = \rho_n \cdot h$ è l'altezza effettiva della parete, calcolata in funzione dell'altezza libera h e del fattore ρ_n che tiene conto del vincolo ai bordi o dell'irrigidimento della parete (EC6-§7.5.1.3).

La parete BE è vincolata in sommità e alla base e risulta irrigidita su un bordo verticale (un solo bordo verticale libero). Siccome $h \leq 3,5 \cdot l$, si calcola $\rho_n = \rho_3$ come:

$$\rho_n = \rho_3 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_2 h}{3l}\right)^2} \rho_2 = 0,683$$

Con $\rho_2 = 0,75$ in quanto il solaio in calcestruzzo armato si estende solo da un lato con un appoggio di almeno 2/3 dello spessore della parete, in modo da fornire un adeguato vincolo alla rotazione, e l'eccentricità del carico in sommità è inferiore a 1/6 dello spessore della parete.

Per il calcolo dell'altezza effettiva delle altre pareti il procedimento è lo stesso ma cambia l . L'unica eccezione è rappresentata dalla parete CD che risulta irrigidita su entrambi i bordi.

Per la parete BE risulta quindi:

$$\Phi = 1 - \frac{2e_i}{t} = 1 - \frac{2 \cdot (0,023 + 0,0042)}{0,35} = 0,845$$

(Per il calcolo del coefficiente di riduzione della resistenza del materiale si può fare riferimento anche alle NTC2018-Tab.4.5.3).

Per calcolare la forza assiale agente sulle singole pareti bisogna considerare la reazione dello schema statico del solaio sul cordolo. Il solaio è ordito parallelamente al lato minore della struttura, quindi per calcolare la forza assiale trasmessa alla parete BE è necessario valutare le reazioni vincolari dei travetti del solaio predalles posti ad interasse $i = 0,6 \text{ m}$. Il carico distribuito sul travetto considera il contributo dei carichi permanenti, strutturali e non, e dei carichi variabili:

$$q_{\text{travetto}} = i \cdot (\gamma_{G1} \cdot g_1 + \gamma_{G2} \cdot g_2 + \gamma_{Q1} \cdot q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot q_{k3})$$

$$= 0,6 \cdot (1,3 \cdot 3,25 + 1,5 \cdot (1,574 + 1,2) + 1,5 \cdot 0 \cdot 0,5 + 1,5 \cdot 0 \cdot 0,128) = 5,03 \text{ kN}$$

Si ottiene quindi la forza assiale massima agli SLU agente sulla parete BE:

$$N_{\text{copertura, BE}} = q_{\text{travetto}} \cdot \frac{l}{2} = 5,03 \cdot \frac{3,65}{2} = 9,2 \text{ kN}$$

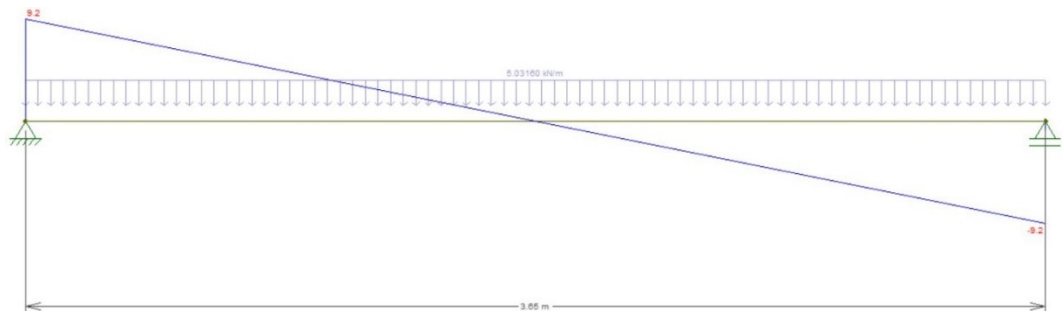


Figura 59. Schema statico e diagramma di momento del travetto.

Per la verifica delle pareti FC, DG e HA si considera la stessa forza, invece per le pareti AB e CD la metà.

Si calcola ora il peso della parete BE:

$$N_{\text{parete, BE}} = s_{\text{parete}} \cdot l_{\text{parete}} \cdot h_{\text{parete}} \cdot \gamma_c = 33,30 \text{ kN}$$

$$N_{\text{conf, BE}} = s_{\text{conf, v}} \cdot l_{\text{conf, v}} \cdot h_{\text{conf, v}} \cdot \gamma_c + s_{\text{conf, h}} \cdot l_{\text{conf, h}} \cdot h_{\text{conf, h}} \cdot \gamma_c$$

$$= 2 \cdot 0,15 \cdot 0,15 \cdot 2,5 \cdot 25 + 0,15 \cdot 0,25 \cdot 2,8 \cdot 25 = 5,44 \text{ kN}$$

Quindi il carico assiale complessivo è pari a:

$$N_{\text{BE}} = N_{\text{copertura, BE}} + N_{\text{parete, BE}} + N_{\text{conf, BE}} = \mathbf{47,93 \text{ kN}}$$

Risulta quindi:

$$N_{\text{Ed}} = 47,93 \leq 6250,49 = \Phi \cdot f_{cd} \cdot A_t = N_{\text{Rd}}$$

- Muratura confinata soggetta a carichi verticali e orizzontali combinati sul piano della parete
 - Resistenza a taglio nel piano (EC6-§ 8.10.3.1)

$$V_{\text{Ed}} \leq V_{\text{Rd}}$$

$$V_{\text{Rd}} = f_{vd} \cdot t \cdot d \leq V_{\text{Rdtl}}$$

Con:

f_{vd} la resistenza al taglio di progetto della muratura;

$t = 250 \text{ mm}$ lo spessore della parete resistente al taglio;

$d = 2025 \text{ mm}$ spessore effettivo della parete;

$V_{Rdtl} = 0,3f_{cd} \cdot t \cdot d = 1458 \text{ kN}$ il valore di progetto della resistenza al taglio limite;

$V_{Ed} = 15,11 \text{ kN}$ valore di progetto del carico di taglio applicato alla parete i-esima.

