

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Architettura per il Progetto Sostenibile

Tesi di Laurea Magistrale

Il calcestruzzo schiumato estrudibile ultra-leggero per la realizzazione
di componenti edilizi innovativi ed energeticamente efficienti



Relatore
Prof.ssa Luciana Restuccia

Correlatore
Dott. Devid Falliano

Candidato
Silvia Parmigiani

Anno Accademico 2020/2021

INDICE

SOMMARIO	1
ABSTRACT	3
CAPITOLO 1_TECNOLOGIA DEL CALCESTRUZZO: LA NUOVA SFIDA DEL GREEN DEAL	5
1.1_INTRODUZIONE	5
1.2_GREEN CONCRETE: STRATEGIE DI ECO-SOSTENIBILITÀ	8
1.2.1_Composizione della miscela	9
1.2.2_Produzione dei costituenti della miscela	15
1.2.3_Miscelazione del calcestruzzo	17
1.2.4_Applicazione <i>in situ</i>	18
1.2.5_Performance in fase d'uso	18
1.2.6_Fine vita	20
CAPITOLO 2_PRODUZIONE ADDITIVA CON IL CALCESTRUZZO NEL SETTORE DELLE COSTRUZIONI	21
2.1_PRODUZIONE ADDITIVA: ORIGINE, METODI E PROCESSI	21
2.2_PROCESSO DI ESTRUSIONE CON IL CALCESTRUZZO: CONTOUR CRAFTING E 3D CONCRETE PRINTING	25
2.3_PROPRIETÀ DEL CALCESTRUZZO ESTRUDIBILE	29
2.3.1_Proprietà allo stato fresco	29
2.3.2_Proprietà allo stato indurito	32
2.4_POTENZIALITÀ, LIMITI E SFIDE DELL'AUTOMAZIONE NEL SETTORE DELLE COSTRUZIONI	41
2.4.1_Fabbricazione digitale <i>in situ</i>	50
CAPITOLO 3_CONGLOMERATI CEMENTIZI SPECIALI: IL CALCESTRUZZO SCHIUMATO ESTRUDIBILE	53
3.1_CALCESTRUZZI ALLEGGERITI: PROPRIETÀ E MIX DESIGN DEI CALCESTRUZZI SCHIUMATI	53
3.2_CALCESTRUZZO SCHIUMATO ESTRUDIBILE	62
3.2.1_Mix design e caratteristiche del materiale allo stato fresco	62
3.2.2_Caratteristiche del materiale allo stato indurito	64
3.3_POTENZIALITÀ NEL SETTORE DELLE COSTRUZIONI	67
3.4_RICERCA	69

CAPITOLO 4_SPERIMENTAZIONE PARTE I: PROVE DI STABILITÀ, PROPRIETÀ ALLO STATO FRESCO E PRESTAZIONI MECCANICHE E TERMICHE DI CALCESTRUZZI SCHIUMATI INNOVATIVI	73
4.1_MATERIALI E METODI	73
4.2_RISULTATI	81
4.2.1_Caratterizzazione reologica dello stato fresco	81
4.2.2_Variazione di densità	82
4.2.3_Caratterizzazione microstrutturale	84
4.2.4_Prestazioni meccaniche a 28 giorni	91
4.2.4.1_ Resistenza a trazione per flessione	91
4.2.4.2_ Resistenza a compressione	102
4.2.5_Prova di stabilità	114
4.2.6_Conducibilità termica	116
4.3_CONSIDERAZIONI	118
4.4_RICERCA	119
CAPITOLO 5_SPERIMENTAZIONE PARTE II: PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DI COMPONENTI ENERGETICAMENTE EFFICIENTI	121
5.1_PROGETTAZIONE DEI COMPONENTI	121
5.1.1_Introduzione	121
5.1.2_Componenti prefabbricati	124
5.1.2.1_Pannelli in cassaforma removibile	124
5.1.2.2_Blocchi ad incastro maschio-femmina	129
5.1.3_Componenti destinati alla fabbricazione <i>in situ</i>	133
5.1.4_Sistemi di ancoraggio all'esistente	144
5.1.4.1_Sistemi per componenti prefabbricati	144
5.1.4.2_Sistemi per componenti fabbricati <i>in situ</i>	149
5.1.5_Progettazione parametrica	152
5.2_REALIZZAZIONE DEI COMPONENTI	154
5.2.1_Introduzione	154
5.2.2_Materiali e metodi	155
5.2.3_Pannelli colati o estrusi in cassaforma removibile	158
5.2.4_Componenti estrusi in assenza di cassaforma	168
5.3_CONSIDERAZIONI E RICERCA	180
CAPITOLO 6_CONCLUSIONI E SCENARI FUTURI	183
<i>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI</i>	185
<i>INDICE DELLE FIGURE</i>	187
<i>INDICE DELLE TABELLE</i>	201

SOMMARIO

Il lavoro di ricerca sperimentale della presente tesi riguarda il calcestruzzo schiumato estrudibile, un materiale innovativo ricco di potenzialità spendibili nel settore delle costruzioni del prossimo futuro. Tale materiale, ascrivibile alla categoria dei calcestruzzi alleggeriti, si caratterizza per l'elevata multifunzionalità e versatilità di impiego ma, al contempo, grazie alla capacità di sviluppare una tempestiva *green strength*, offre anche la possibilità di essere impiegato in processi di costruzione di estrusione automatizzata, in ambito sia di prefabbricazione che di fabbricazione *in situ*, secondo la metodologia del *3D Concrete Printing*. In tale ambito, i benefici in termini di efficienza, risparmio economico ed eco-sostenibilità associati al materiale hanno la possibilità di essere amplificati grazie ad un suo impiego in prodotti innovativi altrettanto efficienti, economici ed eco-sostenibili.

Il calcestruzzo schiumato estrudibile è un materiale “giovane”, ancora poco investigato nonostante le potenzialità estremamente elevate e l'intento del presente lavoro di tesi si basa proprio sulla necessità di svolgere studi e sperimentazioni tanto in laboratorio quanto in ambienti facilmente assimilabili ai siti produttivi tipici del settore edilizio, quali lo stabilimento e il cantiere.

Proprio per tali necessità, il presente lavoro di tesi è stato focalizzato sulle sperimentazioni svolte in laboratorio, realizzando e studiando le principali proprietà del calcestruzzo schiumato ultra-leggero a densità estremamente bassa. Inoltre, tramite alcune sperimentazioni in campo mediante l'impiego di un braccio robotico, è stato possibile progettare e realizzare dei componenti edilizi energeticamente efficienti, multifunzionali e a densità variabile. Quindi è stato possibile anche studiare il processo estrusivo, che ha permesso di evidenziare potenzialità, limiti e problematiche tanto a livello di materiale quanto di processo.

Nel presente lavoro di tesi, i primi tre capitoli trattano, a livello teorico e sulla base della letteratura esistente, le tre tematiche base che caratterizzano l'ambito oggetto di studio: la tecnologia del calcestruzzo e le strategie per rendere tale materiale più ecosostenibile; le caratteristiche, le potenzialità e i limiti attuali dell'impiego del *3D Concrete Printing* nel settore delle costruzioni e le proprietà che deve possedere un calcestruzzo per poter essere sottoposto a processi estrusivi; le proprietà e potenzialità del calcestruzzo schiumato estrudibile e del suo impiego nel settore delle costruzioni. In seguito, nei capitoli 4 e 5 vengono trattate le sperimentazioni pratiche.

La prima parte sperimentale, trattata nel capitolo 4, è stata svolta presso il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica (DISEG) e si è occupata di indagare le caratteristiche reologiche e meccaniche di materiali a matrice cementizia innovativi, ultra-leggeri e a densità fresca compresa nel *range* 162-188 kg/m³. Grazie alle valutazioni condotte sia allo stato fresco che allo stato indurito, è stato possibile confrontare i materiali a densità circa costante ma caratterizzati dall'impiego di due differenti agenti schiumogeni tensioattivi e dall'eventuale presenza di microfibre in polipropilene. La seconda parte sperimentale, trattata nel capitolo 5, ha riguardato

la progettazione e la realizzazione di componenti in calcestruzzo schiumato estrudibile a densità variabile, destinati alla prefabbricazione o alla fabbricazione *in situ*, adatti per l'applicazione con funzione principale di cappotto termico in interventi di efficientamento energetico su chiusure verticali opache esistenti. In tale contesto sono state ideate, progettate e realizzate varie tipologie di componenti tramite processo estrusivo con impiego di robot collaborativo ed in assenza di casseforme oppure mediante semplice colatura o estrusione svolte all'interno di casseforme di geometria variabile.

Nella parte conclusiva del presente lavoro, sono state espresse le considerazioni finali in merito all'ambito oggetto di studio, ponendo particolare attenzione sugli scenari futuri a livello di ricerca e di sperimentazione.

ABSTRACT

The experimental research work in this thesis concerns extrudable foamed concrete, an innovative material with great potential for use in the construction sector in the near future. This material, which can be ascribed to the category of lightweight concretes, is characterised by its high multifunctionality and versatility of use but, at the same time, thanks to its ability to develop timely green strength, it also offers the possibility of being used in automated extrusion construction processes, both in the field of prefabrication and in situ fabrication, according to the 3D Concrete Printing method. In this context, the efficiency, cost-saving and eco-sustainability benefits associated with the material can be amplified through its use in innovative products that are just as efficient, cost-effective and eco-sustainable.

Extrudable foamed concrete is a 'young' material, still little investigated in spite of its extremely high potential, and the aim of this thesis work is based on the need to carry out studies and experiments both in the laboratory and in environments which can easily be assimilated to typical production sites in the construction sector, such as production plants and construction sites.

Precisely because of these needs, this thesis work has focused on experiments carried out in the laboratory, studying the main properties of ultra-lightweight foamed concrete with extremely low density. In addition, through field experiments using a robotic arm, it was possible to design and manufacture energy-efficient, multifunctional and variable-density building components. It was also possible to study the extrusion process, which made it possible to highlight the potential, limitations and problems of both material and process.

In this thesis work, the first three chapters deal with the three basic themes that characterise the area under study, on a theoretical level and on the basis of existing literature: concrete technology and strategies for making this material more eco-sustainable; the characteristics, potential and current limits of the use of 3D Concrete Printing in the construction sector and the properties that a concrete must possess in order to be subjected to extrusion processes; the properties and potential of extrudable foamed concrete and its use in the construction sector. Subsequently, practical experiments are dealt with in Chapters 4 and 5.

The first experimental part, dealt with in Chapter 4, was carried out in the laboratory of the Department of Structural, Geotechnical and Building Engineering (DISEG) and investigated the rheological and mechanical characteristics of innovative, ultra-lightweight cement matrix materials with a fresh density in the range 162-188 kg/m³. Thanks to the evaluations carried out both in the fresh and hardened state, it was possible to compare materials with approximately constant density but characterised by the use of two different foaming agents and the possible presence of polypropylene microfibres. The second experimental part, dealt with in Chapter 5, concerned the design and construction of extrudable foamed concrete components with variable density, intended

for prefabrication or in situ fabrication, suitable for application as thermal insulation in energy efficiency measures on existing opaque vertical building envelopes. In this context, various types of components have been conceived, designed and manufactured by means of an extrusion process using a collaborative robot and in the absence of formwork, or by simple casting or extrusion carried out inside formwork of variable geometry.

In the final part of this paper, the latest considerations regarding the area under study are expressed, with particular emphasis on future scenarios in terms of research and experimentation.

CAPITOLO 1

TECNOLOGIA DEL CALCESTRUZZO: LA NUOVA SFIDA DEL *GREEN DEAL*

1.1_INTRODUZIONE

Nel settore edilizio il cemento svolge un ruolo essenziale come materiale base per molti tipi di costruzioni (case, strade, scuole, ospedali, porti ecc.) e, in particolare, viene utilizzato nella maggior parte dei casi con funzione di legante dei vari componenti che costituiscono il calcestruzzo e gli altri materiali a base cementizia (CBM). Il cemento è una polvere fine, inorganica, non metallica, che si ottiene attraverso un processo di produzione articolato in varie fasi che si svolgono all'interno dei cementifici e, quando tale polvere viene miscelata con acqua, permette di formare un impasto in grado di fare presa ed indurire. Ad oggi, il cemento Portland è il principale cemento idraulico impiegato nel settore delle costruzioni e, quando miscelato con acqua, aggregati ed eventuali additivi e/o aggiunte, permette di realizzare elementi in calcestruzzo, uno dei materiali da costruzione più competitivi e durevoli, ma anche più energivori e ad elevato impatto ambientale. A tal proposito, negli ultimi anni numerosi studi hanno posto l'attenzione sugli elevati (e maggiori del previsto) impatti ambientali provocati durante l'intero ciclo di vita dai prodotti in calcestruzzo impiegati nel settore delle costruzioni e hanno evidenziato in particolare alcuni aspetti negativi in ambito di eco-sostenibilità. Infatti, il calcestruzzo:

- è costituito per la maggior parte da materiali non eco-sostenibili poiché provenienti da materie prime non rinnovabili.
- È costituito da un materiale base, il cemento, che viene prodotto attraverso il secondo processo produttivo con più emissioni di CO₂ equivalente.

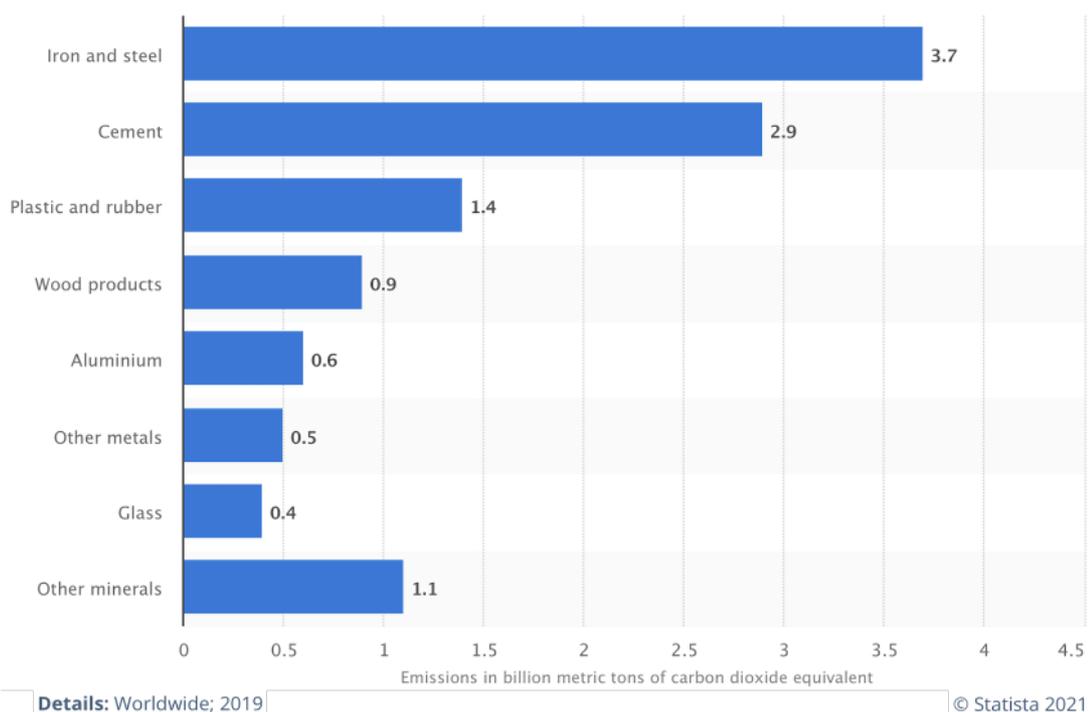


Figura 1 – Emissioni mondiali di gas ad effetto serra suddivise per processi produttivi di differenti materiali impiegati nell'industria delle costruzioni nell'anno 2019 [Statista, 2021].

- È responsabile del 4-8% dei gas ad effetto serra prodotti complessivamente a livello globale, per cui, secondo alcuni studi [2], tutte le foreste ad oggi presenti nel mondo non sono in grado di compensare nemmeno la metà delle emissioni di CO₂ equivalente determinate dalla preparazione degli aggregati e dalla produzione di cemento globale.
- Richiede una quantità molto significativa di risorse naturali e di energia (solitamente proveniente da combustibili fossili) durante tutte le fasi del ciclo di vita quali: produzione dei costituenti base (quali cemento, aggregati, armature ecc.), produzione, miscelazione e applicazione in cantiere del calcestruzzo, *performance* in fase d'uso e scenario di fine vita dei prodotti finali, cui si aggiungono i notevoli impatti legati a trasporti, sfridi ecc.

Ad aggravare la situazione e ad aumentare l'urgenza di prendere provvedimenti in merito, vi è il fatto che nell'ultimo ventennio la produzione e l'impiego di cemento e calcestruzzo a livello globale è cresciuta notevolmente, tanto che il calcestruzzo risulta ad oggi il secondo materiale da costruzione più impiegato nel settore edilizio [2], e nel prossimo futuro se ne prevede un ulteriore aumento. Negli ultimi 7 anni la produzione mondiale di cemento ha superato i 4 miliardi di tonnellate all'anno e, considerando che per produrre una tonnellata di cemento sono necessari circa 4 GJ di energia e vengono emesse circa 981 tonnellate di CO₂ equivalente, ad esempio nel 2019, a fronte di una produzione annua pari a 4,2 miliardi di tonnellate, solo la fase produttiva del cemento ha consumato circa 16,8 miliardi di GJ di energia e ha emesso circa 4,1202E+12 tonnellate di CO₂ equivalente [2]. Oltre agli impatti in fase di produzione, bisogna considerare anche che l'estrazione

degli enormi quantitativi di materie prime vergini necessari per la produzione del cemento (quali calcare, argilla, carbon fossile ecc.) comporta pesanti effetti sull'ambiente in termini di deforestazione e perdita di suolo superficiale.

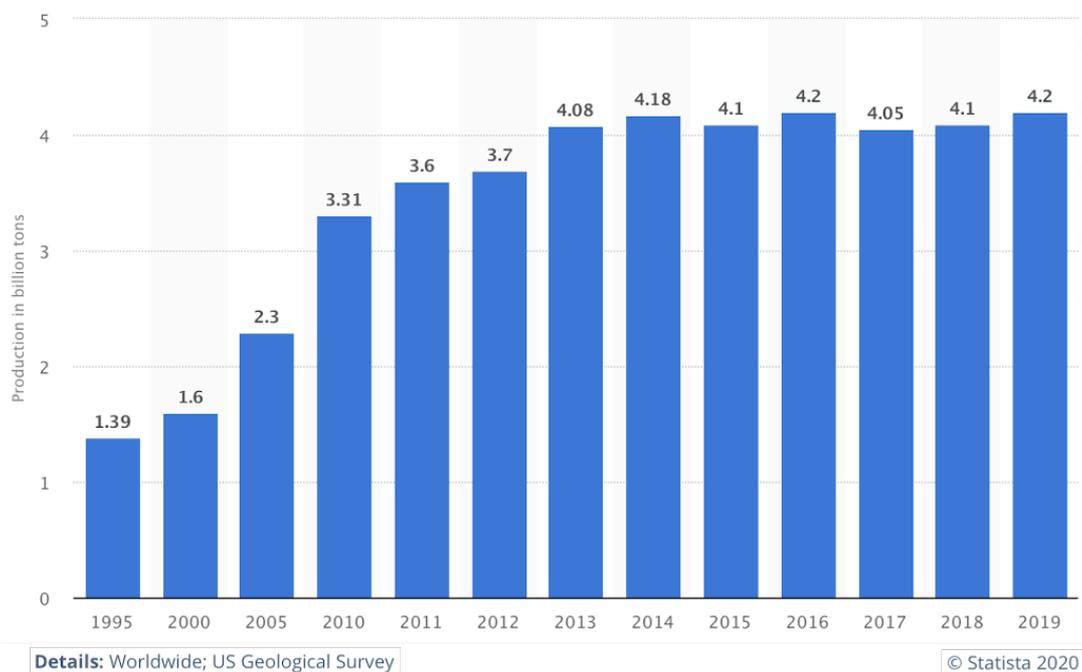


Figura 2 – Produzione di cemento a livello mondiale dal 1995 al 2019 [Statista, 2020]

Negli impasti ordinari di calcestruzzo, il cemento, sebbene sia l'ingrediente meno eco-sostenibile, costituisce solo circa il 12% sul totale della massa mentre l'80% è costituito dagli aggregati che, fortunatamente, determinano un impatto ambientale insignificante in confronto al cemento, nonostante presentino un impiego annuo mondiale quasi 12 volte superiore. Ad esempio, nel 2019 sono state prodotte a livello mondiale circa 48,3 miliardi di tonnellate di aggregati e, avendo questi ultimi un *Global Warming Potential* (GWP) pari a circa 0,0123 tonnellate di CO₂ equivalente per ogni tonnellata di aggregati prodotti, hanno generato in totale circa 5,9409E+8 tonnellate di CO₂ equivalente [2]. Dato l'enorme consumo di aggregati impiegati per il confezionamento del calcestruzzo, è necessario considerare che, oltre all'emissione di gas serra, la produzione di tali quantitativi e i correlati consumi energetici per svolgere le operazioni di estrazione, lavorazione e trasporto comportano impatti considerevoli sull'ambiente in termini di consumo di risorse ed effetto sull'ecosistema delle aree verdi e dei letti dei fiumi.

1.2_ *GREEN CONCRETE*: STRATEGIE DI ECO-SOSTENIBILITA'

Alla luce delle considerazioni emerse in merito agli impatti ambientali provocati, durante l'intero ciclo di vita, dai prodotti in calcestruzzo impiegati nel settore edilizio, molti studiosi hanno espresso la loro preoccupazione e la necessità e l'urgenza di prevedere azioni finalizzate all'incremento dell'eco-sostenibilità di tali prodotti. Le azioni devono perseguire, in particolare, la riduzione sia delle emissioni in atmosfera di *Green House Gases* (GHGs), principali responsabili del surriscaldamento globale e di tutte le conseguenze che tale fenomeno comporta a livello di cambiamento climatico (eventi naturali catastrofici, desertificazione, scioglimento dei ghiacciai ecc.), sia del consumo di risorse (anche a contenuto energetico), prevedendone la sostituzione almeno parziale con materie prime secondarie (MPS) provenienti da altre lavorazioni con il duplice beneficio di ridurre l'estrazione di materie prime vergini e di risolvere il problema legato allo smaltimento dell'ingente quantitativo di scarti di varia natura che affligge le attività produttive. Per raggiungere tali obiettivi è necessario svolgere ricerche e sperimentazioni finalizzate all'individuazione di nuove strategie e pratiche, più sostenibili rispetto a quelle attuali, o all'approfondimento di quelle già parzialmente individuate ma il cui studio risulta ancora incompleto. Gli studi realizzati fino ad oggi si sono soffermati soprattutto sugli approcci più tradizionali per ridurre l'impatto ambientale legato al calcestruzzo, ma vi sono molti altri approcci non tradizionali che devono ancora essere esplorati e approfonditi al fine di valutarne tutti gli aspetti essenziali e definirne di conseguenza l'affidabilità sulla base di molteplici punti di vista. Per confermare la validità di una strategia di sostenibilità, infatti, è necessario adottare un approccio olistico per valutarne l'effetto su una lunga serie di requisiti che il materiale deve garantire, a seconda del caso specifico, sia allo stato fresco (in particolare la lavorabilità) che allo stato indurito (in particolare durabilità e *performance* tecnica). In tale contesto, negli ultimi anni, sono già stati fatti progressi importanti ma, alla luce degli obiettivi ambientali posti a livello globale (soprattutto in vista di un prossimo aumento di impiego del calcestruzzo), essi non risultano sufficienti per la salvaguardia del nostro ecosistema.

Nei paragrafi seguenti sono presentati i principali percorsi che possono portare ad un aumento della sostenibilità del calcestruzzo in senso lato con l'obiettivo di compensare almeno in parte gli elevati impatti ambientali che i metodi e le tecniche attualmente in uso comportano. Andando più nel dettaglio, i percorsi di sostenibilità trattati di seguito riguardano l'intero ciclo di vita del calcestruzzo e trattano essenzialmente 6 ambiti: composizione della miscela; processi di produzione delle materie prime meno eco-sostenibili della miscela (cemento, aggregati e armature); strumenti e tecniche di miscelazione del calcestruzzo; applicazioni *in situ* del calcestruzzo; *performance* in fase d'uso dei prodotti finali; fine vita. Per capire se un calcestruzzo risulta più *green* rispetto ad un altro è necessario valutare quali strategie di sostenibilità sono state adottate e quanto esse siano risultate

valide nel migliorare la *performance* ambientale complessivamente offerta durante l'intero ciclo di vita dei prodotti (da valutare tramite un'analisi LCA), fermo restando l'obbligo e la priorità di soddisfare i requisiti tecnici richiesti nel caso specifico.

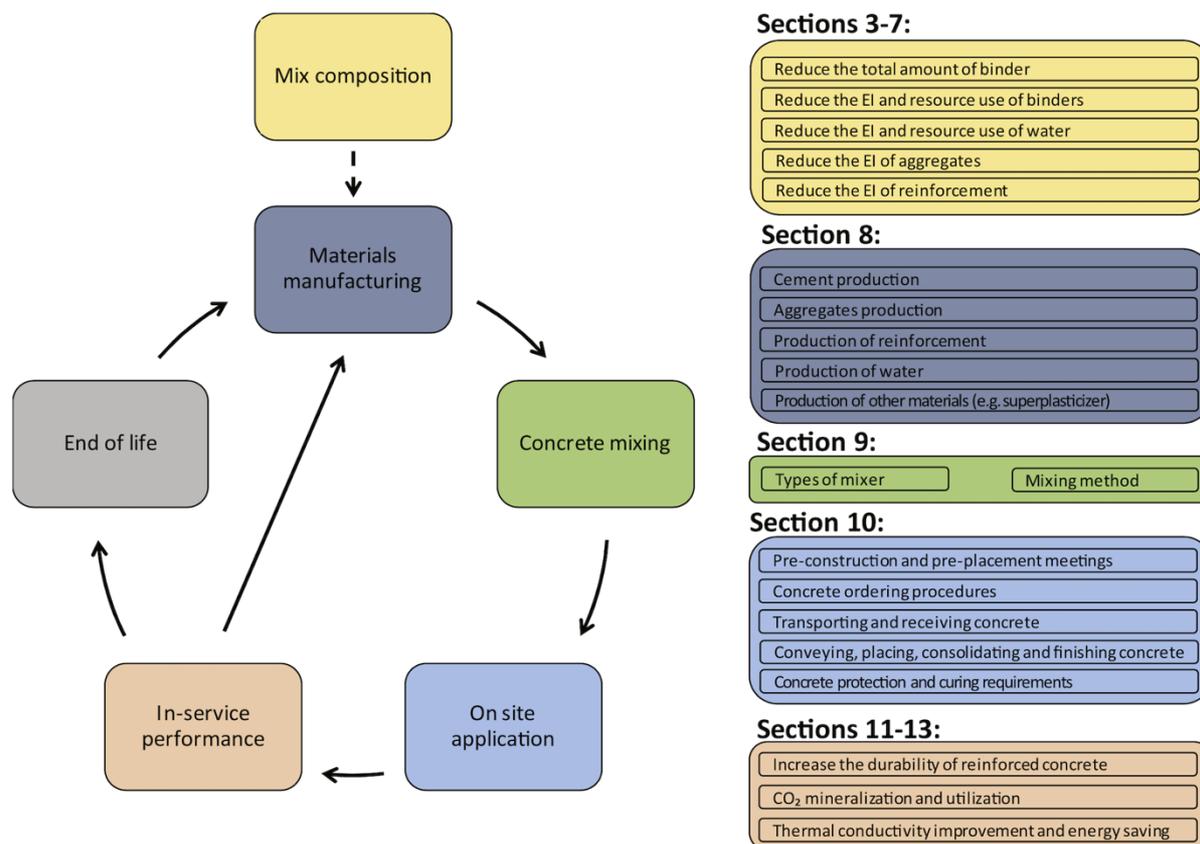


Figura 3 – Fasi del ciclo di vita del calcestruzzo e relative strategie di sostenibilità [2].

1.2.1_Composizione della miscela

Uno dei possibili percorsi da intraprendere per migliorare l'eco-compatibilità del calcestruzzo riguarda la modificazione della composizione della miscela al fine di ridurre il quantitativo del componente meno eco-sostenibile (il cemento) e/o di ridurre gli impatti ambientali e l'uso di risorse attribuibili, in generale, ai vari componenti che costituiscono l'impasto base (leganti, aggregati, acqua e rinforzi). I contributi derivanti dalla presenza di eventuali additivi sono trascurabili per le minime quantità che li caratterizzano.

Ridurre il contenuto di legante

Al fine di ottenere un calcestruzzo più eco-sostenibile, economico e durevole, tale strategia, sebbene non sia tra le più semplici da mettere in pratica poiché richiede ricerche approfondite, offrirebbe un ottimo contributo. La fattibilità di tale azione deriva da una serie di studi dai quali emerge la possibilità di impiegare un quantitativo di cemento inferiore rispetto al minimo fissato

da normativa (pari a 260 kg/m³ secondo la EN 206-1, 2000) senza inficiare le prestazioni di durabilità dei prodotti finali. Ad oggi la letteratura in merito risulta ancora molto scarsa sebbene tale strategia permetterebbe di risolvere la situazione a monte del problema ottenendo potenzialmente benefici molto rilevanti.

All'interno di tale ambito, alcune delle azioni specifiche per ridurre il quantitativo di legante sono le seguenti [2]:

- *impiegare polveri pozzolaniche o idrauliche come materiali cementizi supplementari (SCMs).*

L'impiego della maggior parte degli SCMs in sostituzione parziale del quantitativo di cemento permetterebbe un miglioramento significativo di alcune proprietà quali la durabilità del calcestruzzo. Tuttavia, tali aggiunte generalmente comportano la diminuzione della resistenza alla carbonatazione per cui è essenziale considerarne l'impiego solo in alcune situazioni quali: strutture non direttamente esposte ad alti contenuti di CO₂ (come, ad esempio, strutture di fondazione o collocate sott'acqua), strutture con armature non convenzionali o strutture che coinvolgono grandi masse per ridurre il calore di drenaggio.

- *Impiegare polveri con funzione di riempimento (fillers).*

Un ridotto quantitativo di cemento può compromettere alcune proprietà essenziali della miscela quali ad esempio la lavorabilità e coesione e portare, di conseguenza, ad una scarsa compattazione con ricadute a livello di resistenza, porosità e durabilità. Sebbene gli studi in proposito siano ancora troppo limitati, per risolvere tali problemi vari ricercatori hanno espresso interesse verso l'impiego di *fillers* chimicamente non attivi quali ad esempio polveri di marmo, calcare, quarzo, dolomia e granito. A tal proposito è necessario approfondire la ricerca al fine di valutare correttamente le conseguenze che l'impiego di *fillers* in sostituzione di parte del cemento possono generare a livello di lavorabilità, resistenza meccanica e durabilità (in particolare in termini di carbonatazione in caso di alti quantitativi di polveri aggiunte).

- *Ridurre il rapporto acqua/legante e impiegare disperdenti.*

Secondo alcuni ricercatori [2], tale soluzione rappresenta la strategia più promettente per ridurre il quantitativo di legante ottenendo benefici economici oltre che a livello di sostenibilità e qualità ma, nonostante il gran numero di studi, è necessario un ulteriore approfondimento a livello di ricerca per poterne confermare l'effettivo valore. La riduzione del rapporto acqua/legante permetterebbe potenzialmente di ottenere alcuni importanti benefici quali: maggior qualità dell'impasto dovuto alla maggior vicinanza tra particelle di cemento; minor diametro dei pori (per la ridotta quantità di acqua libera poiché la maggior parte del contenuto d'acqua viene assorbito dai prodotti di idratazione) che offre una maggior resistenza alla carbonatazione e alla penetrazione da parte di agenti esterni che

possono inficiare la durabilità degli elementi finali (quali CO₂, ioni di cloruro ed altri); riduzione del costo e dell'impatto ambientale del calcestruzzo grazie alla riduzione del quantitativo di cemento previsto (tale beneficio in termini di riduzione di costo e impatto sull'ambiente non viene compensato nemmeno nel caso in cui sia necessario impiegare additivi chimici per ottenere rapporti acqua/cemento estremamente bassi poiché l'impatto economico e ambientale degli additivi impiegati nel calcestruzzo è molto ridotto per via delle minime quantità impiegate); e infine maggior resistenza a compressione in caso di presenza di *fillers*, in quanto, a causa del basso rapporto acqua/cemento, tali materiali fini rimangono incapsulati totalmente tra le particelle di cemento che si trovano naturalmente più vicine.

In tale ambito, al momento, si ritiene che sia possibile generare calcestruzzi a ridotto contenuto di legante con buone prestazioni tecniche e ridotto impatto ambientale ed economico riducendo il rapporto acqua/cemento fino a 0.4, prevedendo contemporaneamente l'utilizzo di superfluidificanti, *fillers* e SCMs con particelle sferiche. Un aspetto importante da tenere in considerazione riguarda la condizione di indurimento di calcestruzzi a basso rapporto acqua/cemento al fine di controllare i fenomeni di ritiro per non compromettere la *performance* di durabilità delle strutture in calcestruzzo.

- *Ridurre indirettamente il quantitativo di legante.*

In teoria vi sono alcune strategie che permettono di migliorare le caratteristiche del calcestruzzo compensando le conseguenze della riduzione della quantità di cemento quali ad esempio l'impiego di nano-materiali, di miscele binarie, ternarie o quaternarie, di armature inossidabili e di barriere contro la penetrazione di agenti aggressivi. Impiegando una o più di queste strategie, potenzialmente si può confezionare un calcestruzzo con durabilità e prestazioni di resistenza più elevate prevedendo al contempo un inferiore quantitativo di legante.

Prendendo in considerazione tutte le possibili azioni appena trattate, il modo migliore per risolvere il problema in modo efficiente consiste attualmente nel ridurre il rapporto acqua/cemento ma tale strategia da sola potrebbe non essere sufficiente richiedendo l'adozione di ulteriori strategie per poter giungere ad una riduzione significativa del legante. In tale ambito, si potrebbe trovare una valida soluzione definitiva sviluppando un nuovo tipo di cemento per calcestruzzi a resistenza normale che presenti caratteristiche migliori rispetto al cemento Portland ordinario (in termini di compatibilità con la maggior parte degli additivi chimici, minor richiesta d'acqua, guadagno di resistenza precoce e minor evoluzione termica) in modo da consentire una riduzione del contenuto di legante a parità di caratteristiche finali del calcestruzzo.

Ridurre l'impatto ambientale e l'uso di risorse dei leganti

Un'altra possibile strategia per aumentare il grado di sostenibilità del calcestruzzo è costituita dalla sostituzione di parte del cemento con materie prime secondarie (MPS), senza ridurre il quantitativo totale di legante. In generale tale strategia potrebbe non essere tra le migliori ma attualmente risulta la più popolare per via della facilità di esecuzione. A tal proposito vi sono molteplici studi focalizzati sugli effetti che tali sostituzioni con SCMs possono comportare a livello di prestazione tecnica e di durabilità (soprattutto riguardo alla carbonatazione) ma è necessario affrontare il discorso in modo più ampio andando a valutare contemporaneamente sia gli aspetti tecnici che l'impatto ambientale, economico e la tossicità delle possibili varianti di calcestruzzo con SCMs considerando l'intero ciclo di vita del materiale. L'impiego di SCMs non significa automaticamente che il calcestruzzo sia più sostenibile in quanto il processo di produzione di un materiale non convenzionale con co-prodotti o sottoprodotti richiede alcune fasi aggiuntive (quali recupero, trasporto e trattamento delle materie prime secondarie) per cui è importante che l'impatto ambientale sia valutato attraverso analisi LCA con confini di studio dalla culla alla tomba e andando a considerare tutte le categorie di impatto in modo da poter stilare una classifica di sostenibilità dei calcestruzzi con differenti SCMs.

In tale contesto, vi sono tre principali fonti da cui poter attingere gli SCMs:

- *scarti agricoli e da acquacoltura.*

In tale ambito gli scarti devono essere bruciati ad una temperatura di almeno 1000 °C per accrescere la quantità di particelle amorfe e, una volta in forma di ceneri, possono essere impiegati come leganti economici a parziale sostituzione del cemento. Sebbene gli studi svolti fino ad oggi siano ancora scarsi e non tengano in considerazione tutti gli aspetti necessari, alcuni di essi hanno dimostrato che aumentando la quantità di questo tipo di SCMs diminuiscono la lavorabilità e il ritiro da essiccazione, ed aumenta il tempo di presa. In tale ambito vi è una grande varietà di tipologie di scarti, che si caratterizzano per una composizione chimica molto variabile, anche da una regione all'altra, per cui le *performance* finali del calcestruzzo possono variare notevolmente a seconda del tipo di scarto e anche della tecnica di combustione impiegata per ridurlo allo stato di cenere. Tra gli scarti agricoli e da acquacoltura su cui sono già stati svolti studi (parziali) di impiego come SCMs in calcestruzzi non convenzionali vi sono: lolla di riso, olio di palma, pannocchia di mais, bagassa di canna da zucchero, paglia, foglie, legno, biomasse forestali e varie piante. Alcuni studi sono stati svolti anche su ceneri derivanti da conchiglie di ostriche, cozze, vongole e su gusci d'uovo; in questi casi, nei calcestruzzi sono stati evidenziati effetti a livello di riduzione della resistenza, del ritiro da essiccazione e della conducibilità termica, e di aumento del tempo di presa e della resistenza all'attacco di solfato di magnesio.

- *Scarti industriali.*

Tale categoria si caratterizza, a differenza delle altre due, per una quantità significativa di studi finalizzati ad una valutazione completa a livello di *performance* tecnica, economica e ambientale. A causa della grande variabilità in termini di composizione chimica che caratterizza gli scarti industriali, sono però necessari ulteriori studi per confermare definitivamente i benefici che tali SCMs possono apportare nel confezionamento di calcestruzzi più sostenibili di quelli convenzionali. Tra gli scarti industriali, i più studiati sono: ceneri volanti di carbone, ceneri pesanti di carbone, loppa basica d'altoforno ed altre scorie industriali, fumi di silice, altre pozzolane artificiali e naturali.

- *Rifiuti urbani.*

Anche questa categoria di scarti richiede ancora approfondimenti a livello sperimentale poiché al momento gli studi risultano insufficienti. Tra i rifiuti urbani utilizzabili potenzialmente come SCMs nel calcestruzzo vi sono in particolare: polvere di vetro, ceneri di fanghi e ceneri derivanti dall'incenerimento dei rifiuti solidi urbani.

Inoltre, un'alternativa all'impiego di SCMs può essere fornita dalla produzione di clinker alternativi al clinker di cemento Portland. In tale ambito, sono stati svolti studi su cementi ricchi di Ye'elimita, fosfati o magnesio, cementi riciclati a basso contenuto di carbonio attivato termicamente, leganti a base di silicati di calcio reattivi ecc. In generale tali cementi alternativi possono richiedere temperature più basse ma spesso offrono prestazioni peggiori rispetto a quelle del cemento Portland ordinario. Gli studi relativi a questi nuovi clinker di cementi alternativi risultano ancora molto scarsi per due motivi: il costo e la difficoltà nel simulare il processo di produzione convenzionale in condizioni di laboratorio.

Ridurre l'impatto ambientale e l'uso di risorse degli aggregati

Sebbene all'interno della miscela del calcestruzzo gli aggregati costituiscano il secondo materiale più consumato dopo l'acqua e si presentino con un quantitativo quasi 12 volte maggiore rispetto a quello del cemento, l'impatto ambientale di tali elementi risulta irrilevante rispetto a quello provocato dal legante. Tuttavia, l'elevato utilizzo (con andamento crescente nel prossimo futuro) di tali quantitativi di materiali provoca uno sfruttamento allarmante di materie prime che, nel lungo termine, può compromettere la capacità del pianeta di rigenerarle secondo il normale ciclo naturale per cui è opportuno prendere in considerazione anche questo aspetto, sebbene risulti secondario rispetto al cemento.

L'impiego di aggregati provenienti da scarti per confezionare calcestruzzi può ridurre solo leggermente (fino ad un massimo del 10% [2]) l'impatto ambientale complessivo del materiale o, a seconda dello scenario di trasporto, può addirittura aumentarlo leggermente. In tale ambito vi sono

moltissimi studi grazie ai quali è stato possibile definire le caratteristiche tecniche che gli aggregati riciclati devono possedere (in termini di componenti, assorbimento d'acqua, contenuto di umidità, dimensione, forma, densità, massimo quantitativo impiegabile, qualità del materiale originario) per poter essere utilizzati per realizzare calcestruzzi, ma mancano ancora studi che considerino contemporaneamente gli aspetti tecnici, ambientali ed economici. A livello tecnico, è stato appurato che nella maggior parte dei casi il contenuto e le caratteristiche degli aggregati non influiscono sulla durabilità dei prodotti in calcestruzzo ma l'applicabilità di aggregati non tradizionali dipende essenzialmente dalla resistenza del calcestruzzo per cui, ad oggi, se ne raccomanda l'uso solo nel calcestruzzo a bassa resistenza.

Principalmente al fine di ridurre l'impatto ambientale e l'uso di risorse attribuiti agli aggregati del calcestruzzo è possibile impiegare aggregati provenienti da vari ambiti e con varie caratteristiche:

- aggregati da rifiuti da costruzione e demolizione (C&D) (aggregati riciclati da calcestruzzo, muratura, mix di calcestruzzo e muratura, o mix costituito da rifiuti contaminati da altre tipologie di materiali come legno, vetro, asfalto, plastica ecc.).
- Aggregati da scarti agricoli e acquacoltura (quali cenere di bagassa di canna da zucchero, gusci di arachidi, segatura, paglia di grano, cenere di legno, lolla di riso, sughero, noccioli di frutta ecc.). Oltre che come sostitutivi di legante, vista l'abbondanza dei rifiuti agricoli e l'elevata domanda di aggregati a livello globale, tali scarti possono essere potenzialmente utilizzati anche come parziale sostituzione degli aggregati convenzionali (soprattutto fini) ed in particolare risultano interessanti per produrre calcestruzzi alleggeriti e a bassa conducibilità termica.
- Aggregati da scarti industriali, impiegati in particolare come sostituzione di aggregati fini (quali ceneri volanti di carbone, ceneri pesanti di carbone, scorie d'altoforno di acciaio e ferro, fumi di silice, rifiuti plastici, gomme ecc.).
- Aggregati da rifiuti urbani (quali vetro, ceneri pesanti da incenerimento di rifiuti solidi urbani, ceneri da fanghi di depurazione o di acque reflue, fanghi da carta ecc.).
- Aggregati isolanti (quali plastica, gomma e aggregati leggeri come argilla espansa, pomice cenere di fanghi ecc.). Questi aggregati, oltre alla funzione di ridurre il consumo di materie prime vergini, permettono di ridurre la densità degli elementi e la conduttività termica del calcestruzzo e di evitare la formazione di ponti termici negli edifici, risultando utili per applicazioni multifunzionali del calcestruzzo con contributi rilevanti durante la fase d'uso.
- Altri tipi di aggregati (quali aggregati attivati da alcali, *biochar* ecc.).

Ridurre l'impatto ambientale e l'uso delle risorse idriche

Il settore delle costruzioni si caratterizza per consumi di acqua molto elevati (pari a circa il 12% del prelievo mondiale di acque dolci) e ciò risulta valido anche per la produzione del calcestruzzo poiché per produrre 1 m³ di materiale sono necessari circa 150 litri d'acqua (che possono arrivare addirittura a 500 litri considerando anche il lavaggio e le perdite durante le fasi di produzione e trasporto) [2]. In tale contesto, sarebbe interessante individuare possibili strategie per ridurre l'enorme consumo di risorse idriche e, a tal proposito, in letteratura sono state proposte alcune idee con l'obiettivo di trovare una soluzione a questo spreco, come ad esempio l'uso: di acqua di mare (solo per impieghi in assenza di armature), di acqua riciclata recuperata dalla preparazione di calcestruzzi preconfezionati, e di acqua di scarto trattata proveniente da fognature, industrie e acque grigie domestiche. Attualmente queste sono solo ipotesi che andrebbero studiate in modo approfondito prima di poterle impiegare realmente poiché, com'è ben noto ed è anche fissato a livello normativo, solitamente si raccomanda l'impiego di acqua potabile con caratteristiche specifiche per poter confezionare calcestruzzi ad alte prestazioni, di qualità e ad elevata durabilità, quindi tutte le alternative proposte necessitano di ricerche e sperimentazioni finalizzate alla valutazione delle proprietà tecniche finali degli elementi realizzati con calcestruzzi miscelati con acque da origini non convenzionali.

Ridurre l'impatto ambientale e l'uso di risorse dei rinforzi

L'ultima strategia, applicabile a livello di composizione del materiale e valida per impieghi strutturali, riguarda la sostituzione delle tradizionali barre d'acciaio di rinforzo con sistemi più sostenibili o a livello di materie prime o di *performance* in fase d'uso, in termini di durabilità e quindi di riduzione di interventi di manutenzione/sostituzione durante la vita utile della struttura. In tale ambito sono state proposte alcune alternative non convenzionali che al momento sono in fase di studio, quali: armature in bamboo, in basalto, in polimero rinforzato con fibra di vetro o con carbone, in acciaio inossidabile ecc. [2].

1.2.2_Produzione dei costituenti della miscela

Il secondo percorso finalizzato alla riduzione degli impatti ambientali del calcestruzzo riguarda la produzione degli elementi base che all'interno della miscela rappresentano i materiali meno eco-sostenibili, cioè il cemento, gli aggregati e i rinforzi in acciaio, mentre, rispetto all'impatto complessivo del calcestruzzo, i contributi degli additivi e dell'acqua sono trascurabili. Tale percorso agisce, quindi, a monte del problema e si pone l'obiettivo di migliorare la *performance* ambientale delle materie prime costituenti il calcestruzzo. Ad oggi, gli studi su questo percorso di sostenibilità sono ancora molto scarsi.

Produzione del cemento

Produrre il cemento comporta impatti ambientali molto elevati soprattutto a livello di emissioni di CO₂ nelle varie fasi che compongono il ciclo produttivo.

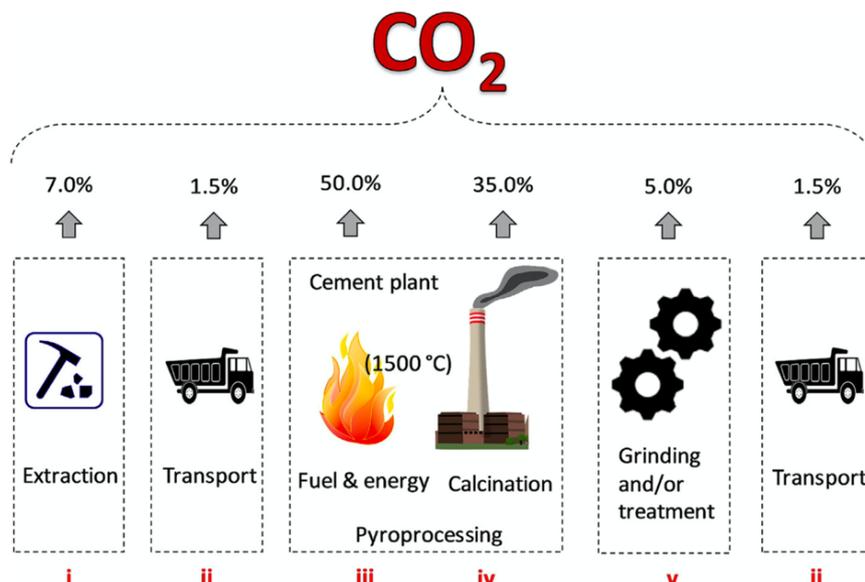


Figura 4 – Distribuzione delle emissioni di CO₂ prodotte durante le varie fasi del processo di produzione del cemento [2].