Risulta quindi:

$$V_{Ed} = 15,11 \leq 486 = f_{vd} \cdot t \cdot d = V_{Rd} \leq V_{Rdtl}$$

- Resistenza a pressoflessione nel piano (EC6-§ 8.10.3.2)

$$M_{Ed} \leq M_{Rd}$$

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{yd} \cdot (d - 0,4x) + N_{Ed} \cdot \left(\frac{l}{2} - 0,4x\right)$$

Per definire la posizione dell'asse neutro x si verificata l'equilibrio tra le forze di compressione nella muratura e le forze di trazione nell'acciaio, considerando anche il carico verticale applicato:

$$F_c = F_t$$

$$0,8 \cdot B \cdot x \cdot f_{md} = A_s \cdot f_{yd} + P$$

Da cui:

$$x = \frac{A_s \cdot f_{yd} + P}{0,8 \cdot B \cdot f_{md}} = \frac{314,16 \cdot 391 + 47932}{0,8 \cdot 0,35 \cdot 8} = 76,28 \text{ mm}$$

Nel calcolo di M_{Rd} viene considerata prudenzialmente solamente l'armatura tesa, che risulta pari a 4Ø12 (vedi paragrafo §3.7). Inoltre lo *stress block*, seppur riguardi sia un elemento di confinamento che una porzione stampata, tiene conto della resistenza di progetto del materiale meno resistente (porzione stampata).

$$M_{Ed} = F \cdot h = 41,56 \leq 296,45 = M_{Rd}$$

Si riporta la tabella riassuntiva dei risultati delle verifiche viste sinora per tutte le pareti strutturali:

PARETI	Verifica carichi verticali		Verifica taglio nel piano		Verifica pressoflessione nel piano	
	N _{Ed} [kN]	N _{Rd} [kN]	V _{Ed} [kN]	V _{Rd} [kN]	M _{Ed} [kN]	M _{Rd} [kN]
1 (AB)	70.64	10736.35	52.76	918	145.08	604.80
2 (BE)	47.93	6250.49	15.11	486	41.56	296.45
3 (FC)	82.19	12154.60	37.64	1014	103.52	692.70
4 (CD)	70.64	10800.18	52.76	918	145.08	604.80
5 (DG)	47.93	6250.49	15.11	486	41.56	296.45
6 (HA)	82.19	12154.60	37.64	1014	103.52	692.70

- Muratura confinata soggetta ad altre condizioni di carico (vedi EC6-§8.4 e §8.5)

Al paragrafo §8.10.4 si specifica che le pareti in muratura confinata soggette ad altre condizioni di carico devono essere verificate secondo le prescrizioni dei paragrafi §8.4 e §8.5 relativi alla muratura non armata. Il paragrafo §8.4 si riferisce prevalentemente a murature non portanti quali tramezze e tamponamenti soggette a carichi laterali quali vento, pressioni del terreno o dell'acqua ed esplosioni. Nel caso in esame tutte le pareti vengono progettata col fine di garantire un contributo strutturale, pertanto l'applicazione delle verifiche previste dal §8.4 non risulta sempre necessaria.

- Verifica del meccanismo ad arco di muri tra due supporti (§8.4.3)

Le patereti AB e CD, essendo soggette a carichi verticali modesti vista l'orditura del solaio, vengono verificate secondo il meccanismo ad arco definito al paragrafo §8.4.3. Tuttavia, trattandosi di elementi strutturali, si prevede che la verifica risulti ampiamente soddisfatta.

Il carico laterale di progetto agli SLU è pari a:

$$p_{Ed} = \gamma_q \cdot p_v = 0,862 \text{ kN/m}^2$$

La resistenza laterale in termini di forza per unità d'area è pari a:

$$p_{Rd} = 0,8 \cdot f_d \cdot \frac{r_a \cdot t}{l_a^2} = 0,8 \cdot 8 \cdot \frac{315 \cdot 350}{3300^2} = 64,8 \text{ kN/m}^2$$

con:

f_d la resistenza a compressione di progetto nella direzione di spinta dell'arco;

t lo spessore della parete;

$r_a = 0,9t - d_a$ l'altezza dell'arco;

d_a è la deformazione dell'arco sotto il carico laterale di progetto. $d_a = 0$ nel caso in cui la parete presenti una snellezza $\lambda < 20$;

l_a è la lunghezza o l'altezza della parete tra supporti in grado di resistere alla spinta dell'arco.

Risulta quindi:

$$p_{Rd} > p_{Ed}$$

Per cui la verifica è ampiamente soddisfatta.

- Verifica a pressoflessione fuori dal piano (§8.5)

Le pareti vengono verificate a pressoflessione fuori dal piano, secondo le prescrizioni del paragrafo §8.5, in particolare utilizzando il metodo che considera la capacità a flessione fuori piano della parete (§8.5.3). Quando il momento sollecitante M_{Ed} è calcolato con un'analisi di primo ordine, gli effetti del secondo ordine devono essere considerati definendo il momento resistente ridotto della parete, pari a $\Phi_M M_{Rd}$. Il fattore di riduzione del momento resistente tiene conto degli effetti del secondo ordine.

Il metodo adottato per la verifica della parte compressa di una muratura soggetta ai carichi combinati verticale ed orizzontale nel piano (EC6-§8.3.2) può essere preso come riferimento, invertendo t e l .