Per rendere tale materiale più eco-sostenibile è possibile agire su ciascuna fase attraverso una serie di azioni:

- per le fasi di estrazione e frantumazione è possibile agire migliorando le pratiche minerarie tramite: la riduzione al minimo dell'uso di attrezzature; l'impiego di combustibili alternativi; l'aumento dell'efficienza dei macchinari; l'impiego di lubrificanti specifici per ridurre l'usura dei macchinari; l'utilizzo di aggregati riciclati; l'eventuale impiego di mulini alimentati ad energia rinnovabile.
- Per la fase di trasporto dalla cava all'impianto di produzione (spesso lontani) è possibile prevedere l'impiego di nastri trasportatori sotterranei e più efficienti.
- Per la fase di combustione è possibile prevedere l'impiego di combustibili alternativi.
- Per la fase di decarbonatazione è possibile prevedere l'impiego di alternative alla decarbonatazione con calcare.
- Per le fasi di frantumazione, macinazione e riduzione dimensionale è possibile impiegare l'utilizzo di fonti di energia rinnovabile.
- Per il processo in generale è possibile perseguire l'obiettivo di produrre un cemento a impronta di carbonio quasi nulla e migliorare le tecnologie impiegate per rendere il cementificio più *green*. In tale ambito, ad esempio è possibile prevedere nell'impianto la presenza di una camera, a pressione e umidità controllate, riempita di aggregati riciclati da calcestruzzi ricchi di magnesio e calcio che, attraversata dai gas emessi dall'industria,

permette di sequestrare la CO₂ e gli altri gas serra generati durante la produzione evitandone l'emissione in atmosfera.

Produzione degli aggregati

A livello di aggregati vi sono ancora pochissimi studi relativi all'ottimizzazione di tecniche, strumenti e fonti impiegate nelle varie fasi che costituiscono l'intero processo di produzione di tali materie prime. A tal proposito è necessario individuare soluzioni di sostenibilità per ciascuna di queste fasi per rendere tutto il processo meno impattante per l'ambiente. Una delle tendenze attuali è l'impiego di materie prime secondarie (MPS) derivanti in particolare dal riciclo di rifiuti da costruzione e demolizione, ma è bene ricordare che, prima di raggiungere le caratteristiche specifiche per un impiego nelle miscele per il calcestruzzo, tali materie devono subire alcune trasformazioni e lavorazioni che possono avere impatti importanti per cui è bene studiare soluzioni più eco-sostenibili per minimizzare gli effetti ambientali che comportano gli aggregati.

Produzione dei rinforzi in acciaio

Anche a livello di produzione delle armature, in caso di impieghi strutturali del calcestruzzo armato, le fasi che compongono il processo di produzione, che dalle materie prime porta alla realizzazione degli elementi finali in acciaio, hanno chiaramente un impatto importante, soprattutto per le temperature cui dev'essere sottoposto tale materiale in altoforno. A tal proposito, esistono però percorsi di produzione alternativi che permettono di ottenere i prodotti finali riducendo gli impatti ambientali dell'intero processo produttivo, sia a livello di emissioni di CO₂ che di consumo di energia, e molte aziende si sono già indirizzate verso tali soluzioni più eco-sostenibili.

1.2.3_Miscelazione del calcestruzzo

Il terzo percorso finalizzato alla riduzione degli impatti ambientali legati alla produzione del calcestruzzo riguarda una fase particolarmente energivora del processo produttivo, la fase di miscelazione. Tale fase si può svolgere in impianto (nel caso di calcestruzzi premiscelati) o direttamente in cantiere tramite l'impiego di betoniere. In entrambi i casi, la miscelazione ha un'elevata influenza sulla qualità e omogeneità finale del composto miscelato e di conseguenza sulle proprietà dell'elemento finale e le sue prestazioni. Vista l'importanza di tale influenza, ad oggi le ricerche si sono focalizzate sulla valutazione di una lunga serie di metodi e strumenti di miscelazione alternativi con il solo fine di garantire la qualità e la *performance* tecnica dell'impasto finale, trascurando completamente l'importanza di ridurre l'impatto ambientale di tale fase soprattutto per ciò che riguarda il consumo di energia. In tale contesto, quindi, è necessario svolgere nuovi studi

in grado di considerare contemporaneamente l'effetto che l'impiego di metodi e strumenti di miscelazione alternativi ha sia sulla qualità finale dell'impasto che sull'ambiente.

1.2.4_Applicazione *in situ*

Il quarto percorso finalizzato alla riduzione degli impatti ambientali legati alla produzione del calcestruzzo riguarda la fase di applicazione in cantiere. Negli ultimi anni, vari studi di ricerca hanno posto particolare attenzione agli sviluppi in ambito di digitalizzazione dei processi di produzione del settore edilizio e, nel caso del calcestruzzo, in particolare sono stati individuati due metodi basati su processi di estrusione di *Additive Manufacturing*, il *3D Concrete Printing* e il *Contour Crafting*. Nell'ambito edilizio, l'impiego di metodi di produzione automatizzata può portare grandi benefici in termini di risparmio di risorse, di energia, di costi e di tempo nella produzione delle strutture e degli elementi in calcestruzzo, sia in ambito di prefabbricazione che soprattutto nel caso di costruzione in cantiere. Alcuni aspetti particolarmente interessanti dal punto di vista ambientale riguardano la possibilità di non impiegare più casseforme (elemento particolarmente costoso e a grande impatto ambientale), di annullare la produzione di rifiuti, e di prevedere, tramite una progettazione intelligente basata sui principi di ottimizzazione topologica e ibridazione funzionale, la presenza di materiale solo dove è strutturalmente o funzionalmente necessario, portando nel complesso ad un elevato risparmio in termini di risorse. In tale ambito, vi sono molteplici studi di ricerca e sperimentazioni in corso per valutare tutti gli aspetti che l'introduzione di tale innovazione comporterebbe nel campo di produzione del calcestruzzo e ulteriori studi sono ancora necessari in particolare per valutare la *performance* ambientale complessivamente offerta da prodotti realizzati tramite tale tecnologia durante l'intero ciclo di vita.

1.2.5_Performance in fase d'uso

Il quinto percorso finalizzato alla riduzione degli impatti ambientali legati alla produzione del calcestruzzo riguarda la fase d'uso, che all'interno del ciclo di vita assume un ruolo centrale per via dell'elevata estensione temporale che la caratterizza. In tale ambito, vi sono in particolare tre possibili strategie con cui intervenire per ottenere potenziali benefici a livello ambientale: aumentare la durabilità delle strutture in calcestruzzo, sequestrare CO₂ dall'ambiente attraverso il materiale e, infine, migliorare le prestazioni degli elementi finali tramite la riduzione della conducibilità termica con conseguente risparmio energetico.

Aumento della durabilità delle strutture in calcestruzzo

Una strategia particolarmente conosciuta per ridurre l'impatto ambientale del calcestruzzo consiste nell'aumentarne la durabilità al fine di allungarne la vita utile e ridurre i cicli di

manutenzione/sostituzione da effettuare durante la fase d'uso del ciclo di vita. In tale ambito vi sono essenzialmente due tipologie di metodi adottabili: il metodo intrinseco ed estrinseco. Il primo implica un'azione sul calcestruzzo a livello di miscela (*mix design*, aggiunte, sostituzioni e copertura della miscela) e/o l'impiego di armature in acciaio più resistenti. Il secondo prevede varie possibili soluzioni quali ad esempio l'impiego di vernici o rivestimenti idrofobici. Molte di queste azioni, sebbene spesso comportino un aumento iniziale del costo e dell'impatto ambientale della struttura dovuti ad un aumento delle prestazioni richieste al materiale, risultano vincenti nel lungo periodo a livello sia economico che ambientale per la riduzione del numero di interventi di manutenzione/sostituzione necessari durante la fase d'uso del ciclo di vita degli elementi nel caso di impiego di calcestruzzo ad alte prestazioni. In generale, qualsiasi azione venga intrapresa in tale ambito, gli obiettivi finali sono essenzialmente: il rallentamento/arresto della corrosione delle armature (impiegando ad esempio armature in acciaio inossidabile, in acciaio al cromo a basso contenuto di carbonio, in basalto, in polimeri rinforzati con fibre di vetro o fibre di carbonio, con rivestimento epossidico, con additivi anti-corrosione, zincate ecc.), l'impedimento della penetrazione di agenti aggressivi nel materiale (tramite un controllo del ritiro oppure impiegando calcestruzzi *self-healing* o protezioni superficiali realizzate con *coating* o trattamenti di varia natura), la riduzione della velocità di degrado del materiale (ponendo attenzione ad alcune questioni come la reazione alkali-aggregati, la resistenza ai cicli di gelo-disgelo e ad altri attacchi fisici e chimici) e la progettazione della durabilità. Quest'ultima si riferisce ai molteplici aspetti che devono essere considerati già a livello progettuale e si può considerare l'elemento chiave per migliorare la sostenibilità del calcestruzzo.

Cattura e sequestro della CO₂

Al fine di ridurre le emissioni di gas ad effetto serra (ed in particolare di CO₂) che caratterizzano la produzione dei CBM e produrre calcestruzzi a basse emissioni di carbonio, è possibile adottare alcune strategie per sequestrare tale gas dall'ambiente riducendo di conseguenza l'impronta ambientale legata tipicamente a tali materiali. A livello di materiale è possibile prevedere il sequestro di CO₂ tramite carbonatazione minerale e tale procedimento può essere effettuato da vari tipi di elementi quali metalli (come zinco, rame, nickel, ferro ecc.) oppure rocce contenenti magnesio, calcio e basalto, che risultano più adatte al sequestro di CO₂ per l'elevata diffusione in natura e il ridotto costo rispetto ai primi. La possibilità di effettuare la carbonatazione per sequestrare CO₂ dall'ambiente è influenzata dalle condizioni di esposizione a tale gas serra (pressione parziale/contenuto di CO₂, temperatura, fonte di CO₂) e dalle proprietà dei CBM (contenuto di acqua, composizione chimica, dimensione e area superficiale delle particelle, porosità e permeabilità).

Miglioramento della conducibilità termica e risparmio energetico

Una delle strategie più efficaci per ridurre l'impatto ambientale è rappresentata dalla riduzione della spesa energetica dell'edificio durante la vita utile, fase del ciclo di vita molto più estesa e di conseguenza a maggiore incidenza sull'ambiente rispetto alla fase di costruzione. Al fine di risparmiare energia tramite la riduzione del fabbisogno di energia per impianti di riscaldamento e/o di raffreddamento, la soluzione migliore consiste nella riduzione della trasmittanza termica dell'involucro e, in questo ambito specifico, della conducibilità termica del calcestruzzo. Quest'ultimo parametro fisico nel calcestruzzo è influenzato da una serie di fattori, quali:

- densità e microstruttura.

La densità in particolare è influenzata da: rapporto acqua/legante, dimensione e proporzione degli aggregati, porosità e natura dei pori. Agire sulla densità dei materiali rappresenta la strategia migliore (e la più studiata in letteratura) per modificare il valore di trasmittanza termica di qualsiasi tipo di CBM.

- Tipo, dimensione e proporzione di aggregati e altri materiali aggiuntivi (aggregati naturali, materiali alleggeriti, aggregati riciclati da scarti di varia provenienza, eventuale contenuto di *Phase Change Materials* ecc.). Poiché gli aggregati costituiscono la maggior parte del volume del calcestruzzo, tale fattore influenza notevolmente il valore di trasmittanza termica degli elementi finali.
- Contenuto di umidità e temperatura.
- Tipo e contenuto di legante (sebbene non sia tra i fattori più significativi).
- Eventuale presenza di fibre naturali (vegetali, minerali o animali).

1.2.6_Fine vita

Il sesto ed ultimo percorso finalizzato alla riduzione degli impatti ambientali legati al calcestruzzo riguarda la fase di fine vita. In tale ambito, rientrano tutte le strategie finalizzate alla re-immissione del calcestruzzo in un nuovo ciclo di vita sia tramite il riutilizzo degli elementi tal quali che, come più spesso avviene, tramite il riciclaggio e il successivo impiego come aggregato utile per la produzione di nuovo calcestruzzo. In tale contesto è possibile prevedere già in fase progettuale quali saranno gli scenari di fine vita degli elementi in calcestruzzo ed operare alcune scelte strategiche che facilitino le procedure di dismissione a fine vita quali, ad esempio, la realizzazione di unioni a secco che permettano la reversibilità delle operazioni di giunzione e accoppiamento sia con altri elementi in calcestruzzo che con materiali di differente natura, oppure la realizzazione di elementi a comune matrice cementizia ma caratterizzati da porzioni a differente densità in modo tale da soddisfare una pluralità di requisiti prestazionali senza la necessità di impiegare materiali di natura differente che possono contaminare in modo irreversibili i futuri rifiuti riciclati da C&D.

CAPITOLO 2

PRODUZIONE ADDITIVA CON IL CALCESTRUZZO NEL SETTORE DELLE COSTRUZIONI

2.1_PRODUZIONE ADDITIVA: ORIGINE, METODI E PROCESSI

La produzione additiva (AM, acronimo derivante dall'inglese *Additive Manufacturing*) è una metodologia produttiva nata a partire dal primo processo di stampa 3D ideato da Ciraud nel 1972 e che consiste in «*the process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies, such as traditional machining*» (ASTM F2792-10: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. American Society for Testing and Materials) [1]. Ad oggi, mentre in molti settori manifatturieri l'AM, grazie agli sviluppi degli ultimi quarant'anni, ha avuto un impatto tale da essere ormai impiegata quotidianamente diventando parte integrante dei processi produttivi, la sua applicazione nel settore delle costruzioni è relativamente nuova ed è ancora in una fase iniziale di sviluppo. Uno dei primi a suggerirne l'impiego in edilizia per la realizzazione di grandi strutture senza l'uso di casseforme è stato nel 1997 Joseph Pegna, ideatore di un processo chiamato *Selective Aggregation* (SA) che, sebbene non sia stato realmente sviluppato e applicato, ha assunto un grande valore scientifico poiché è stato fonte d'ispirazione per lo sviluppo di metodi di AM simili che hanno portato nel corso degli anni alla realizzazione di molti progetti e progressi in quest'ambito d'innovazione.

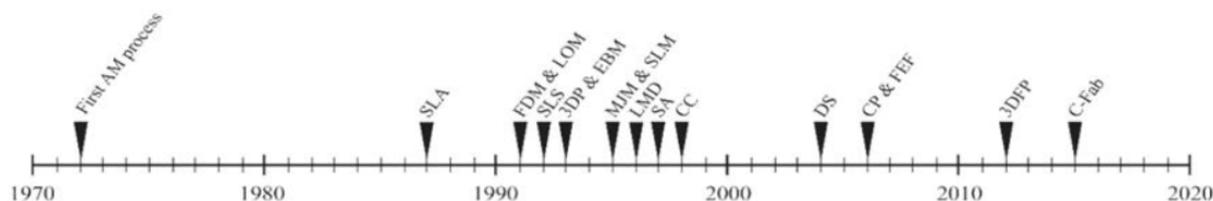


Figura 5 - Linea del tempo con i metodi di AM impiegati nel settore delle costruzioni [20].

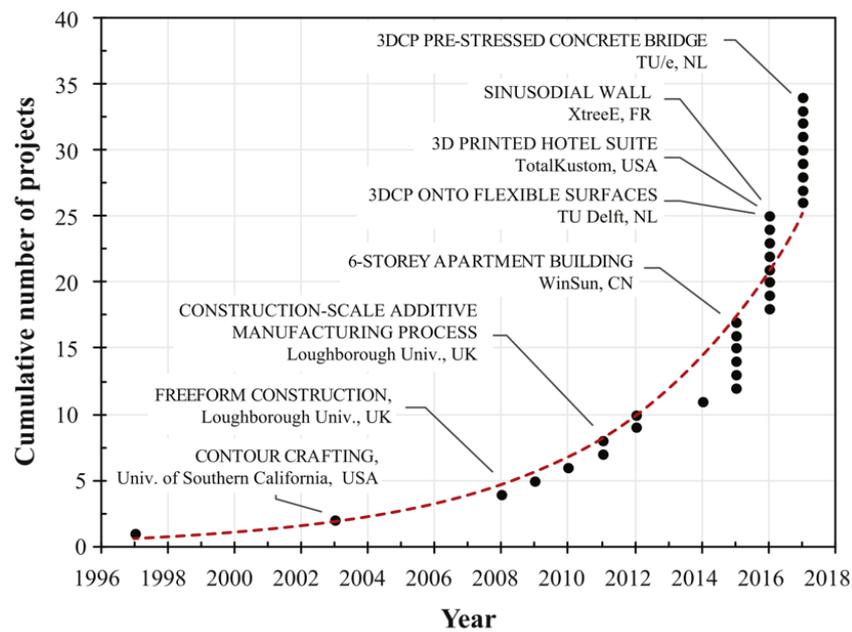


Figura 6 - La crescita delle applicazioni sperimentali di AM a larga scala nel settore delle costruzioni a partire dal lavoro seminale di Solid Freeform Construction di Pegna del 1997 [4].

I metodi di produzione additiva sviluppati negli ultimi decenni che risultano avere un potenziale nel settore edilizio sono in tutto 15 e possono essere divisi in 7 categorie in base al tipo di processo impiegato.

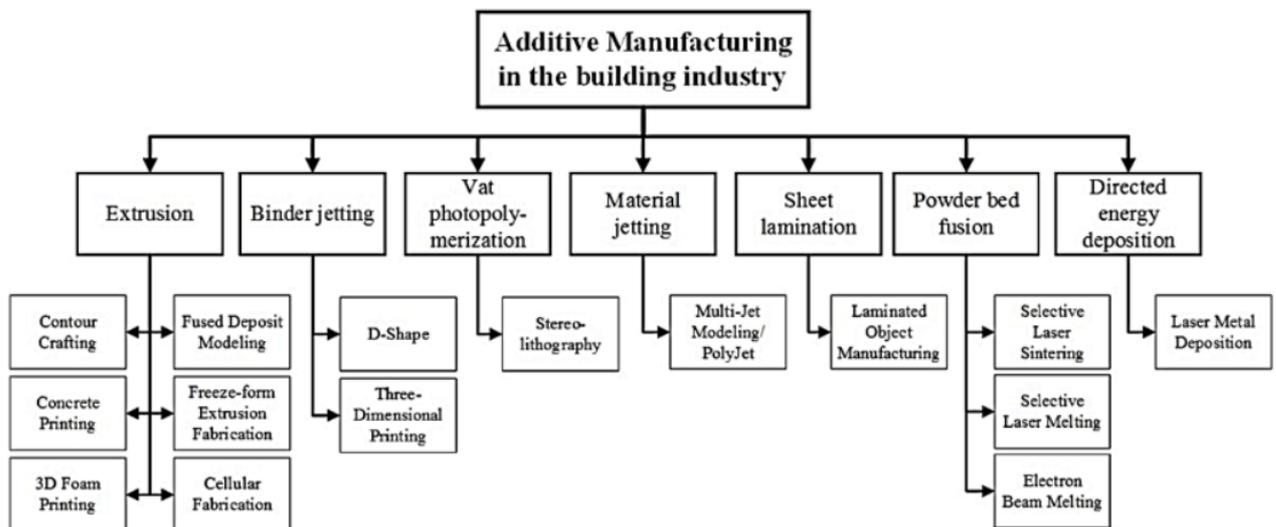


Figura 7 – Schematizzazione dei processi e metodi di AM impiegati nel settore delle costruzioni [20].

Ogni metodo è caratterizzato essenzialmente dal tipo di processo e di materiale impiegato ma la scelta di un metodo specifico risulta condizionata anche dal prodotto finale desiderato in termini di scala dimensionale, localizzazione della produzione, eventuale funzione portante, complessità formale e finitura superficiale.

Tabella 1 – Caratteristiche del processo e dei materiali per ciascun metodo di AM applicabile nel settore delle costruzioni [20].

<i>Method</i>		<i>Process Properties</i>	<i>Manufactured Materials</i>	<i>State of Starting Material</i>
<i>CC</i>	<i>Contour Crafting</i>	Extrusion, Requires Support Structure	Concrete, Ceramics	Paste
<i>CP</i>	<i>Concrete Printing</i>	Extrusion, Re-usable Support Structure	Concrete	Paste
<i>C-Fab</i>	<i>Cellular Fabrication</i>	Extrusion, No Support Structure	Polymers	Paste
<i>3DFP</i>	<i>3D Foam Printing</i>	Extrusion, Support Structure Not Always Necessary	Polyurethane Foam (PUR)	Liquid
<i>FDM</i>	<i>Fused Deposit Modeling</i>	Extrusion, Requires Support Structure	Ceramics, Glass, Polymers	Paste
<i>FEF</i>	<i>Freeze-form Extrusion Fabrication</i>	Extrusion, Solidification by Freezing, No Support Structure	Ceramics, Metals, FGMs	Paste
<i>DS</i>	<i>D-Shape</i>	Binder Jetting, No Support Structure	Sandstone	Powder
<i>3DP</i>	<i>Three-Dimensional Printing</i>	Binder Jetting, No Support Structure	Sandstone, Ceramics, Polymers, Metals	Powder
<i>SLA</i>	<i>Stereolithography</i>	Vat Photopolymerization, Requires Support Structure	Ceramics, Polymers, Metals	Liquid
<i>MJM</i>	<i>Multi-Jet Modeling (and PolyJet)</i>	Material Jetting, Requires Support Structure	Polymers, Metals, FGMs	Liquid
<i>LOM</i>	<i>Laminated Object Manufacturing</i>	Sheet Lamination, Requires Support Structure	Ceramics, Polymers, Metals, Wood, FGMs	Solid Sheets
<i>SLS</i>	<i>Selective Laser Sintering</i>	Powder Bed Fusion, No Support Structure	Ceramics, Glass, Polymers, Metals	Powder
<i>SLM</i>	<i>Selective Laser Melting</i>	Powder Bed Fusion, No Support Structure	Ceramics, Glass, Metals	Powder
<i>EBM</i>	<i>Electron Beam Melting</i>	Powder Bed Fusion, No Support Structure	Metals	Powder
<i>LMD</i>	<i>Laser Metal Deposition</i>	Directed Energy Deposition, Support Structure Not Always Necessary	Metals, FGMs	Powder, Solid Wire

Tabella 2 – Applicazioni pratiche di ciascun metodo di AM nel settore delle costruzioni [20].

		Extrusion					BJ		VP	MJ	SL	PBF			DED	
		CC	CP	C-Fab	3DFP	FDM	FEF	DS	3DP	SLA	MJM	LOM	SLS	SLM	EBM	LMD
SCALE	Large-scale	✓		✓	✓			✓								✓
	Medium-scale		✓	✓		✓			✓	✓		✓				✓
	Small-scale					✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
LOCATION	On-site production	✓			✓	✓		✓								✓
	Prefabrication		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Outdoor application	✓	✓	✓	✓	✓		✓					✓	✓	✓	✓
MATERIAL	Concrete	✓	✓													
	Sandstone							✓	✓							
	Ceramics	✓				✓	✓		✓	✓		✓	✓	✓		
	Glass					✓							✓	✓		
	Polymers			✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓			
	Metals						✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	FGMs						✓			✓	✓	✓				✓
STRUCTURAL	Load-bearing	✓	✓	✓		✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓	✓
FORM	Double-curved objects		✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓
	Smooth surface finish									✓	✓					
		CC	CP	C-Fab	3DFP	FDM	FEF	DS	3DP	SLA	MJM	LOM	SLS	SLM	EBM	LMD

2.2_PROCESSO DI ESTRUSIONE CON IL CALCESTRUZZO: *CONTOUR CRAFTING* E *3D CONCRETE PRINTING*

Tra i 15 metodi di AM adatti ad un utilizzo nel settore delle costruzioni, solamente due impiegano come materiale il calcestruzzo: il *Contour Crafting* (CC) e il *3D Concrete Printing* (CP).

Per la realizzazione degli elementi finali, entrambi utilizzano il processo di estrusione, il più comunemente impiegato e il più promettente tra i processi basati sull'AM. Questo tipo di processo consiste nella creazione di oggetti fisici tramite la realizzazione di strati sovrapposti autoportanti: il materiale viene pompato e fatto uscire come filamento continuo (solitamente di diametro da 6 a 50 mm), ancora in uno stato quasi solido, tramite l'applicazione di una certa pressione che lo spinge attraverso un ugello montato su un braccio a portale o un robot a controllo digitale che posiziona con precisione il materiale durante il processo di costruzione e allo stesso tempo pone un limite dimensionale all'oggetto finale. Rispettando una certa tempistica per la sovrapposizione degli strati (*layer cycle-time*), tra essi si crea un legame ad elevata resistenza che permette di generare una struttura solida in grado di mantenere la propria forma sotto la crescente pressione idrostatica causata dalla deposizione degli ulteriori strati successivi evitando la formazione di *cold joints* che rappresentano punti di debolezza localizzata nell'elemento finale. Il materiale solitamente impiegato nei processi di estrusione con calcestruzzo consiste in una malta ad alto contenuto di cemento con una dimensione massima delle particelle dell'ordine di 2-3 mm per evitare problemi durante il processo estrusivo. La forma dell'estrusione può essere variabile in base alla testa dell'ugello (circolare, ovale o rettangolare) e la velocità di estrusione lineare solitamente varia nell'intervallo da 50 mm/s a 500 mm/s. L'orientamento di stampa è solitamente verticale ma può essere anche orizzontale. Le proprietà dello strato e l'orientamento di stampa hanno una grande influenza sul prodotto finale che comunque, per la sua natura stratificata, risulta anisotropo e quindi presenta resistenza meccanica variabile nelle tre direzioni (x, y e z). La finitura superficiale nervata è influenzata dallo spessore dello strato in quanto gli strati rimangono visibili nel prodotto finale (in generale, più spesso è lo strato e più sarà necessaria una post-elaborazione per ottenere una finitura superficiale liscia). Per quanto riguarda le caratteristiche geometriche, gli elementi stampati possono essere planari o volumetrici ed è possibile creare elementi a sbalzo e spazi vuoti all'interno del volume. Nel settore delle costruzioni, la tecnologia di AM che impiega il calcestruzzo si può applicare a tre famiglie di prodotti [4]:

- Componenti (come blocchi e pannelli) realizzati in stabilimento;
- Pareti e colonne stampate *in situ*;
- Casseratura permanente (*shell*), con eventuale riempimento realizzato *in situ* tramite getto convenzionale.

In letteratura [4] vi è inoltre una distinzione tra metodi di AM su larga, media e piccola scala: i primi riguardano soprattutto intere pareti/edifici costruiti *in situ* e grandi elementi strutturali; i secondi riguardano componenti edilizi che possono essere assemblati insieme per costruire edifici; i terzi riguardano oggetti dettagliati e complessi come elementi di facciata e giunti. A seconda della scala si impiega un diverso tipo di stampante o robot per cui, ad esempio, sistemi a portale e bracci robotici sono spesso utilizzati per metodi su larga e media scala.

Contour Crafting (CC)

Il metodo del *Contour Crafting*, ideato da Behrokh Khoshnevis presso la *University of Southern California* (USA) tra 2003 e 2004 (anche se è in sviluppo già dal 1998), è stato progettato per l'automazione delle costruzioni *in situ* ed in particolare per strutture che devono essere costruite velocemente e devono essere economicamente convenienti, quali case popolari ed edifici in zone disastrose. Questo metodo infatti permette di costruire una casa di 230 mq in 24 ore e ad un costo di costruzione pari a circa un quinto rispetto all'impiego di sistemi tradizionali (www.contourcrafting.com).

Il sistema si rivolge alla larga scala dell'edificio, impiega una struttura esterna a portale o simile ad una gru controllata da un computer ed è particolarmente interessante perché, nella versione a doppio ugello, permette di realizzare contemporaneamente gli strati esterni di chiusura dei muri e lo strato interno (tipicamente ad andamento sinusoidale per garantire stabilità con un risparmio di materiale), generando forme articolate che prevedono già a livello progettuale l'integrazione dei sistemi di rinforzo (collocati e inglobati in calcestruzzo di riempimento gettato e vibrato alla maniera tradizionale) e gli impianti idrico, elettrico e di aerazione. Di contro, questo sistema necessita di essere combinato con tecniche costruttive tradizionali per la realizzazione ed installazione di alcuni elementi quali fondazioni, finestre ed elementi orizzontali. Inoltre, esso non permette di realizzare forme particolarmente complesse quali pareti a doppia curvatura.

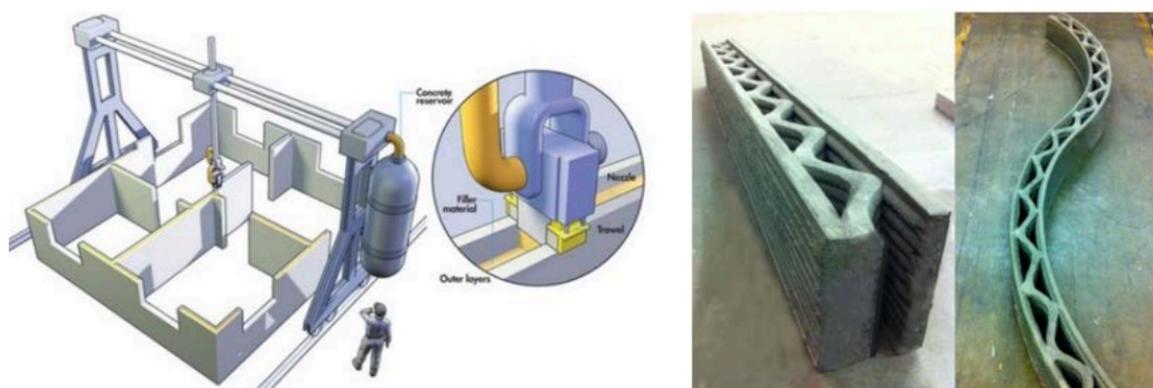


Figura 8 – Modello di funzionamento del metodo di Contour Crafting (sinistra). Dettaglio di pareti rettilinee e curvilinee costruite tramite tale metodo con evidenza del tipico andamento sinusoidale del filamento interno (destra) [20].

All'inizio del 2020 a Dubai, sulla base di un progetto di *Apis Cor*, è stato costruito il più grande edificio al mondo realizzato con questo sistema: si tratta di un edificio a due piani, di superficie pari a 640 mq, realizzato impiegando solo tre operai in sito, senza nessun lavoro extra di assemblaggio, con minima produzione di materiali di scarto, minimo impatto ambientale e tempi di esecuzione rapidissimi (www.apis-cor.com).

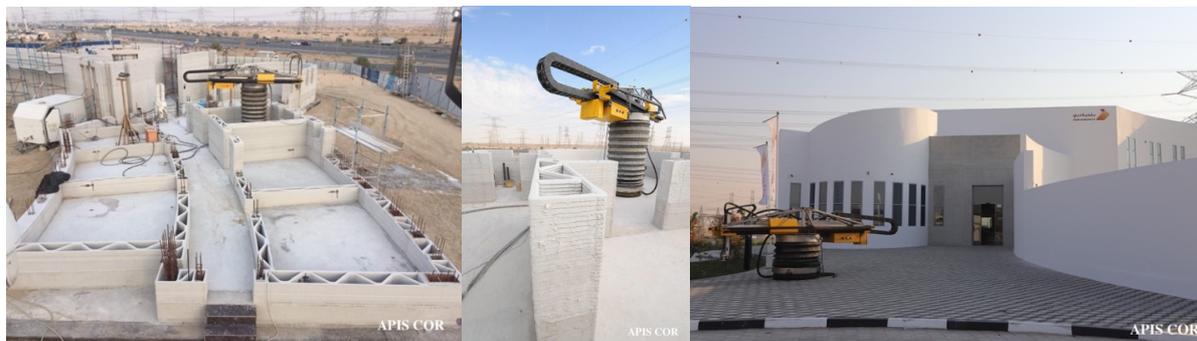


Figura 9 – Fase costruttiva e risultato finale dell'edificio più grande al mondo realizzato tramite Contour Crafting a Dubai a inizio 2020 su progetto di Apis Cor (www.apis-cor.com).

3D Concrete Printing (CP)

Il secondo metodo basato sull'estrusione del calcestruzzo è stato ideato nel 2006 dal team di ricerca della *Freeform Construction* della *Loughborough University* (Inghilterra) ed è stato pensato originariamente per la prefabbricazione in stabilimento di elementi in calcestruzzo ma, grazie alla sua evoluzione, oggi consente un'ampia versatilità di impieghi (anche *in situ*) prevedendo inoltre la possibilità di aggiungere diversi tipi di materiali alla miscela di calcestruzzo in modo da ottenere un materiale ad alte prestazioni.



Figura 10 – Funzionamento del processo di 3D Concrete Printing (sinistra). Esempi di realizzazioni: muro panchina (centro) e elemento di facciata progettato in modo parametrico da Bruil (2017) [20].

Rispetto al CC, il *3D Concrete Printing* offre illimitata libertà formale sia per le geometrie esterne che per quelle interne all'oggetto stampato, risultando particolarmente interessante in ambito architettonico e strutturale, e permettendo quindi di realizzare anche elementi a doppia curvatura. Inoltre, esso è impiegabile per la realizzazione di oggetti di qualsiasi scala, da edifici realizzati *in situ*

a singoli elementi prefabbricati in stabilimento, e che svolgono una ampia gamma di funzioni all'interno della costruzione (muri perimetrali, pareti interne, pannelli di rivestimento, blocchi di tamponamento ecc.). Anche in questo metodo è possibile prevedere la presenza di più ugelli che permettano di realizzare contemporaneamente, anche con materiali con diverse caratteristiche (a livello di densità, natura del materiale, funzione ecc.), differenti parti dell'elemento. Come nel caso del CC, durante il processo di fabbricazione è possibile prevedere nell'oggetto la presenza di spazi vuoti che possono ospitare elementi di rinforzo, materiale isolante, servizi quali tubazioni, impianti elettrici e di aerazione, e possono offrire anche contributi rilevanti dal punto di vista dell'isolamento termico, acustico e della riduzione di peso dell'elemento finito. A tal proposito, per entrambi i metodi durante il processo di progettazione è necessario prendere in considerazione tutti gli aspetti importanti legati all'edificio quali proprietà meccaniche, isolamento, spazi per servizi e impianti, in modo da creare costruzioni ottimizzate per tutti questi aspetti.



a) a panel, horizontally printed, shell and fill application: TU Delft, Netherlands



b) an in-situ wall, vertically printed, shell and fill application: WinSun, China



c) a solid geometry, vertically printed component: Loughborough University, UK



d) a vertically printed panel component: XTreeE, France



e) horizontal component manufacture: Loughborough University, UK



f) vertically printed, in-situ walls and columns: Total Kustom, USA

Figura 11 – Esempi applicativi di 3D Concrete Printing con differenti tipologie e orientamento di stampa [4].

2.3_PROPRIETÀ DEL CALCESTRUZZO ESTRUDIBILE

2.3.1_Proprietà allo stato fresco

I materiali (classici o ad alte prestazioni) a base di cemento che sono stati sviluppati anche recentemente per l'impiego in edilizia non sono utilizzabili in processi di AM a causa delle loro proprietà allo stato fresco che risultano inadeguate per poter svolgere correttamente il processo estrusivo e portare alla realizzazione di elementi finali ad elevate prestazioni. Infatti, allo stato fresco il materiale utilizzato in processi di *3D Concrete Printing* deve possedere specifiche proprietà reologiche e di irrigidimento che gli offrano in particolare la fluidità necessaria per poter essere pompato fino alla testa di stampa e la capacità di sviluppo tempestivo di una certa rigidità appena il filamento si stacca dall'ugello di estrusione, al fine di poter sostenere se stesso e gli strati successivamente depositati mantenendo la propria forma e subendo una minima o nulla deformazione dopo l'estrusione. Le proprietà reologiche di un impasto dipendono essenzialmente dalla composizione chimico-fisica del mix design, dalla procedura di miscelazione e, in piccola parte, anche dalle condizioni ambientali e dalla durata del processo di estrusione. Andando più nel dettaglio, a livello qualitativo Thanh T. Le ed altri autori hanno identificato tre caratteristiche essenziali che deve possedere l'impasto allo stato fresco, «*pumpability, extrudability, and buildability*» [4], cui si aggiungono altre grandezze correlate quali l'«*open time*», il «*layer cycle-time*» e la «*green strength*».

Pompabilità

La pompabilità è definita come «*the ease with which the fresh mix is transported from the pump to the extrusion nozzle*» [4] e corrisponde sostanzialmente alla necessità di una fluidità tale da permettere al materiale di scorrere all'interno della pompa per poter raggiungere la testa di stampa. Un problema che può inficiare questo trasferimento è la possibile segregazione delle particelle nel tubo con la conseguente formazione di blocchi causati dall'errata progettazione della miscela e/o da una miscelazione insufficiente del composto prima del pompaggio. I blocchi, e in generale le interruzioni durante il processo di estrusione, sono particolarmente problematici nei processi di AM perché possono provocare la formazione di *cold joints* tra gli strati a causa del mancato legame tra gli stessi, che risulta essenziale per la realizzazione di un componente finale omogeneo e di qualità.

Estrudibilità

L'estrudibilità è definita come «*the ability to extrude the mix through a nozzle without considerable cross-sectional deformation and with an acceptable degree of splitting/tearing of filament*» [4]. Questa caratteristica è influenzata dalla forma e dalla dimensione dell'ugello che devono essere compatibili e coerenti sia con il materiale da estrudere che con il prodotto finale da realizzare. Inoltre, è importante valutare

con attenzione il tipo di aggregati impiegati e l'eventuale contenuto di fibre nell'impasto. Attualmente l'estrudibilità viene valutata tramite ispezione visiva.

Stampabilità

La stampabilità del materiale viene valutata stampando una serie di strati sovrapposti con un percorso di stampa a singolo filamento. Questo parametro e la qualità della stampa sono influenzati, oltre che dal *mix design* (in particolare la presenza di additivi superfluidificanti o acceleranti, e il contenuto di aggregati fini o altre aggiunte in grado di aumentare la stabilità del materiale), dal tempo totale di miscelazione e dal tempo che intercorre tra la miscelazione e l'estrusione effettiva dello strato. Se è passato un periodo di tempo insufficiente, il composto non avrà ancora sviluppato una coesione e viscosità tali da permettere allo strato di sostenere il peso del materiale depositato successivamente. Se è passato troppo tempo invece la viscosità potrebbe risultare talmente elevata da rendere difficoltoso il pompaggio del materiale oppure, se viene superato il momento di inizio della presa, potrebbe generare difetti e *cold joints* nell'elemento finale, andando a comprometterne le prestazioni.

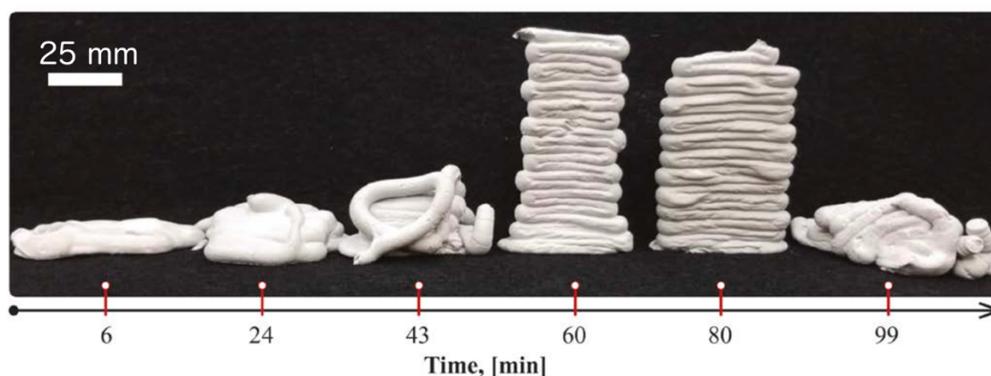


Figura 12 – Esempio di test di stampabilità finalizzato ad individuare la finestra di tempo ideale per ottenere una struttura in grado di auto-sostenersi [4].

Open time, layer cycle-time e green strength

In riferimento ai requisiti di pompabilità, estrudibilità e stampabilità viene definito un «*open time*» che rappresenta una finestra temporale in cui un determinato volume di materiale deve essere estruso in quanto mantiene la viscosità e la coesione di miscela adeguate allo svolgimento del processo. A questo proposito, un'area di ricerca su cui si sta ancora lavorando riguarda l'applicazione di additivi in grado di aiutare a stabilizzare la miscela per estendere l'*open time*. Il test di stampabilità del materiale può essere utile per determinare l'*open time* della miscela e di conseguenza progettare l'ottimizzazione del percorso dell'utensile e dei parametri di funzionamento della macchina (come ad esempio la velocità di stampa) al fine di minimizzare o eliminare la formazione di *cold joints* durante la produzione degli elementi.

Un altro concetto correlato con il precedente è il «*layer cycle-time*» che rappresenta il tempo che intercorre tra la deposizione di due strati successivi. Questa grandezza influisce sulla forza di legame tra gli strati che, se insufficiente, può portare alla formazione di *cold joints*. La lunghezza del percorso di estrusione e la velocità con cui il materiale può essere depositato sono fattori particolarmente importanti che influenzano sia il tempo di produzione del componente che il *layer cycle-time*. Un fattore limitante, che influisce sulla velocità di stampa impostata a livello di macchinario, è costituito dalla quantità di materiale che può essere depositata quando vi è un cambio di direzione nel percorso seguito dall'ugello. Di conseguenza, la progettazione e la creazione del percorso di stampa deve considerare anche questo fattore, oltre alle proprietà del materiale, alle caratteristiche del processo, e alle dimensioni, forma e proprietà finali del componente da produrre.

Il processo estrusivo, essendo svolto in assenza di casseforme, deve necessariamente prevedere l'impiego di un materiale in grado di presentare deformazioni minime o nulle in seguito all'estrusione. A tal proposito, un aspetto particolarmente importante da tenere in considerazione riguarda la deformazione dello strato sotto il peso proprio, ma soprattutto sotto il peso dei successivi strati che verranno aggiunti con lo sviluppo in altezza dell'elemento: è essenziale che il materiale presenti un'elevata tensione di snervamento (per la stabilità di forma del singolo strato appena estruso) e un'adeguata e il più possibile costante tissotropia (per la stabilità di forma che consente di supportare gli strati successivi). Infatti, con l'aumento del numero di strati, è necessario che il materiale sviluppi un'elevata e rapida resistenza e rigidità per garantire la stabilità di forma dell'elemento nel suo complesso: a questo fine, il processo di idratazione deve procedere rapidamente per fornire uno scheletro interno portante. Questa caratteristica, tipicamente propria dei materiali sottoposti ad estrusione, viene definita *green strength*. La minima deformazione controllata che deriva dall'aggiunta di un nuovo strato, da una parte favorisce l'adesione tra due strati sovrapposti in quanto aumenta la superficie di contatto tra gli stessi, ma dall'altra, se eccessiva, rischia di pregiudicare la geometria dell'oggetto finale e soprattutto di compromettere la stabilità dell'elemento in fase di stampa rischiando di portarlo al collasso: lo "schiacciamento" degli strati può infatti aumentare progressivamente la distanza tra l'ugello e la quota di deposizione dello strato andando ad inficiare la stabilità della stratificazione. Questo aspetto è rilevante soprattutto in elementi particolarmente elevati in altezza e stampati con orientamento verticale. Per evitare questi problemi, oltre al controllo delle proprietà tissotropiche del materiale allo stato fresco, è possibile inoltre prevedere la regolazione dinamica dell'altezza dell'ugello durante la stampa e l'attento controllo del *buildup rate*, con la possibilità di iniettare appena prima dell'estrusione alcuni additivi in grado di accelerare il processo di indurimento degli strati inferiori dell'elemento per poter supportare senza problemi gli strati successivi. L'impiego di additivi specifici o altre aggiunte (come

ad esempio le ceneri volanti) possono aiutare a raggiungere la coesione e il comportamento tissotropico adeguati, senza compromettere la fluidità allo stato fresco.

In conclusione, al fine di garantire la realizzabilità del processo di estrusione e la realizzazione di un elemento finale di qualità e ad alte prestazioni, è essenziale raggiungere proprietà reologiche adeguate, ripetibili e costanti. Attualmente, a livello di ricerca si sta lavorando sullo studio della reologia del calcestruzzo estrudibile ed in particolare sia sugli aspetti di base, quali la viscosità e la tensione di snervamento, che su comportamenti più complessi, quali la tissotropia, la *green strength* tempestiva e la stabilità di forma. In questo ambito, un nuovo approccio particolarmente interessante è rappresentato dal controllo attivo della reologia (ARC) e dell'irrigidimento (ASC) svolto in tempo reale durante la produzione. Inoltre, per quantificare le grandezze significative che caratterizzano ciascun impasto allo stato fresco, cioè viscosità plastica, tensione di snervamento e tissotropia, si stanno adottando nuove tecniche di misurazione che si sono dimostrate affidabili come ad esempio quelle effettuate tramite reometri portatili a rotazione.

2.3.2_Proprietà allo stato indurito

L'impiego del *3D Concrete Printing*, e quindi il fatto che l'oggetto venga realizzato tramite la sovrapposizione di filamenti estrusi di conglomerato cementizio, ha una grande influenza sulle caratteristiche e le prestazioni dell'oggetto finale. Inoltre, vi è una stretta correlazione tra proprietà allo stato fresco e allo stato indurito per cui non devono essere considerate separatamente. In questo frangente, la ricerca sta ancora cercando di comprendere gli effetti del processo e del *mix design* sulle proprietà finali in modo da poterli controllare e minimizzare.

Fino ad oggi, i casi studio realizzati tramite *3D Concrete Printing* si caratterizzano per *performance* finali complessivamente insufficienti (soprattutto se si considera che in futuro le applicazioni dovranno essere svolte in contesti e condizioni ambientali reali) in quanto l'attenzione è stata rivolta principalmente all'obiettivo di riuscire a realizzare una serie di strati sovrapposti senza incorrere nel collasso dell'elemento. Al livello di sviluppo attuale, si riscontra quindi una scarsa attenzione alle prestazioni finali del prodotto, quali ad esempio la prestazione meccanica e la durabilità dell'elemento, sebbene esse risultino essenziali per giungere alla commercializzazione di prodotti di qualità di alto livello. Sostanzialmente, ad oggi la riproduzione delle proprietà finali «*as-good-as-cast*» non è stata ancora raggiunta e, a livello di ricerca, si sta lavorando anche in questo ambito.

La *performance* complessiva degli oggetti stampati è determinata essenzialmente da alcuni aspetti e caratteristiche che l'elemento deve presentare allo stato indurito, quali:

- adesione tra strati e conseguente assenza di *cold-joints*.
- Densità costante del filamento, evitando zone a scarso riempimento di materiale.
- Assenza di fessurazioni da ritiro e conseguente durabilità del prodotto finale.

- Conformità geometrica rispetto a quanto previsto dal progetto e dal modello 3D.
- Prestazioni meccaniche richieste in termini di resistenza a compressione e a trazione.

Mentre alcune di queste caratteristiche possono essere valutate tramite osservazioni visive, per altre, come le prestazioni meccaniche, è necessario procedere attraverso misurazioni precise in grado di quantificare le proprietà e le prestazioni offerte dal prodotto realizzato. A tal proposito, per i materiali estrusi non esistono ancora metodi standardizzati per testare tali prestazioni per due principali motivi: il fatto che i componenti realizzati tramite processo estrusivo presentano natura anisotropa e caratteristiche anche molto variabili all'interno dello stesso elemento, e il fatto che attualmente manca un formato coerente per la realizzazione dei provini da testare e per descrivere i parametri del processo (quali ad esempio la dimensione dell'ugello, l'altezza dello strato, le dimensioni del filamento, la velocità di stampa, la dimensione del componente da cui viene prelevato il campione da testare e il *layer cycle-time*) che permettano la confrontabilità tra i dati provenienti da differenti studi. Soprattutto in vista di uno prossimo futuro impiego reale del *3D Concrete Printing*, è necessario individuare nuovi metodi di analisi e di prova standardizzati poiché quelli impiegati attualmente per elementi in calcestruzzo realizzati in modo tradizionale risultano assolutamente inadeguati a causa della differenza a livello di processo, materiale e prodotto. Anche a livello di progettazione strutturale, gli attuali *software* e modelli 3D non sono ancora in grado di prevedere le proprietà meccaniche finali di elementi estrusi per cui, anche su questo fronte, sono necessari ulteriori studi e sviluppi.

Adesione tra strati

Un aspetto importante, già menzionato più volte, è l'adesione tra strati sovrapposti per formare un legame solidale ed evitare la formazione, in corrispondenza delle interfacce, di *cold joints* che rappresentano punti e zone di debolezza nell'elemento finale e che vanno ad influenzarne in particolare le prestazioni meccaniche. I *cold joints* generalmente sono causati da un eccessivo *layer cycle-time* ma anche da altri fattori quali ad esempio la velocità di stampa e la dimensione delle particelle di sabbia (quando presenti). Essi possono anche essere temporanei in quanto la forza di adesione tra gli strati aumenta con il progredire dell'idratazione del cemento. Nel caso di componenti con impieghi strutturali risulta indispensabile cercare di minimizzare le influenze che il processo produttivo può generare sul prodotto finale prendendole in considerazione già in fase di progettazione al fine di garantire il raggiungimento delle prestazioni richieste.

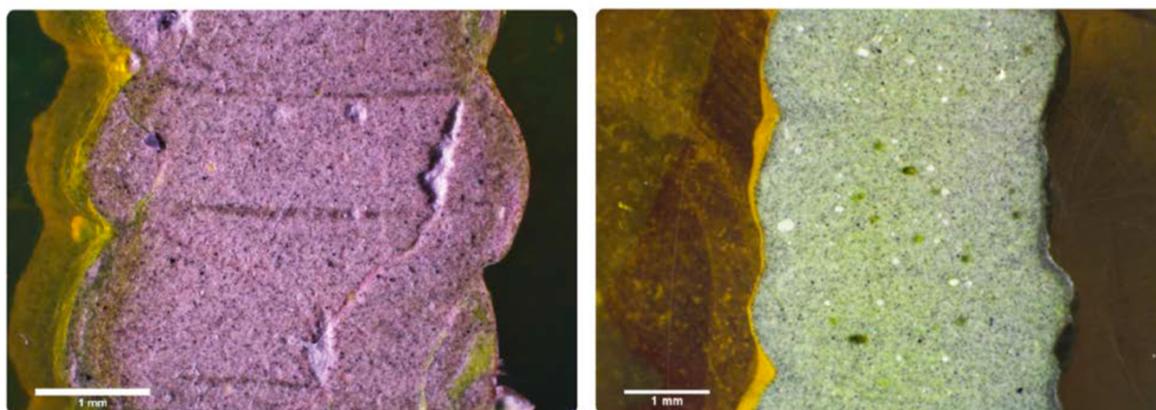


Figura 13 – Esempio di elemento caratterizzato da insufficiente adesione tra strati e probabile presenza di cold joints (sinistra) a confronto con elemento caratterizzato da un’ottima adesione tra strati non più riconoscibili (destra). Nel caso specifico, i difetti del primo elemento dipendono da un’estrusione avvenuta in seguito al momento di inizio presa dell’impasto [4].

Densità costante del filamento

Un altro aspetto particolarmente importante è il raggiungimento della densità di progetto in ogni parte dell’elemento evitando, tramite il *mix design* e la stabilità delle proprietà reologiche durante la stampa, di generare vuoti all’interno dei filamenti estrusi poiché essi andrebbero ad inficiare la densità effettiva dell’elemento, la sua *performance* e anche la sua durabilità. Oltre al *mix design* e alla stabilità dell’impasto, anche la deformazione del materiale stampato ha un ruolo importante perché può spingere il materiale in questi vuoti minimizzandone l’occorrenza. Un altro fattore che può portare a questo tipo di fenomeno, riguarda il percorso dell’ugello in corrispondenza di cambi di direzione: a seconda delle proprietà allo stato fresco, della dimensione e geometria dell’ugello e della velocità di deposizione, vi sono infatti specifici raggi di curvatura da impiegare per evitare fratture o difetti nel componente.



Figura 14 – Esempio di elementi caratterizzati da densità di filamento variabile (sinistra) e costante (destra). Nel primo caso si possono riconoscere chiaramente i vari strati e si riscontra la presenza di vuoti di varie dimensioni, mentre nel secondo l’elemento risulta omogeneo, coerente, frutto di un’estrusione di qualità [4].

Fessurazioni da ritiro e durabilità

A differenza del processo tradizionale di costruzione con calcestruzzo, l'assenza di casseforme, la maggiore superficie esposta e il basso rapporto acqua/cemento che caratterizzano il calcestruzzo impiegato nel *3D Concrete Printing* aumentano l'occorrenza di fessurazioni dovute al ritiro spontaneo del materiale durante la fase di maturazione. Il *mix design* e la fase di indurimento assumono quindi un ruolo fondamentale per ridurre al minimo l'insorgere di questo tipo di problema che può causare una riduzione della durabilità dell'elemento finale, oltre ad un difetto estetico. In ambito di prefabbricazione in stabilimento chiaramente risulta più semplice adottare misure specifiche atte a controllare le condizioni di indurimento, che possono avere un'influenza notevole sull'elemento estruso. In generale, a livello di ricerca, si sta ancora lavorando su questo aspetto poiché risulta essenziale in vista di un futuro impiego reale del processo estrusivo e anche al fine di migliorare la *performance* ambientale durante la fase d'uso del ciclo di vita dei prodotti, agendo sulla durabilità dei componenti estrusi e di conseguenza sulla riduzione del tasso di manutenzione e sostituzione.



Figura 15 – Esempio di fessurazioni da ritiro in un elemento realizzato tramite *3D Concrete Printing* [6].

Conformità geometrica

Un requisito fondamentale del processo di fabbricazione è la conformità geometrica dell'elemento finale al progetto e al modello 3D di partenza poiché è in grado di determinarne fortemente il valore. Molto spesso, le geometrie possiedono un valore sia estetico che funzionale e nel processo di *3D Concrete Printing* sono vincolate da alcune limitazioni intrinseche al processo per cui, a livello di conformità geometrica, vi sono alcuni aspetti essenziali da considerare quali:

- dimensioni e tolleranze minime.
- Creazione di componenti completamente densi.
- Creazione di sbalzi.

Nell'ambito del processo estrusivo di *3D Concrete Printing*, vi sono alcuni fattori che influenzano e limitano le dimensioni geometriche e le tolleranze minime realizzabili. A tal proposito si parla di «risoluzione di stampa» ed essa dipende principalmente dalle proprietà reologiche del materiale, dal percorso dell'ugello e dai parametri di processo (dimensione dell'ugello e dimensione dello strato ad esempio), che a loro volta dipendono dall'elemento che si vuole realizzare e dalla strategia di

costruzione adottata. La risoluzione di stampa assume un ruolo ancora più significativo nel caso di assemblaggio di componenti (in adiacenza o addirittura tramite incastro maschio-femmina) e per quanto riguarda la finitura superficiale degli elementi finiti. In questi ultimi casi si possono adottare varie strategie per ovviare alle limitazioni imposte dal processo estrusivo:

- utilizzare spatole automatiche per lisciare la superficie verticale degli elementi in fase di stampa.
- Utilizzare un macchinario che permette all'ugello un movimento a 4 o 5 assi in modo da poter prevedere angoli con inclinazioni ampiamente variabili tra ugello e superficie di lavoro.
- Realizzare un elemento di geometria vicina a quella desiderata a cui poi viene applicato un elemento aggiuntivo oppure viene sottratto del materiale per ottenere la precisione richiesta.
- Prevedere che il percorso di stampa sia continuo sui bordi esterni del componente.

Nel caso in cui si desideri ottenere un elemento pieno si possono adottare due strategie differenti: si può realizzare il cosiddetto «tratteggio» cioè un percorso interno di materiale estruso che, a causa dell'insufficiente risoluzione di stampa, inevitabilmente lascerà dei piccoli vuoti in corrispondenza dei cambi di direzione che possono inficiare la densità, le prestazioni attese e la durabilità dell'elemento realizzato; oppure è possibile riempire il perimetro estruso con un materiale di riempimento colato (anche a differente densità per aumentare le prestazioni dell'elemento rendendolo multi-funzionale) grazie al quale non rimarrà alcun vuoto all'interno del componente finito.



Figura 16 – Esempio di «tratteggio» in cui è evidente l'effetto del cambiamento di direzione dell'ugello sulla densità dello strato (sinistra) [4] ed esempio di riempimento colato all'interno di un perimetro estruso (destra) [fotografia dell'autore].

L'ultimo aspetto da considerare a livello di conformità geometrica riguarda la creazione di sbalzi e sporgenze che nell'ambito del *3D Concrete Printing* si possono creare in due modalità differenti: tramite l'impiego di qualche supporto esterno temporaneo che andrà rimosso in seguito all'indurimento oppure tramite «*corbeling*», cioè la realizzazione di sbalzi tra strati sovrapposti

impostati con spostamenti a livello di percorso di stampa. Quest'ultima soluzione al momento è possibile solo fino ad un certo grado di sbalzo perché può portare all'instabilità e al collasso dell'elemento, soprattutto quando è prevista una struttura a singolo filamento. L'instabilità in questo caso è dovuta essenzialmente alle proprietà del materiale e al modo in cui la macchina può muovere l'ugello. A questo proposito, invece del classico metodo di «2D slicing» impiegato maggiormente nell'ambito del *3D Printing*, è opportuno utilizzare «il metodo della continuità tangenziale» che, grazie all'impiego di un ugello con più di 3 assi, permette di sfruttare la superficie massima di contatto tra gli strati andando così a stabilizzare la struttura complessiva. Con questo metodo si può potenzialmente ottenere una maggiore libertà progettuale ma a livello sperimentale è necessario svolgere ulteriori prove per garantire la stabilità di vari tipi e gradi di sbalzo evitando un indebolimento o addirittura un collasso della stratificazione.

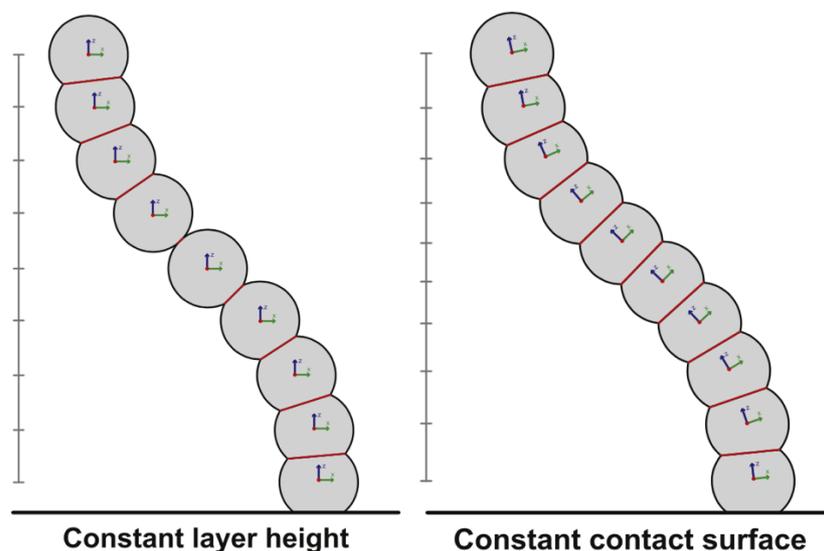


Figura 17 – Confronto tra il metodo del 2D slicing (sinistra) e il metodo della continuità tangenziale (destra) per la realizzazione di sbalzi. La validità del secondo metodo deriva dalla costante superficie di contatto tra gli strati che riduce notevolmente il rischio di collasso della stratificazione [4].

Prestazioni meccaniche

Le caratteristiche precedentemente trattate hanno un'influenza diretta molto rilevante sulle prestazioni tecniche, ed in particolare meccaniche, del prodotto finale, che rappresentano requisiti imprescindibili che esso deve possedere per poter svolgere correttamente il ruolo per cui è stato progettato e, di conseguenza, per condurre ad un impiego reale del *3D Concrete Printing* sia nell'ambito della prefabbricazione in stabilimento e della conseguente commercializzazione di componenti edilizi, sia nell'ambito della costruzione *in situ*.

In questo frangente, un aspetto particolarmente importante, ma attualmente irrisolto, dal punto di vista meccanico riguarda l'inserimento di elementi di rinforzo per ottenere prestazioni meccaniche adatte ad impieghi strutturali e con *performance* confrontabili con il classico calcestruzzo armato. A tal proposito, nell'ambito della ricerca sono stati proposti vari approcci differenti ma non si è ancora

giunti ad una soluzione veramente soddisfacente. Oltre a comprendere quale possa essere la modalità migliore dal punto di vista realizzativo, è necessario chiaramente individuare quale soluzione permette di ottenere la *performance* meccanica migliore secondo una serie di parametri significativi: resistenza, snervamento, deformazione, adesione al calcestruzzo stampato ecc.

Le possibili soluzioni attualmente ipotizzate e, solo in parte sperimentate, sono le seguenti:

- a) realizzare tramite *3D Concrete Printing* solo le casseforme permanenti (*shell*) in materiale cementizio e collocare successivamente all'interno le armature che verranno avvolte da un getto di riempimento in calcestruzzo vibrato realizzato con il processo convenzionale per rendere solido l'intero elemento.



Figura 18 – Esempio di integrazione delle classiche armature in acciaio in un elemento stampato con funzione di cassaforma permanente [4].

- b) Realizzare tramite automazione solo le armature con funzione di cassaforma a perdere in rete metallica di acciaio molto fitta all'interno della quale verrà colato in un secondo momento il materiale cementizio (approccio *Mesh Mould Metal* dell'ETH di Zurigo).

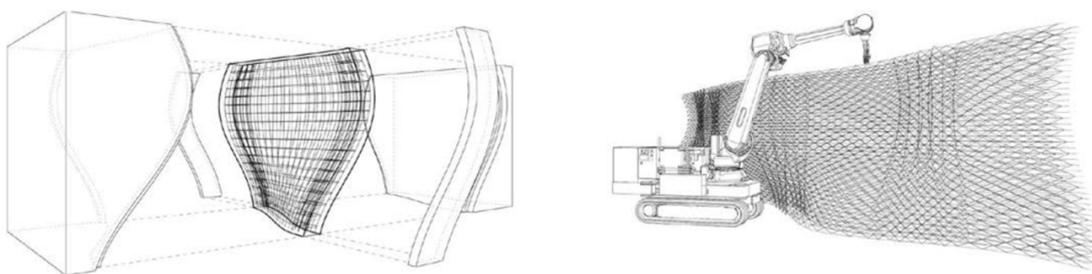


Figura 19 – Confronto tra l'approccio classico di integrazione di armature in un muro a doppia curvatura (sinistra) e l'approccio adottato nel caso studio *Mesh Mould Metal* dell'ETH di Zurigo (destra). Nel secondo caso l'armatura consiste in una fitta rete metallica con funzione di cassaforma a perdere all'interno della quale il materiale cementizio verrà colato in un secondo momento [3].

- c) Inserire nell'impasto cementizio da estrarre un quantitativo di fibre di acciaio corte o fibre polimeriche disperse. In questo caso le fibre hanno funzione di armatura dispersa ma sono anche utili per aumentare la resistenza iniziale e ridurre fenomeni di ritiro durante

l'indurimento, sebbene possano creare problemi a livello di pompabilità ed estrudibilità dell'impasto fresco.

- d) Inserire nelle zone dell'elemento maggiormente sollecitate a trazione rinforzi in tessuto o in griglia bidirezionale in fibra (eventualmente combinabili con l'aggiunta di fibre disperse nell'impasto) al fine di migliorarne in particolare la prestazione meccanica a trazione per flessione [9].



Figura 20 – Provini con rinforzo in griglia bidirezionale in fibra di vetro e fibre disperse in seguito alla prova di trazione per flessione [9].

- e) Stampare gli elementi in calcestruzzo (anche come elementi separati da assemblare) prevedendo apposite cavità in cui posizionare in un secondo momento le armature di rinforzo post-tensionate (sia in direzione longitudinale che trasversale) assicurandone il contatto con il calcestruzzo tramite stuccatura con impiego di una malta cementizia a bassa viscosità o un adesivo strutturale [1].



Figura 21 – Esempio di realizzazione di una trave a sezione variabile stampata in 3D con integrazione successiva delle armature di rinforzo in acciaio [1].

- f) Stampare il calcestruzzo e posizionare contemporaneamente elementi di armatura tramite sistema multi-braccio.
- g) Stampare contemporaneamente sia il calcestruzzo che l'armatura tramite estrusione multi-ugello e/o multi-braccio.

Nell'ambito del *3D Concrete Printing*, quindi, i rinforzi possono essere inseriti secondo due orientamenti: in direzione parallela rispetto agli strati stampati o in direzione perpendicolare ad essi. Al primo caso appartengono ad esempio le sperimentazioni con rinforzi in tessuto o griglie di fibre posizionati parallelamente agli strati estrusi. L'inserimento di barre di rinforzo in acciaio in questa direzione non è particolarmente conveniente poiché il diametro dell'elemento di rinforzo influenzerà molti altri aspetti quali lo spessore dello strato e di conseguenza il diametro di estrusione, la discretizzazione del volume in base alla dimensione del filamento, il percorso dell'utensile, le caratteristiche reologiche allo stato fresco, il *layer cycle-time* e le tolleranze dimensionali, e tutte queste variabili hanno un effetto sulla conformità geometrica del prodotto finale. Per tutti questi motivi, nel caso di rinforzi in barre d'acciaio potrebbe risultare più semplice l'inserimento in direzione perpendicolare rispetto agli strati di stampa.

In generale, poiché fino ad ora non è stata individuata una soluzione di rinforzo soddisfacente, si ipotizza la necessità di sperimentare soluzioni *ad hoc* per questo nuovo tipo di processo costruttivo (come ad esempio la soluzione *g*) invece di continuare ad adattare soluzioni tradizionali che sono state pensate per un processo del tutto differente da quello estrusivo.

2.4_POTENZIALITÀ, LIMITI E SFIDE DELL'AUTOMAZIONE NEL SETTORE DELLE COSTRUZIONI

Potenzialità

La ricerca di nuovi processi in grado di innovare radicalmente l'attuale pratica produttiva (in stabilimento) e costruttiva (*in situ*) del settore edilizio nasce dalla volontà di individuare processi (e prodotti) più efficienti, economici e sostenibili rispetto a quelli esistenti. Le tecniche di costruzione tradizionale, infatti, sono lente, costose, ad alto impiego di materie prime, ad alta intensità di energia, rischiose per la salute dei lavoratori e si basano solitamente su tecniche di produzione sottrattiva, per cui si rimuove o taglia materiale da un pezzo più grande con conseguente usura degli utensili e generazione di grandi quantità di rifiuti. In tale contesto, il crescente interesse verso il *3D Concrete Printing* nel settore delle costruzioni deriva dalle potenzialità e i benefici che esso potrebbe portare, sia dal punto di vista del processo produttivo che dei prodotti finali, quali:

- illimitata libertà formale ed espressiva che permette una totale customizzazione dei prodotti senza costi aggiuntivi o addirittura a costi inferiori all'aumentare della complessità geometrica.

Tale aspetto potenzialmente offre la possibilità di realizzare un nuovo e variegato panorama architettonico in contrapposizione alla standardizzazione formale che caratterizza solitamente le strutture in calcestruzzo costruite fino ad ora. Infatti, nei processi convenzionali la forma è sempre stata limitata dalle tecniche costruttive tradizionali ed in particolare dall'impiego di casseforme che, soprattutto per elementi formalmente complessi, comporta, oltre ad elevati impatti ambientali, notevoli ritardi e costi a livello di materiale, manodopera e lavorazione (fino al 50% del costo totale della struttura in calcestruzzo) per cui risulta più conveniente realizzare elementi geometricamente semplici e standardizzati in modo da poterle riutilizzare. In questo contesto, grazie all'introduzione del *3D Concrete Printing* è possibile realizzare elementi in calcestruzzo attualmente irrealizzabili (o realizzabili con tempi e costi insostenibili) senza costi aggiuntivi o a costi inferiori al crescere della complessità, quali: elementi che prevedono geometrie particolarmente complesse (doppia curvatura); elementi strutturali progettati tramite ottimizzazione topologica; elementi progettati tramite ibridazione funzionale con conformazioni specifiche (sezioni cave) e l'eventuale impiego di materiali differenti (per natura o proprietà) al fine di garantire una multi-funzionalità dell'elemento stesso.



Figura 22 – Esempi di realizzazioni tramite 3D Concrete Printing: un elemento formalmente complesso e a doppia curvatura (in alto a sinistra) (www.parametric-architecture.com); un elemento strutturale realizzato tramite ottimizzazione topologica (in alto a destra) [6]; elementi realizzati tramite ibridazione funzionale per mezzo della forma (in basso a sinistra) [6] e combinando sia la forma che materiali di riempimento a densità inferiore rispetto al perimetro (in basso a destra) [fotografia dell'autore].

- Maggior efficienza del processo produttivo/costruttivo e del prodotto in termini di qualità, tempi e costi di produzione.
- Possibilità di gestire più rapidamente, in modo più accurato e a costi inferiori eventuali modifiche e adattamenti progettuali più o meno urgenti in fase di costruzione.
- Maggior precisione e controllo sulle caratteristiche e prestazioni dell'elemento finale dovuti alla minor occorrenza dell'errore umano e alla migliore gestione del processo di produzione/costruzione grazie alla digitalizzazione dello stesso.
- Maggior sicurezza del lavoratore nel caso di costruzioni *in situ* grazie alla drastica riduzione delle lavorazioni da realizzare manualmente in cantiere che permette una maggior sicurezza e tutela dei lavoratori in campo edile, una delle categorie soggette al maggior numero di incidenti, anche mortali.

- Nascita di nuove figure professionali specializzate in ambito di digitalizzazione dei processi produttivi/costruttivi nel settore edilizio.

Sebbene si possa pensare che l'automatizzazione dei processi possa portare ad una riduzione di posti di lavoro a causa della diminuzione delle lavorazioni da eseguire manualmente dall'uomo, in realtà gli studiosi Frey e Osborne [6] hanno dimostrato che, alla diminuzione del numero di lavoratori scarsamente qualificati, si contrapporrà un aumento dei lavoratori specializzati altamente qualificati quali esperti di robotica, programmazione, tecnologia del calcestruzzo ecc. Inoltre, si assisterà ad un allargamento della fascia demografica dei lavoratori in ambito edile, ed in particolare nella fase di costruzione, grazie alla minor rilevanza di fattori quali età, sesso e capacità fisica.

- Minor impatto ambientale dei processi costruttivi e dei prodotti realizzati, in termini di riduzioni a livello di consumo di energia e materiale, emissioni di CO₂ e di annullamento della produzione di rifiuti, soprattutto al crescere della complessità e in caso di progettazione accurata secondo i principi di ottimizzazione topologica e ibridazione funzionale (che permettono di prevedere la presenza di materiale solo dove è strutturalmente e funzionalmente necessario) ed un'adeguata scelta del materiale (o materiali) al fine di ridurre l'impatto durante l'intero ciclo di vita del prodotto/edificio. Dal punto di vista ambientale, un aspetto da tenere in considerazione durante la fase di progettazione riguarda la distinzione tra la complessità formale usata come strategia progettuale al fine di ottimizzare l'uso di materiale o solamente come virtuosismo estetico che porterebbe ad un aumento del materiale e ad un maggior impatto ambientale. In tale ambito, alcuni studiosi hanno dimostrato che è possibile ottenere una riduzione dell'impatto ambientale fino a circa il 50% in strutture in calcestruzzo prodotte digitalmente rispetto ai processi convenzionali [6].

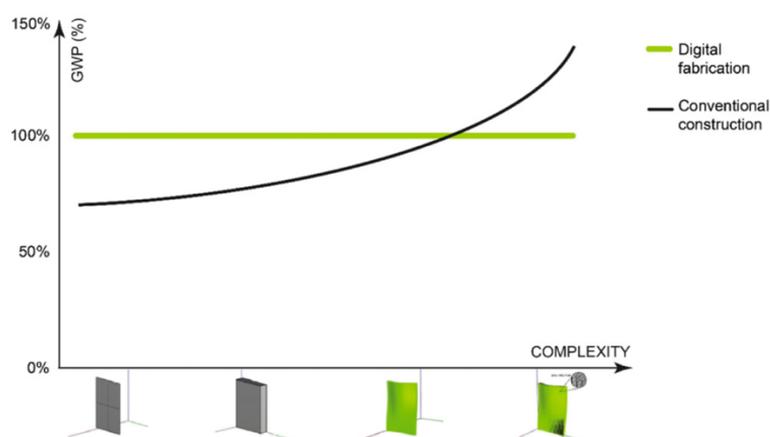


Figura 23 – Confronto tra il vantaggio ambientale della fabbricazione digitalizzata e una costruzione convenzionale al crescere della complessità formale. L'impatto ambientale è espresso tramite percentuale di Global Warming Potential (kg CO₂ eq.) per m² di muro in calcestruzzo [6].

- Possibilità di progettare secondo il principio di ottimizzazione topologica (o strutturale) al fine di alleggerire gli elementi stampati e risparmiare fino al 50% di materiale [6].

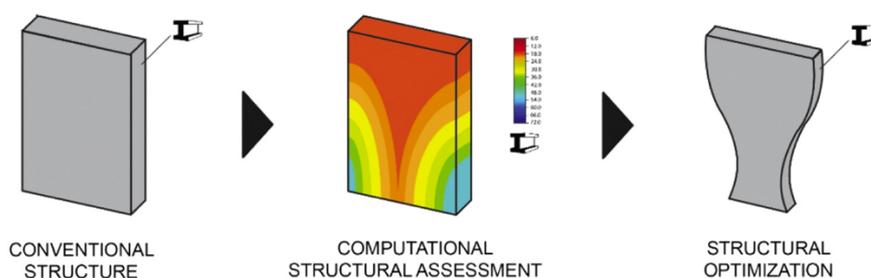


Figura 24 – Schematizzazione del principio di ottimizzazione topologica (o strutturale) [6].

- Possibilità di integrare più facilmente la multifunzionalità negli elementi edilizi sia attraverso l'integrazione di servizi come tubazioni o impianti tramite una geometria complessa della struttura che preveda cavità atti ad ospitare tali elementi (integrazione funzionale), sia attraverso la forma e/o i materiali impiegati per realizzare i componenti, che possono fornire una o più funzioni secondarie conferendo un valore aggiunto al prodotto stampato (ibridazione funzionale). L'ibridazione funzionale permette infatti ad un unico elemento di poter svolgere più funzioni attraverso: la forma (prevedendo ad esempio la presenza di cavità vuote che permettono un aumento della prestazione termica e acustica dell'elemento), il materiale (ad esempio impiegando materiali cementizi a bassissima conducibilità termica o ad attivazione termica) oppure combinando la forma con l'impiego di uno o più materiali all'interno dello stesso elemento (ad esempio riempiendo le cavità con materiale isolante o, ancora meglio, impiegando materiali della stessa natura ma a densità differenti). Per ottenere effettivi vantaggi ambientali è necessario scegliere con attenzione le funzioni da ibridare in modo da: ridurre il fabbisogno di materiale rispetto alla realizzazione di elementi *ad hoc* per svolgere le funzioni aggiuntive ed ottenere un bilancio complessivamente positivo considerando l'intero ciclo di vita dell'elemento. A tal proposito, se l'ibridazione da un lato può ridurre gli impatti ambientali in fase di produzione digitale, dall'altro può rendere più problematico e più frequente l'intervento per manutenzione e sostituzione degli elementi, o inficiare la riciclabilità del prodotto finale a causa dell'abbinamento di materiali di differente natura, comportando un peggioramento della *performance* ambientale complessivamente fornita durante l'intero ciclo di vita. Per evitare ciò, oltre ad una scelta accorta dei materiali, bisognerebbe evitare l'accoppiamento di funzioni che presentano cicli di vita temporalmente molto differenti e che porterebbero a cicli di sostituzione molto elevati per l'intero elemento, o in alternativa prevedere una flessibilità tale da consentire la manutenzione solamente di alcuni componenti senza influenzare la vita utile dell'intero elemento.

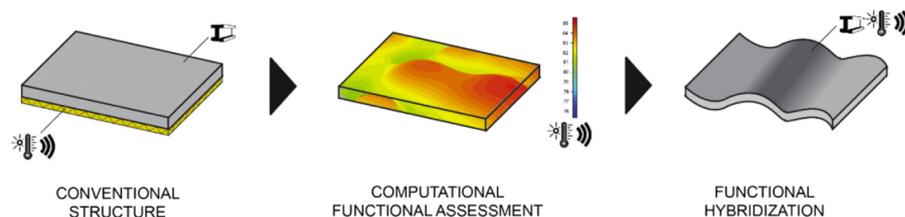


Figura 25 - Schematizzazione del principio di ibridazione funzionale [6].

Limiti e sfide

Sebbene vi siano molte sperimentazioni in corso, nel settore edilizio l'impiego di processi di AM come il *3D Concrete Printing* è avvenuto in ritardo rispetto ad altri settori ed è ancora lontano da un suo impiego quotidiano a causa, da una parte, delle caratteristiche proprie del settore stesso e, dall'altra, dalle sfide aperte soprattutto a livello tecnico e di lavorazione ma anche derivanti da valutazioni di carattere economico (in termini di fattibilità e vantaggio economico del processo automatizzato rispetto a quello tradizionale), sociale e ambientale (in riferimento alle attuali considerazioni inerenti l'eco-sostenibilità).

Il ritardo rispetto ad altri settori è dovuto al fatto che il settore edilizio:

- è molto conservativo e tradizionale nella sua pratica per cui si oppone con resistenza all'introduzione di cambiamenti e di nuovi attori nel processo di produzione/costruzione.
- Si caratterizza per prodotti finali che sono influenzati da una serie di vincoli (legali e di altra natura) e devono necessariamente soddisfare una serie di requisiti (prestazione meccanica, sicurezza ecc.).
- Offre alle imprese di costruzione margini di profitto relativamente bassi, per cui non sono incentivate a puntare su nuovi metodi all'avanguardia (che possono richiedere un rilevante capitale iniziale per l'acquisto di nuovi apparecchi e strumentazioni).
- Si caratterizza per processi scarsamente industrializzati, dipendendo fortemente dall'impiego di manodopera per eseguire manualmente molte lavorazioni, soprattutto nelle fasi finali di costruzione.
- È un settore ad alti livelli di fatturato e quindi ad alti rischi, rendendo difficile l'implementazione di nuovi metodi, soprattutto se molto "rivoluzionari" come nel caso dell'automazione.
- Investe poco in ricerca e sviluppo (questo vale anche per paesi con una situazione economica molto buona) e i cicli di ricerca sono molto lenti e costosi.
- Si caratterizza per una scarsa collaborazione e interoperabilità di dati tra realtà di ricerca e sviluppo.

Tutti questi fattori hanno portato ad una staticità dei processi di costruzione come possono testimoniare le pratiche attualmente eseguite e la stessa organizzazione di cantiere che non hanno evidenziato particolari innovazioni nell'ultimo secolo.

Ad oggi, i processi di *3D Concrete Printing* si caratterizzano per alcuni limiti, che al contempo rappresentano le sfide che la ricerca dovrà tentare di risolvere nel prossimo futuro. Per poter giungere alla risoluzione di tali questioni, è assolutamente necessario un approccio interdisciplinare che coinvolga attivamente tutti gli ambiti interessati (meccanica, elettronica, scienza dei materiali, processi produttivi ecc.) e riesca a padroneggiare la complessità che caratterizza tali processi e tutti gli aspetti che li riguardano.

I limiti e le sfide possono essere sintetizzati negli aspetti seguenti:

- *un insufficiente controllo sulle proprietà allo stato fresco.*

Questo aspetto si riferisce sia al singolo impasto, in termini di successo del processo estrusivo in relazione ai parametri di pompabilità, estrudibilità e stampabilità, sia alla ripetibilità di tale risultato in molteplici impasti, al fine di poter garantire la coerenza delle proprietà finali di una serie di prodotti. A tal proposito, a livello di ricerca si sta lavorando già molto, come possono dimostrare i molteplici studi incentrati sulla valutazione delle proprietà reologiche e di irrigidimento di varie miscele alternative. Purtroppo, tali proprietà sono abbastanza sensibili alla composizione fisico-chimica dell'impasto per cui ad ogni cambiamento a livello di *mix design* è necessario rivalutare quantità e proporzioni degli altri componenti, senza la possibilità di scalare le conoscenze già acquisite. Attualmente un approccio valido che si sta studiando nel progetto «*ERC Advanced Grant Smart Cast*» consiste nel controllo attivo della reologia (ARC) e dell'irrigidimento (ASC) in tempo reale durante la produzione attraverso la creazione di campi magnetici generati grazie all'aggiunta di particelle magnetiche nell'impasto.

- *Un insufficiente controllo sulle proprietà allo stato indurito e sulla ripetibilità di tali proprietà in processi successivi.*

Le prestazioni finali del prodotto (*performance* meccanica, durabilità, conformità geometrica ecc.) non risultano ancora sufficientemente elevate in ottica di un'applicazione reale del *3D Concrete Printing* nella pratica quotidiana. Infatti, ad oggi, le realizzazioni sperimentali basate sul processo estrusivo sono ancora incentrate principalmente sulla dimostrazione della fattibilità di questo tipo di fabbricazione, perseguendo principalmente l'obiettivo di riuscire a realizzare una serie di strati sovrapposti evitando un prematuro collasso dell'elemento. In tali sperimentazioni solitamente non vengono impiegati materiali di qualità e si pone ancora poca attenzione alla *performance* complessiva che nella realtà applicativa l'elemento dovrà fornire durante l'intera vita utile in un contesto reale. Oltre alle prestazioni tecniche, che

chiaramente rivestono un ruolo essenziale, la precisione e la conformità geometrica risultano altrettanto rilevanti al fine di soddisfare i requisiti estetici del prodotto e ridurre al minimo le operazioni di finitura. Per poter approdare sul mercato, i prodotti realizzati tramite *3D Concrete Printing* devono possedere una serie di caratteristiche e prestazioni ed esse devono risultare competitive e, se possibile, più elevate rispetto agli elementi a base cementizia attualmente realizzati con i processi tradizionali. Per poter avere successo, i nuovi prodotti stampati devono presentare un valore aggiunto rispetto ai prodotti già presenti sul mercato offrendo ad esempio prestazioni che solitamente non contraddistinguono le categorie di prodotti a base cementizia quali la leggerezza, l'ottimizzazione topologica e la multifunzionalità.

A livello di ricerca è necessario approfondire lo studio sul controllo delle proprietà allo stato indurito, in particolare le prestazioni meccaniche, la durabilità e la conformità geometrica, e sulla loro dipendenza dalle proprietà dell'impasto allo stato fresco.

- *Una limitata gamma di materiali estrudibili, allo stesso tempo in grado di offrire elevate prestazioni nel prodotto finale.*

A causa delle specifiche proprietà reologiche e di irrigidimento che un materiale deve possedere allo stato fresco per poter essere sottoposto con successo al processo estrusivo e per poter offrire elevate prestazioni all'elemento allo stato indurito, i materiali a base cementizia ad alte prestazioni e ad alta durabilità impiegati attualmente nei processi convenzionali risultano inadeguati per il *3D Concrete Printing*. Inoltre, risulta particolarmente complicato individuare nuovi materiali specifici per questo processo poiché le proprietà che essi devono possedere nelle diverse fasi di produzione risultano molto specifiche e in parte contraddittorie. A livello di ricerca, quindi, serve molto tempo per individuare materiali adatti ad essere stampati poiché ogni minima modifica del *mix design* influenza tutte le proprietà del materiale allo stato sia fresco che indurito per cui è necessario eseguire nuovamente tutti i test e le valutazioni per confermare la validità di ogni nuovo composto. Al momento l'idea di trasformare i materiali cementizi ad alte prestazioni attualmente in uso in materiali estrudibili rappresenta una sfida particolarmente interessante perché permetterebbe un passaggio più rapido ed immediato dalla produzione convenzionale con casseforme a quella automatizzata. A livello di *mix design* vi sono molti impasti alternativi da provare, soprattutto con l'obiettivo di aumentare il valore dei prodotti attraverso la multi-funzionalità che il singolo materiale può potenzialmente fornire: oltre alle sostituzioni e aggiunte per rendere il composto più performante e sostenibile, in parallelo si sta cercando di ricreare una versione estrudibile di alcuni composti innovativi già presenti nell'ambito delle costruzioni in calcestruzzo tradizionali quali ad esempio gli *smart materials* (*self-cleaning*,

self-repairing, self-healing, self-sensing, nano-reinforced materials, oltre ai materiali che, contenendo PCM, svolgono un ruolo attivo dal punto di vista energetico). In futuro lo sviluppo di nuovi approcci per prevedere in anticipo le proprietà finali e il controllo attivo della reologia e dell'irrigidimento forniranno nuove soluzioni per velocizzare il processo che porterà ad estendere la tavolozza di materiali applicabili in processi di estrusione tramite stampa 3D.

- *La mancanza di soluzioni soddisfacenti per quanto riguarda l'integrazione di rinforzi.*

Tale aspetto costituisce ad oggi una sfida critica nell'ambito del *3D Concrete Printing* poiché rappresenta un prerequisito essenziale per poter sfruttare la libertà geometrica, le ottimizzazioni topologiche e soprattutto per ampliare lo spettro di applicazione della fabbricazione digitale con il calcestruzzo anche a elementi con funzione strutturale portante.

- *La mancanza di normative e procedure codificate per la progettazione di elementi con funzione portante e, in generale, per la valutazione delle prestazioni di elementi realizzati tramite processo estrusivo automatizzato.*

La natura anisotropa dei prodotti realizzati tramite AM e il concetto stesso di stratificazione, che prevede la possibile presenza di interfacce più deboli e più porose di altre, stanno sfidando gli attuali approcci e codici di progettazione strutturale (in termini di dimensionamento, tensioni e deformazioni, elementi di rinforzo ecc.), la durabilità e le attuali pratiche per i test prestazionali che si basano sul concetto di materiale omogeneo ed isotropo e per i quali un cubo o un cilindro di materiale estruso non sarà assolutamente rappresentativo nel caso del *3D Concrete Printing*. Tutti gli approcci, le pratiche, i codici progettuali, il controllo di conformità e i test di prova delle prestazioni dovranno essere rivisti in considerazione della natura anisotropa e delle peculiarità del prodotto stampato. Per impieghi strutturali sarà indispensabile riuscire a simulare le caratteristiche del materiale fresco e indurito al fine di generare un modello che permetta la progettazione e l'integrazione ottimale dei sistemi di rinforzo e di prevedere già in fase progettuale le prestazioni finali del componente. Questa attuale lacuna può rappresentare un ostacolo rilevante in vista dell'introduzione della produzione digitale automatizzata nell'industria delle costruzioni in calcestruzzo. Fortunatamente le conoscenze scientifiche acquisite sui materiali cementizi fino ad oggi sono ancora valide, quindi i tempi di attesa potrebbero ridursi, ma bisogna comprendere le conseguenze dell'impiego di un nuovo metodo di produzione per poter giungere a normative, codici e metodi di prova standardizzati validi per i processi automatizzati al fine di giungere all'immissione sul mercato di materiali e prodotti certificabili.

- *Un'insufficiente attenzione alla performance ambientale dei materiali e prodotti durante l'intero ciclo di vita.*

Alla luce dell'importanza attuale degli aspetti ambientali, è essenziale che i nuovi materiali e prodotti impiegati nell'ambito del *3D Concrete Printing* siano in grado di offrire un'elevata *performance* ambientale, ponendo particolare attenzione all'impatto complessivo di processi, materiali e prodotti durante l'intero ciclo di vita. Sebbene i nuovi processi automatizzati siano nati anche al fine di rendere i processi produttivi più eco-sostenibili, è necessario che l'impegno verso l'ambiente sia mantenuto anche a livello di materiali e *performance* dei prodotti durante il ciclo di vita del componente/edificio. A tal proposito, i materiali attualmente impiegati a livello sperimentale risultano ancora troppo concentrati su altri aspetti, quali la fattibilità dei processi e altri tipi di prestazioni, trascurando l'aspetto ambientale che al giorno d'oggi riveste un ruolo sempre più importante ed essenziale. I *mix* impiegati fino ad ora in processi estrusivi ad esempio presentano un contenuto di cemento fino addirittura al 50% del peso totale degli ingredienti e tale aspetto è assolutamente inadeguato in un'ottica di eco-sostenibilità e di commerciabilità di prodotti stampati. L'ottimizzazione topologica ad esempio, se da un lato permette di ridurre fortemente il volume di materiale impiegato, dall'altro può comportare la necessità di un impiego di cemento molto elevato a causa della snellezza degli elementi che limita fortemente la dimensione degli aggregati utilizzabili, per cui l'impatto ambientale del materiale può risultare talmente elevato da ribaltare il beneficio apportato dalla riduzione di volume.

A livello di ricerca attualmente vi sono alcuni studi che stanno tentando di migliorare e ottimizzare la *performance* ambientale dei materiali e dei prodotti finali ad esempio provando a ridurre il contenuto di cemento attraverso sostituzioni con altri materiali con funzioni leganti e in alcuni casi prevedendo l'impiego di sottoprodotti provenienti da altre lavorazioni, oppure inserendo aggiunte in grado di migliorare la *performance* ambientale dei prodotti durante la vita utile dell'edificio come nel caso di prodotti ad elevata efficienza energetica. In generale è necessario fare ancora molta strada in questo ambito ponendo una maggiore attenzione agli impatti ambientali legati nel complesso ai processi di *3D Concrete Printing*.

- *La mancanza pratica di una totale libertà formale in caso di sbalzi e sporgenze senza impiego di supporti esterni temporanei.*

Potenzialmente i metodi di AM permettono una libertà formale ed espressiva illimitata. A livello pratico, vi sono però ancora alcuni limiti tecnici da superare in particolare per quanto riguarda forme particolarmente complesse con strati sovrapposti che presentano degli scostamenti (sbalzi) in direzione perpendicolare rispetto all'orientamento di stampa.

Attualmente, in assenza di supporti esterni temporanei, questa soluzione è realizzabile (in particolare tramite il metodo della continuità tangenziale, invece che con il classico *2D slicing*) solo fino ad un certo grado di sbalzo per non occorrere in fenomeni di instabilità e collasso della stratificazione. In tale ambito, a livello di ricerca e di pratica sperimentale è necessario approfondire e studiare più nel dettaglio la questione svolgendo varie prove pratiche anche con metodi alternativi o con lo stesso *2D slicing* per poterne definire i limiti e le potenzialità.

- *L'incoerenza e inaffidabilità attuale dei processi di produzione che richiedono operatori di macchine esperti e una straordinaria cura nella preparazione e nella formulazione del mix design.*

Tali caratteristiche derivano dal fatto che le proprietà del materiale dipendono ancora fortemente dall'apparato di processo, dai parametri operativi e dalle istruzioni date alla macchina sotto forma di algoritmi per creare la geometria desiderata. Inoltre, i disturbi durante la stampa (quali cambiamenti nel materiale e problemi con il processo) ostacolano la robustezza del prodotto influenzando le prestazioni finali dell'oggetto e rendendolo di conseguenza inadeguato.

- *Limiti tecnologici a livello di robotizzazione.*

Le attuali tecnologie e soluzioni di robotica e automazione impiegate in ambito sperimentale in campo edilizio sono molto specifiche in riferimento al singolo caso, processo e materiale. Per introdurre un impiego dell'automazione a larga scala, e in vista di un'automatizzazione completa della costruzione *in situ*, è importante sviluppare tecnologie in grado di fornire soluzioni generiche, versatili e riutilizzabili, anche al fine di ridurre le spese generali di investimento che tali macchinari ad oggi comportano.

2.4.1 Fabbricazione digitale *in situ*

Nell'ambito dell'automazione dei processi edilizi, un aspetto che richiede un approfondimento particolare riguarda la cosiddetta sfida della «fabbricazione *in situ* (IF)» che consiste nella produzione avanzata di strutture su larga scala svolta direttamente in cantiere e che rappresenta una grande sfida multidisciplinare e al contempo una grande opportunità per rivoluzionare radicalmente la pratica costruttiva nel settore delle costruzioni e realizzare costruzioni con minori costi, tempi e impatti ambientali.

La costruzione completamente automatizzata di un intero edificio o di porzioni di esso tramite produzione additiva (AM) chiaramente presenta problematiche, sfide e una complessità notevolmente maggiori rispetto alla produzione di singoli componenti o porzioni di unità tecnologiche di dimensioni contenute (anche in vista del trasporto al cantiere) e realizzati tramite prefabbricazione in uno stabilimento produttivo, luogo controllato e riparato dalle condizioni

ambientali esterne in cui i macchinari possono essere fissati, confinati e lavorare in sicurezza in assenza di imprevisti. Costruire in cantiere un edificio intero o porzioni di esso significa realizzare un prodotto complesso, di grandi dimensioni, costituito da molte fasi contemporanee o sequenziali, da molti materiali e componenti differenti che devono assolvere ad una serie di funzioni specifiche, e attraverso un'ampia varietà di lavorazioni. Rispetto allo stabilimento produttivo, il cantiere è un ambiente meno controllato (seppur confinabile e ad accesso limitato esclusivamente al personale competente) e soggetto alle condizioni ambientali reali.