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} = \frac{N_{Ed} \cdot t}{2} \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{t \cdot l \cdot n_f \cdot \Phi_M \cdot f_d}\right)$$

con:

Φ_M il fattore riduttivo calcolato seguendo l'appendice F dell'EC6, secondo cui:

$$\Phi_M = \frac{(1 - A_1)}{(1 - v)} = 0,897$$

con:

$$A_1 = \begin{cases} \frac{2,58v + \sqrt{(2,58v)^2 + 10,33\lambda^2}}{5,17} & \text{se } \lambda \leq 1,14A_1 \\ \left(\frac{\lambda^2 v}{0,65}\right)^{1/3} & \text{se } \lambda > 1,14A_1 \end{cases}$$

$$v = \frac{N_{Ed}}{A \cdot f_d} = 0,0109$$

Per il calcolo di A_1 è stato ricavato il fattore di snellezza:

$$\lambda = h_{ef}/t_{ef} \cdot \sqrt{f_k/E} = 0,170.$$

Risulta quindi:

$$M_{Ed} = 1,09 \leq 8,33 = M_{Rd}$$

A titolo di esempio sono state riportate le verifiche relative al meccanismo ad arco per la parete AB e a pressoflessione fuori piano per la parete BE. Si riporta la tabella riassuntiva dei risultati delle verifiche viste sinora per tutte le pareti strutturali:

PARETI	Verifica meccanismo ad arco		Pressoflessione fuori piano	
	pEd	pRd	MEd	MRd
1 (AB)	0.86	64.79	2.17	12.29
2 (BE)	-	-	1.09	8.33
3 (FC)	-	-	2.19	14.29
4 (CD)	0.86	64.79	2.17	12.29
5 (DG)	-	-	1.09	8.33
6 (HA)	-	-	2.19	14.29

Verifiche agli SLE

Come definito al paragrafo §9.5 dell'EC6, gli elementi in muratura confinata non devono presentare fessurazioni flessionali né deformarsi eccessivamente sotto le condizioni di carico di esercizio.

La verifica degli elementi in muratura confinata agli stati limite di esercizio deve basarsi sulle stesse ipotesi adottate per gli elementi in muratura non armata, come indicato al paragrafo §9.2.

Per le strutture in muratura non armata, non è necessario effettuare verifiche separate agli stati limite di esercizio per fessurazione e deformazione quando gli stati limite ultimi sono soddisfatti, a condizione che siano rispettati anche i dettagli definiti al capitolo 10 e che le dimensioni delle pareti rientrino nei valori limite riportati nell'Allegato E.

Le verifiche agli SLU hanno dato esito positivo e il rispetto delle regole di dettaglio è attestato ai paragrafi §3.2.2 e §3.7 del presente elaborato. Infine l'allegato E specifica i limiti di snellezza per le pareti soggette a carichi laterali, in relazione alle diverse condizioni di vincolo, nello stato limite di esercizio. Il caso più sfavorevole è rappresentato dalle pareti BE e DG, le quali risultano comunque ampiamente entro i limiti.

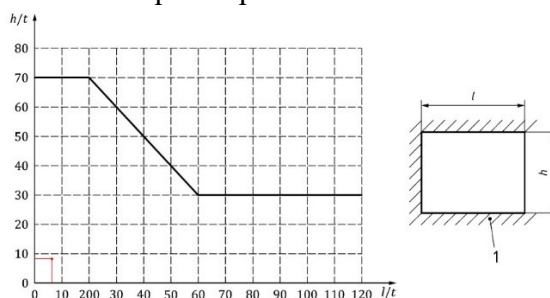


Figura 60. Limite di snellezza per una parete in muratura soggetta a carichi laterali (EC6-allegato E).

Le stesse direttive si trovano nelle NTC2018-§4.5.6.3.

3.7 Giunto sismico

Le costruzioni devono presentare, ove possibile, una struttura iperstatica caratterizzata da regolarità in pianta e in elezione. Se necessario, tale requisito può essere soddisfatto suddividendo la struttura in unità dinamicamente indipendenti mediante giunti strutturali. Poiché l'edificio in esame è rispettata la condizione di regolarità in pianta, viene suddiviso in tre strutture indipendenti.

Al fine di prevenire fenomeni di martellamento, è necessario garantire il rispetto della distanza minima tra costruzioni contigue, definita al paragrafo NTC-§7.2.1.

La distanza tra due punti di costruzioni che si fronteggiano non può in ogni caso essere inferiore a $1/100$ della quota dei punti considerati, misurata dallo spiccato della fondazione o dalla sommità della struttura scatolare rigida di cui al § 7.2.1, moltiplicata per $2a_g S/g \leq$

1. Pertanto:

$$d_{min} = \frac{1}{100} \cdot 3,25 \cdot 2a_g S/g = 0,0154 \text{ m} = 1,54 \text{ cm}$$

In via cautelativa, però, si procede al calcolo degli spostamenti massimi delle due strutture contigue, assumendo come dimensione minima del giunto sismico la somma dei due spostamenti, che dev'essere maggiore rispetto a d_{min} .

La capacità di spostamento allo SLC delle pareti stampate, come definito al paragrafo C1-§7.8.4, viene assunta pari all'1,2% dell'altezza del pannello:

$$d_1 = 1,2 \cdot 3,25/100 = 0,039 \text{ m} = 3,9 \text{ cm}$$

Si evidenzia che il calcolo della capacità di spostamento allo SLC è più cautelativo rispetto a quello previsto dalla normativa, ovvero lo spostamento allo SLV.

Per quanto riguarda la struttura contigua, costituita da profili tubolari verticali in acciaio, è necessario rispettare il limite di deformabilità agli SLE per costruzioni ordinarie soggette ad azioni orizzontali, come indicato nella Tab.4.2.XIII delle NTC. Nello specifico, trattandosi di un edificio monopiano, il rapporto δ/h dovrà risultare inferiore di 1/300, da cui si ottiene:

$$d_{2,max} = 3,25/300 = 0,0108 \text{ m} = 1,08 \text{ cm}$$

Considerando la colonna più sollecitata si calcola lo spostamento relativo alla quota di 3,25 m:

$$d_2 = q_v \cdot \frac{h^4}{8EJ_y} = 0,99 \cdot \frac{3,25^4}{8} \cdot 210000 \cdot 10^3 \cdot 625,33 \cdot 10^{-8} = 0,0105 \text{ m} = 1,05 \text{ cm}$$

con:

$q_v = p_v \cdot l = 0,6 \cdot 1,65 = 0,99 \text{ kN/m}$ la pressione del vento agente sulla colonna più sollecitata;

$h = 3,25 \text{ m}$ l'altezza di riferimento;

$E = 210000 \text{ MPa}$ il modulo elastico dell'acciaio B450C;

$J_y = 625,33 \text{ cm}^4$ il momento d'inerzia in direzione y della sezione tubolare (250x100x5 mm).