In questo contesto, oltre ai limiti che caratterizzano generalmente l'automazione, si presentano ulteriori problematiche a livello progettuale, di programmazione e di fabbricazione, per cui sono richiesti meccanismi e soluzioni più accurate, sicure ed affidabili, complicando ulteriormente le sfide che attualmente separano tali tecnologie da un impiego reale. Mentre per il processo di *Contour Crafting* si impiega una struttura estrinseca che semplifica notevolmente il processo ma allo stesso tempo limita fortemente la libertà formale caratteristica dell'automazione, per sfruttare al massimo le potenzialità del *3D Concrete Printing in situ* recentemente è stata sviluppata una nuova classe di robot IF mobili e versatili progettati specificamente per le attività di fabbricazione nei cantieri edili. Tali robot si caratterizzano per illimitata libertà di movimento nello spazio 3D, elevata precisione di posizionamento, possibilità di essere equipaggiati con diverse teste utensili per realizzare un'ampia gamma di compiti e lavorazioni, mobilità su terreni non piani e trasportabilità con i comuni mezzi logistici al fine di raggiungere il sito di costruzione. Essi sono definiti anche «robot collaborativi» poiché, rispetto ai robot industriali che si utilizzano in ambito di prefabbricazione, sono stati studiati per poter collaborare con l'uomo garantendo una maggiore sicurezza per i lavoratori che necessariamente o accidentalmente si troveranno ad interagire con essi. Le sfide fondamentali che caratterizzano in generale la robotica nell'ambito edilizio, ed in particolare nel contesto del cantiere, riguardano proprio la capacità di controllo del movimento nello spazio 3D in assenza di una struttura estrinseca e in generale "l'intelligenza della macchina". Un sistema IF infatti deve saper risolvere tre passaggi algoritmici fondamentali (localizzare, comprendere ed eseguire) e deve saper affrontare situazioni complesse e i cosiddetti «corner cases» in modo intelligente, sicuro ed affidabile. A livello di localizzazione, la macchina deve saper localizzare se stessa, i pezzi da lavorare ed altri elementi di interesse, la loro posizione reciproca, l'orientamento ed eventuali elementi sul pezzo in lavorazione (fori, punti di attacco ecc.); in seguito deve comprendere e dedurre l'azione o la sequenza di azioni ottimale, cercando di controllare anche eventuali incertezze; infine deve eseguire le azioni pianificate in modo preciso, prevedibile ed affidabile. Per fare tutto ciò è necessario un rapido ragionamento multimodale che consenta di ricevere i dati in ingresso, elaborarli, combinarli ed agire di conseguenza, con un controllo totale in termini di posizione e forza. In tale ambito, per ciascuno dei 3 passaggi attualmente vi sono sfide

teoriche difficili e complesse da risolvere a livello scientifico e ingegneristico e che rappresentano l'attuale frontiera della ricerca nel contesto della fabbricazione *in situ*. Rispetto alla produzione automatizzata standard, un processo IF tramite robotizzazione richiede inoltre un feedback e controllo di processo maggiori per rilevare tutte le quantità necessarie per poter svolgere il lavoro, evitare collisioni con ostacoli, umani ecc., e per calcolare tali quantità sono necessari algoritmi molto sofisticati, con grande potenza e rapidità di calcolo.

A causa di tutte le peculiarità e problematiche aggiuntive che caratterizzano la costruzione su larga scala svolta direttamente in cantiere, la fabbricazione *in situ* rappresenta una sfida multidisciplinare e trasversale ancora più complicata da risolvere rispetto all'automatizzazione dei processi di prefabbricazione in stabilimento. In tale ambito, la soluzione finale risulterà da un compromesso derivante da molti input, requisiti e vincoli per cui è richiesta un'interazione e un'innovazione di numerosi settori attraverso vari tentativi e prove che richiedono un tempo di studio e ricerca prolungato e diverse fasi di maturazione. Per poter svolgere tali passi avanti, è necessario sperimentare in contesti e a scala reali, e possibilmente attraverso "prove ed errori", sebbene nel settore edilizio tali modalità risultino ulteriormente complicate dalle caratteristiche, vincoli, requisiti del settore, processo e prodotto. In generale è necessario generare un ecosistema aperto a livello di ricerca, sviluppo e innovazione, che sia condiviso tra tutti gli attori in modo che ciascuno possa contribuire attivamente nella direzione dello sviluppo della tecnologie IF, portando inoltre alla scalabilità delle tecnologie e ad un'apertura tale che permetta di non limitare le innovazioni al solo contesto accademico e le sperimentazioni nei cantieri edili ad eventi occasionali, permettendo infine di cambiare le dinamiche dell'innovazione nel settore delle costruzioni.

Grazie alle numerose ricerche in corso e agli attuali sviluppi tecnologici ed economici, si spera che in un prossimo futuro aumenteranno esponenzialmente le applicazioni costruttive tramite *3D Concrete Printing in situ* e che finalmente si sostituiranno progressivamente alle tecniche convenzionali

CAPITOLO 3

CONGLOMERATI CEMENTIZI SPECIALI: IL CALCESTRUZZO SCHIUMATO ESTRUDIBILE

3.1 CALCESTRUZZI ALLEGGERITI:

PROPRIETÀ E *MIX DESIGN* DEI CALCESTRUZZI SCHIUMATI

All'interno della grande famiglia dei calcestruzzi, i calcestruzzi alleggeriti si differenziano dalla versione ordinaria principalmente per la minore densità (compresa all'incirca tra 200 e 2000 kg/m³ e quindi inferiore ai 2000-2500 kg/m³ dei calcestruzzi tradizionali) e tale caratteristica si può ottenere attraverso due strategie: tramite sostituzione parziale o totale degli aggregati fini e grossi con aggregati leggeri (argilla espansa, pomice, perlite, vermiculite, polistirolo ecc.); oppure con l'introduzione di bolle d'aria, schiume o additivi in grado di generare un sistema di cavità nel conglomerato cementizio. In base al sistema e alla dimensione media dei pori, i calcestruzzi alleggeriti si possono dividere in due grandi famiglie: calcestruzzi aerati o schiumati, e microporizzati. I primi si caratterizzano per l'aggiunta al *mix* base di un'agente schiumogeno o espandente che produce una grande quantità di bolle macroscopiche permettendo al contempo di ottenere buone prestazioni meccaniche, mentre i secondi si caratterizzano per l'impiego di una malta di calce molto diluita che permette all'aria di entrare nell'impasto quando inizia il processo di presa. Negli ultimi anni l'impiego dei calcestruzzi alleggeriti si è esteso notevolmente grazie ad una serie di ragioni: l'aumento del rapporto resistenza/peso; lo sviluppo di nuovi materiali cementizi, agenti schiumogeni e *fillers* per specifiche applicazioni; l'implementazione dei metodi di produzione; e la maggior capacità di controllo sulle proprietà finali dei prodotti.

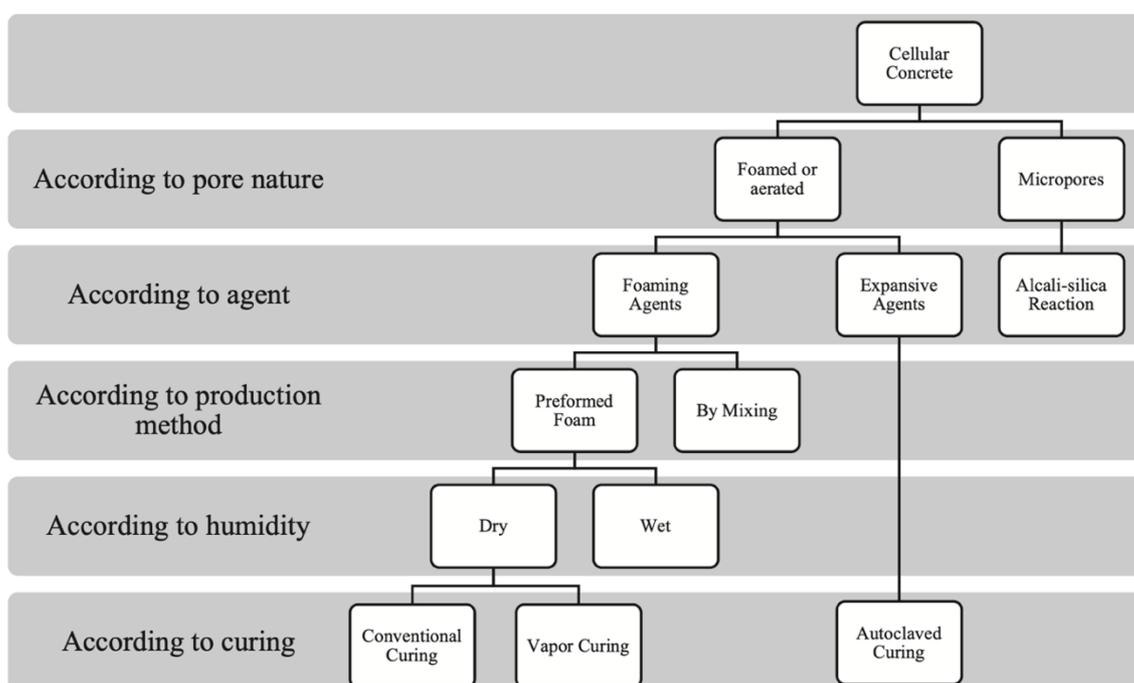


Figura 26 – Classificazione dei calcestruzzi alleggeriti [5].

Il calcestruzzo schiumato, brevettato nel 1923 e definito dall'*American Institute of Concrete (ACI)* come «*a mixture of cement, water and preformed foam*» [5], da tempo è ampiamente impiegato a livello internazionale nel settore delle costruzioni (ad esempio sotto forma di blocchi prefabbricati per le costruzioni o come alternativa ai riempimenti granulari con funzione isolante) ma negli ultimi anni ha suscitato un crescente interesse (anche per usi strutturali) grazie ad alcune caratteristiche che lo rendono più performante e multi-funzionale rispetto al calcestruzzo ordinario, quali:

- leggerezza (fino all'80% maggiore rispetto al calcestruzzo ordinario [5]), conseguente al minor peso specifico, che permette di ridurre la dimensione delle strutture resistenti di supporto e può essere particolarmente utile per non gravare eccessivamente su strutture esistenti in caso di ristrutturazioni e *retrofitting* sismico nelle aree vulnerabili.
- Ottimo isolamento termico e acustico, grazie alla presenza di bolle d'aria e soprattutto per impasti e prodotti a bassa densità (la conduttività termica può ridursi tra il 5% e il 30% rispetto al calcestruzzo ordinario [19]).
- Buona resistenza al fuoco.
- Maggiore lavorabilità.
- Convenienza economica, grazie all'uso di elementi costitutivi semplici, poco costosi e facilmente reperibili ovunque a livello locale. Per questi motivi, i calcestruzzi schiumati rappresentano la soluzione più economica nel settore dell'isolamento termico, acustico e di riempimento di cavità.

- Risparmio di materiale, grazie alla presenza di cavità che riducono la densità dell'elemento e al consumo minimo di aggregato.
- Potenziale utilizzo su larga scala di sottoprodotti derivanti da altre lavorazioni quali ceneri volanti, scorie d'altoforno ecc.
- Maggiore sostenibilità in termini sia ambientali (risparmio di risorse, impiego di sottoprodotti provenienti da altre lavorazioni) che economici (convenienza economica degli elementi costitutivi).

Sostanzialmente, il calcestruzzo schiumato è un materiale cementizio al cui interno, grazie all'aggiunta di un agente schiumogeno, rimangono intrappolate cavità d'aria (non comunicanti, di forma quasi sferica e diametro tra 0.1 e 1.0 mm [5]) che permettono di ottenere un solido poroso. Tramite un adeguato controllo del dosaggio di schiuma, la densità finale dei prodotti può variare all'interno di un ampio *range* da 200 a 2000 kg/m³ permettendo di realizzare elementi adatti ad un'ampia gamma di impieghi per svolgere funzioni sia strutturali (per composti *high density*, cioè con densità superiore a 1500 kg/m³) sia non strutturali (per composti *medium, low e ultra-low density*, cioè di densità inferiore a 1500 kg/m³, caratterizzati da prestazioni meccaniche ridotte) come nel caso di blocchi per tamponamenti o partizioni interne, pannelli di isolamento, pannelli di rivestimento, riempimenti di cavità vuote, massetti, sottofondi ecc.

Per realizzare gli elementi finali, come nel caso del calcestruzzo normale, il calcestruzzo schiumato dev'essere versato in casseforme sia in stabilimento (per elementi prefabbricati quali blocchi, pannelli ecc.) sia direttamente *in situ* (per realizzare elementi strutturali o secondari), e dopo un certo tempo (comparabile o anche maggiore rispetto al calcestruzzo normale) si arriverà all'indurimento dell'elemento stesso. Per la realizzazione *in situ* il calcestruzzo schiumato è particolarmente interessante perché il processo di aggiunta della schiuma è semplice da svolgere direttamente in cantiere ed il materiale risulta facile da pompare, lavorare e si auto-livella senza bisogno di compattazione e vibrazione: quest'ultimo aspetto è particolarmente importante poiché tale procedimento causerebbe il collasso della schiuma nell'impasto influenzando irrimediabilmente la densità finale dell'oggetto.

Composizione dell'impasto

Il calcestruzzo schiumato si ottiene a partire dagli stessi elementi base impiegati per il calcestruzzo convenzionale ma si differenzia da esso per l'aggiunta di agenti tensioattivi che, attraverso reazioni chimiche, producono bolle d'aria che rimangono inglobate nel conglomerato cementizio. L'impasto è costituito dai seguenti componenti: un legante (cemento Portland o altri tipi di cemento e sostituti), acqua, agente schiumogeno tensioattivo, eventuali aggregati, *fillers*, fibre e additivi. Andando più nel dettaglio:

- il cemento può essere in parte sostituito da sottoprodotti derivanti da altre lavorazioni come ad esempio ceneri volanti (30-70% in massa), scorie d'altoforno macinate (10-50% in massa), fumi di silice (fino al 10% in massa), o rifiuti da costruzione e demolizione, al fine di ridurre i costi, migliorare la consistenza del *mix*, ridurre il calore di idratazione ed aumentare la resistenza a compressione e flessione del prodotto finale [19].
- Il fabbisogno d'acqua della miscela dipende da molti fattori quali la composizione dell'impasto (rapporto acqua/cemento, proporzione tra ingredienti della miscela, presenza di additivi ecc.), le caratteristiche da ottenere nella miscela allo stato fresco (consistenza, stabilità, lavorabilità ecc.) e allo stato indurito (densità, resistenza meccanica, prestazioni termiche ecc.). In caso di insufficiente quantità di acqua l'impasto risulterebbe rigido causando la rottura delle bolle, mentre in caso di una quantità eccessiva di acqua si assisterebbe alla separazione tra impasto e aria (fenomeno dell'instabilità). Il rapporto acqua/cemento può variare da 0.4 a 1.25 (in assenza di superfluidificanti) ma è possibile ridurre il consumo di acqua attraverso un'accurata combinazione di superfluidificanti e *mix* minerali [19].
- Gli agenti schiumogeni tensioattivi, determinando la capacità di includere bolle d'aria nell'impasto cementizio, sono necessari per controllare la densità e la porosità dell'elemento finale, e di conseguenza le sue prestazioni. Gli agenti principalmente impiegati per la realizzazione del calcestruzzo schiumato possono essere di due origini: naturale (a base proteica) e sintetica. I primi generano le bolle per degradazione dell'agente stesso, dipendono molto dalla temperatura e dal PH della miscela, e generano una struttura porosa più resistente e serrata che determina migliori prestazioni meccaniche. I secondi invece lavorano riducendo la tensione superficiale dei liquidi, offrono una maggiore espansione permettendo di raggiungere densità inferiori, sono più economici, creano schiume più stabili, ma generano anche un ambiente chimico complesso per cui è essenziale porre attenzione alla compatibilità tra tensioattivo e tipo di cemento. Per generare l'impasto schiumato si possono impiegare due modalità differenti: l'utilizzo di schiuma preformata o il metodo della schiuma miscelata. Il primo consiste nel produrre separatamente l'impasto base (cemento, acqua, additivi ed eventuali aggregati) e la schiuma stabile (agente schiumogeno e acqua), che verrà aggiunta in un secondo momento e il tutto verrà ulteriormente miscelato per alcuni minuti fino ad ottenere un impasto alleggerito omogeneo. Il secondo metodo invece prevede che l'agente schiumogeno tensioattivo venga miscelato direttamente insieme a tutti gli altri ingredienti che compongono l'impasto per cui la schiuma si formerà durante il processo di miscelazione stesso. Solitamente è preferibile impiegare la schiuma preformata in modo da utilizzare una quantità inferiore di

agenti schiumogeni, avere una diretta e stretta relazione tra quantità di agente schiumogeno e contenuto d'aria della miscela, ed ottenere una schiuma di qualità più elevata. In ogni caso, dal momento della miscelazione, la schiuma dev'essere aggiunta all'impasto quanto prima e deve essere stabile per poter resistere alla pressione della malta fino a quando il cemento giunge alla presa iniziale e si comincia a costruire intorno alle bolle d'aria un forte scheletro di calcestruzzo che permette un corretto processo di indurimento. Data una certa densità finale, il fabbisogno di schiuma dipende essenzialmente dai materiali costituenti l'impasto (ad esempio dal tipo di cemento impiegato), dal rapporto acqua/cemento e dalla velocità di miscelazione (soprattutto per densità finali medie e basse); in generale occorre prestare particolare attenzione alle caratteristiche della schiuma poiché influenzano particolarmente la resistenza meccanica del prodotto finale.

- Gli aggregati sono solitamente costituiti da sabbia sottile e vengono impiegati esclusivamente per densità maggiori di 500 kg/m^3 poiché altrimenti si assisterebbe alla segregazione del composto per caduta degli aggregati sotto la forza di gravità. Anch'essi possono essere parzialmente sostituiti con aggregati fini alternativi quali ceneri volanti, calce, gesso, calcestruzzo frantumato derivante da rifiuti da costruzione e demolizione, ceneri da inceneritore, vetro riciclato, sabbia da fonderia o da cava, polistirolo espanso, PVC, *mix* di minerali ecc., al fine di ridurre la densità del calcestruzzo schiumato e/o per utilizzare materiali di scarto o riciclati in modo da ridurre il consumo di materie prime [19].
- L'aggiunta di fibre di origine sintetica (polipropilene, pva ecc.) o naturale (fibre minerali quali la fibra di vetro o fibre vegetali quali la fibra di palma, kenaf ecc.) in certe dimensioni e dosaggi (solitamente da 0.25 a 0.4 in volume del *mix* [5]) può migliorare il comportamento a taglio del calcestruzzo schiumato (raggiungendo i livelli del calcestruzzo normale), mitigare la fragilità, ridurre il problema delle fessurazioni da ritiro, ridurre il peso e il costo del prodotto finale. Un effetto negativo dell'impiego di fibre è rappresentato dalla possibilità che esse determinino una diminuzione della porosità dell'elemento per cui è essenziale porre attenzione nella scelta del tipo, dimensione e quantità di fibre da impiegare.
- L'aggiunta di additivi dev'essere ponderata ponendo particolare attenzione alla compatibilità con l'agente schiumogeno impiegato e con il sistema di reazioni chimiche che permettono di intrappolare con successo l'aria all'interno del prodotto.

Per produrre una miscela stabile è necessario considerare vari fattori, quali: la progettazione del *mix design* a livello sia di ingredienti (ad esempio eventuale impiego di sostituzioni o aggiunte) che di proporzioni (ad esempio rapporto acqua/cemento), l'agente schiumogeno impiegato, il metodo di preparazione della schiuma e la modalità di realizzazione dell'impasto in termini di strumenti e procedure impiegate per la miscelazione; tutti questi aspetti influiscono sulla generazione di

un'adeguata porosità con distribuzione uniforme dei vuoti d'aria e permettono di avere un controllo sulle proprietà della miscela allo stato fresco (a livello di consistenza, stabilità, lavorabilità, ritiro ecc.) e, di conseguenza, sulle proprietà e le prestazioni del prodotto una volta indurito (densità, resistenza meccanica, durabilità, prestazioni termiche, acustiche, di resistenza al fuoco ecc.). Per progettare e proporzionare l'impasto non vi è un metodo di dosaggio standard ma solitamente si parte dalla densità e dai requisiti di resistenza meccanica del prodotto finale (derivanti dalla funzione che esso dovrà svolgere) e sulla base di questi dati si determinano le quantità e le proporzioni tra gli ingredienti (solitamente, a parità di rapporto acqua/cemento, si varia il quantitativo di schiuma per ottenere densità finali differenti). In generale, la combinazione ottimale di resistenza, densità, lavorabilità e costo si può ottenere variando il contenuto di schiuma, il rapporto acqua/cemento dell'impasto e, se presenti, il tipo di fibre impiegate.

Densità, resistenza meccanica e instabilità

Il quantitativo d'aria che può essere incluso nell'impasto può variare tra il 30 e il 60% in volume nel caso di impieghi strutturali e tra il 70 e l'85% in volume in calcestruzzi con funzione di isolamento termico o di elemento secondario (funzione non portante) [5]. La leggerezza che contraddistingue intrinsecamente questo tipo di materiale, oltre a determinare una serie di caratteristiche vantaggiose, porta anche a due principali problemi da affrontare: l'inferiore resistenza meccanica e possibili fenomeni di instabilità dell'impasto (soprattutto per densità inferiori a 500 kg/m^3).

Le caratteristiche meccaniche dipendono essenzialmente da alcuni fattori quali: densità finale, agente schiumogeno tensioattivo, condizione di indurimento, tipo di cemento, rapporto acqua/cemento, rapporto aria/cemento ed eventuale presenza di fibre o altri tipi di rinforzi. A tal proposito sono stati svolti vari studi finalizzati ad un miglioramento della resistenza meccanica attraverso ad esempio l'aggiunta di ceneri volanti o fumi di silice per migliorare la resistenza a compressione e flessione, l'aggiunta di *biochar* per migliorare la resistenza a frattura, oppure l'incorporazione di fibre corte o l'impiego di rinforzi realizzati tramite griglie bidirezionali in fibre per incrementare la resistenza a flessione. Altri studi propongono e sperimentano anche il rinforzo tramite nanofibre. Per quanto riguarda le condizioni di indurimento, esse influenzano il processo di idratazione andando ad avere un effetto sulla resistenza finale dell'elemento.

Un fenomeno particolarmente importante che caratterizza i calcestruzzi schiumati, ed in particolare gli *ultra-low density* (cioè con densità finale inferiore a 500 kg/m^3), è l'instabilità del composto, che consiste nella segregazione del *mix* fresco con separazione tra solidi ed aria e che causa la completa dispersione di quest'ultima nell'ambiente rendendo inadeguato l'impasto.



Figura 27 – Esempio di instabilità del mix fresco sperimentata in laboratorio in impasti ultra-low density di calcestruzzo schiumato. Partendo da sinistra la densità finale del mix è pari a 300, 200 e 150 kg/m³ [14].

Tale fenomeno può avvenire quasi immediatamente o, più spesso, dopo un certo tempo dall'inizio della miscelazione in quanto la formazione definitiva delle bolle nell'impasto non avviene istantaneamente al momento dell'incorporazione della schiuma ma si svolge nel tempo attraverso un processo dinamico basato essenzialmente sulla ricerca di un equilibrio all'interno del sistema di forze cui ciascuna bolla è soggetta.

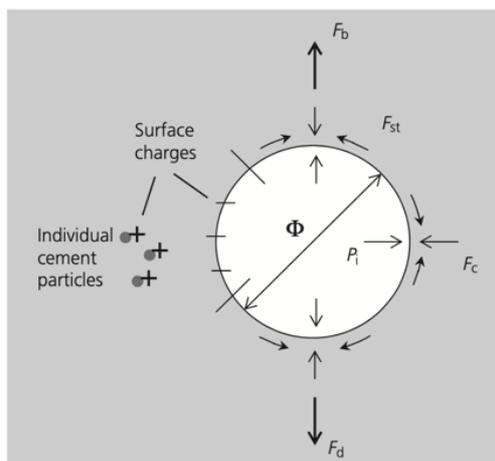


Figura 28 – Rappresentazione schematica del sistema di forze agente su una singola bolla d'aria all'interno di un impasto fresco di calcestruzzo schiumato [14].

In generale, l'accrescimento dimensionale delle bolle all'interno dell'impasto dipende essenzialmente da due fattori: dalla forza di confinamento cui sono soggette, che può generare una differenza di pressione tra esterno e interno della bolla con conseguente accrescimento al fine di ricercare un equilibrio, e dalla naturale variabilità dimensionale che caratterizza le bolle e che facilita fenomeni di diffusione del gas dalle bolle più piccole verso quelle più grandi. La forza di confinamento dipende da: densità del *mix* fresco, aggregati impiegati (sabbia, ceneri volanti ecc.), tipo di cemento, e caratteristiche reologiche di coesione e viscosità dell'impasto. La dimensione delle bolle invece dipende da: densità, rapporto acqua/cemento, tipo di cemento e tipo di *fillers*

impiegati. Il fenomeno dell'instabilità è un processo irreversibile che si presenta potenzialmente in tutti i calcestruzzi schiumati ma è particolarmente problematico negli *ultra-low density* perché la ridotta densità, la mancanza di aggregati/*fillers* e la diminuzione del contenuto di acqua e di cemento, portano ad una notevole riduzione della forza di confinamento ed alla maggior presenza di bolle (più grandi e più vicine) e di micro-bolle nei muri divisorii tra le bolle stesse: tutti questi fattori aumentano notevolmente la probabilità del verificarsi di fenomeni di instabilità poiché il processo di diffusione del gas allo stato fresco è facilitato e continua rapidamente senza incontrare opposizione fino a quando le bolle diventano talmente grandi da subire una forza di galleggiamento superiore alla forza di confinamento e di conseguenza fino a giungere in superficie disperdendo l'aria nell'ambiente. Poiché il fenomeno dell'instabilità si arresta solamente quando il *mix* indurisce, per evitare che si presenti è necessario che l'indurimento avvenga prima che le bolle diventino sufficientemente grandi da galleggiare. Nei calcestruzzi a densità maggiore ciò si raggiunge facilmente durante il tipico processo di indurimento del cemento Portland, mentre nei calcestruzzi *ultra-low density* uno dei metodi studiati a livello di ricerca consiste nella sostituzione di parte del cemento Portland con un quantitativo di cemento calcio sulfoalluminato (CSA) compatibile in modo da accelerare il processo di indurimento. In tale studio sperimentale pubblicato nel 2015 [14], infatti, è emerso che l'aggiunta di CSA in sostituzione parziale del cemento Portland (fino ad un massimo del 10% in massa) permette di ottenere prodotti con densità finale fino a 150 kg/m^3 senza incorrere in fenomeni di instabilità. Non è invece possibile impiegare percentuali maggiori di CSA in quanto il tempo prima dell'inizio dell'indurimento risulterebbe insufficiente per incorporare la schiuma e depositare il calcestruzzo schiumato: infatti con una sostituzione pari al 15% in massa vi sarebbero solo 2 minuti di tempo prima dell'inizio dell'indurimento, mentre con il 10% vi sono circa 20 minuti di tempo. Inoltre, alcuni studi hanno provato che la presenza di ceneri volanti nel *mix* rende le bolle più piccole a parità di densità dell'impasto poiché aumenta la forza di confinamento grazie alla creazione di una sorta di barriera intorno alle bolle stesse.

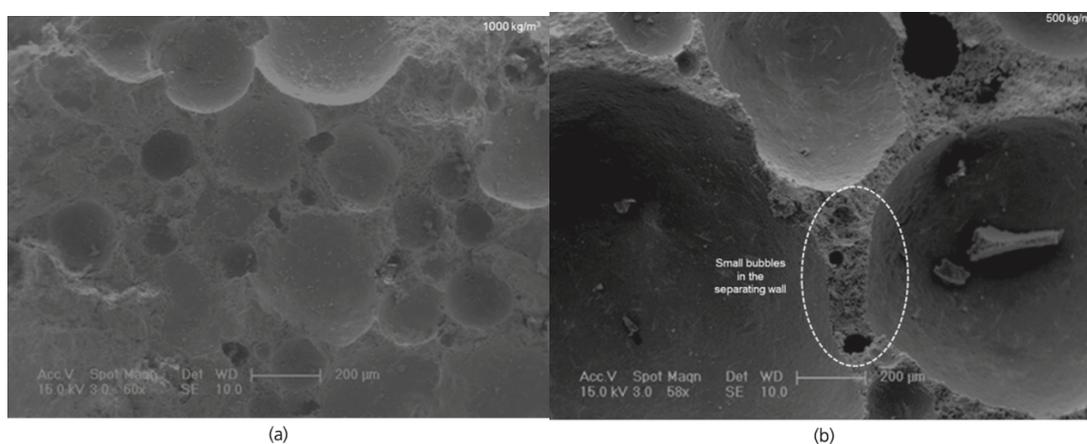


Figura 29 – Confronto tra immagini relative a calcestruzzi schiumati ad alta (sinistra) e bassa (destra) densità. In questo secondo caso si evidenzia la dimensione maggiore delle bolle e la presenza di micro-bolle all'interno delle pareti divisorie tra bolle [14].

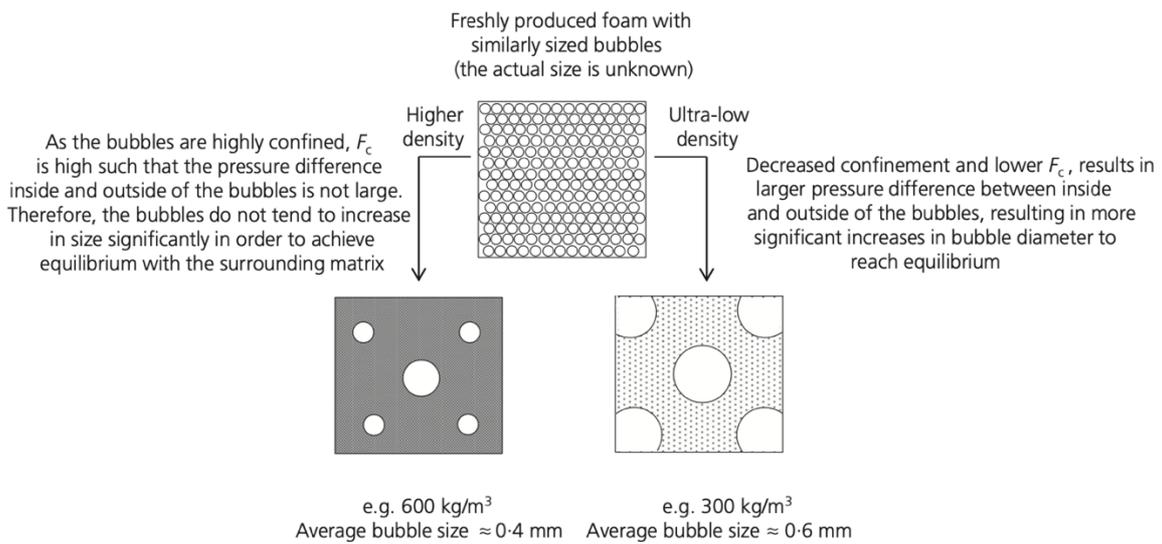


Figura 30 – Rappresentazione schematica di confronto a livello di dimensione delle bolle tra impasti di calcestruzzo schiumato a densità finale 600 e 300 kg/m³ [14].

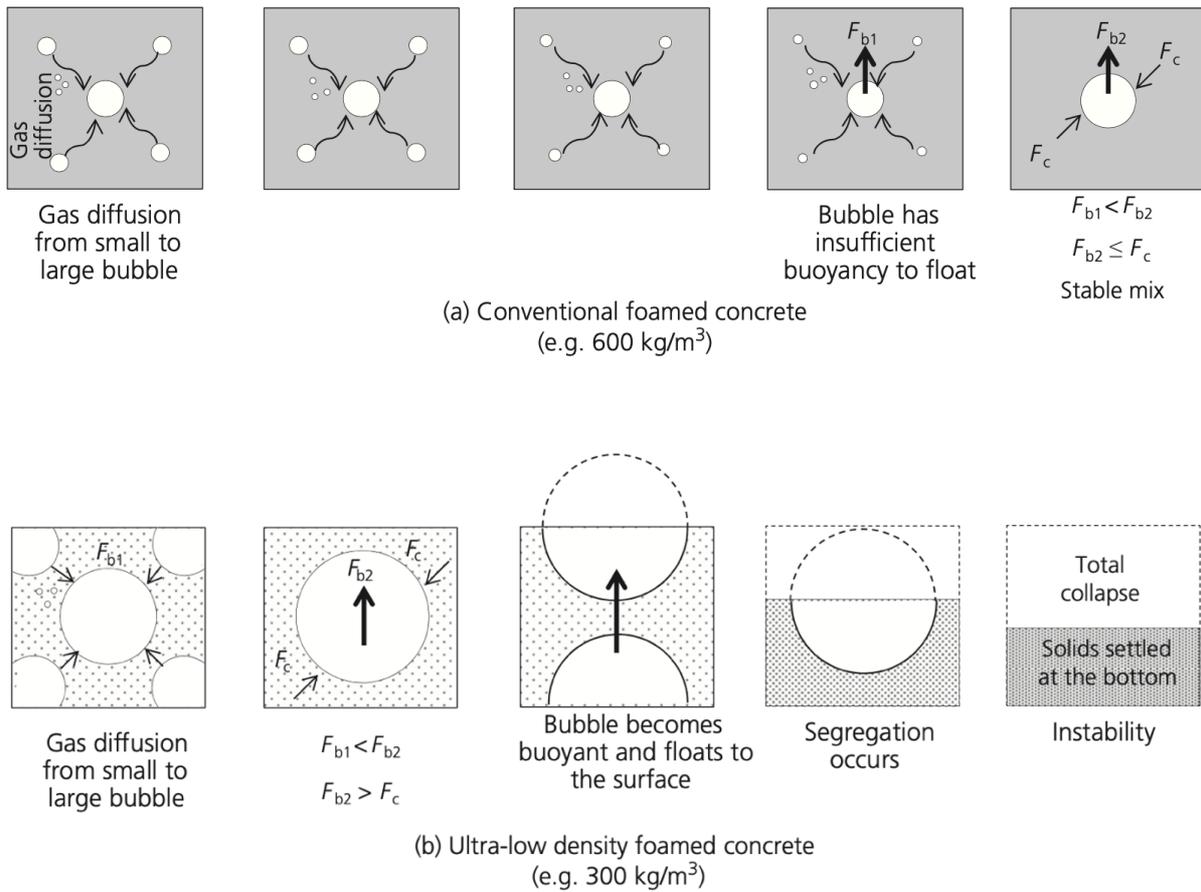


Figura 31 – Rappresentazione schematica del processo di diffusione del gas in impasti di calcestruzzo schiumato a densità finale 600 (sopra) e 300 kg/m³ (sotto). In quest'ultimo caso si evidenzia il fenomeno di instabilità che porta alla segregazione del composto [14].

3.2 CALCESTRUZZO SCHIUMATO ESTRUDIBILE

3.2.1 *Mix design* e caratteristiche del materiale allo stato fresco

Rispetto al classico calcestruzzo schiumato, la versione estrudibile si caratterizza per un *mix design* differente che prevede l'aggiunta di un additivo specifico in grado di offrire all'impasto una caratteristica essenziale, la stabilità dimensionale allo stato fresco (*green strength*), che risulta necessaria per mantenere la forma sotto il peso proprio e degli strati successivamente depositati durante un processo di costruzione automatizzata realizzato tramite estrusione e in assenza di casseforme quale il *3D Concrete Printing*. In particolare, per garantire i requisiti di estrudibilità e stampabilità del materiale, all'impasto tipico del classico calcestruzzo schiumato viene aggiunto (prima di unire la schiuma preformata) un additivo VEA (*Viscosity Enhancing Agent*), agente chimico che modifica la reologia del composto, aumentandone significativamente la coesione e la viscosità senza inficiarne la lavorabilità e la pompabilità, e che allo stesso tempo risulta utile per stabilizzare le bolle all'interno della matrice cementizia. Il VEA impiegato per il calcestruzzo schiumato estrudibile è differente rispetto a quello impiegabile per l'estrusione di un calcestruzzo normale non schiumato in quanto quest'ultimo provocherebbe fenomeni di instabilità e la conseguente perdita dell'aria dall'impasto. L'aumentata viscosità prodotta dal VEA nei calcestruzzi schiumati estrudibili, da una parte, riduce la quantità di aria che può essere trattenuta nell'impasto mentre, dall'altra, contribuisce ad impedire la perdita delle bolle che si sono già formate in quanto risultano soggette a forze di confinamento maggiori in impasti più consistenti. La maggiore difficoltà nel trattenere l'aria all'interno della matrice cementizia si risolve impiegando un maggior quantitativo di schiuma per cui il fabbisogno di schiuma a parità di densità finale nel caso del calcestruzzo schiumato estrudibile risulta maggiore rispetto al classico calcestruzzo schiumato.

Consistenza e green strength

Chiaramente l'aggiunta di un elemento a livello di *mix design* comporta delle conseguenze sulle caratteristiche del materiale sia allo stato fresco che allo stato indurito. Allo stato fresco, le caratteristiche più evidenti che differenziano il calcestruzzo schiumato estrudibile dalla versione schiumata classica riguardano in particolare due aspetti: la consistenza dell'impasto e la capacità di sviluppare una tempestiva *green strength* in seguito all'estrusione. Entrambi gli aspetti derivano chiaramente dal mutato processo di realizzazione degli elementi finali che richiede altri requisiti per poter essere svolto con successo. In particolare, la *green strength* si ottiene grazie ad un'elevata tissetropia del materiale che deriva dalla presenza del VEA e caratterizza necessariamente tutti i materiali estrudibili. Tale caratteristica costituisce una proprietà essenziale poiché permette al materiale a riposo di costruire una struttura interna che, con il passare del tempo, aumenta la resistenza dell'impasto e ne garantisce la stabilità dimensionale allo stato fresco. In seguito

all'estrusione infatti il VEA viene in gran parte assorbito dalle particelle di cemento e agisce come ponte di connessione tra particelle adiacenti, dando così origine a tale processo. La capacità di un materiale schiumato di generare una tempestiva *green strength* dipende inoltre dalla dimensione delle bolle presenti nell'impasto: la dimensione ridotta delle bolle che caratterizza il calcestruzzo schiumato estrudibile, che deriva dall'elevata coesione che caratterizza l'impasto per la presenza del VEA, promuove ed accelera ulteriormente la strutturazione interna (già promossa dal VEA stesso). Per valutare la *green strength* del calcestruzzo schiumato estrudibile è necessario svolgere un test di estrusione poiché lo *slump test* impiegato per il classico calcestruzzo schiumato potrebbe risultare inaffidabile soprattutto a densità basse in quanto, a causa della leggerezza dell'impasto e dell'alta coesione, il materiale potrebbe non scivolare dal cono.



Figura 32 – Confronto qualitativo a livello di consistenza, coesione e viscosità allo stato fresco tra un impasto di calcestruzzo schiumato estrudibile (sopra) e uno di calcestruzzo schiumato classico (sotto) realizzati entrambi per ottenere una densità finale pari a 600 kg/m^3 [9].

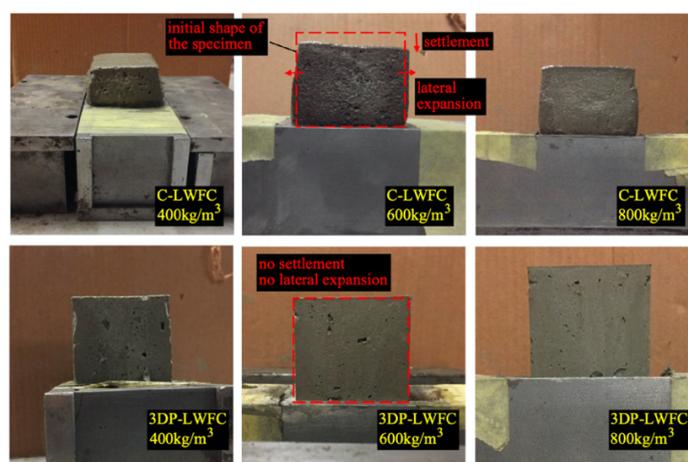


Figura 33 – Confronto a livello di configurazione finale in seguito a test di estrusione e dopo un tempo di riposo di 5 minuti tra impasti a differenti densità realizzati con calcestruzzo schiumato classico (sopra) e con calcestruzzo schiumato estrudibile (sotto). Nel secondo caso si assiste al fenomeno della *green strength* con il conseguente mantenimento della forma in seguito all'estrusione [10].

3.2.2 Caratteristiche del materiale allo stato indurito

Ogni modifica effettuata a livello di *mix design*, come l'aggiunta dell'additivo VEA, influenza le proprietà del materiale allo stato fresco e di conseguenza anche quelle allo stato indurito. Quest'ultime dipendono, infatti, da molti fattori quali il *mix design*, le procedure di miscelazione (ad esempio il tipo di miscelatore e la velocità di miscelazione), le proprietà allo stato fresco e le condizioni di indurimento. In tale contesto, dal confronto con il classico calcestruzzo schiumato emergono alcune differenze riguardanti in particolare la struttura dei pori, la resistenza meccanica e la conducibilità termica.

Dimensione e distribuzione dei pori

Attraverso l'impiego di sistemi digitali, che prevedono l'utilizzo di appositi software per l'analisi di immagini effettuate al microscopio e raffiguranti sezioni trasversali di elementi in calcestruzzo schiumato, è possibile analizzare nel dettaglio vari parametri relativi alle cavità d'aria presenti nel materiale porizzato in seguito all'indurimento (quali volume, dimensioni, distribuzione delle dimensioni, forma e spaziatura tra i vuoti d'aria). Tali aspetti sono estremamente significativi per una serie di motivi: per comprendere l'efficacia della miscelazione e del processo estrusivo, e, di conseguenza, per confermare la validità di prodotti realizzati con tale materiale; per la stretta dipendenza che intercorre tra le caratteristiche dei pori e le prestazioni finali degli elementi estrusi in termini di peso, resistenza meccanica, proprietà termiche, acustiche, durabilità ecc.; per capire la rappresentatività di un provino rispetto all'intero elemento in ottica di valutazione di prestazioni tramite test; per comprendere eventuali modifiche da effettuare a livello di *mix design* o di processo; per individuare i limiti di un materiale (ad esempio la densità minima realizzabile a parità di materiale e processo).

Attraverso l'analisi di immagini effettuate al microscopio su alcuni provini realizzati durante uno studio sperimentale di confronto tra calcestruzzo schiumato classico ed estrudibile [10] è stato evidenziato che in quest'ultimo, a parità di processo di miscelazione, densità finale e condizione di indurimento, le bolle d'aria risultano più piccole e più omogeneamente distribuite all'interno della matrice cementizia rispetto al classico calcestruzzo schiumato. Il medesimo risultato è emerso anche durante un altro studio basato sul confronto tra calcestruzzo aerato autoclavato e calcestruzzo schiumato estrudibile [12]. La ridotta dimensione delle bolle e la distribuzione omogenea delle stesse risultano particolarmente significative per gli effetti positivi a livello di prestazioni in termini di aumento della resistenza meccanica e di riduzione della conducibilità termica degli elementi finali [19]. Il diametro delle bolle può essere ulteriormente ridotto, ottenendo di conseguenza ulteriori benefici prestazionali, aumentando la velocità di miscelazione [10].

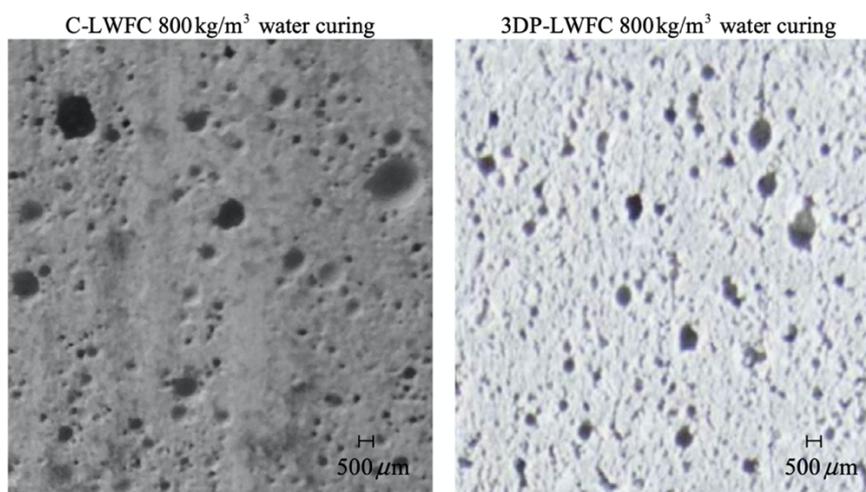


Figura 34 – Confronto a livello di dimensione e distribuzione dei pori tra sezioni trasversali effettuate su un elemento in calcestruzzo schiumato (sinistra) ed uno in calcestruzzo schiumato estrudibile (destra) a parità di densità finale, velocità di miscelazione e condizione di indurimento. Nella seconda immagine si nota che la dimensione dei vuoti è inferiore e la distribuzione risulta più omogenea [10].

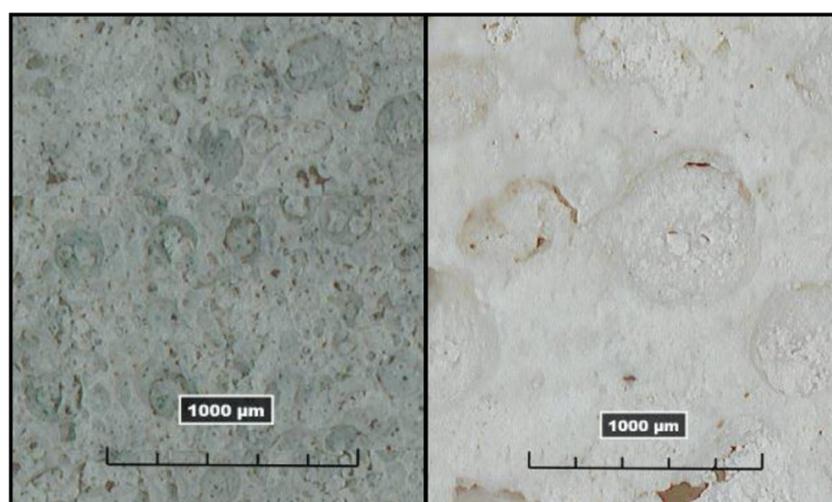


Figura 35 – Confronto a livello di dimensione e distribuzione dei pori tra sezioni trasversali effettuate su un elemento in calcestruzzo schiumato estrudibile (sinistra) ed uno in calcestruzzo aerato autoclavato (destra) a parità di densità finale. Nella prima immagine si nota che la dimensione dei pori è inferiore e la distribuzione risulta più omogenea [12].

Resistenza a compressione

A parità di condizioni (densità finale, agente schiumogeno, condizione di indurimento, tipo di cemento e rapporto acqua/cemento) la resistenza a compressione risulta leggermente maggiore nel calcestruzzo schiumato estrudibile rispetto alla sua versione classica. Tale aumento si può attribuire alla distribuzione più omogenea e dalla dimensione più ridotta dei pori.

Inoltre, in uno studio sperimentale [12] svolto su tre campioni di densità finale pari a 400, 600 e 800 kg/m³, realizzati con cemento CEM II A-L 42.5 R e rapporto acqua/cemento pari a 0.3, sono emerse alcune interessanti osservazioni (valide esclusivamente per il *range* di densità considerato):

- l'incremento della resistenza a compressione con l'aumento della densità presenta un andamento quasi lineare.

- La resistenza a compressione è influenzata notevolmente dalle condizioni di indurimento del provino e, per tutte le densità analizzate, i valori più elevati si riscontrano nel caso di indurimento nel cellophane, quelli peggiori si riferiscono all'indurimento all'aria e quelli intermedi riguardano l'indurimento in acqua.

Resistenza indiretta a trazione

Per quanto riguarda la resistenza a trazione, nel medesimo studio sperimentale [8] è emerso che:

- l'incremento della resistenza a trazione con l'aumento della densità non presenta un andamento lineare in quanto risulta molto più pronunciato nel passaggio da 400 a 600 kg/m³ rispetto a quello tra 600 e 800 kg/m³.
- A differenza della resistenza a compressione, la resistenza a trazione non è influenzata dalla condizione di indurimento, mentre un aspetto che incide notevolmente è l'organizzazione della microstruttura nella zona di collasso.

Conduttività termica

Ovviamente i valori di conduttività termica diminuiscono sensibilmente al diminuire della densità del materiale in quanto vi è una maggior presenza d'aria. Inoltre, a parità di densità, il calcestruzzo schiumato estrudibile si caratterizza per valori di conduttività termica notevolmente inferiori rispetto al classico calcestruzzo schiumato e anche rispetto al calcestruzzo aerato autoclavato: questa riduzione è dovuta essenzialmente alla dimensione inferiore e alla distribuzione più omogenea delle bolle che caratterizzano il calcestruzzo schiumato estrudibile rispetto agli altri due tipi di calcestruzzo.

3.3_ POTENZIALITÀ NEL SETTORE DELLE COSTRUZIONI

Il calcestruzzo schiumato estrudibile rappresenta un'opportunità particolarmente interessante per il settore delle costruzioni in vista di una futura automatizzazione dei processi produttivi e della conseguente diffusione di processi estrusivi che impiegano materiali a base cementizia quali il *3D Concrete Printing*. In tale contesto, in aggiunta ai rilevanti e numerosi vantaggi derivanti potenzialmente dall'impiego dell'automazione (si veda 2.4), l'utilizzo di questo materiale offre un valore aggiunto rispetto agli altri materiali cementizi estrudibili (non schiumati) grazie ai notevoli benefici tipici dei calcestruzzi alleggeriti con schiuma (si veda 3.1) cui si aggiungono quelli derivanti dall'impiego della versione estrudibile degli stessi (si veda 3.2.2). L'impiego di tale materiale risulta particolarmente interessante (a livello economico, prestazionale, di eco-sostenibilità, flessibilità ecc.) sia per la produzione di elementi in stabilimento tramite prefabbricazione (ad esempio blocchi, lastre, pannelli alleggeriti ecc.) che per la costruzione di elementi, porzioni o interi edifici direttamente *in situ* (ad esempio si possono realizzare chiusure ad elevata efficienza energetica quali tamponature, partizioni, solai, coperture ecc.). Infatti, grazie all'enorme flessibilità che lo contraddistingue, il calcestruzzo schiumato estrudibile permette di realizzare tutti gli elementi costruttivi di un edificio senza dover ricorrere ad altri materiali per espletare ad esempio le funzioni portanti, di isolamento termico e acustico. Nel contesto del gran numero di applicazioni di *3D Concrete Printing* che impiegano materiali con prestazioni termiche ed acustiche inadeguate, l'utilizzo del calcestruzzo schiumato estrudibile, con le sue molteplici proprietà ed elevate prestazioni, rappresenta un evidente valore aggiunto che permette di giungere alla realizzazione di elementi di qualità, adatti ad applicazioni molto varie e in grado di suscitare un grande interesse per il mercato. Le caratteristiche più interessanti per il settore delle costruzioni, che risultano valide in generale per i calcestruzzi alleggeriti ma che assumono un ulteriore interesse nel caso di impiego della versione estrudibile in processi automatizzati, sono le seguenti:

- *la multifunzionalità racchiudibile in un unico elemento costituito interamente da matrice cementizia.*

Mentre la concezione tradizionale di multifunzionalità si basa sulla stratificazione tramite accoppiamento (solitamente irreversibile per mezzo di incollaggio) di materiali differenti adibiti ciascuno ad un'unica funzione, l'impiego del calcestruzzo schiumato permette ad un unico elemento di svolgere un'ampia gamma di funzioni. Ad esempio, è possibile impiegare un unico elemento per le chiusure o in generale per gli elementi di separazione tra ambienti che necessitano, oltre che di una separazione fisica, anche di altre funzioni come isolamento termico ed acustico. L'impiego di un materiale che, a seconda delle necessità, può essere progettato e declinato a differenti densità comprese all'interno di un ampio *range* (da 200 a 2000 kg/m³) prevedendo anche la possibilità di realizzare elementi ibridi co-estrusi caratterizzati da densità variabile nello spessore (facilmente ottenibile variando

esclusivamente il quantitativo di schiuma incorporato nell'impasto di base), rappresenta un elemento di grande innovazione nel panorama dei prodotti destinati al settore delle costruzioni. Tale aspetto permette infatti di realizzare elementi che simultaneamente presentano prestazioni che solitamente non coesistono in un unico elemento quali ad esempio ottimo isolamento termico e buonissime proprietà meccaniche. In tale contesto, attraverso la progettazione di numero, spessore e densità dei diversi strati costituenti l'elemento si possono soddisfare in modo ottimale i requisiti di ciascun caso specifico attraverso la realizzazione di un prodotto che allo stato indurito risulterà monolitico, multifunzionale e caratterizzato da un'unica natura (cementizia). Quest'ultimo aspetto è particolarmente rilevante per gli scenari di fine vita dell'elemento stesso ed evita la problematicità che caratterizza solitamente le stratificazioni multifunzionali tipiche dei componenti tradizionali.

- *La realizzabilità di elementi a base cementizia a densità anche molto basse (rispetto soprattutto al classico calcestruzzo ma anche ad altre tipologie di calcestruzzi alleggeriti) con tutti i benefici che ciò comporta.*

Attualmente, a causa della crescente pressione per tecnologie costruttive e materiali più sostenibili in termini di alleggerimento delle strutture, conservazione dell'energia, riduzione ed efficienza nell'uso di risorse, e riduzione dell'impatto del rumore ambientale, si è presentata la necessità di indirizzarsi verso materiali cementizi alleggeriti a densità *ultra-low* (al momento fino a 150 kg/m³). Ad oggi questo tipo di materiale è infatti particolarmente richiesto in molti settori tra cui quello delle costruzioni per assolvere ad una serie di funzioni all'interno della costruzione.

Ad oggi, le più interessanti applicazioni che potrebbero avere i calcestruzzi schiumati estrudibili nel settore delle costruzioni riguardano la realizzazione di:

- elementi prefabbricati alleggeriti a matrice cementizia, ad alta efficienza energetica ed eventualmente a densità variabile (per realizzare ad esempio elementi ibridi multistrato e multifunzione).
- Interventi di nuova costruzione tramite *3D Concrete Printing* direttamente *in situ*.
- Interventi sull'esistente a scopo di efficientamento energetico (ad esempio nel caso di elementi energeticamente efficienti, multifunzionali e stratificati a densità variabile da impiegare con funzione di cappotto termico), ristrutturazione e *retrofitting* sismico nelle aree vulnerabili (grazie alla leggerezza e alle molteplici ed elevate prestazioni offerte da tale materiale in termini di resistenza meccanica, isolamento termico e acustico, resistenza al fuoco ecc.).

3.4_ RICERCA

Il calcestruzzo schiumato estrudibile è un materiale innovativo sviluppato recentemente per cui ad oggi è ancora oggetto di ricerca e sperimentazione e, nonostante le enormi potenzialità (si veda 3.3), non ha ancora conosciuto un'ampia diffusione a livello di mercato, come del resto vale anche per le tecnologie di automazione per il settore edilizio. Nel contesto dei materiali cementizi estrudibili, l'elemento particolarmente innovativo che contraddistingue tale materiale è rappresentato dalla possibilità di ottenere prodotti a densità variabile all'interno di un ampio *range*, da 200 a 2000 kg/m³. A proposito di densità, in particolare risulta interessante l'ambito degli *ultra-low density* poiché è raro riuscire a raggiungere densità così basse in materiali cementizi in grado di offrire al contempo, oltre alle ottime prestazioni associate tipicamente alla leggerezza e alla presenza di cavità d'aria quali isolamento termico e acustico, anche prestazioni che solitamente risultano in antitesi a tale caratteristica, come le ottime prestazioni meccaniche.

All'interno di un ambito in crescente sviluppo e che assumerà un ruolo sempre più importante nel prossimo futuro nel settore delle costruzioni, quale quello dell'*Additive Manufacturing* ed in particolare del *3D Concrete Printing*, la ricerca e la sperimentazione sul calcestruzzo schiumato estrudibile assume un'importanza centrale al fine di conoscerne, analizzarne e, ove possibile, migliorarne le prestazioni tecniche, l'eco-sostenibilità e l'efficienza, in vista della futura commercializzazione. Per giungere a tali risultati però è necessario provare innumerevoli varianti, aggiunte e sostituzioni per conoscere il materiale a 360° sia nelle proprietà che nelle potenzialità, sfide e limiti. Nel contesto di un materiale da impiegare in processi di estrusione, chiaramente è necessario svolgere sia sperimentazioni in laboratorio, per conoscere il materiale, che simulazioni di estrusione a scala reale e in ambiente esterno, impiegando le tecnologie di robotizzazione attualmente in commercio, per testare, conoscere, poter adattare e migliorare i processi e i prodotti finali sulla base dei risultati ottenuti. In generale, a livello di ricerca e sperimentazione, per giungere alla commercializzazione di prodotti prefabbricati e di qualità in calcestruzzo schiumato estrudibile e per poter svolgere applicazioni reali di *3D Concrete Printing* direttamente *in situ* in ottica di *Industria delle Costruzioni 4.0*, è necessario approfondire ancora alcuni aspetti (che in parte costituiscono gli attuali limiti e sfide riguardanti in generale i processi di automazione, si veda 2.4), quali:

- *caratterizzazione reologica e controllo delle proprietà allo stato fresco (pompabilità, estrudibilità e stampabilità).*

Un ambito in cui mancano ancora conoscenze approfondite riguarda il comportamento reologico dei materiali estrudibili ed in particolare le relazioni che intercorrono tra i vari parametri reologici. L'interesse per tali aspetti è giustificato dall'importanza cruciale che le proprietà allo stato fresco ricoprono al fine di ottenere prodotti con caratteristiche ottimali allo stato indurito. La presenza di vari studi a riguardo dimostra l'effettivo interesse

crescente che il *3D Concrete Printing* sta assumendo nel settore delle costruzioni. A livello di stato fresco, inoltre, sarebbe opportuno stabilire una standardizzazione che permetta di definire a livello normativo le prove per la valutazione delle proprietà reologiche dei materiali estrudibili.

- *Controllo sulle proprietà allo stato indurito (dimensione e distribuzione dei pori, adesione tra strati, densità costante del filamento, fessurazioni da ritiro, durabilità, conformità geometrica, estetica, prestazioni tecniche).*

Un prodotto di qualità e competitivo a livello di mercato deve necessariamente presentare ottime proprietà allo stato indurito. Tra queste proprietà, un campo di ricerca che interessa particolarmente il calcestruzzo schiumato estrudibile e su cui stanno lavorando molti ricercatori riguarda l'adesione tra strati sovrapposti caratterizzati da differenti densità al fine di evitare il problema dei *cold joints*: in tale ambito, oltre alle caratteristiche del materiale allo stato fresco, incide anche il processo di estrusione in quanto risulta essenziale impostare correttamente alcune variabili di processo, quali il percorso dell'ugello e il *layer cycle-time*, per poter evitare tale problematica. In generale, per tutte le caratteristiche allo stato indurito, il processo di estrusione cui viene sottoposto il materiale assume un'importanza centrale in quanto ha un'incidenza rilevante sul risultato ottenuto.

- *Test su nuovi mix design (a livello sia di ingredienti che di proporzioni).*

Agendo a livello di *mix design* potenzialmente vi sarebbero infinite variazioni da testare per raggiungere alcuni obiettivi quali ottenere una conoscenza il più possibile completa del materiale, migliorare la *performance* tecnica e ambientale del materiale e dei prodotti, e aumentare ulteriormente il *range* di densità ottenibili con il calcestruzzo schiumato estrudibile. Tramite la ricerca è opportuno individuare, progressivamente e secondo una scala di priorità, quali modifiche apportare e in che quantità al fine di approfondire per ciascuna di esse tutti gli aspetti più rilevanti, tenendo presente che ogni minima modifica a livello di *mix design* comporta la variazione delle caratteristiche sia allo stato fresco che allo stato indurito. A livello di ingredienti vi sono varie aggiunte o sostituzioni che si potrebbero testare quali ad esempio l'impiego di nuovi agenti tensioattivi, di nuove aggiunte minerali provenienti anche da scarti di altre lavorazioni (scorie d'altoforno, fumo di silice ecc.), di nuovi additivi ecc.

- *Migliorare le prestazioni meccaniche attraverso nuovi mix design e/o diminuendo la dimensione delle bolle d'aria.*

Un ambito di studio particolarmente interessante riguarda l'incremento delle prestazioni meccaniche del calcestruzzo schiumato estrudibile poiché, per la presenza di cavità d'aria, tale materiale solitamente si caratterizza per *performance* meccaniche non eccellenti,

soprattutto alle densità più basse. In tale ambito, a livello di ricerca si stanno studiando possibili aggiunte o sostituzioni all'interno del *mix design* quali ad esempio l'impiego di fumo di silice (particolarmente interessante per la ridotta dimensione delle particelle e per la naturale attività pozzolanica che lo caratterizza), nano materiali, nuovi tipi di agenti tensioattivi, nuovi additivi, griglie e fibre di vario tipo e dimensione ecc. Un'altra strategia che potrebbe risultare valida per incrementare le prestazioni meccaniche del calcestruzzo schiumato estrudibile, senza dover intervenire sul *mix design* dell'impasto ma al massimo impiegando solo un maggior quantitativo di schiuma, consiste nell'aumentare la velocità di miscelazione dell'impasto per formare bolle d'aria di dimensione inferiore da cui derivano effetti positivi a livello sia di resistenza meccanica che di conducibilità termica [10].

- *Individuare nuovi metodi per introdurre sistemi di rinforzo.*

Come già ampiamente trattato in precedenza (si veda 2.3.2), non esiste ancora un metodo efficace per introdurre sistemi di rinforzo in elementi realizzati tramite processo estrusivo. A tal proposito, è necessario svolgere ulteriori ricerche e sperimentazioni per trovare uno o più metodi efficaci per tale scopo con l'obiettivo finale di allargare i possibili impieghi del calcestruzzo schiumato estruso all'ambito strutturale portante per poter, un giorno, sostituire completamente le tecniche tradizionalmente impiegate per le costruzioni in calcestruzzo armato.

- *Migliorare le prestazioni termiche attraverso nuovi mix design e/o diminuendo la dimensione delle bolle d'aria.*

Al fine di migliorare le proprietà di isolamento termico del calcestruzzo schiumato estrudibile (già comunque elevate) servirebbe una riduzione della dimensione delle bolle d'aria inglobate nella matrice cementizia. A livello di ricerca si potrebbero studiare soluzioni per ottenere bolle di dimensioni dell'ordine dei nanometri. Come per le prestazioni meccaniche, tale obiettivo si può raggiungere attraverso modifiche del *mix design* oppure, molto più semplicemente, aumentando la velocità di miscelazione e prevedendo solo un maggior quantitativo di schiuma [10].

- *Ottimizzare il mix design per aumentare l'eco-sostenibilità del materiale e dei prodotti finali durante l'intero ciclo di vita.*

L'automatizzazione dei processi costruttivi deriva dalla volontà e dalla necessità di ridurre i notevoli impatti ambientali che caratterizzano il settore delle costruzioni. Per ottenere un maggior beneficio, però, tali processi dovrebbero essere applicati a materiali altrettanto eco-sostenibili al fine di generare prodotti eco-sostenibili. Tutti i materiali estrudibili attualmente in uso nelle sperimentazioni si caratterizzano per un elevato impatto ambientale dovuto in particolare all'impiego di un grande quantitativo di cemento. Per

ridurre gli impatti ambientali di materiali e prodotti è necessario agire innanzitutto a livello di *mix design* (ridurre il contenuto di cemento, impiegare materiali di scarto per ridurre il consumo di materie prime ecc.) ma in generale è necessario valutare gli impatti durante l'intero ciclo di vita del materiale/prodotto dall'estrazione delle materie prime, alla produzione dell'elemento, uso e fine vita attraverso un'analisi LCA finalizzata ad individuare le strategie migliori da mettere in atto per la salvaguardia dell'ambiente. A livello di fase d'uso (che notoriamente rappresenta la fase più impattante nel ciclo di vita di un edificio) vi sono due aspetti essenziali da considerare: la *performance* energetica e la durabilità. Mentre la prima risulta già soddisfatta grazie alle caratteristiche intrinseche del materiale, la seconda va approfondita ulteriormente perché eventuali frequenti cicli di manutenzione/sostituzione comportano elevati impatti sull'ambiente.

- *Elaborare normative, metodi di prova e procedure codificate per progettare elementi in calcestruzzo schiumato estrudibile, controllarne la qualità e valutarne le prestazioni tecniche.*
- *Limiti tecnici e tecnologici del processo e degli strumenti impiegati.*

Visto il particolare impiego previsto per il calcestruzzo schiumato estrudibile, cioè l'utilizzo in processi di estrusione tramite *3D Concrete Printing*, il materiale non è l'unico aspetto da considerare in quanto una notevole importanza è assunta anche dai processi cui è sottoposto per la realizzazione sia dell'impasto (miscelazione) che del prodotto finale (estrusione). In tale ambito, aspetti quali ad esempio la tecnica di miscelazione, il trasporto e il pompaggio influenzano notevolmente le proprietà del materiale sia allo stato fresco che allo stato indurito andando a determinare la *performance* complessivamente offerta dal prodotto finale. A livello di ricerca, è necessario approfondire la conoscenza dei processi per avere un maggior controllo sugli stessi e soprattutto sui loro effetti sul prodotto finale, al fine di prevederne e limitarne l'incidenza operando in anticipo eventuali adattamenti. In questo ambito è ovviamente necessario svolgere molteplici sperimentazioni pratiche per conoscere attraverso varie prove quali sono le variabili in gioco e gli effetti che i processi determinano sul prodotto finale. Oltre alle prove da eseguire con le tecnologie esistenti, nel campo della robotica sono necessari ulteriori sviluppi per superare gli attuali limiti tecnici che i macchinari presentano (ad esempio a livello di sensori, libertà di movimento nello spazio 3D, precisione ecc.) e per introdurre novità particolarmente utili nel caso del calcestruzzo schiumato estrudibile quali ad esempio nuove matrici per l'estrusione simultanea di strati a densità differente.

CAPITOLO 4

SPERIMENTAZIONE PARTE I: PROVE DI STABILITÀ, PROPRIETÀ ALLO STATO FRESCO E PRESTAZIONI MECCANICHE E TERMICHE DI CALCESTRUZZI SCHIUMATI INNOVATIVI

4.1 MATERIALI E METODI

La prima parte dedicata alla sperimentazione è stata svolta presso il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica (DISEG) del Politecnico di Torino ed ha avuto come oggetto il confezionamento di un calcestruzzo schiumato estrudibile, del quale sono state valutate alcune proprietà sia allo stato fresco che allo stato indurito. La densità allo stato fresco è stata fissata in modo da risultare estremamente bassa (compresa nel *range* 162-188 kg/m³).

Sono stati realizzati - tramite la modalità della schiuma preformata - quattro tipi di impasto a densità circa costante, caratterizzati dall'impiego di due differenti agenti tensioattivi schiumogeni (entrambi di natura proteica) e, in alcuni casi, dall'introduzione di microfibre sintetiche in polipropilene. Più in dettaglio, sono stati realizzati due impasti con il tensioattivo *Foamin C* (prodotto dall'azienda *Mibo s.r.l.*) e due con il tensioattivo *Isocem S/B* (prodotto dall'azienda *Isoltech*). In entrambi i casi, in uno dei due impasti con lo stesso tensioattivo sono state inserite microfibre in polipropilene *MasterFiber012* (prodotte dall'azienda *Master Builders*). Oltre a questi ingredienti, sono stati impiegati: cemento di tipo CEM I 52,5 R, acqua, additivo superfluidificante *MasterEASE* (prodotto dall'azienda *Master Builders*) e additivo appartenente alla categoria dei VEA (*Viscosity Enhancing Agents*). Al fine di poter operare dei confronti in fase di valutazione delle proprietà, tutti gli impasti sono stati realizzati con uguali rapporti viscosizzante/cemento (pari al 15%), superfluidificante/cemento (pari all'1,5%), acqua/cemento (pari a 0,33), e, nell'ambito della schiuma preformata, anche uguale rapporto tensioattivo/acqua (pari al 5%). Quando presenti, le

microfibre in polipropilene sono state aggiunte durante la miscelazione dell'impasto in concomitanza con la schiuma e per un quantitativo pari al 5% del peso delle polveri (cemento e viscosizzante). L'unico elemento quantitativamente differente tra gli impasti (oltre alle eventuali fibre) è rappresentato dalla schiuma preformata incorporata in fase di miscelazione (evidenziata successivamente con il valore del rapporto schiuma/cemento). Tale variabilità è dipesa dal differente quantitativo di schiuma necessario affinché ciascun impasto raggiungesse l'obiettivo di densità fresca, definito nella fase iniziale di sperimentazione. Come si può notare dalle tabelle seguenti, nel quarto impasto (ULFC Foamin_5) ciascun ingrediente è stato introdotto in quantità tre volte superiore rispetto agli impasti precedenti (pur mantenendo le stesse proporzioni) per la necessità di ottenere un volume di materiale più elevato per la realizzazione di una colonna di materiale schiumato da impiegare per la prova di stabilità. Tuttavia, in questo impasto si nota che il rapporto schiuma/cemento risulta più elevato rispetto agli altri casi e ciò dipende probabilmente da una serie di ragioni tra cui: la presenza di fibre nell'impasto che comporta un fabbisogno di schiuma maggiore; il fatto che, dato il quantitativo maggiore di impasto prodotto, l'incorporazione della schiuma sia avvenuta più lentamente per cui l'attesa può avere compromesso l'effettiva qualità della schiuma stessa; ed, infine, la possibilità che, per quantitativi maggiori di impasto, sia necessaria più schiuma per raggiungere la densità *target* e quindi che non vi sia una corrispondenza lineare tra quantitativo di schiuma e di impasto.

Tabella 3 – Caratteristiche dell'impasto ULFC Foamin_2

ULFC Foamin_2		
CARATTERISTICHE DEL MATERIALE		
Calcestruzzo schiumato estrudibile realizzato con il metodo della schiuma preformata.		
Cem I 52,5 R	180 g	
Viscosizzante/stabilizzante	27 g	(15% sul cemento)
Superfluidificante (MasterEASE)	2,7 g	(1,5% sul cemento)
Acqua	59,4 g	(a/c = 0,33)
Schiuma preformata:		
Tensioattivo (Foamin C)	20 g	(5%)
Acqua	380 g	(95%)
Quantitativo di schiuma aggiunta all'impasto	250 g	(s/c = 1,39)
Densità allo stato fresco	177 kg/m ³	

Tabella 4 – Caratteristiche dell'impasto ULFC Iso_3

ULFC Iso_3		
CARATTERISTICHE DEL MATERIALE		
Calcestruzzo schiumato estrudibile realizzato con il metodo della schiuma preformata.		
Cem I 52,5 R	180 g	
Viscosizzante/stabilizzante	27 g	(15% sul cemento)
Superfluidificante (MasterEASE)	2,7 g	(1,5% sul cemento)
Acqua	59,4 g	(a/c = 0,33)
Schiuma preformata:		
Tensioattivo (Isocem S/B)	20 g	(5%)
Acqua	380 g	(95%)
Quantitativo di schiuma aggiunta all'impasto	227 g	(s/c = 1,26)
Densità allo stato fresco	167 kg/m ³	

Tabella 5 - Caratteristiche dell'impasto ULFC Iso_4

ULFC Iso_4		
CARATTERISTICHE DEL MATERIALE		
Calcestruzzo schiumato estrudibile realizzato con il metodo della schiuma preformata.		
Cem I 52,5 R	180 g	
Viscosizzante/stabilizzante	27 g	(15% sul cemento)
Superfluidificante (MasterEASE)	2,7 g	(1,5% sul cemento)
Acqua	59,4 g	(a/c = 0,33)
Schiuma preformata:		
Tensioattivo (Isocem S/B)	20 g	(5%)
Acqua	380 g	(95%)
Microfibre sintetiche in polipropilene (MasterFiber012)	10,35 g	(5% sulle polveri)
Quantitativo di schiuma aggiunta all'impasto	227 g	(s/c = 1,26)
Densità allo stato fresco	162 kg/m ³	

Tabella 6 - Caratteristiche dell'impasto ULFC Foamin_5

ULFC Foamin_5		
CARATTERISTICHE DEL MATERIALE		
Calcestruzzo schiumato estrudibile realizzato con il metodo della schiuma preformata.		
Cem I 52,5 R	540 g	
Viscosizzante/stabilizzante	81 g	(15% sul cemento)
Superfluidificante (MasterEASE)	8,1 g	(1,5% sul cemento)
Acqua	178,2 g	(a/c = 0,33)
Schiuma preformata:		
Tensioattivo (Foamin C)	60 g	(5%)
Acqua	1140 g	(95%)
Microfibre sintetiche in polipropilene (MasterFiber012)	31,05 g	(5% sulle polveri)
Quantitativo di schiuma aggiunta all'impasto	870 g	(s/c = 1,61)
Densità allo stato fresco	188 kg/m ³	

Tabella 7 – Riepilogo caratteristiche impasti.

CARATTERISTICHE IMPASTI							
CAMPIONE	DENSITÀ FRESCA γ_f [kg/m ³]	CEMENTO [g]	VEA [g]	ACQUA [g]	SUPERFL. [g]	SCHIUMA [g]	FIBRE [g]
ULFC Foamin_2	177	180	27	59,4	2,7	250	-
ULFC Iso_3	167	180	27	59,4	2,7	227	-
ULFC Iso_4	162	180	27	59,4	2,7	227	10,35
ULFC Foamin_5	188	540	81	178,2	8,1	870	31,05

CAMPIONE	RAPPORTO VEA/CEMENTO	RAPPORTO ACQUA/CEMENTO	RAPPORTO SUPERFL./CEMENTO	RAPPORTO FIBRE/POLVERI	RAPPORTO SCHIUMA/CEMENTO
ULFC Foamin_2	0,15	0,33	0,015	-	1,39
ULFC Iso_3	0,15	0,33	0,015	-	1,26
ULFC Iso_4	0,15	0,33	0,015	0,05	1,26
ULFC Foamin_5	0,15	0,33	0,015	0,05	1,61

Per quanto concerne le analisi sulle proprietà degli impasti, sono state effettuate le sperimentazioni di seguito elencate.

Sull'impasto **ULFC Foamin_2**:

- variazione di densità tra impasto fresco, campione maturato 28 giorni in aria a temperatura ambiente (20 ± 3 °C) e umidità naturale, e campione che in seguito alla maturazione in aria è stato essiccato in forno a 60 °C per almeno 48 ore o comunque fino a raggiungere peso costante.
- Caratterizzazione microstrutturale (porosità, dimensione e distribuzione dei pori), valutata attraverso l'analisi di immagine svolta dopo 28 giorni di maturazione dei campioni in aria (a temperatura ambiente e umidità naturale) e la successiva essiccazione in forno a 60 °C per almeno 24 ore o comunque fino al raggiungimento di peso costante.
- Valutazione delle prestazioni meccaniche (resistenza a compressione e resistenza a trazione per flessione su tre punti) sviluppate dopo 28 giorni di maturazione dei campioni in aria a temperatura ambiente e umidità naturale.

Sull'impasto **ULFC Iso_3**:

- variazione di densità tra impasto fresco, campione maturato 28 giorni in aria a temperatura ambiente (20 ± 3 °C) e umidità naturale, e campione che in seguito alla maturazione in aria è stato essiccato in forno a 60 °C per almeno 48 ore o comunque fino a raggiungere peso costante.
- Caratterizzazione microstrutturale (porosità, dimensione e distribuzione dei pori), valutata attraverso l'analisi di immagine svolta dopo 28 giorni di maturazione dei campioni in aria

(a temperatura ambiente e umidità naturale) e la successiva essiccazione in forno a 60 °C per almeno 24 ore o comunque fino al raggiungimento di peso costante.

- Valutazione delle prestazioni meccaniche (resistenza a compressione e resistenza a trazione per flessione su tre punti) sviluppate dopo 28 giorni di maturazione dei campioni in aria a temperatura ambiente e umidità naturale.

Sull'impasto **ULFC Iso_4**:

- variazione di densità tra impasto fresco, campione maturato 28 giorni in aria a temperatura ambiente (20 ± 3 °C) e umidità naturale, e campione che in seguito alla maturazione in aria è stato essiccato in forno a 60 °C per almeno 48 ore o comunque fino a raggiungere peso costante.
- Caratterizzazione microstrutturale (porosità, dimensione e distribuzione dei pori), valutata attraverso l'analisi di immagine svolta dopo 28 giorni di maturazione dei campioni in aria (a temperatura ambiente e umidità naturale) e la successiva essiccazione in forno a 60 °C per almeno 24 ore o comunque fino al raggiungimento di peso costante.
- Valutazione delle prestazioni meccaniche (resistenza a compressione e resistenza a trazione per flessione su tre punti) sviluppate dopo 28 giorni di maturazione dei campioni in aria a temperatura ambiente e umidità naturale.

Sull'impasto **ULFC Foamin_5**:

- variazione di densità tra impasto fresco, campione maturato 28 giorni in aria a temperatura ambiente (20 ± 3 °C) e umidità naturale, e campione che in seguito alla maturazione in aria è stato essiccato in forno a 60 °C per almeno 48 ore o comunque fino a raggiungere peso costante.
- Caratterizzazione reologica dello stato fresco tramite *slump test*, eseguito al termine della fase di miscelazione.
- Prova di stabilità delle bolle durante la transizione tra presa ed indurimento, valutata su una colonna di materiale alta un metro, dopo un'attesa di 24 ore dalla realizzazione.

Visto l'interesse che in tale ambito ricopre la prestazione termica del materiale, per ciascun impasto sono stati anche ipotizzati i possibili valori di conducibilità termica a 28 giorni di maturazione dei campioni in aria (a temperatura ambiente e umidità naturale), sulla base di una campagna sperimentale svolta in precedenza su campioni di calcestruzzo schiumato estrudibile a densità umida compresa nel *range* 316-828 kg/m³ [12].

Il processo di realizzazione degli impasti è stato svolto secondo fasi realizzative ben precise:

1. pesatura di tutti gli ingredienti.
2. Miscelazione a secco delle polveri (cemento e viscosizzante) per omogeneizzarne la distribuzione.

3. A parte, realizzazione della schiuma tramite miscelazione di acqua e agente schiumogeno tensioattivo.
4. Aggiunta (e miscelazione) di acqua e additivo superfluidificante alle polveri.
5. Aggiunta all'impasto a base cementizia del quantitativo di schiuma preformata necessaria per l'ottenimento della densità *target* definita all'inizio della sperimentazione (valutata durante la produzione del materiale attraverso il rapporto tra peso e volume di un bicchiere riempito di composto) e delle eventuali microfibre.
6. Miscelazione dell'intero composto per circa un paio di minuti o, comunque, fino alla completa integrazione della schiuma e all'ottenimento di un impasto omogeneo.

Sia per la schiuma preformata che per il composto cementizio, la miscelazione è stata svolta impiegando un miscelatore di tipo verticale.

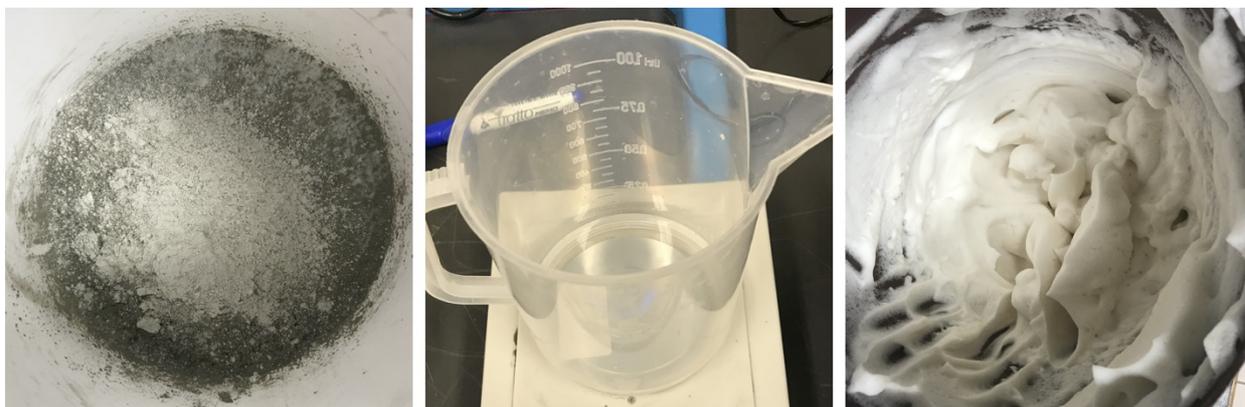


Figura 36 – Riprese fotografiche degli ingredienti base costituenti tutti gli impasti: cemento e viscosizzante (sinistra), acqua e superfluidificante (centro), e schiuma preformata costituita da acqua e agente tensioattivo (destra).



Figura 37 – Riprese fotografiche delle schiume preformate realizzate con due differenti agenti tensioattivi schiumogeni: Focamin C (sinistra) e Isocem S/B (destra). Le schiume appaiono differenti sia per consistenza che per colore (bianca la prima e giallina la seconda).



Figura 38 – Riprese fotografiche degli impasti finali realizzati con due differenti agenti tensioattivi schiumogeni: Foamin C (sinistra) e Isocem S/B (destra). Gli impasti appaiono differenti per consistenza e aspetto.



Figura 39 – Riprese fotografiche delle microfibre in polipropilene Masterfiber012 impiegate nella realizzazione degli impasti ULFC Iso_4 e ULFC Foamin_5.

Una volta terminata la fase di realizzazione dei composti, per gli impasti ULFC Foamin_2, ULFC Iso_3 e ULFC Iso_4 sono stati realizzati, all'interno di casseri metallici foderati di pellicola (vista l'impossibilità di impiegare olio disarmante per via delle reazioni che si svilupperebbero con il tensioattivo), 3 campioni prismatici di dimensioni 4x4x16 cm e un campione cubico di lato 7 cm. I primi sono stati utilizzati per la valutazione della variazione di densità e delle prestazioni meccaniche a 28 giorni (la realizzazione di 3 campioni è servita per individuare comportamenti più realistici e rappresentativi ripetendo la prova su una serie di provini per ciascun impasto). Il campione cubico è stato impiegato sia per la valutazione della variazione di densità, in quanto rappresentativo della densità secca, sia per l'analisi della microstruttura dei pori contenuti nell'elemento. Infine, in seguito alla realizzazione per ciascun impasto di test di stabilità in colonne alte 15 cm, solo per l'impasto che ha fornito risultati migliori, cioè ULFC Foamin_5, è stata realizzata una colonna all'interno di un cilindro cavo alto 1 m e con diametro pari a 5,9 cm al fine

di eseguire il test di stabilità per valutare il comportamento delle bolle d'aria in fase di transizione tra presa e indurimento.



Figura 40 – Riprese fotografiche dei campioni cubici e prismatici allo stato fresco relativi agli impasti ULFC Iso_4 (sinistra), ULFC Iso_3 (centro) e ULFC Foamin_2 (destra).

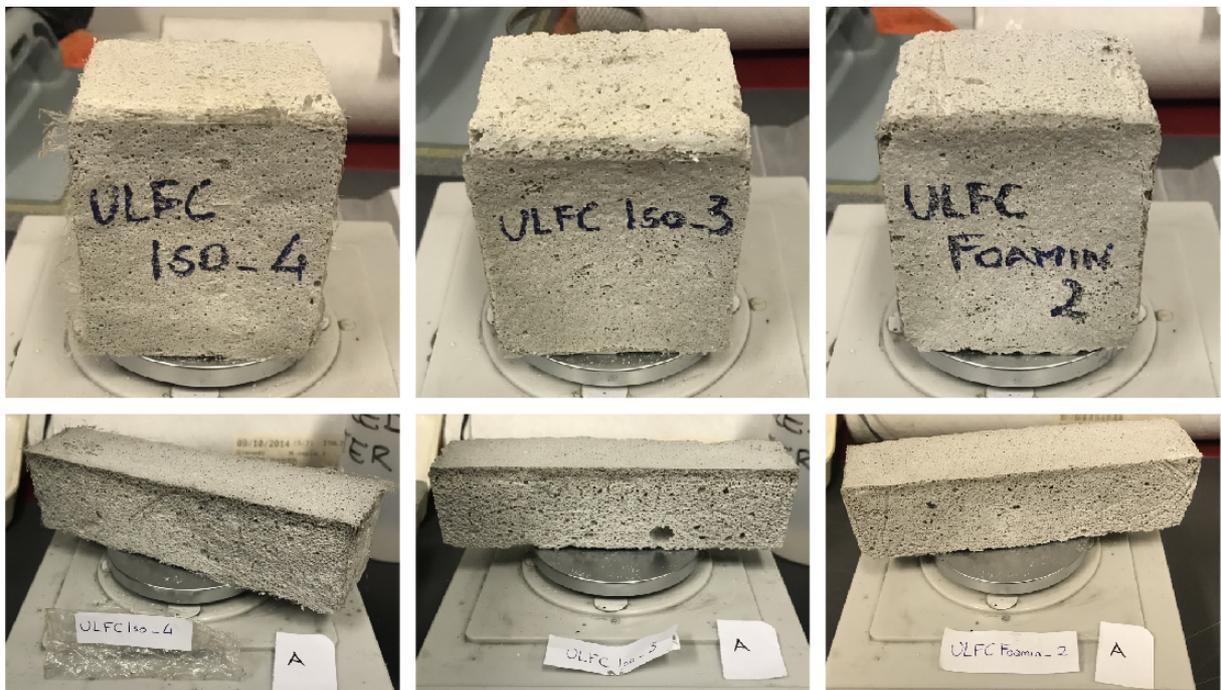


Figura 41 – Riprese fotografiche del campione cubico e di uno prismatico allo stato indurito relativi agli impasti ULFC Iso_4 (sinistra), ULFC Iso_3 (centro) e ULFC Foamin_2 (destra).

4.2_RISULTATI

4.2.1_Caratterizzazione reologica dello stato fresco

La caratterizzazione reologica dello stato fresco è stata valutata in termini di consistenza dell'impasto attraverso uno *slump test* realizzato alla fine della miscelazione, soltanto sull'impasto ULFC Foamin_5. Tale valutazione è stata svolta impiegando un cilindro cavo di altezza e diametro interno pari a 8 cm. Inizialmente riempito di materiale fresco, il cilindro è stato poi rimosso e, una volta stabilizzatosi il materiale, è stata misurata la deformazione prodotta nel materiale lungo due direzioni orizzontali perpendicolari con risultati pari a 12,4 cm e 12,5 cm. Lo svolgimento di tale prova ha permesso di valutare in modo oggettivo - attraverso parametri misurabili - la consistenza del calcestruzzo schiumato estrudibile ULFC Foamin_5 a densità allo stato fresco pari a 188 kg/m³.



Figura 42 – Riprese fotografiche realizzate in durante lo svolgimento dello slump test realizzato con l'impasto ULFC Foamin_5.

4.2.2_Variazione di densità

La valutazione della variazione di densità è stata svolta sui campioni relativi a tutti gli impasti realizzati, cioè ULFC Foamin_2, ULFC Iso_3, ULFC Iso_4 e ULFC Foamin_5. L'obiettivo principale di questa analisi è la valutazione tanto delle variazioni di densità tra i diversi stadi di ciascun campione quanto degli eventuali effetti che, su tali variazioni, potrebbero avere il tensioattivo impiegato e/o la presenza di microfibre di polipropilene incorporate nell'impasto.

In maniera più dettagliata, la variazione di densità è stata valutata per:

1. impasti al termine della miscelazione (densità fresca).
2. Campioni maturati 28 giorni in aria a temperatura ambiente ($20 \pm 3^\circ\text{C}$) e umidità naturale (densità ad umidità naturale).
3. Campioni che, in seguito alla maturazione in aria, sono stati sottoposti ad essiccazione in forno a temperatura di 60°C per almeno 48 ore o comunque fino al raggiungimento di peso costante (densità secca).

Nell'ambito di tale sperimentazione, la densità allo stato fresco è stata valutata come rapporto tra peso e volume di un bicchiere pieno di impasto, mentre la densità umida e secca sono state valutate come rapporto tra il peso del campione, calcolato tramite una bilancia, e il suo volume, calcolato tramite misurazione con calibro delle dimensioni di ogni lato, effettuata come media di tre misurazioni (una centrale e due laterali) e tenendo conto anche dell'infossamento causato dall'esposizione all'aria della faccia superiore di ciascun campione. Nelle tabelle seguenti, per ciascun impasto analizzato, si riportano i valori ottenuti.

Tabella 8 – Valutazione della variazione di densità sui campioni realizzati con l'impasto ULFC Foamin_2.

ULFC Foamin_2					
CAMPIONE	PESO	VOLUME	DENSITÀ	Δ % SU DENSITÀ FRESCA	Δ % SU DENSITÀ A 28 GIORNI
<u>Stato fresco:</u>					
Prisma A	45,31 g	$4 \times 4 \times 16 = 256 \text{ cm}^3$	177 kg/m ³	-	-
Prisma B	45,31 g	$4 \times 4 \times 16 = 256 \text{ cm}^3$	177 kg/m ³	-	-
Prisma C	45,31 g	$4 \times 4 \times 16 = 256 \text{ cm}^3$	177 kg/m ³	-	-
Cubo	60,71 g	$7 \times 7 \times 7 = 343 \text{ cm}^3$	177 kg/m ³	-	-
<u>Dopo 28 giorni all'aria:</u>					
Prisma A	25,78 g	$4 \times 3,9 \times 15,95 = 248,8 \text{ cm}^3$	104 kg/m ³	- 41,24%	-
Prisma B	24,89 g	$4 \times 3,9 \times 15,95 = 248,8 \text{ cm}^3$	100 kg/m ³	- 43,50%	-
Prisma C	24,88 g	$4 \times 3,9 \times 15,95 = 248,8 \text{ cm}^3$	100 kg/m ³	- 43,50%	-
Cubo	35,92 g	$7 \times 7 \times 6,75 = 330,8 \text{ cm}^3$	109 kg/m ³	- 38,42%	-
<u>Dopo 28 giorni all'aria ± almeno 48 h in forno:</u>					
Cubo	31,31 g	$7 \times 7 \times 6,75 = 330,8 \text{ cm}^3$	95 kg/m ³	- 46,33%	- 12,84%

Tabella 9 - Valutazione della variazione di densità sui campioni realizzati con l'impasto ULFC Iso_3.

ULFC Iso_3					
CAMPIONE	PESO	VOLUME	DENSITÀ	Δ % SU DENSITÀ FRESCA	Δ % SU DENSITÀ A 28 GIORNI
<u>Stato fresco:</u>					
Prisma A	42,75 g	4 x 4 x 16 = 256 cm ³	167 kg/m ³		
Prisma B	42,75 g	4 x 4 x 16 = 256 cm ³	167 kg/m ³	-	-
Prisma C	42,75 g	4 x 4 x 16 = 256 cm ³	167 kg/m ³		
Cubo	57,28 g	7 x 7 x 7 = 343 cm ³	167 kg/m ³		
<u>Dopo 28 giorni all'aria:</u>					
Prisma A	24,59 g	4 x 3,7 x 15,95 = 236,7 cm ³	104 kg/m ³	- 37,72%	
Prisma B	24,12 g	4 x 3,8 x 15,95 = 243,7 cm ³	99 kg/m ³	- 40,72%	-
Prisma C	24,70 g	4 x 3,7 x 15,95 = 236,1 cm ³	105 kg/m ³	- 37,13%	
Cubo	35,66 g	7 x 7 x 6,56 = 326,8 cm ³	109 kg/m ³	- 34,73%	
<u>Dopo 28 giorni all'aria + almeno 48 h in forno:</u>					
Cubo	30,91 g	7 x 7 x 6,56 = 326,8 cm ³	94 kg/m ³	- 43,71%	- 13,76%

Tabella 10 - Valutazione della variazione di densità sui campioni realizzati con l'impasto ULFC Iso_4.

ULFC Iso_4					
CAMPIONE	PESO	VOLUME	DENSITÀ	Δ % SU DENSITÀ FRESCA	Δ % SU DENSITÀ A 28 GIORNI
<u>Stato fresco:</u>					
Prisma A	41,47 g	4 x 4 x 16 = 256 cm ³	162 kg/m ³		
Prisma B	41,47 g	4 x 4 x 16 = 256 cm ³	162 kg/m ³	-	-
Prisma C	41,47 g	4 x 4 x 16 = 256 cm ³	162 kg/m ³		
Cubo	55,57 g	7 x 7 x 7 = 343 cm ³	162 kg/m ³		
<u>Dopo 28 giorni all'aria:</u>					
Prisma A	25,22 g	4 x 3,95 x 15,95 = 252,0 cm ³	100 kg/m ³	- 38,27%	
Prisma B	24,82 g	4 x 3,95 x 15,95 = 252,0 cm ³	98 kg/m ³	- 39,51%	-
Prisma C	24,63 g	4 x 3,90 x 15,95 = 248,8 cm ³	99 kg/m ³	- 38,89%	
Cubo	37,33 g	7 x 7 x 6,9 = 338,1 cm ³	110 kg/m ³	- 32,10%	
<u>Dopo 28 giorni all'aria + almeno 48 h in forno:</u>					
Cubo	32,17 g	7 x 7 x 6,9 = 338,1 cm ³	95 kg/m ³	- 41,36%	- 13,63%

Tabella 11 - Valutazione della variazione di densità sui campioni realizzati con l'impasto ULFC Foamin_5.

ULFC Foamin_5					
CAMPIONE	PESO	VOLUME	DENSITÀ	Δ % SU DENSITÀ FRESCA	Δ % SU DENSITÀ A 28 GIORNI
<u>Stato fresco:</u>					
Prisma A	48,13 g	4 x 4 x 16 = 256 cm ³	188 kg/m ³		
Prisma B	48,13 g	4 x 4 x 16 = 256 cm ³	188 kg/m ³	-	-
Prisma C	48,13 g	4 x 4 x 16 = 256 cm ³	188 kg/m ³		
Cubo	64,48 g	7 x 7 x 7 = 343 cm ³	188 kg/m ³		
<u>Dopo 28 giorni all'aria:</u>					
Prisma A	24,97 g	4 x 3,9 x 15,93 = 248,5 cm ³	100 kg/m ³	- 47,07%	
Prisma B	25,46 g	4 x 3,9 x 15,96 = 248,9 cm ³	98 kg/m ³	- 48,01%	-
Prisma C	24,03 g	4 x 3,9 x 15,94 = 248,7 cm ³	104 kg/m ³	- 44,94%	
Cubo	35,40 g	7 x 6,9 x 6,70 = 323,8 cm ³	91 kg/m ³	- 51,35%	
<u>Dopo 28 giorni all'aria + almeno 48 h in forno:</u>					
Cubo	26,55 g	7 x 6,9 x 6,70 = 323,8 cm ³	82 kg/m ³	- 56,47%	- 10,53%

Tabella 12 – Riepilogo variazione di densità dei campioni.

VARIAZIONE DI DENSITÀ					
CAMPIONE	DENSITÀ FRESCA γ_f [kg/m ³]	DENSITÀ UMIDA γ_{ua} [kg/m ³]	Δ % ($\gamma_{ua} - \gamma_f$)	DENSITÀ SECCA γ_s [kg/m ³]	Δ % ($\gamma_s - \gamma_{ua}$)
ULFC Foamin_2 - A	177	104	- 41,24	-	-
ULFC Foamin_2 - B	177	100	- 43,50	-	-
ULFC Foamin_2 - C	177	100	- 43,50	-	-
ULFC Foamin_2 - cubo	177	109	- 38,42	95	-12,84
ULFC Iso_3 - A	167	104	- 37,72	-	-
ULFC Iso_3 - B	167	99	- 40,72	-	-
ULFC Iso_3 - C	167	105	- 37,13	-	-
ULFC Iso_3 - cubo	167	109	- 34,73	94	-13,76
ULFC Iso_4 - A	162	100	- 38,27	-	-
ULFC Iso_4 - B	162	98	- 39,51	-	-
ULFC Iso_4 - C	162	99	- 38,89	-	-
ULFC Iso_4 - cubo	162	110	- 32,10	95	-13,64
ULFC Foamin_5 - A	188	100	- 47,07	-	-
ULFC Foamin_5 - B	188	98	- 48,01	-	-
ULFC Foamin_5 - C	188	104	- 44,94	-	-
ULFC Foamin_5 - cubo	188	91	- 51,35	82	-10,53

Dal confronto tra i risultati emersi dalla valutazione della variazione di densità svolta sui campioni prismatici e cubici, si evince che i campioni realizzati con l'impasto ULFC Foamin_2 e ULFC Foamin_5 si caratterizzano per una variazione di densità complessivamente più elevata tra lo stato fresco e lo stato di maturazione a 28 giorni. Tale variazione potrebbe essere attribuita al maggior quantitativo di schiuma impiegato per la realizzazione di tali impasti rispetto agli altri due oggetti di analisi, possibilmente riscontrando un maggior contributo dovuto all'evaporazione della fase liquida dei composti.