La somma degli spostamenti delle due strutture fornisce quindi:

$$d_{min} = d_1 + d_2 = 4,95 \text{ cm}.$$

In assenza di pregresse conoscenze riguardanti il comportamento sperimentale di pareti realizzate tramite *Extrusion Printing* e dal momento che lo spostamento massimo allo SLV della struttura in acciaio è certamente maggiore, si prevede cautelativamente un giunto sismico di spessore $d = 8 \text{ cm}$.

3.8 Armature negli elementi di confinamento e nei giunti interlayer

Il materiale stampabile utilizzato, come i calcestruzzi tradizionali, presenta una buona resistenza a compressione e durabilità; tuttavia, la resistenza a trazione risulta minima, quasi trascurabile. In conformità alle prescrizioni relative alla muratura confinata è necessario definire l'armatura degli elementi di confinamento e dei giunti *interlayer*.

Siccome il materiale stampato è costituito da aggregati con diametro massimo pari a 2 mm, si definisce un copriferro minimo di 15 mm in accordo con quanto riportato nella tabella EC6.3.3-Tab.6.2.

Le regole di dettaglio relative all'armatura nella muratura confinata sono riportate ai paragrafi NTC-§7.8.6.3, EC6-§10.4 e EC8-§14.7.3.

- Armatura longitudinale

Secondo l'EC8-§14.7.3, il rapporto di armatura longitudinale negli elementi di confinamento non deve essere inferiore allo 0,8% dell'area trasversale dell'elemento o a quattro barre di diametro 10 mm, a seconda del valore maggiore.

Nel caso in esame risulta:

$$A_{long} \geq 180 \text{ mm}^2 = 0,8\% A_{sez, trasv}$$

Pertanto negli elementi di confinamento verticali vengono posizionate **4 barre Ø10**, con un'area effettiva pari a $A_{eff} = 314,16 \text{ mm}^2$, garantendo così il rispetto delle NTC2018 e dell'EC6.

- Staffe

L'EC8 stabilisce che il diametro minimo delle staffe non deve essere inferiore a 6 mm e che la loro spaziatura massima non deve superare i 150 mm.

Inoltre, nei primi 0,6 m dalle estremità di ciascun elemento a ogni livello di piano, la distanza tra le staffe non deve eccedere i 100 mm.

Di conseguenza si utilizzano staffe **Ø6** con una spaziatura pari a 142,4 mm, ridotta a 100 mm nelle zone terminali.

- Collegamento tra parti stampate e elementi di confinamento: armatura nei giunti interlayer

Depositando i *layers* in modo da garantita adesione tra strati successivi è assicurato il copriferro minimo richiesto tra le armature nei giunti *interlayer*, definito al paragrafo EC6-§10.2.2, il quale coincide col copriferro calcolato in relazione alla classe di esposizione di 15 mm.

La normativa relativa alla muratura confinata specifica anche uno spessore minimo della malta affinché si sviluppi resistenza al legame; tuttavia, nel caso della stampa 3D, tale requisito non risulta particolarmente critico, infatti è sufficiente che gli strati aderiscano tra loro, evitando i *cold joints*.

Affinchè gli elementi di confinamento verticali e orizzontali e le pareti stampate agiscano come un unico elemento strutturale quando sottoposti a sollecitazioni, è necessario garantire una connessione sufficiente tra gli elementi.

Secondo l'EC8 il collegamento può avvenire mediante:

- incastro geometrico (*toothing*)
- barre orizzontali disposte singolarmente, con diametro minimo di 6 mm e lunghezza pari a 400 mm, con spaziatura verticale massima di 600 mm
- armatura a scala (*ladder mesh*), posizionata ogni 400 mm lungo l'altezza della parete.

Nel caso in esame si adotta quest'ultima tipologia di armatura poiché risulta la più idonea all'implementazione con la tecnica costruttiva dell'*EP*.

L'armatura prevista nei giunti *interlayers* viene progettata per garantire un collegamento tra i diversi elementi della struttura, incrementare la resistenza al taglio nel piano e migliorare la stabilità durante la stampa.

Per la definizione dell'area minima di armatura nei giunti *interlayer* si fa riferimento al paragrafo EC6-10.2.3, il quale prescrive che, qualora sia richiesta l'armatura per taglio nel componente, l'area di armatura non deve essere inferiore allo 0,04 % (per i muri) dell'area della sezione trasversale lorda del componente. Quindi:

$$A_{s,min} = \frac{0,04 \cdot (350 \cdot 2750)}{100} = 385 \text{ mm}^2$$

Si prevedono l'installazione di 4 barre di diametro minimo di 5 mm, posizionate ogni 400 mm lungo l'altezza della parete e collocate in corrispondenza dell'asse dei *layers* esterni stampati. In questo modo si ottiene un'area totale di armatura nella sezione della parete pari a:

$$A_{s,min} = 4 \cdot (\pi \cdot r^2) = 4 \cdot (\pi \cdot 2,5^2) = 471,24 \text{ mm}^2 > A_{s,min}$$

Come precedentemente indicato, questa armatura assolve la doppia funzione: stabilizzare la parete durante la stampa e incrementare la resistenza al taglio nel piano. Secondo uno studio che adotta la medesima soluzione (Aghajani Delavar et al. 2024), il contributo in termini di resistenza può essere calcolato mediante la relazione:

$$V_{ns} = 0,5 \left(\frac{A_s}{s} \right) f_y f_v$$

Tale contributo risulta tanto maggiore quanto minore è la spaziatura verticale delle armature. Ai fini del presente studio questo contributo, seppur positivo, non viene considerato nella verifica a taglio nel piano, in quanto l'EC6 considera esclusivamente il contributo della parete nel caso di armatura confinata.

- Armatura nel cordolo

Come definito al paragrafo C1-§7.8.6.3, il cordolo di piano deve essere realizzato nel rispetto di quanto riportato al paragrafo NTC-§7.8.6.1, in conformità con le prescrizioni relative alle costruzioni in muratura ordinaria e in muratura armata. Pertanto risulta che l'area dell'armatura corrente non dev'essere inferiore a 8 cm², le staffe devono avere un diametro

non inferiore a 6 mm e interasse non superiore a 250 mm. Dunque vengono posizionate **4 barre Ø16** e staffe **Ø6** con interasse di 250 mm.