4.2.3 Caratterizzazione microstrutturale

L'analisi microstrutturale del calcestruzzo schiumato estrudibile risulta particolarmente importante poiché tale caratteristica influenza, oltre le prestazioni termiche, due delle principali proprietà del materiale allo stato indurito e cioè le prestazioni meccaniche e la durabilità dell'elemento finale. Per quanto riguarda le prestazioni meccaniche, ciò che assume un ruolo centrale è la dimensione dei pori e la loro relativa distribuzione; per quello che riguarda la durabilità, la porosità è la caratteristica che influenza la permeabilità del materiale. Nell'ambito della presente sperimentazione, l'obiettivo principale di tale indagine risulta sia la valutazione della porosità e delle caratteristiche dimensionali e distributive dei pori di ciascun campione analizzato, nell'ottica di individuare eventuali effetti che, su tali aspetti, possono avere il tensioattivo impiegato e/o la presenza di microfibre di polipropilene incorporate nell'impasto.

Durante la sperimentazione, l'analisi della microstruttura è stata effettuata sui campioni realizzati con i seguenti impasti: ULFC Foamin_2, ULFC Iso_3 e ULFC Iso_4. Per ciascuna tipologia di

impasto, tale analisi è stata svolta su una porzione rettangolare di un'unica sezione interna del campione cubico di lato 7 cm. Infatti, il campione, in seguito alla maturazione in aria a temperatura ambiente e umidità naturale per 28 giorni e all'essiccazione in forno a 60 °C per almeno 48 ore o comunque fino al raggiungimento di peso costante, è stato tagliato con un seghetto elettrico a nastro verticale in tre parti, secondo due piani paralleli rispetto alla faccia esposta all'aria durante la maturazione.

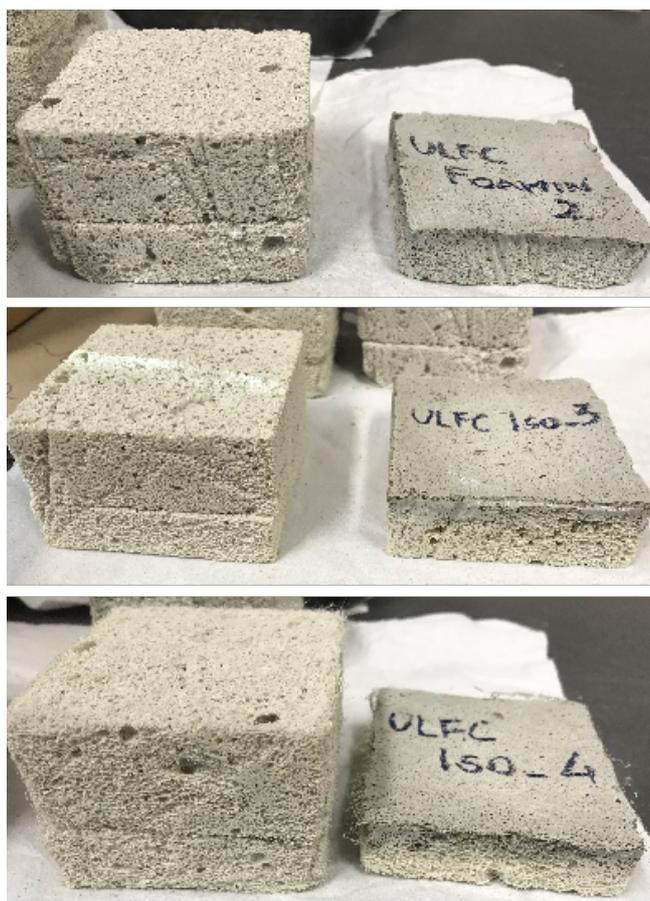


Figura 43 – Riprese fotografiche dei campioni cubici sezionati in corrispondenza di due piani paralleli alla faccia esposta all'aria durante la maturazione.



Figura 44 – Riprese fotografiche di una delle facce interne emerse in seguito al taglio del campione cubico realizzato con gli impasti ULFC Foamin_2 (sinistra), ULFC Iso_3 (centro) e ULFC Iso_4 (destra).

Un’attenta analisi visiva delle facce, scoperte in seguito all’operazione di taglio, ha permesso di verificare, già ad occhio nudo ed a livello qualitativo, la distribuzione dei pori nell’intero campione, e di scegliere la sezione più rappresentativa del campione (scartando ad esempio le sezioni che presentavano macro-vuoti causati da problemi di confezionamento del materiale). Di tale superficie selezionata, tramite analisi stereoscopica, sono state scattate immagini della superficie secondo lo schema rappresentato di seguito per ciascun campione, avendo cura di garantire sempre la parziale sovrapposizione tra le stesse in modo da facilitarne la successiva unione.

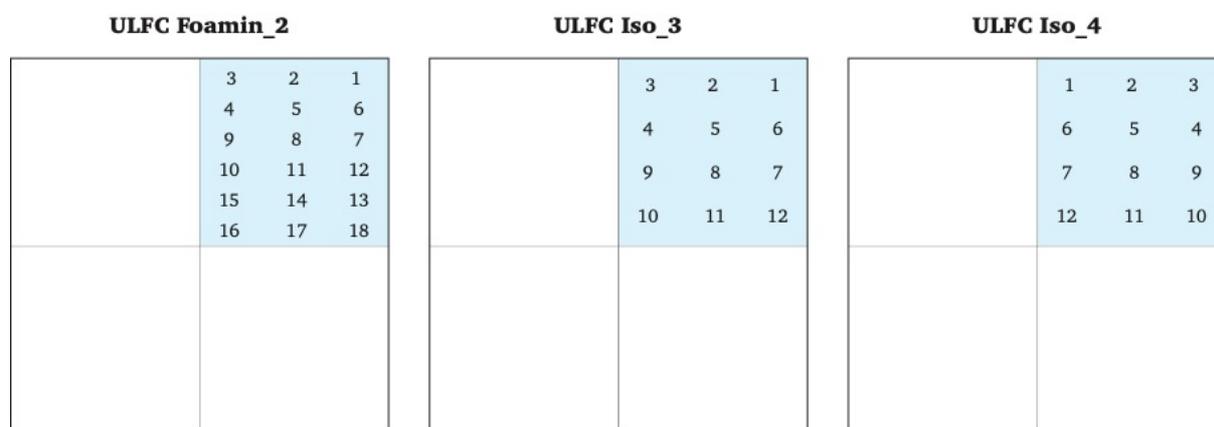


Figura 45 – Rappresentazione schematica della porzione della faccia di ciascun campione su cui sono state eseguite le immagini con stereoscopio (in azzurro) e indicazione dell’ordine numerico seguito durante la realizzazione delle stesse.

L’impiego dello stereoscopio ha permesso di realizzare immagini ad alta risoluzione senza incorrere in problemi di messa a fuoco nonostante l’assenza di una superficie piana continua dovuta alla presenza delle cavità. In un secondo momento, le varie immagini eseguite con lo stereoscopio sono state sovrapposte e unite per formare un’unica immagine di dimensione circa pari a 30 x 30 mm. Per ciascuna immagine è stata selezionata una porzione rappresentativa, di forma rettangolare di area pari a 32,49 mm² e dimensioni pari a 7,68 x 4,23 mm, che è stata binarizzata rappresentando in bianco i pieni e in nero i vuoti. La scelta delle dimensioni del rettangolo su cui svolgere la prova è derivata da motivi di coerenza rispetto alla letteratura riguardante nello specifico tale procedura [18]. Sull’immagine binarizzata di ciascun campione, tramite il software *ImageJ* sono state svolte due tipologie di analisi microstrutturale: la valutazione della porosità e la quantificazione della dimensione e della relativa distribuzione dei pori.

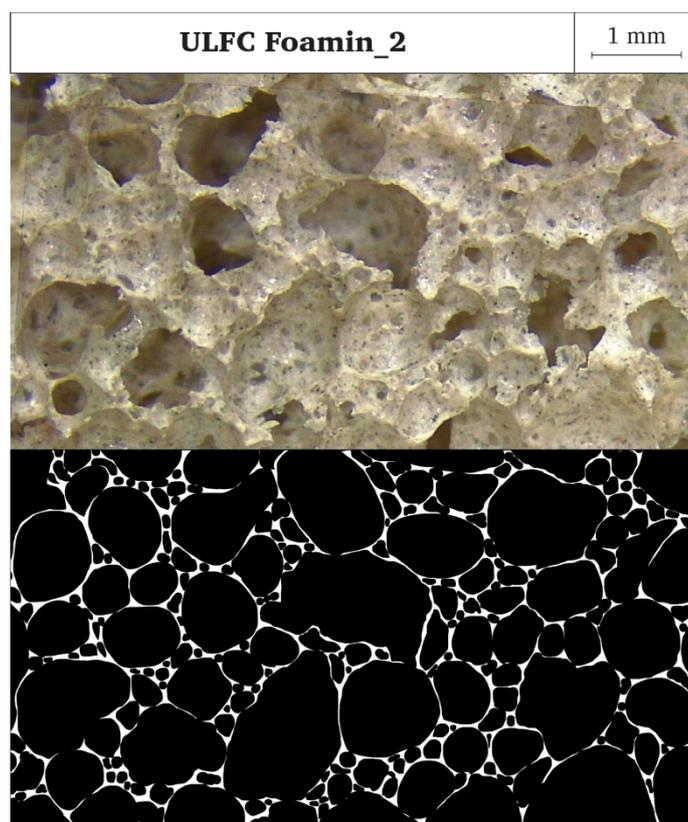


Figura 46 – Immagine originale e binarizzata oggetto di analisi microstrutturale per l'impasto ULFC Foamin_2.

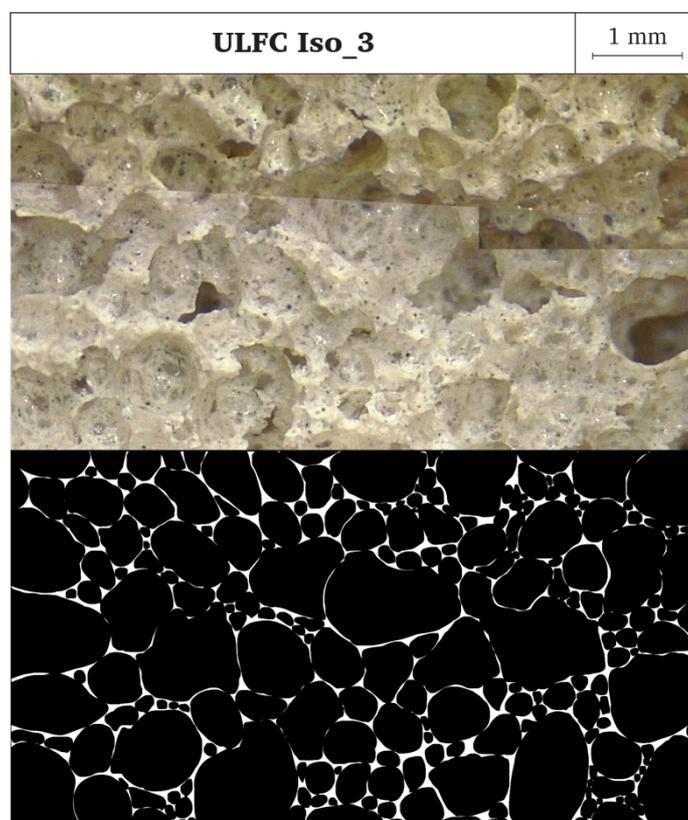


Figura 47 - Immagine originale e binarizzata oggetto di analisi microstrutturale per l'impasto ULFC Iso_3.

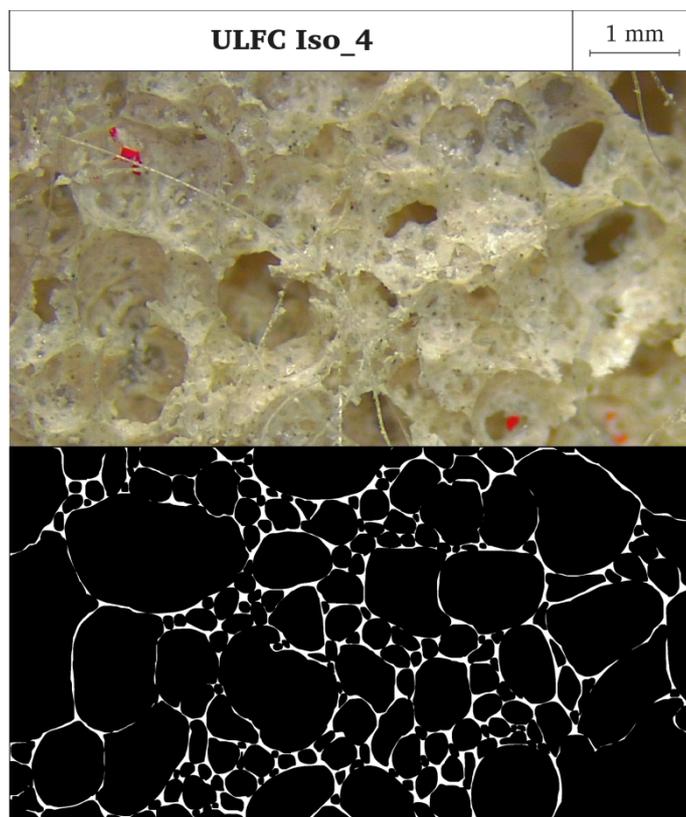


Figura 48 - Immagine originale e binarizzata oggetto di analisi microstrutturale per l'impasto ULFC Iso_4.

La porosità di ciascun campione è stata quantificata sull'immagine binarizzata tramite la funzione *Threshold* di *ImageJ*. Tale valore è stato poi confrontato con il valore di porosità teorica ricavato dalla seguente formula:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\gamma_{dry}}{\gamma_{solid}}$$

In cui γ_{dry} è la densità del campione dopo i 28 giorni di maturazione in aria e i 7 giorni di essiccazione in forno, mentre γ_{solid} è la densità dell'impasto cementizio senza l'aggiunta di schiuma (pari a 1850 kg/m³).

In seguito, sempre sul software *ImageJ*, tramite la funzione *Analyze particles*, sono stati ricavati i valori relativi all'area di ciascun poro (ad esclusione di quelli posti sul contorno dell'immagine) e, considerando ogni poro come se fosse un cerchio perfetto, è stato calcolato tramite un foglio di lavoro *Excel* il diametro equivalente di ciascuno di essi e la distribuzione percentuale della dimensione dei pori.

Dalle valutazioni svolte durante le analisi microstrutturali sono emersi i risultati presentati nella tabella e nei grafici seguenti.

Tabella 13 – Riepilogo dei risultati ottenuti dall'analisi microstrutturale svolta sull'area d'immagine selezionata per ciascuno degli impasti oggetto di valutazione.

ANALISI MICROSTRUTTURALE			
CAMPIONE	DENSITÀ SECCA γ_s [kg/m³]	POROSITÀ TEORICA [%]	POROSITÀ DA IMMAGINE [%]
ULFC Foamin_2	95	94,92	92,35
ULFC Iso_3	94	94,92	93,53
ULFC Iso_4	95	94,86	93,95

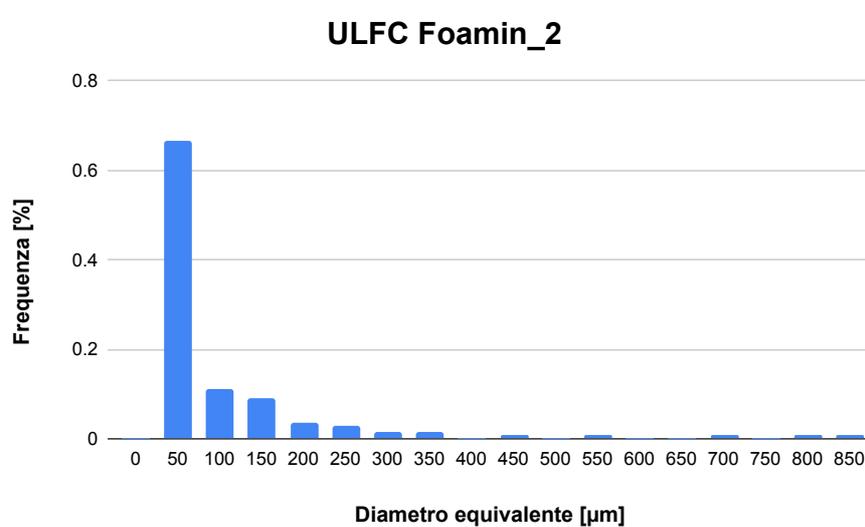


Figura 49 - Rappresentazione grafica della frequenza con cui si presentano i diametri equivalenti dei pori analizzati tramite analisi di immagine relativamente ai campioni realizzati con impasto ULFC Foamin_2.

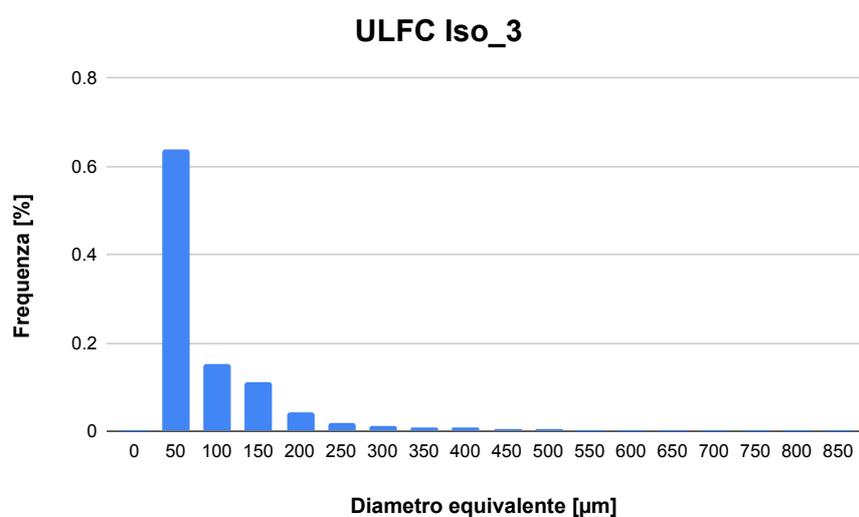


Figura 50 - Rappresentazione grafica della frequenza con cui si presentano i diametri equivalenti dei pori analizzati tramite analisi di immagine relativamente ai campioni realizzati con impasto ULFC Iso_3.

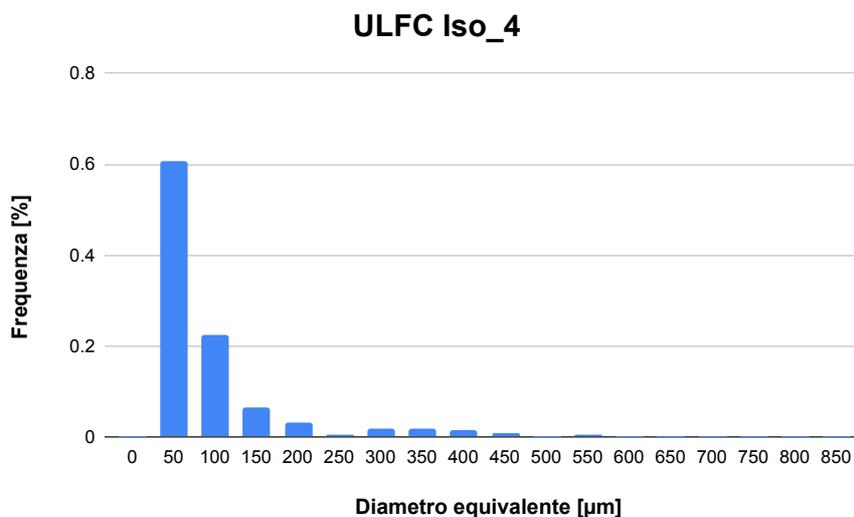


Figura 51 - Rappresentazione grafica della frequenza con cui si presentano i diametri equivalenti dei pori analizzati tramite analisi di immagine relativamente ai campioni realizzato con impasto ULFC Iso_4.

Dall'analisi microstrutturale emergono valori molto elevati e molto simili di porosità dei campioni, come era prevedibile vista la densità ultra-bassa che li caratterizza e che è compresa in un *range* molto ristretto. Dall'osservazione delle immagini e dalle quantificazioni svolte successivamente con il software *ImageJ* si evidenzia che tutti gli impasti si caratterizzano per porosità a celle chiuse in cui i pori risultano facilmente distinguibili e sono interconnessi solamente nei pochi casi in cui si verifica il fenomeno della coalescenza. Tuttavia, emergono alcune differenze tra i vari campioni: ad esempio, a livello di caratteristiche dei pori (nonostante si rilevi una porosità circa simile tra i tre campioni) si evidenzia che l'impasto realizzato con il tensioattivo *Foamin C* è caratterizzato da dimensioni minori delle bolle d'aria rispetto all'impasto ULFC Iso_3 e ULFC Iso_4, quest'ultimo caratterizzato invece dalle dimensioni delle bolle maggiori, molto probabilmente per via della presenza delle fibre.

4.2.4_Prestazioni meccaniche a 28 giorni

4.2.4.1_Resistenza a trazione per flessione

La prova di resistenza a trazione per flessione è stata eseguita sui campioni prismatici realizzati per gli impasti ULFC Foamin_2, ULFC Iso_3 e ULFC Iso_4. Tale valutazione è stata svolta secondo la modalità di flessione su 3 punti (con *span* pari a 10 cm) a controllo di forza (50 N/s), secondo la normativa UNI EN 196-1. Per ciascun impasto, la valutazione è stata effettuata sui tre campioni realizzati in casseforme metalliche di forma prismatica, di dimensioni 4x4x16 cm, maturati in aria a temperatura ambiente ($20\pm 3^{\circ}\text{C}$) e umidità naturale per 28 giorni. La realizzazione di tre campioni ha permesso di individuare, attraverso una serie di tre prove, un comportamento rappresentativo e realistico relativo alla resistenza a trazione per flessione del materiale. Per lo svolgimento della prova, ciascun provino è stato posizionato in modo che la superficie esposta all'aria durante la maturazione si trovasse in posizione frontale così da non essere sottoposta direttamente alla pressione esercitata dal macchinario attraverso i tre punti di contatto, in accordo alla normativa utilizzata. Di seguito si riportano le riprese fotografiche effettuate durante il test ed i risultati emersi alla fine della valutazione, sia in forma tabulare che di grafico.

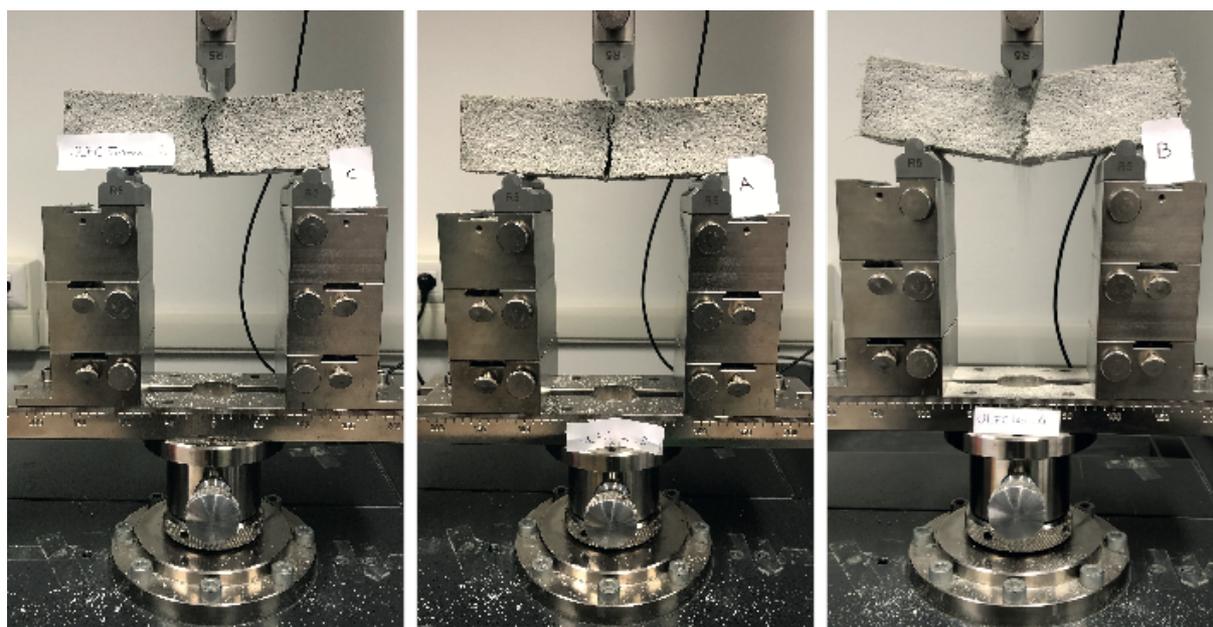


Figura 52 – Riprese fotografiche realizzate al termine della prova di resistenza a trazione per flessione svolte sui campioni ULFC Foamin_2 – C (sinistra), ULFC Iso_3 – A (centro) e ULFC Iso_4 – B (destra). Si evidenzia che in quest'ultimo caso, data la presenza delle microfibre, la resistenza raggiunta dal provino è notevolmente superiore rispetto agli altri due casi e non avviene una separazione netta tra i due monconi.

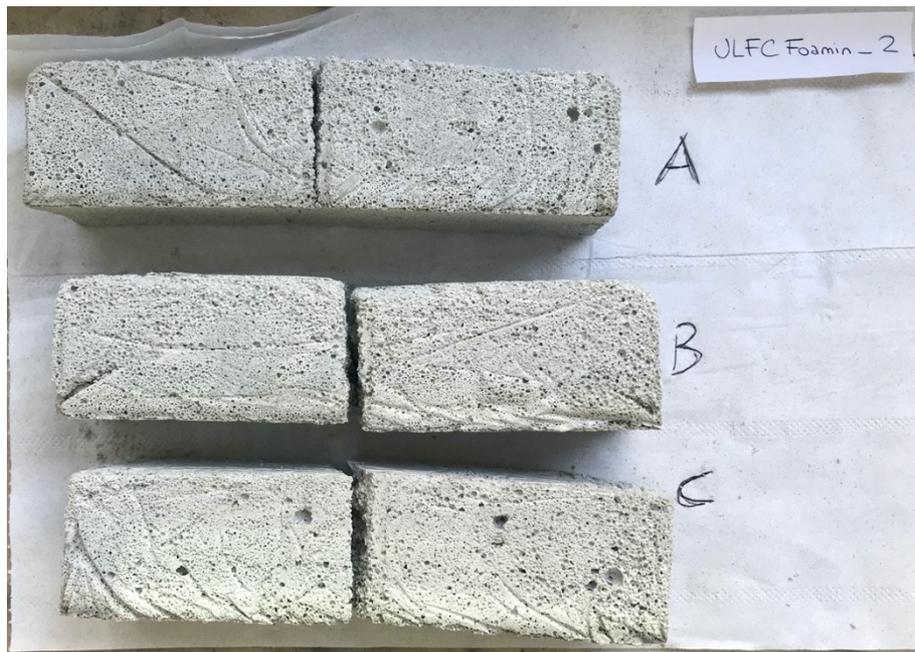


Figura 53 – Ripresa fotografica dei monconi ottenuti alla fine delle prove di trazione per flessione eseguite sui campioni realizzati con l'impasto ULFC Foamin_2.

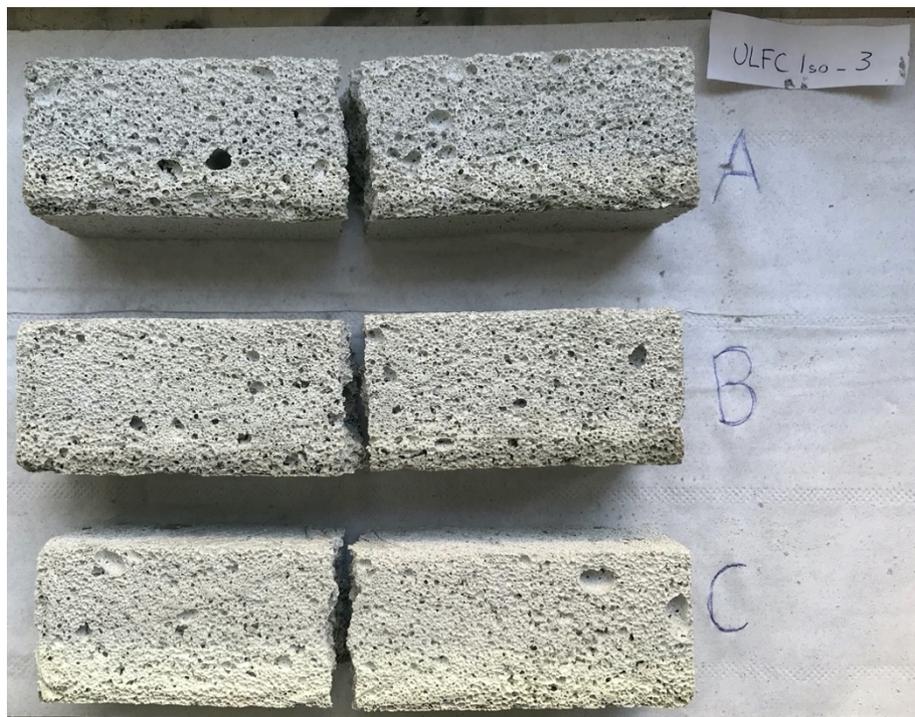


Figura 54 - Ripresa fotografica dei monconi ottenuti alla fine delle prove di trazione per flessione eseguite sui campioni realizzati con l'impasto ULFC Iso_3.



Figura 55 - Ripresa fotografica dei monconi ottenuti alla fine delle prove di trazione per flessione eseguite sui campioni realizzati con l'impasto ULFC Iso_4. Si evidenzia che nei campioni B e C non è avvenuta la netta separazione dei due monconi.



Figura 56 - Ripresa fotografica dei due monconi ottenuti alla fine della prova di trazione per flessione eseguita sul campione ULFC Iso_3 - A.

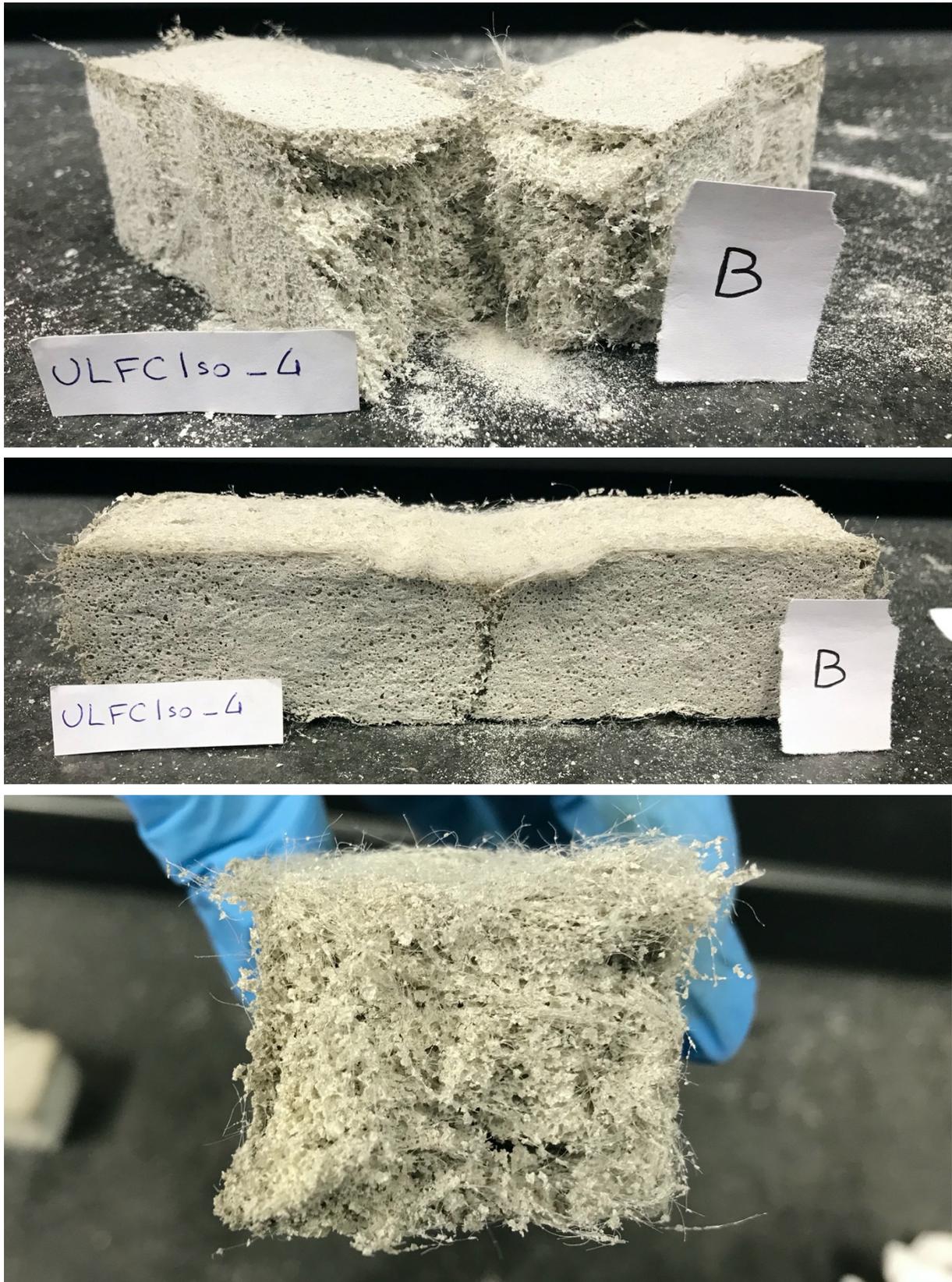


Figura 57 – Riprese fotografiche eseguite alla fine della prova a trazione per flessione relativa al campione ULFC Iso_4 – B. Si evidenzia, nelle prime due immagini, che la presenza delle fibre ha impedito la netta separazione tra i due monconi (realizzata in seguito manualmente).

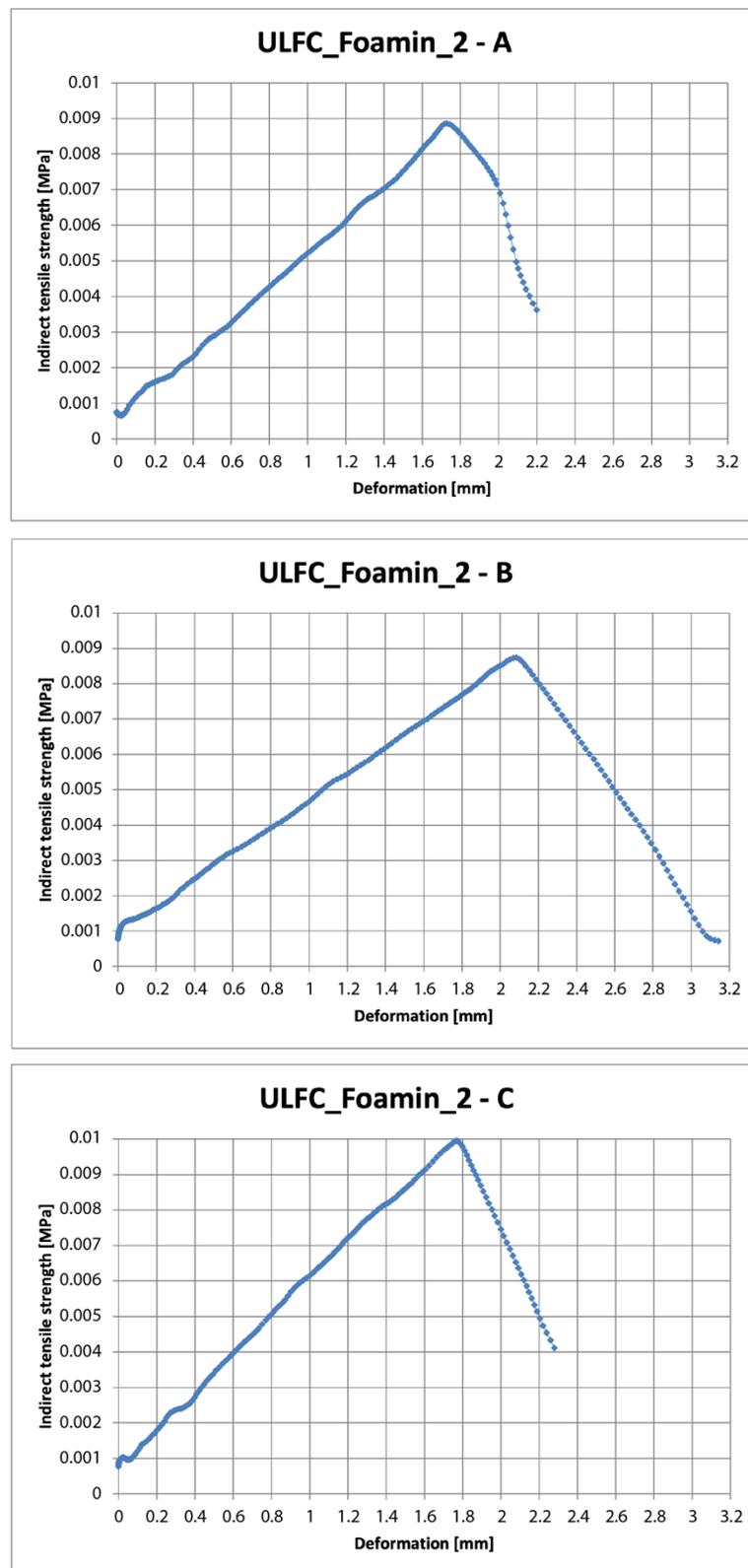


Figura 58 – Rappresentazioni grafiche relative ai risultati emersi dalla prova di resistenza a trazione per flessione effettuata su ciascuno dei tre campioni prismatici realizzati con l'impasto ULFC Foamin_2.

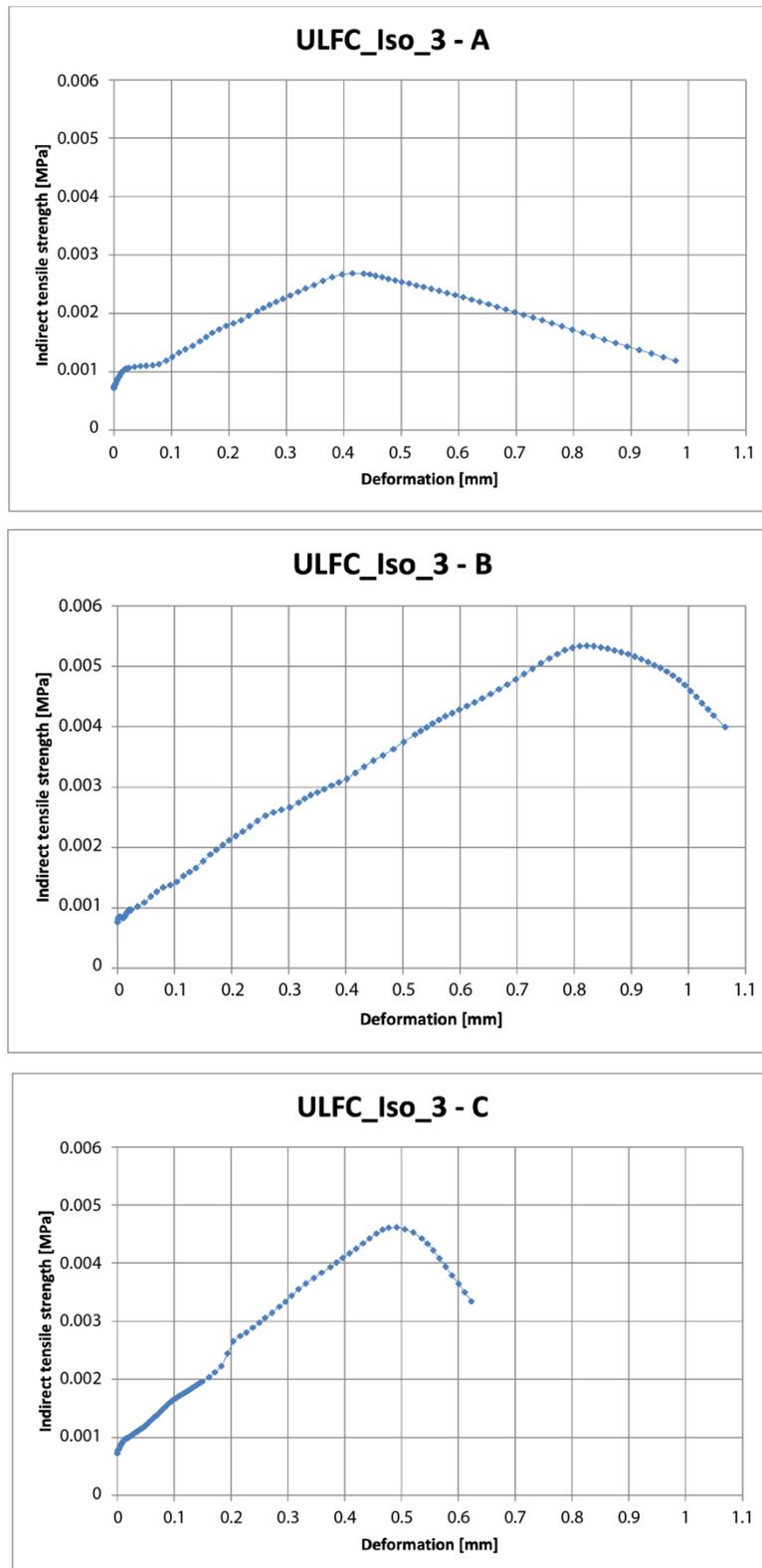


Figura 59 - Rappresentazioni grafiche relative ai risultati emersi dalla prova di resistenza a trazione per flessione effettuata su ciascuno dei tre campioni prismatici realizzati con l'impasto ULFC Iso_3.

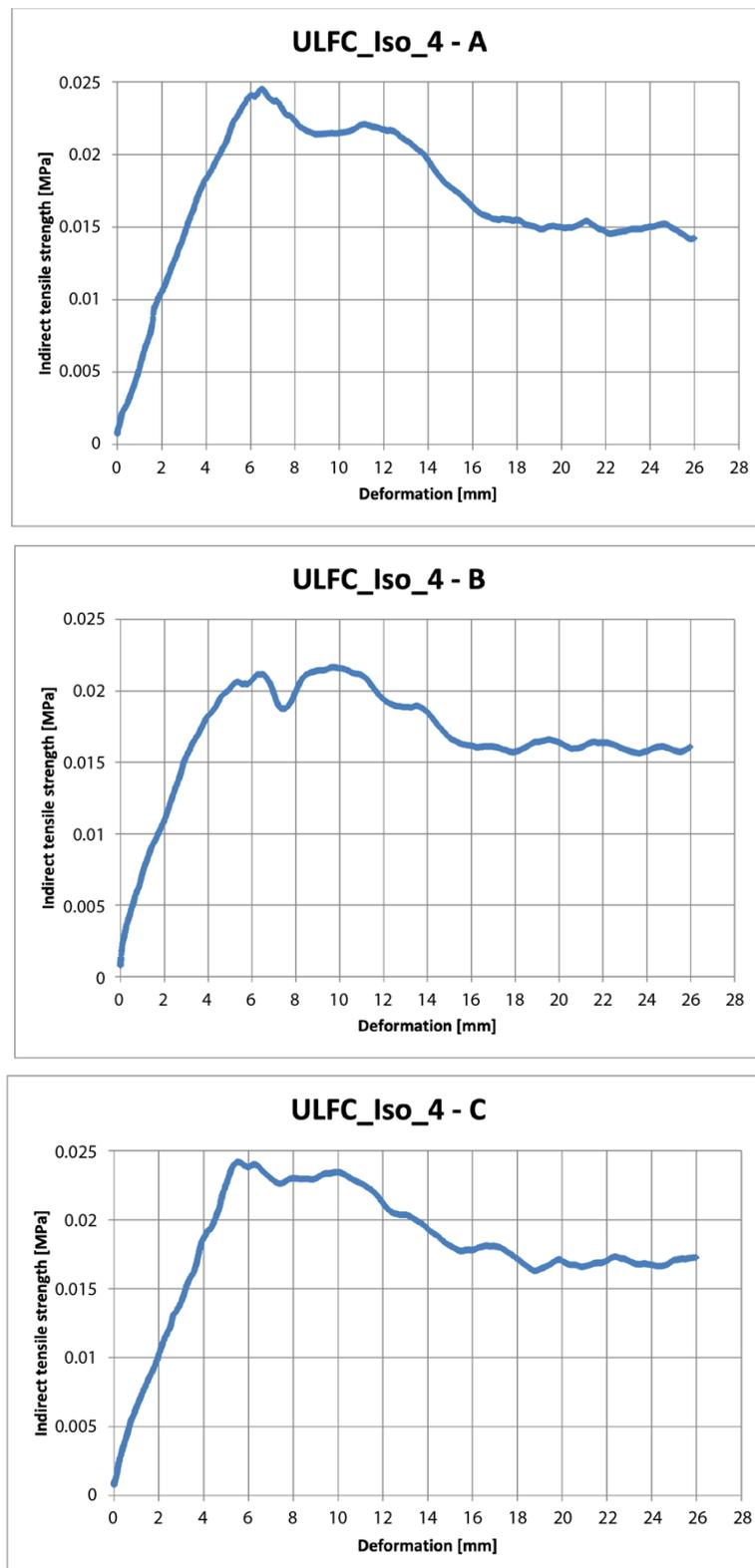


Figura 60 - Rappresentazioni grafiche relative ai risultati emersi dalla prova di resistenza a trazione per flessione effettuata su ciascuno dei tre campioni prismatici realizzati con l'impasto ULFC Iso_4.

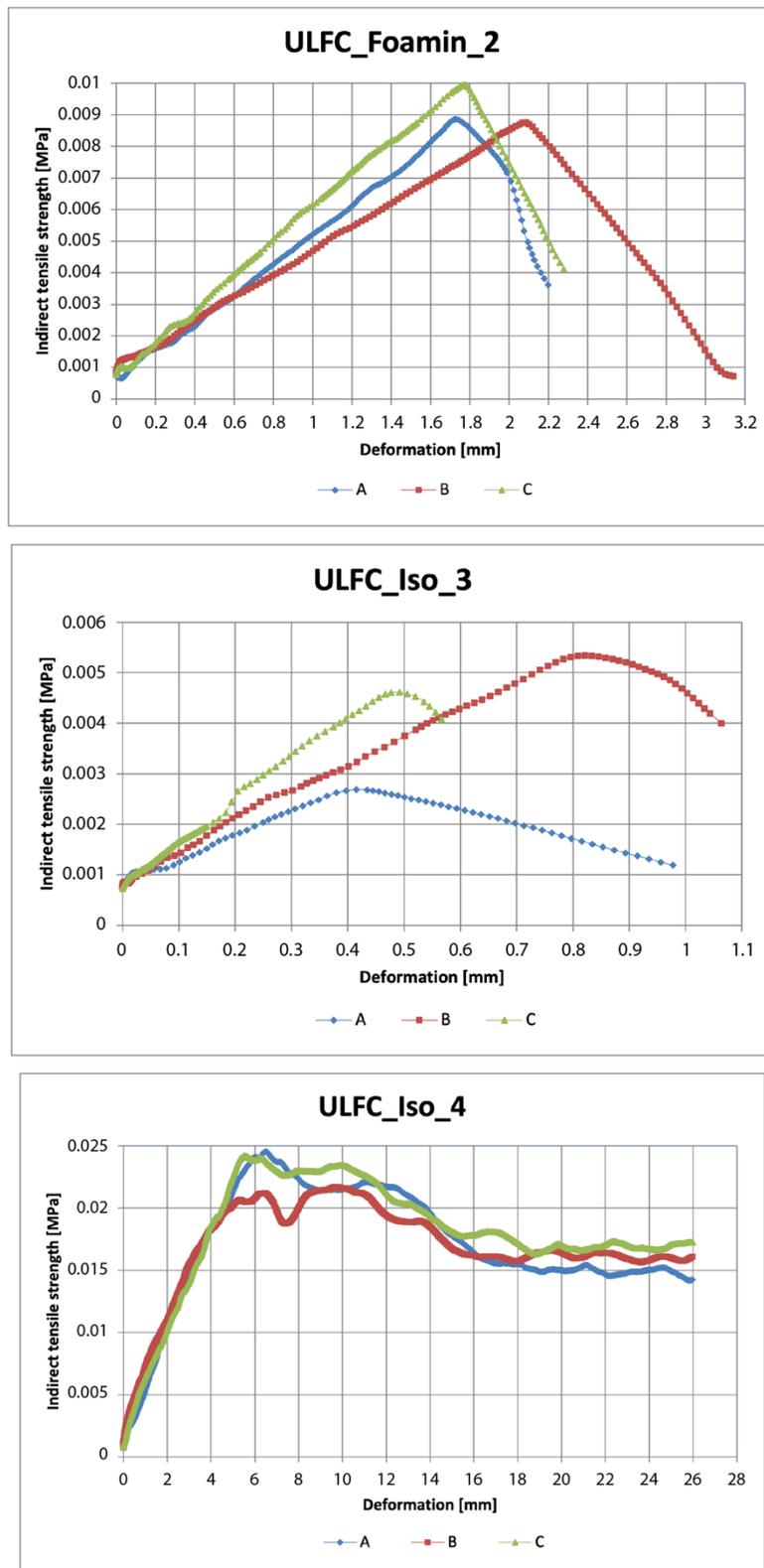


Figura 61 – Rappresentazioni grafiche con sovrapposizione dei risultati emersi dalla prova di resistenza a trazione per flessione effettuata su ciascuno dei tre campioni prismatici realizzati con l'impasto ULFC Foamin_2 (in alto), ULFC Iso_3 (centro) e ULFC Iso_4 (in basso).

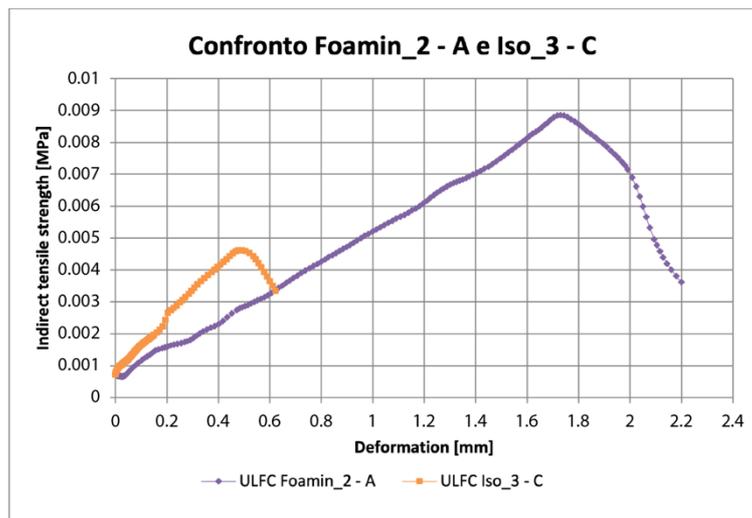


Figura 62 – Rappresentazione grafica con sovrapposizione dei risultati emersi dalla prova di resistenza a trazione per flessione effettuata su due campioni rappresentativi realizzati con due impasti caratterizzati dall'impiego di due tensioattivi differenti e dall'assenza di microfibre.

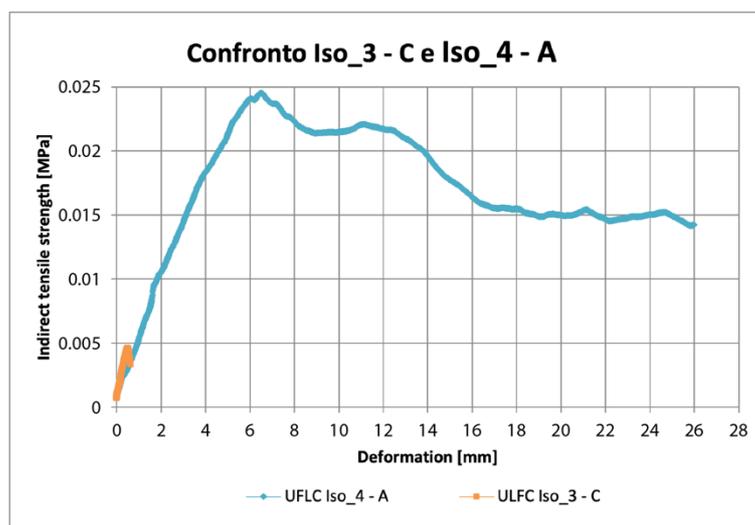


Figura 63 - Rappresentazione grafica con sovrapposizione dei risultati emersi dalla prova di resistenza a trazione per flessione effettuata su due campioni rappresentativi realizzati con due impasti caratterizzati dall'impiego dello stesso tensioattivo e dalla presenza solamente in uno dei due di microfibre.

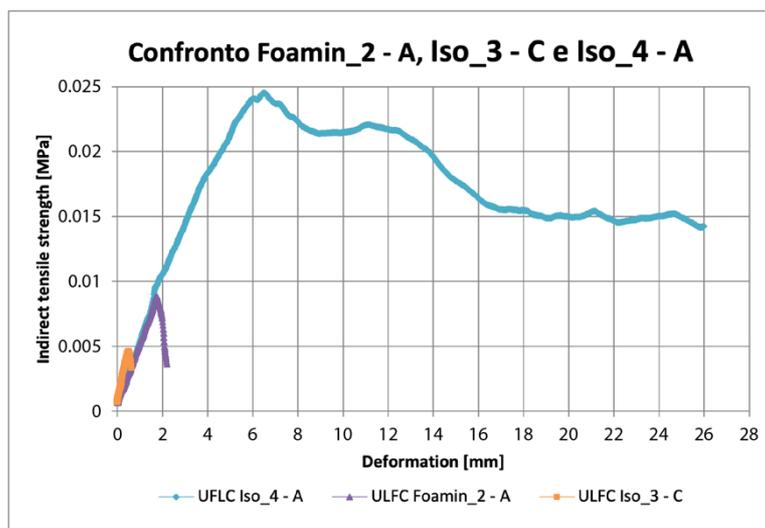


Figura 64 - Rappresentazione grafica con sovrapposizione dei risultati emersi dalla prova di resistenza a trazione per flessione effettuata su tre campioni rappresentativi realizzati con i tre impasti su cui è stata svolta la valutazione.

Tabella 14 – Riepilogo dei risultati emersi dalla prova a trazione per flessione eseguita sui tre campioni ULFC Foamin_2.

ULFC Foamin_2					
CAMPIONE	DENSITÀ γ_{ua} [kg/m ³]	RESISTENZA INDIRETTA A TRAZIONE f_t [MPa]	RESISTENZA INDIRETTA A TRAZIONE MEDIA [MPa]	DEVIAZIONE MEDIA STANDARD [MPa]	POROSITÀ [%]
A	104	0,0089	0,0091	0,000661	92,35
B	100	0,0087			
C	100	0,0100			

Tabella 15 - Riepilogo dei risultati emersi dalla prova a trazione per flessione eseguita sui tre campioni ULFC Iso_3.

ULFC Iso_3					
CAMPIONE	DENSITÀ γ_{ua} [kg/m ³]	RESISTENZA INDIRETTA A TRAZIONE f_t [MPa]	RESISTENZA INDIRETTA A TRAZIONE MEDIA [MPa]	DEVIAZIONE MEDIA STANDARD [MPa]	POROSITÀ [%]
A	104	0,0027	0,0042	0,001371	93,53
B	99	0,0053			
C	105	0,0046			

Tabella 16 - Riepilogo dei risultati emersi dalla prova a trazione per flessione eseguita sui tre campioni ULFC Iso_4.

ULFC Iso_4					
CAMPIONE	DENSITÀ γ_{ua} [kg/m ³]	RESISTENZA INDIRETTA A TRAZIONE f_t [MPa]	RESISTENZA INDIRETTA A TRAZIONE MEDIA [MPa]	DEVIAZIONE MEDIA STANDARD [MPa]	POROSITÀ [%]
A	100	0,0245	0,0235	0,001561	93,95
B	98	0,0217			
C	99	0,0242			

Tabella 17 – Riepilogo dei risultati emersi dalle prove di resistenza a trazione per flessione eseguite sui campioni realizzati con gli impasti oggetto di valutazione.

PROVE DI RESISTENZA A TRAZIONE PER FLESSIONE					
CAMPIONE	DENSITÀ UMIDA γ_{ua} [kg/m ³]	RESISTENZA INDIRECTA A TRAZIONE f_t [MPa]	RESISTENZA INDIRECTA A TRAZIONE MEDIA [MPa]	DEVIAZIONE MEDIA STANDARD [MPa]	POROSITÀ [%]
ULFC Foamin_2 - A	104	0,0089	0,0091	0,000661	92,35
ULFC Foamin_2 - B	100	0,0087			
ULFC Foamin_2 - C	100	0,0100			
ULFC Iso_3 - A	104	0,0027	0,0042	0,001371	93,53
ULFC Iso_3 - B	99	0,0053			
ULFC Iso_3 - C	105	0,0046			
ULFC Iso_4 - A	100	0,0245	0,0235	0,001561	93,95
ULFC Iso_4 - B	98	0,0217			
ULFC Iso_4 - C	99	0,0242			

Dai risultati ottenuti in seguito alla realizzazione delle prove di trazione per flessione su tre punti e dai confronti eseguiti tra i diversi campioni analizzati, emergono alcuni elementi da mettere in evidenza. Dal confronto tra i due impasti ULFC Foamin_2 e ULFC Iso_3 - che si differenziano essenzialmente per l'agente tensioattivo schiumogeno impiegato - si evidenzia che l'impiego del tensioattivo *Foamin C* offre una prestazione nettamente superiore rispetto all'*Isocem S/B*, con una crescita percentuale di resistenza indiretta a trazione pari al 117%.

Dal confronto tra i due impasti caratterizzati dall'impiego dello stesso agente tensioattivo schiumogeno (*Isocem S/B*), emerge che per gli impasti ULFC Iso_3 e ULFC Iso_4 si possa evidenziare un comportamento migliore dovuto alla presenza delle microfibre (come si poteva già prevedere vista la specifica funzione che, in questo ambito, offre tipicamente l'impiego di fibre disperse nell'impasto). La loro presenza permette infatti di ottenere una resistenza indiretta a trazione notevolmente maggiore rispetto ai campioni senza fibre, con un incremento percentuale in termini di resistenza a flessione pari al 459%, oltre ad una capacità di deformazione molto superiore. Tra i tre impasti oggetto di analisi risulta che, come prevedibile, la prestazione migliore in termini di resistenza indiretta a trazione sia offerta dall'impasto ULFC Iso_4 (con un incremento percentuale pari al 158% rispetto all'ULFC Foamin_2). Poiché dal primo confronto è emerso che l'impiego del *Foamin C* permette di avere una prestazione superiore rispetto all'*Isocem S/B*, in futuro sarebbe interessante svolgere la prova di resistenza a trazione per flessione anche sull'impasto ULFC Foamin_5 che, ipoteticamente, vista la copresenza di *Foamin C* e fibre, potrebbe permettere un ulteriore incremento di prestazione e risultare, di conseguenza, la soluzione migliore nel presente ambito di analisi.

4.2.4.2 *Resistenza a compressione*

La prova di resistenza a compressione è stata eseguita sui campioni maturati in aria a temperatura ambiente ($20\pm 3^{\circ}\text{C}$) e umidità naturale realizzati per gli impasti ULFC Foamin_2, ULFC Iso_3 e ULFC Iso_4. In particolare, sono stati sottoposti al test i monconi dei prismi generatisi in seguito alla prova a flessione per cui, per ciascun impasto, la prova è stata svolta su un totale di 6 elementi. L'elevato numero di prove realizzate ha permesso di individuare un comportamento rappresentativo e realistico relativo alla resistenza a compressione del materiale impiegato per ciascuna tipologia di impasto. Per lo svolgimento della prova, è stata impiegata la modalità a controllo di forza secondo la normativa UNI EN 196-1, ma, diversamente da essa, è stata impiegata una forza molto inferiore (pari a 50 N/s) perché, viste le caratteristiche specifiche del materiale oggetto di analisi, già a priori si prevedevano resistenze a compressione molto ridotte. In fase di test, ciascun provino è stato posizionato in modo che la superficie esposta all'aria durante la maturazione si trovasse in posizione frontale così da non essere sottoposta direttamente alla pressione esercitata dal macchinario, in accordo alla normativa. Di seguito si riportano le riprese fotografiche effettuate durante il test ed i risultati emersi alla fine della valutazione, sia in forma tabulare che di grafico.



Figura 65 - Riprese fotografiche realizzate al termine della prova di resistenza a compressione svolte sui campioni ULFC Foamin_2 – A1 (sinistra) e ULFC Iso_4 – A1 (destra).



Figura 66 – Ripresa fotografica realizzata alla fine della prova di resistenza a compressione svolta sul campione ULFC Foamin_2 – A1. Si evidenzia che la compressione esercitata sul campione ha prodotto solamente lo schiacciamento dello stesso per via dell'elevata porosità che caratterizza il campione.

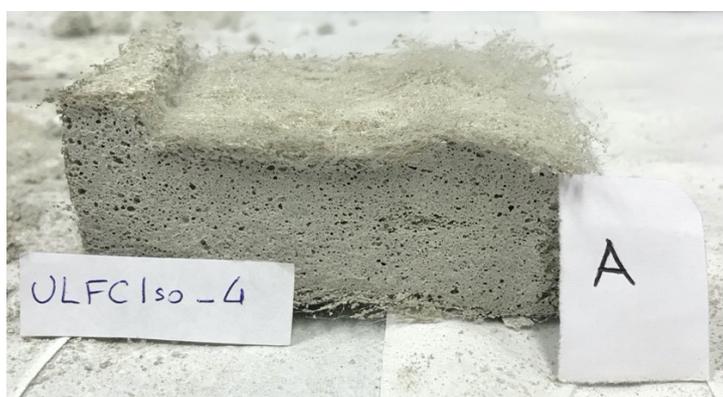
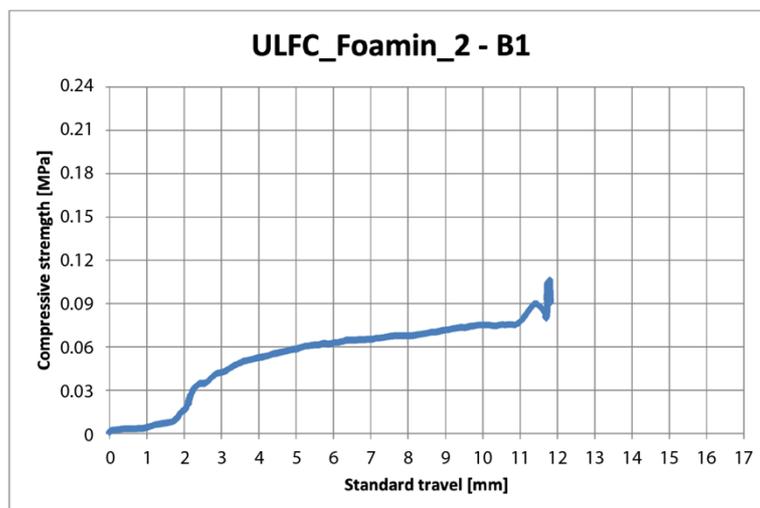
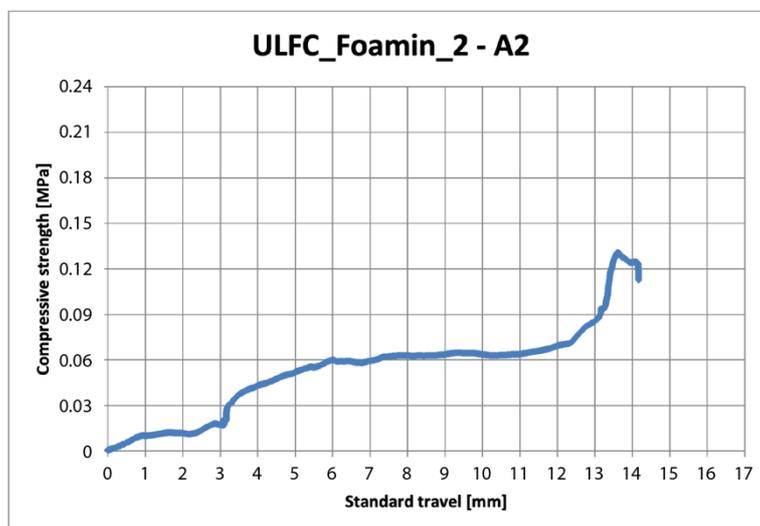
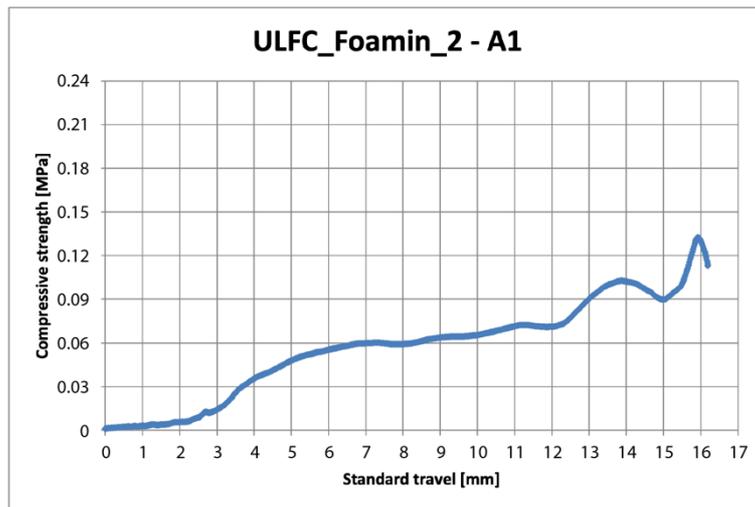


Figura 67 - Ripresa fotografica realizzata alla fine della prova di resistenza a compressione svolta sul campione ULFC Iso_4 – A1. Si evidenzia che, anche nel caso di presenza di microfibre, la compressione esercitata sul campione ha prodotto solamente lo schiacciamento dello stesso.



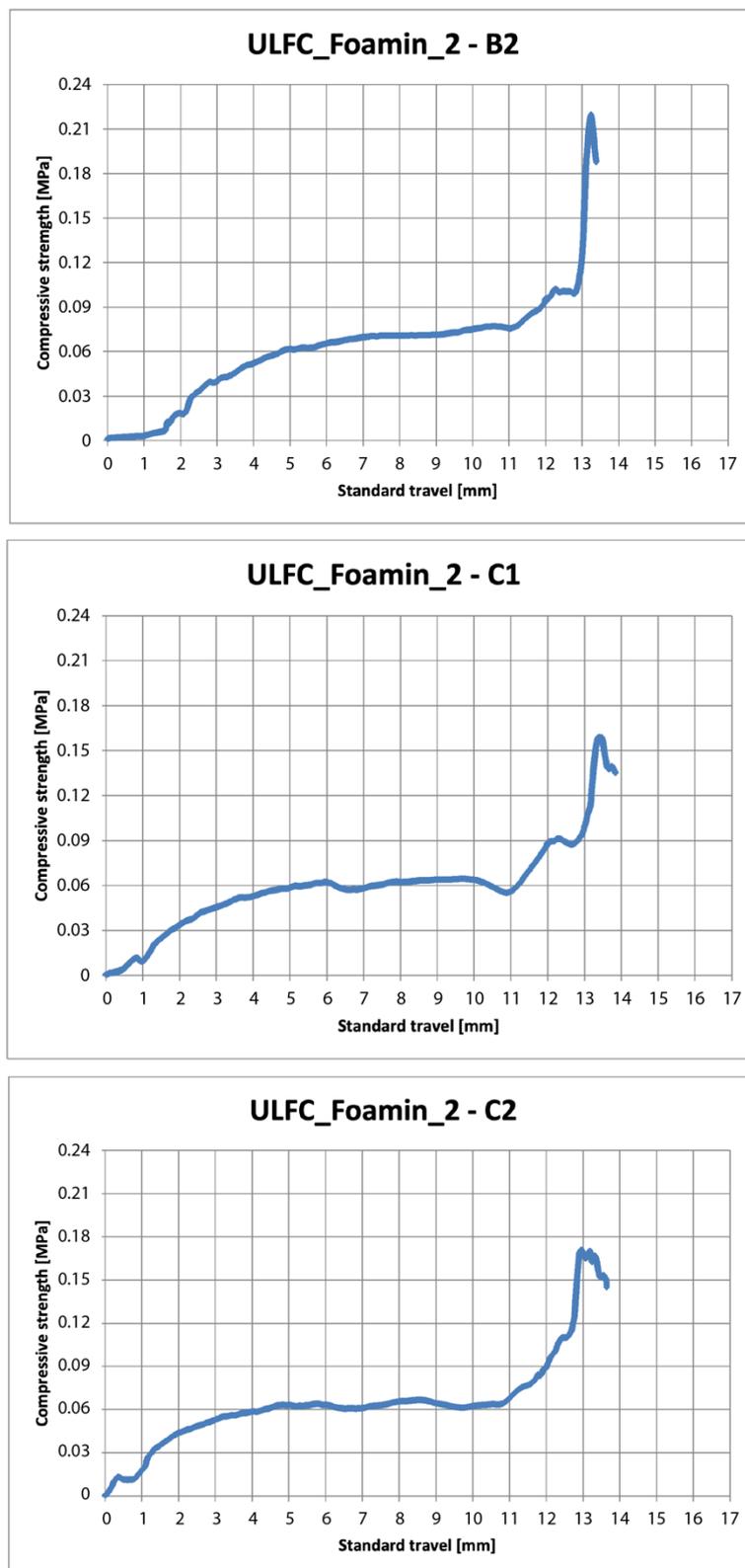
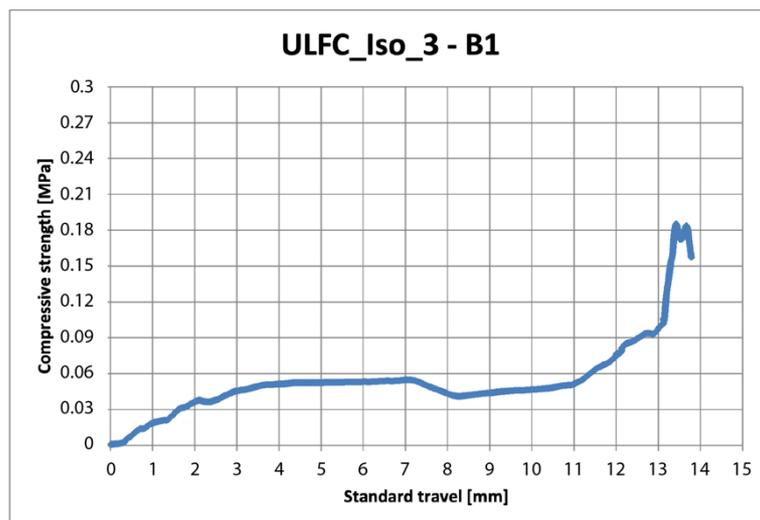
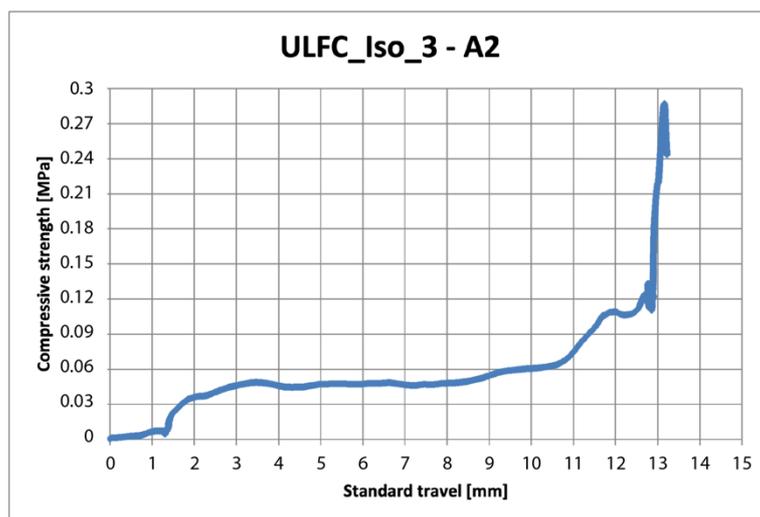
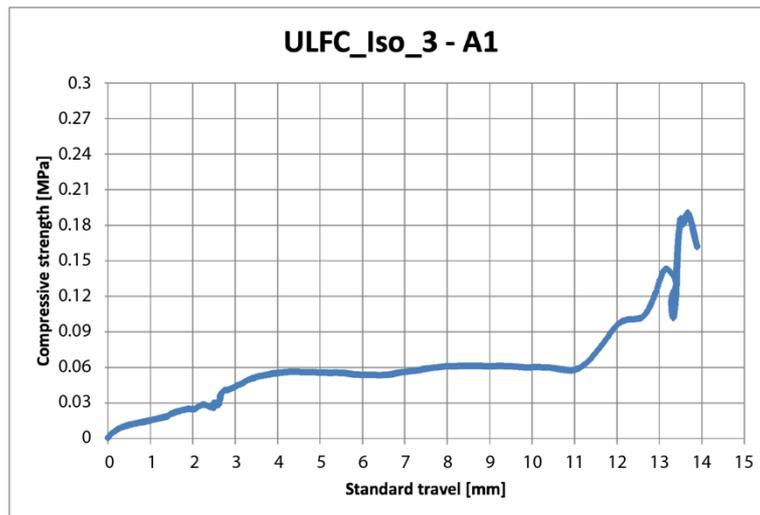


Figura 68 - Rappresentazioni grafiche relative ai risultati emersi dalla prova di resistenza a compressione effettuata su ciascuno dei sei monconi derivanti dai campioni prismatici realizzati con l'impasto ULFC Foamin_2.



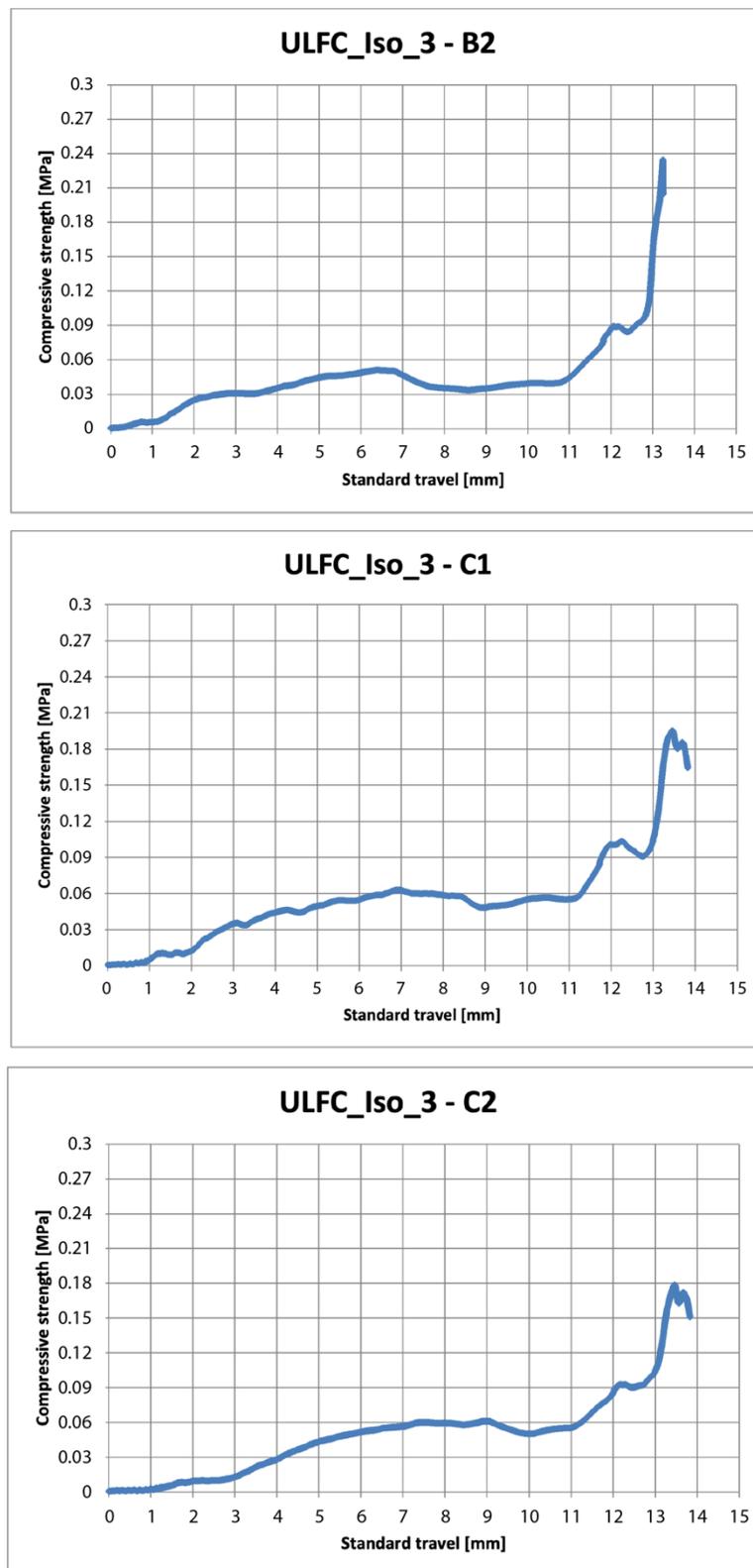
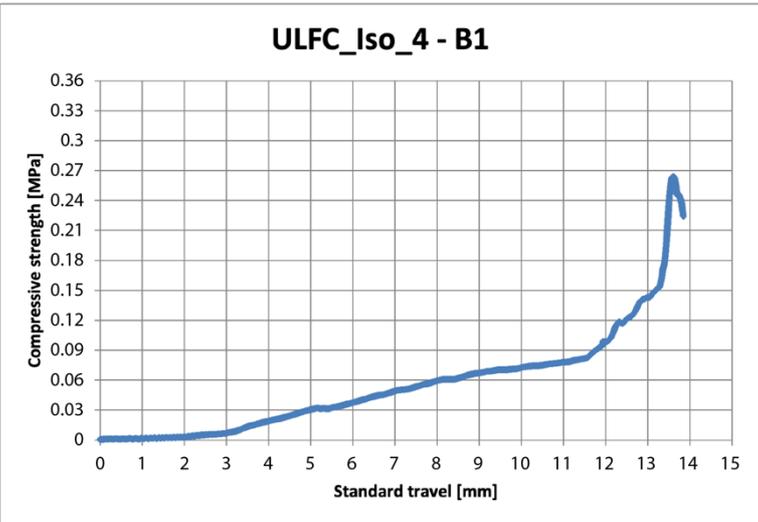
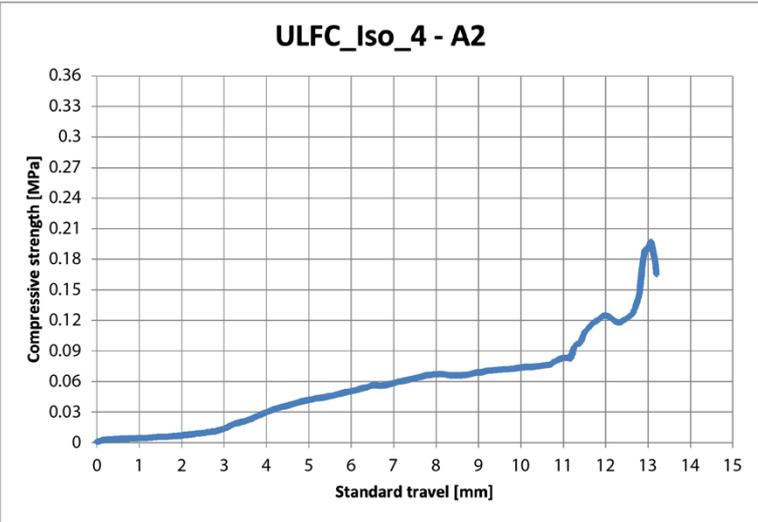
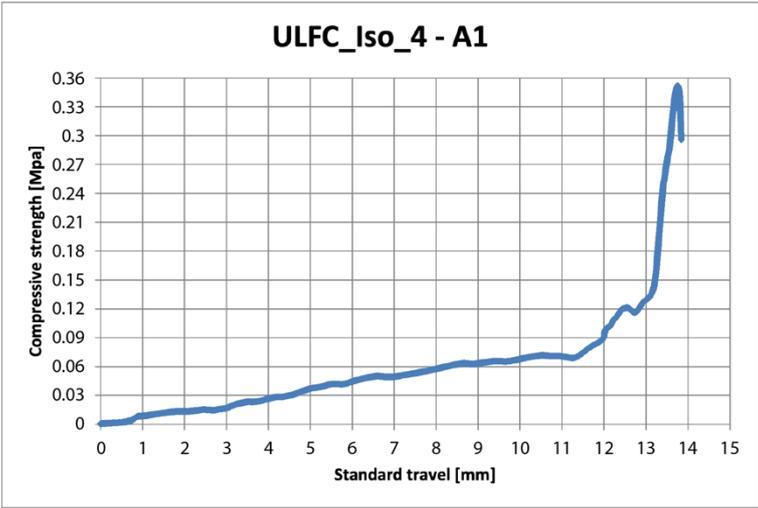


Figura 69 - Rappresentazioni grafiche relative ai risultati emersi dalla prova di resistenza a compressione effettuata su ciascuno dei sei monconi derivanti dai campioni prismatici realizzati con l'impasto ULFC Iso_3.



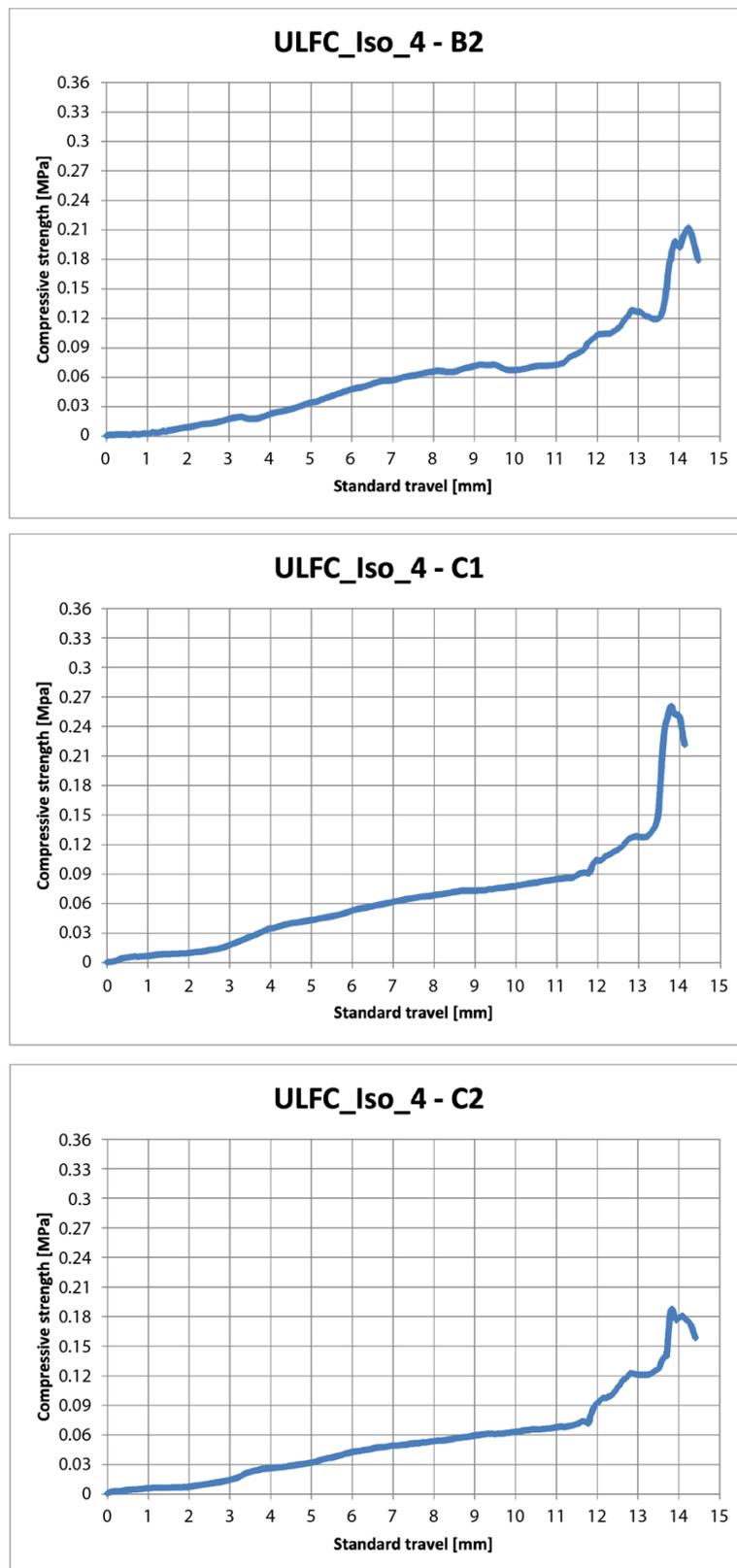


Figura 70 - Rappresentazioni grafiche relative ai risultati emersi dalla prova di resistenza a compressione effettuata su ciascuno dei sei monconi derivanti dai campioni prismatici realizzati con l'impasto ULFC Iso_4.

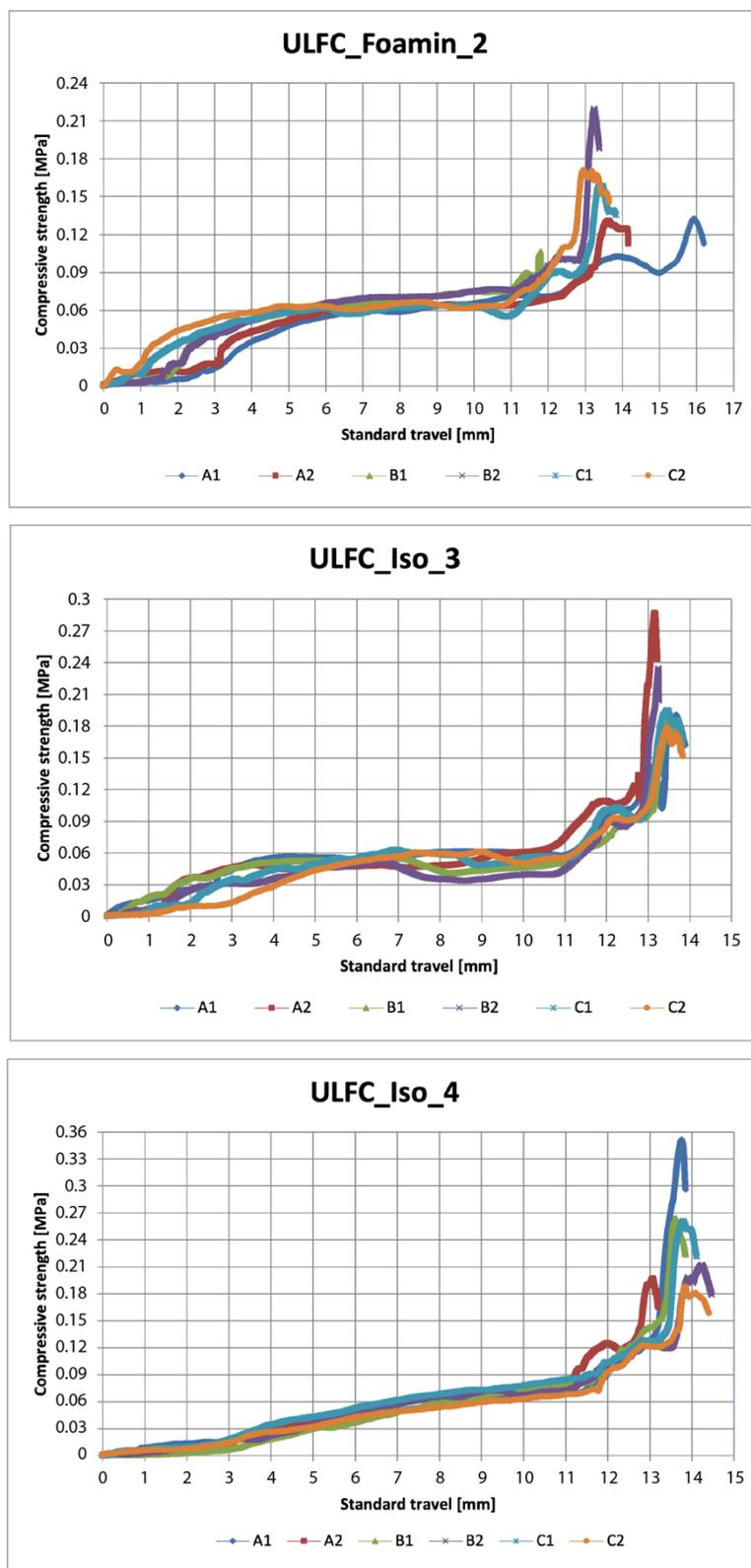


Figura 71 - Rappresentazioni grafiche con sovrapposizione dei risultati emersi dalla prova di resistenza a compressione effettuata su ciascuno dei sei monconi derivanti dai campioni prismatici realizzati con l'impasto ULFC Foamin_2 (in alto), ULFC Iso_3 (centro) e ULFC Iso_4 (in basso).

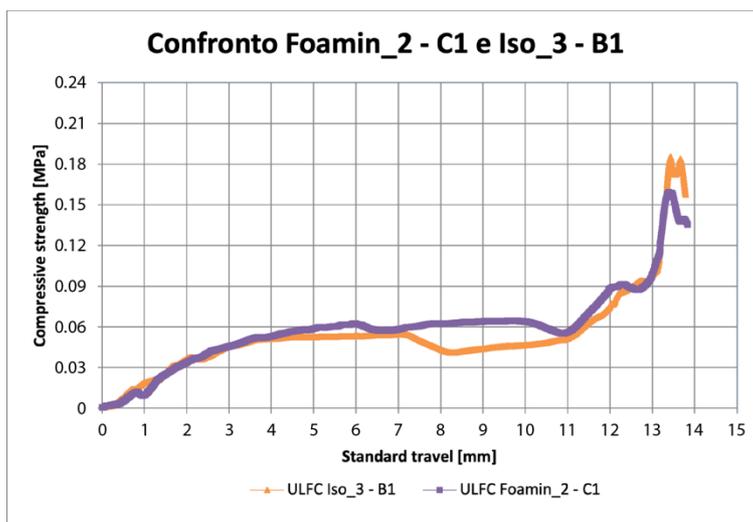


Figura 72 - Rappresentazione grafica con sovrapposizione dei risultati emersi dalla prova di resistenza a compressione effettuata su due campioni rappresentativi realizzati con due impasti caratterizzati dall'impiego di due tensioattivi differenti e dall'assenza di microfibre.

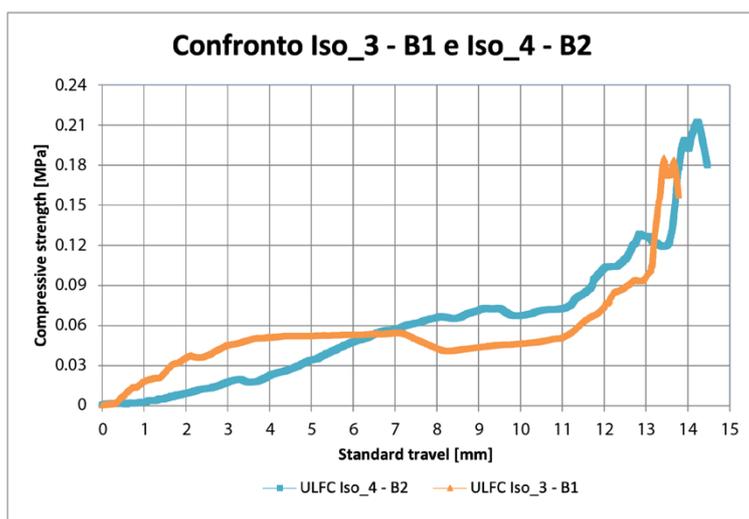


Figura 73 - Rappresentazione grafica con sovrapposizione dei risultati emersi dalla prova di resistenza a compressione effettuata su due campioni rappresentativi realizzati con due impasti caratterizzati dall'impiego dello stesso tensioattivo e dalla presenza solamente in uno dei due di microfibre.

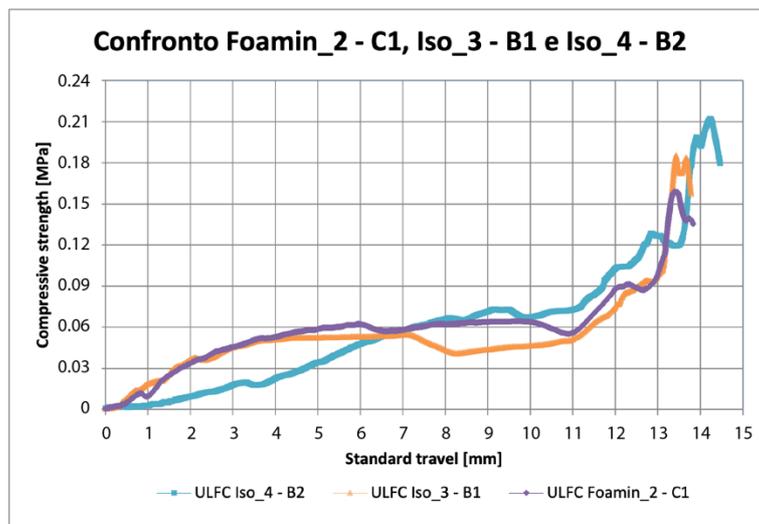


Figura 74 - Rappresentazione grafica con sovrapposizione dei risultati emersi dalla prova di resistenza a compressione effettuata su tre campioni rappresentativi realizzati con i tre impasti su cui è stata svolta la valutazione.