- Ancoraggi e lunghezza di sovrapposizione

La lunghezza di ancoraggio è calcolata in base alla formula riportata al paragrafo EC6-§10.2.5.1:

$$l_b = \frac{\emptyset f_{yd}}{4 f_{bod}}$$

Con:

$\emptyset$ il diametro dell'armatura;

$f_{yd} = 391 \text{ MPa}$ la tensione di snervamento di progetto dell'acciaio;

f_{bod} la resistenza di ancoraggio di progetto dell'armatura, ottenuta come f_{bok}/γ_M , con $f_{bok} = 4,1 \text{ MPa}$ la resistenza caratteristica di ancoraggio definita nel EC6-Tab.5.7 e $\gamma_M = 2,2$ il fattore parziale di sicurezza di cui al paragrafo EC6-§4.4.2.

Tuttavia, in conformità con le regole di dettaglio indicate al paragrafo EC8-§14.7.3, la lunghezza di sovrapposizione delle barre armatura negli elementi di confinamento non deve essere inferiore a 60 volte il diametro delle barre. Pertanto la lunghezza di sovrapposizione tra le armature longitudinali delle colonne e dei cordoli dev'essere rispettivamente:

$$l_{b,col} = 60 \cdot 10 = 600 \text{ mm} \qquad l_{b,cord} = 60 \cdot 16 = 960 \text{ mm}$$

Invece la distanza tra due barre sovrapposte dev'essere inferiore a due volte il diametro di ciascuna barra o a 20 mm, a seconda del valore maggiore. Al tempo stesso le barre parallele devono rispettare la distanza minima ottenuta come il valore massimo tra la dimensione massima dell'aggregato più 5 mm, il diametro della barra e 10 mm.

L'ancoraggio delle staffe avviene mediante piegature, con una barra longitudinale posizionata all'interno della piegatura. Per risultare efficace la curvatura del gancio viene prolungata da un tratto rettilineo di 5 volte il diametro della barra o 50 mm, in base a quale valore risulti maggiore.

3.9 Connessione delle pareti 3D alle fondazioni e al solaio

La connessione delle pareti alle fondazioni e al solaio avviene tramite gli elementi di confinamento quali le colonne e il cordolo in spessore. Quindi si può fare riferimento alle normative sul calcestruzzo armato.

La connessione rigida tra ogni colonna di confinamento e le fondazioni è garantita dall'impiego di tirafondi non a contatto. Questi ultimi devono rispettare la lunghezza di sovrapposizione minima definita §3.8 del presente elaborato. In particolare, devono essere annegati all'interno delle fondazioni per una lunghezza conforme ai criteri di ancoraggio e devono prolungarsi all'interno della colonna per una lunghezza corrispondente almeno alla lunghezza minima di sovrapposizione, rispettando inoltre i requisiti di distanza rispetto alle barre longitudinali della colonna.

CAPITOLO 4: LIMITAZIONI DELLO STUDIO E FUTURI SVILUPPI

4.1 Limitazioni dello studio

È opportuno precisare che il presente studio si colloca ad un livello preliminare e presenta alcune limitazioni che necessitano di essere adeguatamente considerate.

L'assenza di metodiche riconosciute per il calcolo strutturale, unita alla carenza di caratterizzazioni sperimentali dei materiali e degli elementi stampati, ha reso necessaria l'adozione di semplificazioni nella modellazione e l'impiego di ipotesi teoriche basate su dati reperibili in letteratura o per analogia con altre tecniche costruttive.

Ad esempio, per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche delle pareti stampate, sono stati utilizzati i valori di resistenza a compressione, taglio e flessione di elementi realizzati mediante la tecnica *Extrusion Printing*. Questi dati sono stati ricavati da prove sperimentali condotte su provini costituiti da un materiale già utilizzato in diversi progetti realizzati.

Per ottenere il valore di progetto sono state poi applicate le disposizioni definite nelle normative vigenti sulla muratura confinata. È fondamentale osservare che, al variare delle modalità di stampa, delle caratteristiche geometriche dell'elemento e della tecnica costruttiva impiegata, le proprietà meccaniche del materiale e i relativi coefficienti parziali di sicurezza possono subire modifiche significative. Pertanto, in diverse circostanze, è stato scelto un approccio conservativo, finalizzato a tenere conto delle suddette variabili, al fine di garantire una valutazione adeguata e sicura del comportamento della struttura.

L'integrazione di futuri studi sperimentali risulterà fondamentale per affinare i modelli e incrementare l'affidabilità dei calcoli strutturali.

Un'ulteriore criticità è rappresentata dalla limitata disponibilità di studi approfonditi sui dettagli costruttivi, con particolare riferimento alle modalità di connessione tra gli elementi stampati e altri componenti strutturali, quali solai e fondazioni. Considerando che il progetto sviluppato prevede l'impiego di elementi di confinamento verticali e orizzontali in calcestruzzo armato, si fa riferimento alle normative vigenti relative alle connessioni per strutture di tale tipologia.

4.2 Futuri sviluppi

Fin dalle prime ricerche sui processi di *Additive Manufacturing*, con particolare riferimento all'*Extrusion Printing*, è emerso chiaramente come questa tecnologia consenta già oggi di ridurre significativamente i tempi di costruzione, garantendo al contempo un elevato livello di sicurezza in cantiere.

Lo sviluppo della tecnologia, tuttavia, dipende anche da aspetti economici e ambientali. Sebbene tali fattori siano riconosciuti come potenzialmente migliorabili attraverso l'uso della stampa 3D per la realizzazione di edifici, ad oggi il materiale utilizzabile per l'*EP* risulta ancora costoso e presenta un impatto ambientale considerevole. Numerosi studi sono già in corso per la definizione di un mix design alternativo volto a migliorare questi aspetti.

Tra gli aspetti più interessanti, l'*Extrusion Printing* offre una notevole libertà progettuale, permettendo la realizzazione di edifici con geometrie complesse senza l'impiego di casseforme, con conseguente riduzione dei costi di realizzazione, i quali non aumentano proporzionalmente alla complessità geometrica. Questa tecnologia si rivela particolarmente raccomandabile per la costruzione di elementi strutturali complessi, poiché, mediante l'ottimizzazione topologica, è possibile ridurre al minimo l'impiego di materiale, ottenendo configurazioni altamente efficienti, altrimenti difficilmente realizzabili con metodi costruttivi tradizionali.

In tale contesto, l'adozione di software avanzati, come *Atena*, capaci di implementare legami costitutivi specifici per materiali stampati in 3D, risulterebbe altamente auspicabile per migliorare la precisione delle simulazioni numeriche e l'affidabilità delle analisi struttura

Conclusioni

L'obiettivo principale del presente studio è quello di affinare un processo volto a porre le basi per la progettazione strutturale analitica di un edificio realizzato mediante la “nuova” tecnica *Extrusion Printing*.

Una ricerca conoscitiva sui sistemi di *Additive Manufacturing* e, nello specifico, sul metodo di stampa per estrusione di materiali cementizi è servita a sviluppare un caso studio coerente con le possibilità offerte dalla tecnologia automatizzata, sia in termini di apparecchiature che di materiali presenti sul mercato.

La diffusione di questo sistema nel settore edilizio non può limitarsi esclusivamente alla conoscenza delle sue potenzialità, ma necessita un approfondimento sulla sua effettiva applicabilità in ogni suo aspetto, dalle potenzialità compositive alla riduzione dei tempi e dei costi, dalla sicurezza sul lavoro al contenimento dell'impatto ambientale e degli scarti.

In quest'ottica, la dimostrazione che le normative vigenti possano disciplinare, con opportuni adattamenti, anche la progettazione strutturale di edifici realizzati mediante *EP* rappresenta un significativo passo in avanti nell'affermazione di questa innovativa tecnica costruttiva.

L'analogia tra una struttura in muratura confinata ed una realizzata mediante stampa 3D con elementi di confinamento consente di adottare i criteri progettuali consolidati della prima per la seconda, riducendo la necessità di un elevato numero di prove sperimentali sulle pareti.

Nonostante alcune fasi progettuali, come, ad esempio, la modellazione 3D o la ottimizzazione topologica degli elementi, risultino dispendiose sia in termini di lavoro intellettuale che di tempo, la durata effettiva della costruzione appare decisamente ridotta rispetto ai metodi tradizionali. Si prevede, infatti, che la stampa in cantiere delle pareti verticali della porzione di edificio oggetto di verifica, con uno sviluppo lineare complessivo di 22,6 m, possa essere completata in poco meno di 7 ore, assumendo una velocità di deposizione di 200 mm/s.

Questa è solo una delle tante potenzialità sorprendenti dell'*Extrusion Printing*. Certamente saranno necessarie ancora numerose ricerche e applicazioni pratiche per assistere ad un'affermazione integrale della tecnica, ma la definizione di un percorso progettuale strutturato, coerente e sostenibile può rappresentare l'elemento chiave per la progressiva integrazione dell'automazione anche nei sistemi edilizi.

Bibliografia

- Aghajani Delavar, M., Chen, H., & Sideris, P. (2024). Analysis and design of 3D printed reinforced concrete walls under in-plane quasi-static loading. *Engineering Structures*, 303, 117535. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117535>
- Al Farhan, A. A., Xu, J., Dobrzanski, J., Kolawole, J. T., Whyte, L., Isa, M. N., Liu, X., Kinnell, P., & Buswell, R. (2024). Quantifying 3D Concrete Printing Production Waste. In D. Lowke, N. Freund, D. Böhler, & F. Herding (A c. Di), Fourth RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication (Vol. 53, pp. 46–53). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70031-6_6
- Bos, F., Ahmed, Z., Jutinov, E., & Salet, T. (2017). Experimental Exploration of Metal Cable as Reinforcement in 3D Printed Concrete. *Materials*, 10(11), 1314. <https://doi.org/10.3390/ma10111314>
- Bos, F. P., Menna, C., Pradena, M., Kreiger, E., Da Silva, W. R. L., Rehman, A. U., Weger, D., Wolfs, R. J. M., Zhang, Y., Ferrara, L., & Mechtcherine, V. (2022). The realities of additively manufactured concrete structures in practice. *Cement and Concrete Research*, 156, 106746. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106746>
- Buswell, R. A., Bos, F. P., Silva, W. R. L. D., Hack, N., Kloft, H., Lowke, D., Freund, N., Fromm, A., Dini, E., Wangler, T., Lloret-Fritsch, E., Schipper, R., Mechtcherine, V., Perrot, A., Vasilic, K., & Roussel, N. (2022). Digital Fabrication with Cement-Based Materials: Process Classification and Case Studies. In N. Roussel & D. Lowke (A c. Di), Digital Fabrication with Cement-Based Materials (Vol. 36, pp. 11–48). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90535-4_2
- Buswell, R. A., Da Silva, W. R. L., Bos, F. P., Schipper, H. R., Lowke, D., Hack, N., Kloft, H., Mechtcherine, V., Wangler, T., & Roussel, N. (2020). A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete. *Cement and Concrete Research*, 134, 106068. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106068>
- Buswell, R. A., Thorpe, A., Soar, R. C., & Gibb, A. G. F. (2008). Design, data and process issues for mega-scale rapid manufacturing machines used for construction. *Automation in Construction*, 17(8), 923–929. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.03.001>
- Capozzi, V., Micchia, A., Menna, C., & Asprone, D. (2024). *Innovazione e Sostenibilità a Montalto di Castro: Il Futuro delle Costruzioni attraverso la stampa 3D del calcestruzzo*.
- Curth, A. (2019). Slip Forming to Construction 3D Printing: The early history of Large-Scale Additive Manufacturing, in << ICI Journal >>, July - September 2022, pp.16-20.
- De Schutter, G., & Feys, D. (2016). Pumping of Fresh Concrete: Insights and Challenges.

- RILEM Technical Letters*, 1, 76–80.
<https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.15>
- De Schutter, G., Lesage, K., Mechtcherine, V., Nerella, V. N., Habert, G., & Agusti-Juan, I. (2018). Vision of 3D printing with concrete—Technical, economic and environmental potentials. *Cement and Concrete Research*, 112, 25–36.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.001>
- Deng, S., Zhang, X., Qin, Y., & Luo, G. (2007). Rheological characteristic of cement clean paste and flowing behavior of fresh mixing concrete with pumping in pipeline. *Journal of Central South University of Technology*, 14(S1), 462–465.
<https://doi.org/10.1007/s11771-007-0307-6>
- Hambach, M., & Volkmer, D. (2017). Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 79, 62–70.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001>
- Hwang, D., & Khoshnevis, B. (2005, settembre 14). *An Innovative Construction Process-Contour Crafting (CC)*. 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Ferrara, Italy. <https://doi.org/10.22260/ISARC2005/0004>
- Kaplan, D., de Larrard, F., & Sedran, T. (2005). *Design of Concrete Pumping Circuit*. *ACI Materials Journal*, V. 102, No. 2, 110.
- Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting—Related robotics and information technologies. *Automation in Construction*, 13(1), 5–19.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012>
- Khoshnevis, B., & Bekey, G. (2002, settembre 1). *Automated Construction Using Contour Crafting—Applications on Earth and Beyond*. 19th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Washington, DC, USA.
<https://doi.org/10.22260/ISARC2002/0076>
- Khoshnevis, B., Russell, R., Hongkyu Kwon, & Bukkapatnam, S. (2001). Crafting large prototypes. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 8(3), 33–42.
<https://doi.org/10.1109/100.956812>
- Kreiger, M., Kreiger, E., Mansour, S., Monkman, S., Delavar, M. A., Sideris, P., Roberts, C., Friedell, M., Platt, S., & Jones, S. (2024). Additive construction in practice – Realities of acceptance criteria. *Cement and Concrete Research*, 186, 107652.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107652>
- Liu, H., Wang, Y., Zhu, C., Wu, Y., Liu, C., He, C., Yao, Y., Wang, Y., & Bai, G. (2025). Design of 3D printed concrete masonry for wall structures: Mechanical behavior and strength calculation methods under various loads. *Engineering Structures*, 325, 119374. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119374>
- Lowke, D., Anton, A., Buswell, R., Jenny, S. E., Flatt, R. J., Fritschi, E. L., Hack, N., Mai, I., Popescu, M., & Kloft, H. (2024). Digital fabrication with concrete beyond horizontal planar layers. *Cement and Concrete Research*, 186, 107663.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107663>
- Lowke, D., Dini, E., Perrot, A., Weger, D., Gehlen, C., & Dillenburger, B. (2018). Particle-

- bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges. *Cement and Concrete Research*, 112, 50–65. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.018>
- Lowke D., Weger D., Henke K., Talke D., Winter S., Gehlen C. (2015). 3D-Drucken von Betonbauteilen durch selektives Binden mit calciumsilikatbasierten Zementen – Erste Ergebnisse zu betontechnologischen und verfahrenstechnischen Einflüssen.
- Ma, G., Li, Z., Wang, L., & Bai, G. (2019). Micro-cable reinforced geopolymer composite for extrusion-based 3D printing. *Materials Letters*, 235, 144–147. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.09.159>
- Marchment, T., & Sanjayan, J. (2020). Mesh reinforcing method for 3D Concrete Printing. *Automation in Construction*, 109, 102992. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102992>
- Mechtcherine, V., Bos, F. P., Perrot, A., Da Silva, W. R. L., Nerella, V. N., Fataei, S., Wolfs, R. J. M., Sonebi, M., & Roussel, N. (2020). Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review. *Cement and Concrete Research*, 132, 106037. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106037>
- Mechtcherine, V., Buswell, R., Kloft, H., Bos, F. P., Hack, N., Wolfs, R., Sanjayan, J., Nematollahi, B., Ivaniuk, E., & Neef, T. (2021). Integrating reinforcement in digital fabrication with concrete: A review and classification framework. *Cement and Concrete Composites*, 119, 103964. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103964>
- Mechtcherine, V., Nerella, V. N., Will, F., Näther, M., Otto, J., & Krause, M. (2019). Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. *Automation in Construction*, 107, 102933. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102933>
- Pegna, J. (1997). Exploratory investigation of solid freeform construction. *Automation in Construction*, 5(5), 427–437. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(96\)00166-5](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(96)00166-5)
- Perrot, A., Mélinge, Y., Estellé, P., & Lanos, C. (2009). Vibro-extrusion: A new forming process for cement-based materials. *Advances in Cement Research*, 21(3), 125–133. <https://doi.org/10.1680/adcr.2008.00030>
- Perrot, A., Pierre, A., Nerella, V. N., Wolfs, R. J. M., Keita, E., Nair, S. A. O., Neithalath, N., Roussel, N., & Mechtcherine, V. (2021). From analytical methods to numerical simulations: A process engineering toolbox for 3D concrete printing. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104164. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104164>
- Perrot, A., Rangeard, D., & Pierre, A. (2016). Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures*, 49(4), 1213–1220. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0571-0>
- Perrot, A. (A c. Di). (2019). 3D Printing of Concrete: State of the Art and Challenges of the Digital Construction Revolution (1a ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119610755>

- Reißig, S., Herdan, A., & Mechtcherine, V. (2024). Characterisation of the Rheological Behaviour of a Resource-Saving Sustainable Concrete in the context of 3D printing. In D. Lowke, N. Freund, D. Böhler, & F. Herding (A c. Di), Fourth RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication (Vol. 53, pp. 22–29). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70031-6_3
- Reißig, S., Nerella, V. N., & Mechtcherine, V. (2022). Material Design and Rheological Behavior of Sustainable Cement-Based Materials in the Context of 3D Printing. In R. Buswell, A. Blanco, S. Cavalaro, & P. Kinnell (A c. Di), Third RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication (Vol. 37, pp. 439–445). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06116-5_65
- Roussel, N. (2006). A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications. *Cement and Concrete Research*, 36(10), 1797–1806. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.025>
- Roussel, N. (2018). Rheological requirements for printable concretes. *Cement and Concrete Research*, 112, 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.005>
- Roussel, N., & Lowke, D. (A c. Di). (2022). *Digital Fabrication with Cement-Based Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM TC 276-DFC* (Vol. 36). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-90535-4>
- Salet, T. A. M., Ahmed, Z. Y., Bos, F. P., & Laagland, H. L. M. (2018). Design of a 3D printed concrete bridge by testing. *Virtual and Physical Prototyping*, 13(3), 222–236. <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1476064>
- Schmidt, W., & Link, J. (2024). Rheological Properties. In M. Sonebi & D. Feys (A c. Di), Measuring Rheological Properties of Cement-based Materials (Vol. 39, pp. 7–31). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36743-4_2
- Siemiński, P. (2021). Introduction to fused deposition modeling. In *Additive Manufacturing* (pp. 217–275). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818411-0.00008-2>
- Sonebi, M., & Feys, D. (A c. Di). (2024). *Measuring Rheological Properties of Cement-based Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 266-MRP* (Vol. 39). Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-36743-4>
- Tudela, M., Cardenas, K., Le Bienvenu, S., Dunkelberg, F., Nakamatsu, J., Kim, S., Ruiz, G., Pando, M. A., Aguilar, R., & Silva, G. (2024). Development and Characterization of a Printable Concrete Made with Construction and Demolition Waste Aggregates. In D. Lowke, N. Freund, D. Böhler, & F. Herding (A c. Di), Fourth RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication (Vol. 53, pp. 3–10). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70031-6_1
- Wangler, T., Lloret, E., Reiter, L., Hack, N., Gramazio, F., Kohler, M., Bernhard, M., Dillenburger, B., Buchli, J., Roussel, N., & Flatt, R. (2016). Digital Concrete: Opportunities and Challenges. *RILEM Technical Letters*, 1, 67–75. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.16>

- Weger, D., Stengel, T., Gehlen, C., Maciejewski, Y., & Meyer-Brötz, F. (2021). Approval for the Construction of the First 3D Printed Detached House in Germany—Significance of Large Scale Element Testing. In S. Z. Jones & E. L. Kreiger (A c. Di), *Standards Development for Cement and Concrete for Use in Additive Construction* (pp. 144–169). ASTM International 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. <https://doi.org/10.1520/STP163620200119>
- Weng, Y., Lu, B., Li, M., Liu, Z., Tan, M. J., & Qian, S. (2018). Empirical models to predict rheological properties of fiber reinforced cementitious composites for 3D printing. *Construction and Building Materials*, 189, 676–685. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.039>
- Whitaker, M. (2014). The history of 3D printing in healthcare. *The Bulletin of the Royal College of Surgeons of England*, 96(7), 228–229. <https://doi.org/10.1308/147363514X13990346756481>
- Wolfs, R., Bos, D., & Salet, T. (2023). Lessons learned of project Milestone: The first 3D printed concrete house in the Netherlands. *Materials Today: Proceedings*, S2214785323035770. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.183>
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, 1–10. <https://doi.org/10.5402/2012/208760>
- Zhang, C., Nerella, V. N., Krishna, A., Wang, S., Zhang, Y., Mechtcherine, V., & Banthia, N. (2021). Mix design concepts for 3D printable concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104155. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104155>
- Zhou, Y., Althoey, F., Alotaibi, B. S., Gamil, Y., & Iftikhar, B. (2023). An overview of recent advancements in fibre-reinforced 3D printing concrete. *Frontiers in Materials*, 10, 1289340. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1289340>

Sitografia

- [1] ISO/ASTM 52900:2021. Sito web: <https://bsol.bsigroup.com/Bibliographic/BibliographicInfoData/000000000030453352>.
Ultimo accesso il 13/02/2025. Ultima consultazione 20/02/2025.
- [2] BS EN ISO/ASTM 52939:2023. Sito web: <https://bsol.bsigroup.com/Bibliographic/BibliographicInfoData/000000000030485328>.
Ultima consultazione 20/02/2025.
- [3] Baranyk, I. (2017). Sito web: <https://www.archdaily.com/806230/this-complex-concrete-column-was-made-using-3d-printed-formwork>. Ultima consultazione 20/02/2025.
- [4] Cano, P. (2022). Sito web: <https://www.archdaily.com/992081/big-icon-and-lennar-announce-community-of-3d-printed-homes-in-texas-usa>. Ultima consultazione 20/02/2025.
- [5] ICON. Sito web: <https://www.iconbuild.com/>. Ultima consultazione 20/02/2025.
- [6] Urschel, E. Sito web: <https://patents.google.com/patent/US2339892A/en>. Ultima consultazione 20/02/2025.
- [7] ArchDaily. Sito web: <https://www.archdaily.com/804596/worlds-first-3d-printed-bridge-opens-in-spain>. Ultima consultazione 20/02/2025.
- [8] D-shape. Sito web: <https://d-shape.com/3d-printing/>. Ultima consultazione 20/02/2025.
- [9] StraitsResearch. Sito web: <https://straitsresearch.com/report/3d-concrete-printing-market>. Ultima consultazione 20/02/2025.
- [10] ApisCor. Sito web: <https://apis-cor.com/>. Ultima consultazione 20/02/2025.
- [11] COBOD. Sito web: <https://cobod.com/>. Ultima consultazione 20/02/2025.
- [12] ANIWAA. Sito web: <https://www.aniwaa.com/>. Ultima consultazione 20/02/2025.
- [13] CyBe. Sito web: <https://cybe.eu/>. Ultima consultazione 20/02/2025.
- [14] Constructions-3D. Sito web: <https://www.constructions-3d.com/en>. Ultima consultazione 20/02/2025.
- [15] WASP. Sito web: <https://www.3dwasp.com/>. Ultima consultazione 20/02/2025.
- [16] Zaha Hadid Architects. Sito web: <https://www.zaha-hadid.com/design/striatus/>.
Ultima consultazione 20/02/2025.
- [17] Block, I. (2019). World's largest 3D-printed building completes in Dubai. Sito web: <https://www.dezeen.com/2019/12/22/apis-cor-worlds-largest-3d-printed-building-dubai/>.
Ultima consultazione 20/02/2025