Tabella 18 - Riepilogo dei risultati emersi dalla prova a compressione eseguita sui sei monconi derivanti dai tre campioni prismatici realizzati con impasto ULFC Foamin_2.

ULFC Foamin_2					
CAMPIONE	DENSITÀ γ_{ua} [kg/m ³]	RESISTENZA A COMPRESSIONE R_c [MPa]	RESISTENZA A COMPRESSIONE MEDIA [MPa]	DEVIAZIONE MEDIA STANDARD [MPa]	POROSITÀ [%]
A1	104	0,1326	0,1533	0,03967	92,35
A2	104	0,1309			
B1	100	0,1065			
B2	100	0,2196			
C1	100	0,1591			
C2	100	0,1710			

Tabella 19 - Riepilogo dei risultati emersi dalla prova a compressione eseguita sui sei monconi derivanti dai tre campioni prismatici realizzati con impasto ULFC Iso_3.

ULFC Iso_3					
CAMPIONE	DENSITÀ γ_{ua} [kg/m ³]	RESISTENZA A COMPRESSIONE R_c [MPa]	RESISTENZA A COMPRESSIONE MEDIA [MPa]	DEVIAZIONE MEDIA STANDARD [MPa]	POROSITÀ [%]
A1	104	0,1907	0,2119	0,04172	93,53
A2	104	0,2871			
B1	99	0,1854			
B2	99	0,2344			
C1	105	0,1953			
C2	105	0,1785			

Tabella 20 - Riepilogo dei risultati emersi dalla prova a compressione eseguita sui sei monconi derivanti dai tre campioni prismatici realizzati con impasto ULFC Iso_4.

ULFC Iso_4					
CAMPIONE	DENSITÀ γ_{ua} [kg/m ³]	RESISTENZA A COMPRESSIONE R_c [MPa]	RESISTENZA A COMPRESSIONE MEDIA [MPa]	DEVIAZIONE MEDIA STANDARD [MPa]	POROSITÀ [%]
A1	100	0,3515	0,2456	0,06094	93,95
A2	100	0,1972			
B1	98	0,2637			
B2	98	0,2123			
C1	99	0,2611			
C2	99	0,1879			

Tabella 21 - Riepilogo dei risultati emersi dalle prove di resistenza a compressione eseguite sui campioni realizzati con gli impasti oggetto di valutazione.

PROVE DI RESISTENZA A COMPRESSIONE					
CAMPIONE	DENSITÀ UMIDA γ_{ua} [kg/m ³]	RESISTENZA A COMPRESSIONE R_c [MPa]	RESISTENZA A COMPRESSIONE MEDIA [MPa]	DEVIAZIONE MEDIA STANDARD [MPa]	POROSITÀ [%]
ULFC Foamin_2 - A1	104	0,1326	0,1533	0,03967	92,35
ULFC Foamin_2 - A2	104	0,1309			
ULFC Foamin_2 - B1	100	0,1065			
ULFC Foamin_2 - B2	100	0,2196			
ULFC Foamin_2 - C1	100	0,1591			
ULFC Foamin_2 - C2	100	0,1710			
ULFC Iso_3 - A1	104	0,1907	0,2119	0,04172	93,53
ULFC Iso_3 - A2	104	0,2871			
ULFC Iso_3 - B1	99	0,1854			
ULFC Iso_3 - B2	99	0,2344			
ULFC Iso_3 - C1	105	0,1953			
ULFC Iso_3 - C2	105	0,1785			
ULFC Iso_4 - A1	100	0,3515	0,2456	0,06094	93,95
ULFC Iso_4 - A2	100	0,1972			
ULFC Iso_4 - B1	98	0,2637			
ULFC Iso_4 - B2	98	0,2123			
ULFC Iso_4 - C1	99	0,2611			
ULFC Iso_4 - C2	99	0,1879			

Dai risultati ottenuti in seguito alla realizzazione delle prove di compressione e dai confronti eseguiti tra i campioni di ciascun impasto emergono anche in questo caso alcuni elementi da mettere in evidenza, anche se le differenze tra i tre impasti analizzati risultano di entità molto ridotta. Dal confronto tra gli impasti ULFC Foamin_2 e ULFC Iso_3 (che si differenziano essenzialmente per l'agente tensioattivo schiumogeno impiegato), si evidenzia che l'impiego del tensioattivo *Isocem S/B* permette una prestazione meccanica superiore rispetto al *Foamin C*, con una crescita percentuale di resistenza a compressione pari al 38%. Dal confronto tra i due impasti che, seppur caratterizzati dall'impiego dello stesso agente tensioattivo schiumogeno (*Isocem S/B*), si differenziano per la presenza in un solo caso di microfibre in polipropilene (ULFC Iso_3 e ULFC Iso_4), si evidenzia che la presenza delle microfibre permette di ottenere una resistenza a compressione maggiore rispetto al campione senza fibre, con una crescita percentuale valutata rispetto al campione senza fibre pari a circa il 16%, sebbene insignificante rispetto al miglioramento evidenziato in termini di

resistenza indiretta a trazione (si veda 4.2.4.1). Sebbene le differenze non siano notevoli, tra i tre impasti oggetto di analisi risulta che la prestazione migliore in termini di resistenza a compressione sia offerta dall'impasto ULFC Iso_4, con un incremento percentuale rispetto al campione ULFC Foamin_2 pari al 60%.

Un aspetto particolarmente interessante che si è riscontrato in seguito all'analisi e alla comparazione delle curve di tutti i campioni sottoposti a test di compressione è costituito dalla presenza di un *plateaux*, un tratto a tangente circa orizzontale particolarmente evidente in ciascuno dei grafici ottenuti in seguito ai test, cui segue un incrudimento del materiale con corrispondente fase di *hardening* evidenziata da un rapido aumento della resistenza del provino. Tale comportamento potrebbe essere causato semplicemente da un maggior effetto di confinamento dovuto all'avvicinarsi delle due presse, oppure dalle caratteristiche intrinseche del materiale per cui al crescere dello spostamento vengono “reclutate” sempre più fibre che, avendo una resistenza costante, determinano il tratto a tangente circa orizzontale. Per spiegare con esattezza tale comportamento sarebbe necessario svolgere ulteriori test per indagare in modo più approfondito le motivazioni che ne sono alla base.

4.2.5_Prova di stabilità

La prova di stabilità risulta particolarmente importante per i calcestruzzi schiumati ultra-leggeri, soprattutto se a densità estremamente bassa come nel caso oggetto di studio, poiché è possibile che nella fase di transizione tra presa ed indurimento si verifichi il fenomeno dell'instabilità delle bolle con conseguente perdita dell'aria dall'impasto che può portare al collasso. La stabilità è stata valutata per tutti gli impasti tramite l'impiego di colonne di materiale di altezza pari a 15 cm e diametro interno pari a 7 cm. Solamente sull'impasto che ha offerto il risultato migliore, e cioè ULFC Foamin_5, è stata svolta un'ulteriore prova di stabilità tramite l'impiego di una colonna di materiale di altezza pari a 1 m e diametro interno pari a 5,9 cm.

Per la valutazione della stabilità, in seguito alla miscelazione, il materiale è stato versato all'interno del cilindro, ponendo particolare attenzione nel riempirlo in modo omogeneo, senza lasciare macro-vuoti d'aria durante il procedimento. Dopo 24 ore, è stato verificato tramite controllo visivo il mancato collasso del composto e la conseguente riuscita della prova. In seguito, la colonna è stata lasciata maturare per 7 giorni in aria a temperatura ambiente ($20\pm 3^{\circ}\text{C}$) ed umidità naturale prima di essere sezionata con l'impiego di un seghetto a nastro verticale al fine di individuare tre sezioni cilindriche di altezza pari a 5 cm provenienti da tre punti differenti della colonna, nella metà superiore, al centro e nella metà inferiore. Di ciascun cilindro sono stati valutati il peso e il volume, al fine di calcolare la densità di ciascun campione e valutarne eventuali variazioni alle differenti quote di altezza della colonna. Dalla valutazione non sono state riscontrate variazioni di densità

significative nei tre campioni cilindrici analizzati, per cui si confermano il corretto inserimento del materiale all'interno della colonna e l'assenza di fenomeni di instabilità nell'impasto oggetto di verifica.



Figura 75 – Riprese fotografiche eseguite sulla colonna alta 1 m in seguito all'indurimento. Si evidenzia il mancato collasso del materiale.



Figura 76 – Riprese fotografiche delle sezioni cilindriche effettuate sulla colonna alta 1 m a differenti quote: nella metà superiore (sinistra), in posizione mediana (centro) e nella metà inferiore (destra).

4.2.6_Conducibilità termica

La valutazione della conducibilità termica dei campioni realizzati nel contesto della presente sperimentazione rappresenta un ambito particolarmente interessante, da analizzare soprattutto in riferimento ad un materiale ultra-leggero caratterizzato da una densità estremamente bassa come nel caso oggetto di studio. Pur non avendo eseguito delle prove, è possibile comunque prevedere dei valori indicativi di conducibilità termica dei campioni realizzati, grazie ad uno studio sperimentale pubblicato nel 2019 [12], è stato possibile ipotizzare dei valori indicativi di conducibilità termica per i campioni realizzati in questa sperimentazione. Chiaramente, l'effettiva validità di tali valori deve essere verificata a livello sperimentale per lo specifico caso oggetto di studio ma, nelle circostanze appena delineate, tale strategia ha permesso di avanzare delle ipotesi a riguardo. Quest'ultime si basano essenzialmente sull'assunzione di poter estendere la curva definita da densità fresca e conducibilità termica evidenziata durante lo studio sperimentale [12] e ricavata dall'analisi di campioni in calcestruzzo schiumato estrudibile maturati in aria e con densità umida compresa nel *range* tra 316 e 828 kg/m³ anche a campioni caratterizzati da densità più basse. Nello studio i campioni sottoposti a tale valutazione sono stati realizzati in dimensioni di 50x50x3 cm e analizzati in un contesto di temperatura ambientale di 25 °C tramite il metodo del termoflussimetro con piatto freddo a temperatura di 15 °C e piatto caldo a temperatura di 40 °C. Da tale esperimento è emerso che la conducibilità termica si riduce significativamente con la diminuzione della densità del campione e che, nel tratto di densità analizzato, tale riduzione segue un andamento descrivibile tramite la curva di regressione esponenziale individuata dalla formula rappresentata nella figura seguente.

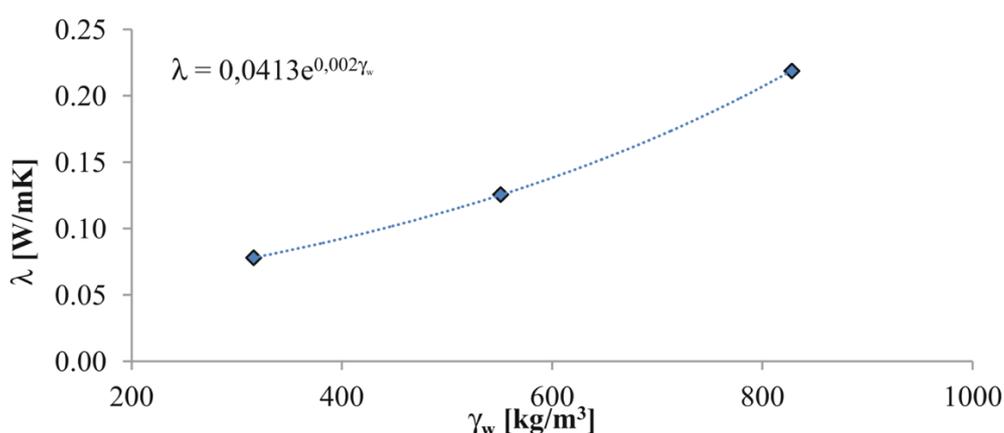


Figura 77 - Rappresentazione grafica della curva di regressione esponenziale ottenuta dai valori di conducibilità termica (asse delle ordinate) e di densità umida (asse delle ascisse) nell'ambito dello studio sperimentale svolto su campioni di calcestruzzo schiumato estrudibile a densità umida compresa nel range 316-828 kg/m³ [12].

Partendo dal comportamento emerso da tale studio e assumendo che la regressione continui con lo stesso andamento anche per densità umide inferiori a 316 kg/m³ fino ad arrivare ad includere

anche il *range* di densità umide oggetto del presente lavoro di tesi, compreso tra 98 e 110 kg/m³, è stato possibile ipotizzare i valori di conducibilità termica dei campioni realizzati nel presente studio. Chiaramente, le differenze che distinguono lo studio sperimentale [12] dal presente lavoro, sia a livello di composizione degli impasti che di *range* di densità analizzato, rendono incognita l'effettiva validità dei valori riportati nella seguente tabella ma almeno permettono di avanzare un'ipotesi in merito. Nel caso in cui coincidessero con le prestazioni realmente offerte, i valori di conducibilità riportati nella seguente tabella in relazione ai campioni di calcestruzzo schiumato estrudibile risulterebbero ottimali per lo svolgimento della funzione di isolamento termico cui è prevalentemente indirizzato il materiale innovativo oggetto di studio.

Tabella 22 – Valori di conducibilità termica ipotizzati per i campioni realizzati con impasti ULFC Foamin_2, Iso_3 e Iso_4.

CONDUCIBILITÀ TERMICA IPOTIZZATA		
CAMPIONE	DENSITÀ UMIDA γ_{ua} [kg/m³]	CONDUCIBILITÀ TERMICA λ [W/mK]
ULFC Foamin_2 - A	104	0,0507
ULFC Foamin_2 - B	100	0,0503
ULFC Foamin_2 - C	100	0,0503
ULFC Iso_3 - A	104	0,0507
ULFC Iso_3 - B	99	0,0502
ULFC Iso_3 - C	105	0,0508
ULFC Iso_4 - A	100	0,0503
ULFC Iso_4 - B	98	0,0501
ULFC Iso_4 - C	99	0,0502

4.3_CONSIDERAZIONI

Oltre alle considerazioni già espresse nell’ambito di ciascuna analisi specifica, vi sono ulteriori aspetti da evidenziare. I campioni analizzati nel presente studio si caratterizzano per valori di porosità molto elevati e ciò produce effetti significativi sulle prestazioni meccaniche sia di compressione che di trazione indiretta. Tuttavia, le variazioni a livello di porosità e di dimensione dei pori risultano minime per cui non provocano effetti rilevanti sui tre impasti oggetto di analisi. I fattori che invece influenzano le prestazioni meccaniche, sia di compressione che di trazione, sono l’eventuale presenza di microfibre in polipropilene disperse nell’impasto e, in misura molto minore e con comportamento inverso tra trazione e compressione, anche il tipo di tensioattivo impiegato. In assenza di fibre, infatti, si nota che l’impiego del *Foamin C* produce un incremento di resistenza a trazione indiretta (pari al 117%) e allo stesso tempo un decremento di resistenza a compressione (pari al 38%) rispetto all’impiego dell’*Isocem S/B*. Tuttavia, l’elemento che maggiormente determina differenze notevoli a livello di prestazioni meccaniche e produce un miglioramento di entrambe le resistenze è l’eventuale presenza di microfibre in polipropilene. Nel caso di impasto ULFC Iso_4, infatti, si riscontrano le migliori prestazioni meccaniche con incrementi di resistenza indiretta a trazione fino al 459% rispetto a ULFC Iso_3 e di resistenza a compressione fino al 60% rispetto a ULFC Foamin_2. Chiaramente, il contributo maggiore della presenza di fibre si manifesta in riferimento alla resistenza indiretta a trazione poiché in tale ambito esse svolgono funzione di armatura dispersa.

Tabella 23 – Riepilogo delle prestazioni meccaniche di resistenza indiretta a trazione e resistenza a compressione degli impasti oggetto di valutazione.

PRESTAZIONI MECCANICHE						
CAMPIONE	DENSITÀ UMIDA γ_{um} [kg/m ³]	RESISTENZA INDIRETTA A TRAZIONE MEDIA [MPa]	DEVIAZIONE MEDIA STANDARD A TRAZIONE [MPa]	RESISTENZA A COMPRESSIONE MEDIA [MPa]	DEVIAZIONE MEDIA STANDARD A COMPRESSIONE [MPa]	POROSITÀ [%]
ULFC Foamin_2 - A ULFC Foamin_2 - B ULFC Foamin_2 - C	104 100 100	0,0091	0,000661	0,1533	0,03967	92,35
ULFC Iso_3 - A ULFC Iso_3 - B ULFC Iso_3 - C	104 99 105	0,0042	0,001371	0,2119	0,04172	93,53
ULFC Iso_4 - A ULFC Iso_4 - B ULFC Iso_4 - C	100 98 99	0,0235	0,001561	0,2456	0,06094	93,95

4.4_RICERCA

Nell'ottica di proseguire lo studio svolto sul calcestruzzo schiumato ultra-leggero a densità fresca compresa nel *range* di 162-188 kg/m³ oggetto della presente sperimentazione, sarebbe interessante approfondire ulteriormente le conoscenze generali sul calcestruzzo schiumato nel *range* di densità analizzato (che risulta particolarmente interessante in quanto attualmente rappresenta un ambito di studio ancora sostanzialmente inesplorato, al di fuori del presente lavoro) ed eseguire ulteriori confronti specifici tra impasti realizzati con i due differenti agenti schiumogeni tensioattivi impiegati (*Foamin C* e *Isocem S/B*), con eventuale presenza di microfibre in polipropilene *MasterFiber012*.

Le valutazioni più interessanti per il completamento del presente lavoro di ricerca potrebbero essere:

- prestazione di conducibilità termica realmente offerta.
- Prestazioni meccaniche offerte dai campioni realizzati con l'impasto ULFC *Foamin_5*.
- Caratterizzazione microstrutturale del campione cubico realizzato con l'impasto ULFC *Foamin_5*.
- Stabilità del composto da valutare tramite test su colonna alta un metro per gli impasti ULFC *Foamin_2*, ULFC *Iso_3* e ULFC *Iso_4*.

Tra gli ambiti appena elencati, il primo riveste un interesse prioritario poiché nel presente lavoro tale valutazione è stata ipotizzata sulla base di uno studio sperimentale [12] svolto su campioni in calcestruzzo schiumato estrudibile realizzati in condizioni differenti (sia per composizione dell'impasto che per *range* di densità analizzato). Risulterebbe pertanto particolarmente interessante individuare i valori reali relativi ai campioni realizzati con gli impasti specifici di questo studio, sia per approfondire la conoscenza relativa a questo specifico ambito, sia per confermare o smentire l'assunzione della continuità di andamento della curva di regressione esponenziale del grafico di densità umida e conducibilità termica evidenziata nello studio sperimentale del 2019 in riferimento al *range* di densità umida compreso tra 316 e 828 kg/m³ e ipotizzata anche per il *range* di densità analizzato nel presente lavoro, compreso tra 98 e 110 kg/m³ (si veda 4.2.6).

Anche il secondo ambito, cioè la valutazione delle prestazioni meccaniche dei campioni realizzati con l'impasto ULFC *Foamin_5*, risulta di particolare interesse visti i risultati emersi al termine delle prove meccaniche svolte sugli altri tre impasti da cui è stato possibile evidenziare, in particolare in termini di resistenza indiretta a trazione per flessione (si veda 4.2.4.1), un contributo positivo rilevante dovuto (separatamente) sia all'impiego del tensioattivo *Foamin C* che alla presenza di fibre disperse nell'impasto. Pertanto, sarebbe opportuno verificare se la combinazione delle due condizioni permette di garantire le prestazioni meccaniche più elevate tra tutti gli impasti oggetto di analisi.

Il materiale indagato in questo lavoro di tesi sperimentale necessita di essere studiato ancora da molti punti di vista quali, ad esempio, la caratterizzazione reologica tramite l'impiego di un reometro, il comportamento in ambito acustico, la durabilità, la permeabilità ecc.

In particolare, sarebbe interessante svolgere ulteriori studi circa la caratterizzazione reologica del materiale, in quanto essa permette di delineare le proprietà allo stato fresco del materiale che per le sue peculiarità potrebbe essere destinato ad un impiego in processi di produzione automatizzata.

Un ulteriore *step* di proseguimento del lavoro potrebbe riguardare l'impiego di tale materiale innovativo in processi di produzione automatizzata. Tali sperimentazioni andrebbero svolte sia nell'ambito di laboratorio che in contesti di produzione automatizzata più realistici tramite l'impiego della metodologia del *3D Concrete Printing*. A tal proposito sarebbe interessante impiegare, in una sperimentazione di carattere simile a quella esposta nel capitolo successivo, il materiale ultra-leggero per la realizzazione delle porzioni a bassa densità di componenti ingegnerizzati multi-funzionali e multi-densità interamente costituiti da calcestruzzo schiumato estrudibile e possibilmente realizzati con l'impiego di un macchinario in grado di applicare contemporaneamente sia il materiale ad alta densità costituente lo scheletro resistente dell'elemento che quello a bassissima densità per i riempimenti delle cavità. In tale ambito, si potrebbero individuare eventuali problematiche ancora insolite inerenti sia allo svolgimento del processo produttivo che alle caratteristiche, proprietà e prestazioni del componente allo stato indurito.

Lo stesso procedimento realizzato nel presente lavoro di tesi e le successive ipotesi di prosecuzione della sperimentazione appena delineate potrebbero inoltre essere impiegati per allargare ulteriormente l'indagine sul calcestruzzo schiumato estrudibile nel *range* di densità considerato introducendo, ad esempio, altre possibili variabili (quali altre tipologie di tensioattivi e/o di fibre, sostituzioni o aggiunte di alcuni costituenti per migliorare le proprietà del composto o dell'elemento indurito e/o per aumentarne l'eco-sostenibilità ecc.) al fine di istituire nuovi confronti con l'obiettivo di individuare soluzioni sempre migliori e performanti nell'ottica di una futura commercializzazione di componenti costituiti da questo tipo di materiale innovativo.

CAPITOLO 5

SPERIMENTAZIONE PARTE II: PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DI COMPONENTI ENERGETICAMENTE EFFICIENTI

5.1_PROGETTAZIONE DEI COMPONENTI

5.1.1_Introduzione

La seconda parte sperimentale del presente lavoro di tesi riguarda la progettazione e la realizzazione di componenti edilizi energeticamente efficienti in calcestruzzo schiumato estrudibile. Tali componenti sarebbero facilmente impiegabili per la realizzazione del cappotto termico nell'ottica di interventi di efficientamento energetico delle chiusure verticali opache esistenti, al fine di migliorare la *performance* termica dell'edificio e contemporaneamente garantendo un rinnovamento di facciata.

In modo analogo, le stesse procedure potrebbero essere impiegate per la progettazione e realizzazione di elementi costituenti un'unica interfaccia multifunzionale tra interno ed esterno (anche con eventuale funzione portante) nel caso di nuove costruzioni. Tuttavia, nel caso specifico, tutti gli elementi, essendo pensati per essere ancorati ad un muro esistente, sono stati progettati esclusivamente per soddisfare il requisito di auto-portanza e per garantire una *performance* termica ottimale quando accoppiati con l'esistente.

Durante la sperimentazione sono state valutate a livello progettuale tre differenti tipologie di elementi realizzati interamente in calcestruzzo schiumato estrudibile, sebbene con procedimenti e densità differenti (anche all'interno dello stesso elemento), quali:

- sistemi a cappotto costituiti da pannelli prefabbricati realizzati all'interno di casseforme removibili secondo due metodologie differenti, *3D Concrete Printing* o colatura, e, nel caso di colatura, in due versioni, mono-densità o a densità variabile (pannelli multistrato).
- Sistemi a cappotto composti da blocchi prefabbricati in stabilimento e destinati all'assemblaggio in cantiere, costituiti da una cassaforma a perdere estrusa secondo il

metodo del *3D Concrete Printing* con riempimento delle cavità definite da tale percorso con materiale colato ultraleggero al fine di migliorare la *performance* termica del componente.

- Sistemi a cappotto (con eventuale funzione di facciata ventilata) progettati per la realizzazione *in situ* e costituiti, come nel caso precedente, da una cassaforma a perdere estrusa tramite *3D Concrete Printing* con eventuali riempimenti delle cavità in materiale colato ultraleggero.

All'inizio della fase progettuale sono state fissate alcune condizioni che hanno indirizzato la progettazione degli elementi, quali:

- *caratteristiche stratigrafiche e prestazioni del muro esistente.*

La chiusura opaca esistente ipotizzata è costituita da mattoni pieni faccia a vista (spessore 30 cm; densità 1700 kg/m³; conducibilità termica 0,78 W/m²K) e intonaco di calce posto sulla faccia interna (spessore 1,5 cm; densità 1500 kg/m³; conducibilità termica 0,54 W/m²K), e complessivamente ha una trasmittanza termica pari a 1,717 W/m²K (l'impiego di un muro non isolato deriva dalla volontà di valutare i risultati in un caso estremo, sebbene non improbabile, al fine di evidenziare il contributo del nuovo sistema a cappotto introdotto).

- *Caratteristiche dei materiali impiegati per la realizzazione dei nuovi componenti.*

Tutti i componenti oggetto di progettazione si caratterizzano per l'impiego di un unico materiale, il calcestruzzo schiumato estrudibile, declinato a differenti densità all'interno di un *range* di densità fresca compreso tra 800 kg/m³ e 170 kg/m³ corrispondenti a densità finale compresa tra circa 650 kg/m³ e 95 kg/m³.

- *Trasmittanza termica massima del sistema complessivo (muro esistente e cappotto termico) pari a 0,28 W/m²K.*

Il valore massimo di trasmittanza termica rappresenta un requisito imprescindibile da verificare in ciascuna sezione trasversale del sistema e deriva dalle normative attualmente in vigore e, in particolare, dal Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico del 26 giugno 2015 secondo il quale risulta il valore di trasmittanza termica massima ammessa al 2021 per chiusure verticali opache di edifici esistenti soggetti a riqualificazione energetica collocati in zona climatica E, come Torino. Nella pratica progettuale, in realtà, si è cercato di migliorare ulteriormente tale prestazione arrivando spesso a valori inferiori a 0,27 W/m²K.

Tabella 24 – Valori di trasmittanza termica U massima delle chiusure verticali opache oggetto di riqualificazione, differenziate a seconda della zona climatica di localizzazione dell'edificio (Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico del 26 giugno 2015, allegato 1, capitolo 4, appendice B).

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2021 ⁽²⁾
A e B	0,45	0,40
C	0,40	0,36
D	0,36	0,32
E	0,30	0,28
F	0,28	0,26

La stratigrafia delle sezioni trasversali di ciascun componente è stata definita, in termini di spessori di ciascuno strato, sulla base di queste tre condizioni ponendo inoltre particolare attenzione alla *performance* termica complessivamente offerta dal componente oggetto di progettazione. In tale ambito sono stati considerati in ogni sezione vari parametri e aspetti tra cui, in particolare, la trasmittanza termica, l'assenza di ponti termici (sia nel singolo elemento che nelle sezioni di interfaccia tra elementi adiacenti), la trasmittanza termica periodica, la massa superficiale, lo sfasamento e l'attenuazione dell'onda termica. In fase progettuale, la *performance* termica è stata valutata secondo la normativa UNI 13786 attraverso un foglio di calcolo Excel (www.mygreenbuildings.org).

Ad esclusione dei componenti realizzati in casseforme removibili, per gli altri due sistemi oggetto di progettazione (blocchi prefabbricati e sistemi a cappotto realizzati *in situ*) si prevede l'impiego combinato del processo estrusivo e della colatura, e le caratteristiche dimensionali e formali degli elementi finali sono state definite ed influenzate, oltre che dalle condizioni poc'anzi enunciate, anche da ulteriori fattori, quali:

- volontà di esprimere le potenzialità che caratterizzano tipicamente la metodologia del *3D Concrete Printing* basando la progettazione sui principi di libertà formale (andamenti curvilinei e sbalzi), ottimizzazione topologica, risparmio di materiale (derivante sia dall'ottimizzazione topologica che dalla scelta di riempire le cavità con materiale colato solo quando necessario per il soddisfacimento dei requisiti prestazionali) e ibridazione funzionale (ottenuta senza cambiare natura del materiale ma solo attraverso la differenziazione di densità del composto tra “struttura” e “riempimento”).
- Requisiti derivanti dall'impiego del *3D Concrete Printing* in merito ad alcuni parametri da definire (quali l'orientamento verticale di stampa e le caratteristiche dimensionali del filamento, assunto di sezione quasi circolare con diametro pari a 2,5 cm) e ad altri aspetti da tenere in considerazione (quali l'attenzione ad angoli e cambi di direzione, la necessità di definire un percorso di stampa chiuso per poter svolgere il processo in continuità, la valutazione della forma ottimale per garantire la stabilità del materiale estruso ed evitare il

collasso durante il processo di produzione ponendo attenzione ad esempio alla lunghezza d'onda dei filamenti con andamento ondulato, alla funzione di irrigidimento e stabilizzazione svolta dai filamenti interni al perimetro, alla possibilità di aggiungere irrigidimenti interni *ad hoc* ecc.).

- Requisiti inerenti alla colatura di materiale ultraleggero in termini di necessità di individuare un perimetro chiuso che può essere definito interamente dal percorso di stampa oppure dalle intercapedini formate tra quest'ultimo e il muro esistente.
- Requisiti estetici (e funzionali) relativi alla faccia esposta verso l'esterno in termini di continuità del filamento estruso e di cura nella modalità di assemblaggio di blocchi e pannelli.
- Requisiti inerenti alle modalità di ancoraggio previste nei differenti casi tra nuovo sistema e muro esistente in termini, ad esempio, di definizione della distanza massima tra punti di contatto utili per l'introduzione dei sistemi di ancoraggio.

5.1.2_Compenti prefabbricati

L'ambito relativo alla progettazione di componenti prefabbricati si divide in due parti dedicate alla progettazione rispettivamente di pannelli estrusi o colati in cassaforma removibile e di blocchi prefabbricati ad incastro maschio-femmina. In tutti i casi, i componenti prefabbricati oggetto di progettazione, in previsione della posa in opera in cantiere e quindi della necessità di garantirne la trasportabilità e manovrabilità in tale contesto (in caso sia di manodopera umana che di futura automatizzazione di tale procedura tramite l'impiego di robot con funzione di «*pick and place*»), si caratterizzano per dimensioni e peso massimi assunti a priori (pari rispettivamente a un quadrato di lato 50 cm e un peso di 16 kg) sulla base di ricerche svolte su componenti da costruzione destinati ad impieghi analoghi attualmente in commercio.

5.1.2.1_Pannelli in cassaforma removibile

Il primo ambito di applicazione studiato a livello progettuale per la prefabbricazione riguarda la produzione di pannelli realizzati in cassaforma removibile tramite l'impiego di tre metodologie differenti:

- colatura di materiali a differente densità per ottenere un pannello multistrato multifunzionale (pannello tipo 1).
- Colatura di materiale mono-densità (pannello tipo 2).
- Estrusione tramite *3D Concrete Printing* di materiale mono-densità (pannello tipo 3).

A livello progettuale, i pannelli sono definiti dal punto di vista dimensionale e formale dalla cassaforma, ipotizzata di forma quadrata (con lato pari a 50 cm per il pannello tipo 1 e pari a 40

cm per i pannelli tipo 2 e 3) con superfici piane, mentre lo spessore degli strati dipende dai risultati derivanti dalla valutazione della *performance* termica del sistema complessivo (muro esistente e sistema a cappotto). Chiaramente, modificando la forma della cassaforma è possibile realizzare componenti con effetti di facciata tridimensionali per ottenere un involucro innovativo anche dal punto di vista estetico ed espressivo.

Per l'assemblaggio tra pannelli, si prevede l'impiego di una malta leggera (con caratteristiche tali da non dar luogo a ponti termici) molto sottile che permetta l'incollaggio tra elementi adiacenti al fine di garantire la continuità del sistema offrendo al contempo un contributo estetico e funzionale per la protezione dagli agenti atmosferici.

Pannello tipo 1

Nella conformazione finale, il pannello multistrato oggetto di progettazione si caratterizza per l'impiego di calcestruzzo schiumato estrudibile colato con caratteristiche variabili, a livello di densità e spessore degli strati, secondo la seguente stratificazione:

- strato 1: calcestruzzo schiumato a densità fresca 600 kg/m^3 per uno spessore pari a 5 cm.
- Strato 2: calcestruzzo schiumato a densità fresca 170 kg/m^3 per uno spessore pari a 11 cm.
- Strato 3: calcestruzzo schiumato a densità fresca 600 kg/m^3 per uno spessore pari a 4 cm.

Complessivamente il pannello risulta spesso 20 cm.

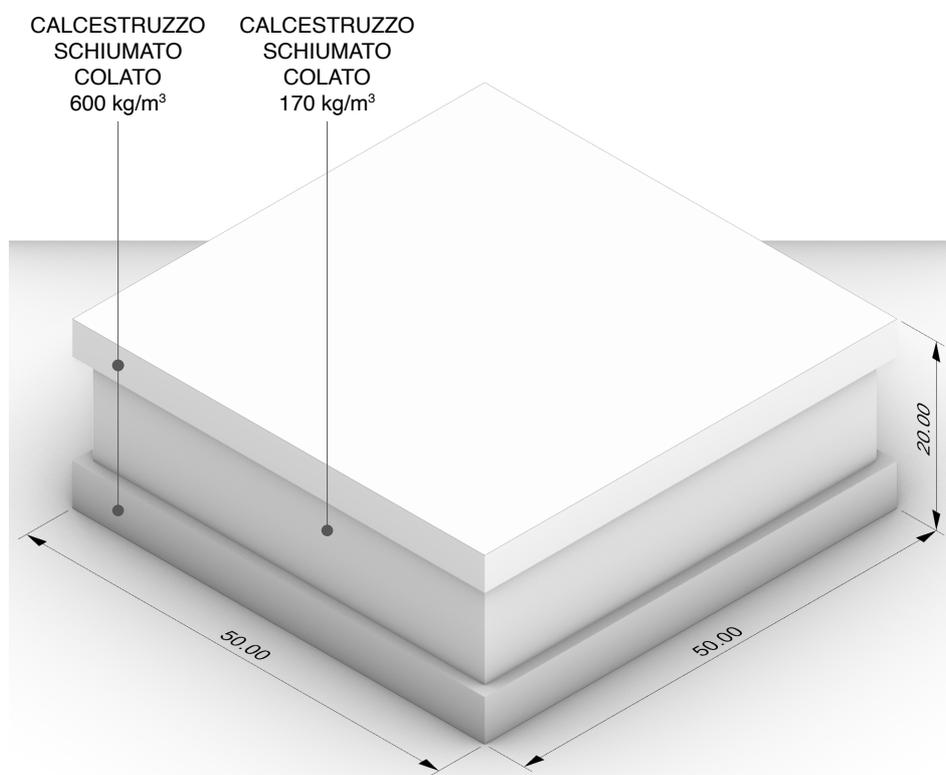


Figura 78 – Rappresentazione 3D del pannello prefabbricato tipo 1.

Tabella 25 – Caratteristiche del pannello prefabbricato tipo 1.

PANNELLO PREFABBRICATO MULTISTRATO COLATO			
CARATTERISTICHE DEL PANNELLO		CARATTERISTICHE DEL MATERIALE (calcestruzzo schiumato estrudibile)	
Dimensioni	50 cm (L) x 50 cm (H) x 20 cm (Sp)	STRATI 1 E 3:	
Peso	13,5 kg	Densità fresca	600 kg/m ³
N. strati	3	Densità finale	487 kg/m ³
PRESTAZIONE TERMICA DEL SISTEMA (Muro esistente + sistema a cappotto)		Conducibilità termica	0,1040 W/m ² K
Trasmittanza termica	0,274 W/m ² K	STRATO 2:	
Massa superficiale	587 kg/m ²	Densità fresca	170 kg/m ³
Attenuazione	0,052	Densità finale	95 kg/m ³
Sfasamento	16,54 h	Conducibilità termica	0,050 W/m ² K
Trasmittanza termica periodica	0,014 W/m ² K		

Pannello tipo 2

Il pannello a mono-densità colato si caratterizza per un unico strato in calcestruzzo schiumato estrudibile a densità fresca pari a 450 kg/m³ con uno spessore totale pari a 25 cm.

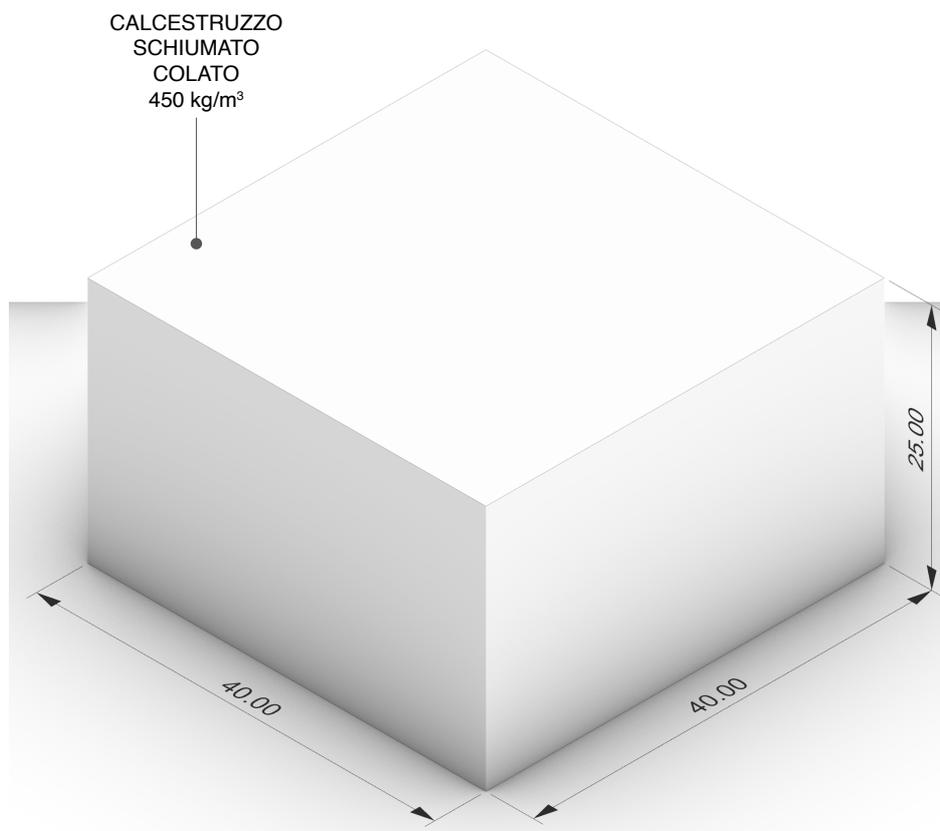


Figura 79 – Rappresentazione 3D del pannello prefabbricato tipo 2.

Tabella 26 – Caratteristiche del pannello prefabbricato tipo 2.

PANNELLO PREFABBRICATO MONOSTRATO COLATO			
CARATTERISTICHE DEL PANNELLO		CARATTERISTICHE DEL MATERIALE (calcestruzzo schiumato estrudibile)	
Dimensioni	40 cm (L) x 40 cm (H) x 25 cm (Sp)	Densità fresca	450 kg/m ³
Peso	16 kg	Densità finale	406 kg/m ³
N. strati	1	Conducibilità termica	0,0806 W/m ² K
PRESTAZIONE TERMICA DEL SISTEMA (Muro esistente + sistema a cappotto)			
Trasmittanza termica	0,273 W/m ² K		
Massa superficiale	624 kg/m ²		
Attenuazione	0,023		
Sfasamento	21,45 h		
Trasmittanza termica periodica	0,006 W/m ² K		

Pannello tipo 3

Il pannello a mono-densità da realizzare in cassaforma removibile tramite processo estrusivo si caratterizza, come nel caso precedente, per un unico strato in calcestruzzo schiumato estrudibile a densità fresca pari a 450 kg/m³ con spessore pari a 25 cm.

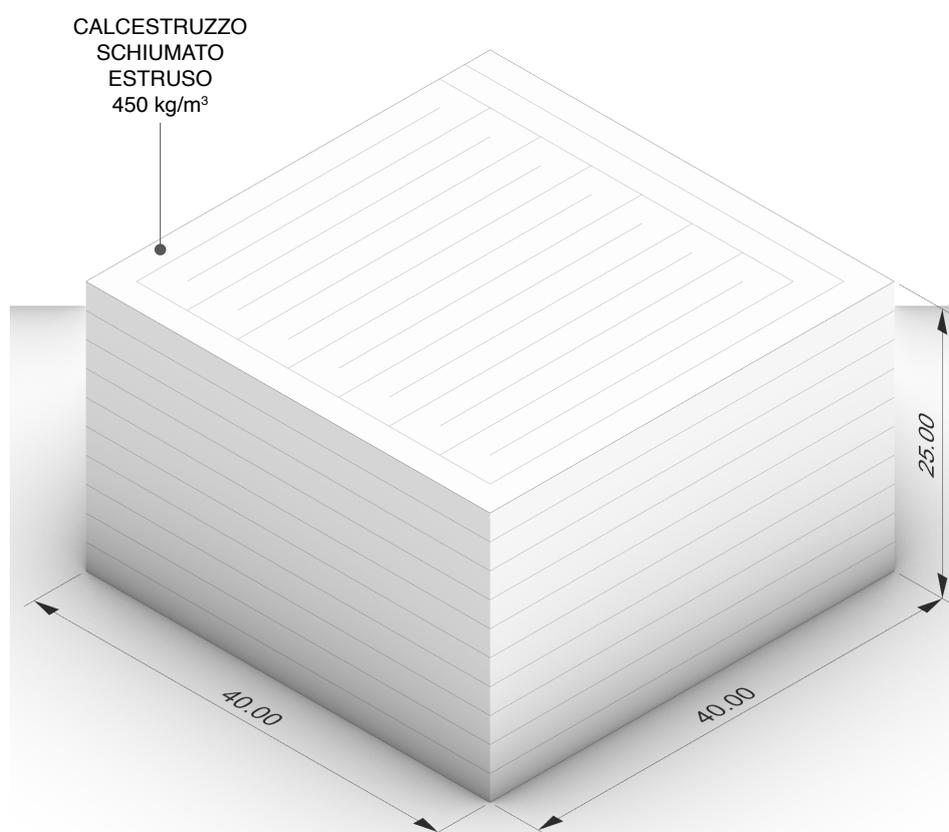


Figura 80 - Rappresentazione 3D del pannello prefabbricato tipo 3.

Tabella 27 – Caratteristiche del pannello prefabbricato tipo 3.

PANNELLO PREFABBRICATO MONOSTRATO ESTRUSO	
CARATTERISTICHE DEL PANNELLO	
Dimensioni	40 cm (L) x 40 cm (H) x 25 cm (Sp)
Peso	16 kg
N. strati	1
PRESTAZIONE TERMICA DEL SISTEMA (Muro esistente + sistema a cappotto)	
Trasmittanza termica	0,273 W/m ² K
Massa superficiale	624 kg/m ²
Attenuazione	0,023
Sfasamento	21,45 h
Trasmittanza termica periodica	0,006 W/m ² K
CARATTERISTICHE DEL MATERIALE (calcestruzzo schiumato estrudibile)	
Densità fresca	450 kg/m ³
Densità finale	406 kg/m ³
Conducibilità termica	0,0806 W/m ² K

In questo caso, per via del processo impiegato, il percorso di stampa, rappresentato in modo semplificato nella seguente schematizzazione, assume un ruolo primario nella progettazione del componente poiché rimarrà visibile sulla superficie di ciascun pannello, contribuendo al disegno e all'estetica della facciata. Il percorso di stampa è stato predisposto perseguendo l'obiettivo di generare un perimetro esterno il più possibile continuo a livello di filamento per motivi di natura sia estetica che funzionale, in termini di protezione di tale superficie da infiltrazioni ed altre problematiche in grado di indebolire l'elemento e la sua *performance*.

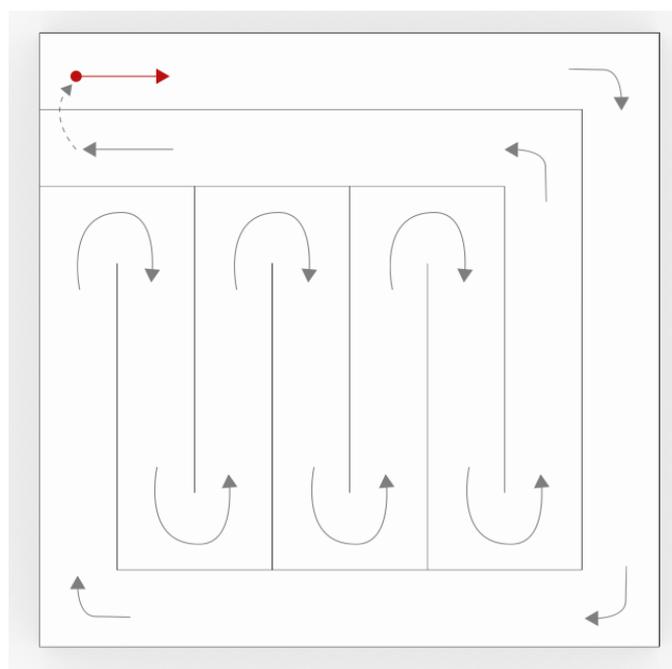


Figura 81 – Rappresentazione schematica semplificata del percorso di stampa ipotizzato per la realizzazione del pannello prefabbricato tipo 3. In rosso è segnato il punto di partenza del percorso di stampa che corrisponde al contempo al punto di cambio di quota per la realizzazione di layers sovrapposti.

5.1.2.2_Blocchi ad incastro maschio-femmina

L'ultima tipologia di componente prefabbricato trattata in ambito progettuale è rappresentata dal sistema a cappotto costituito da blocchi ad incastro maschio-femmina formati da un filamento estruso in calcestruzzo schiumato estrudibile con funzione di cassaforma a perdere (con densità fresca pari a 800 kg/m^3) e da una serie di riempimenti realizzati in calcestruzzo schiumato ultraleggero colato (con densità fresca pari a 300 kg/m^3).

La progettazione di un blocco con tali caratteristiche, pensato per la realizzazione in ambito di prefabbricazione e per la posa in opera in cantiere, secondo la modalità di incastro maschio-femmina, necessita di particolari attenzioni in merito, oltre alle considerazioni ed ai requisiti già trattati precedentemente (si vedano 5.1.1 e 5.1.2) e cioè:

- *il soddisfacimento delle prestazioni termiche e l'assenza di ponti termici in corrispondenza del giunto tra due blocchi adiacenti.*

Tale aspetto ha portato alla caratterizzazione formale definitiva di ciascun blocco e alla scelta di predisporre un sistema ad incastro maschio-femmina al fine di evitare la continuità del filamento ad alta densità nelle sezioni trasversali di interfaccia tra i blocchi poiché avrebbe causato la presenza di un ponte termico e il mancato rispetto dei requisiti di prestazione termica assunti inizialmente. L'impiego di tale modalità di incastro presuppone la necessità di predisporre pezzi speciali per situazioni particolari (quali angoli, interruzioni del muro ecc.) che non sono stati oggetto di tale lavoro.

- *La realizzazione di un blocco completo che necessita solamente di essere posato in cantiere.*

A tale scopo, il blocco all'arrivo in cantiere è stato progettato per possedere già tutte le caratteristiche che gli permettono di soddisfare i requisiti termici *target* in combinazione con il muro esistente, senza la necessità di svolgere in cantiere ulteriori interventi a livello di riempimenti (non è quindi prevista la necessità di effettuare riempimenti in cavità formate tra il muro esistente e i nuovi blocchi).

In seguito ad una serie di tentativi finalizzati all'ottimizzazione formale e prestazionale del blocco, si è giunti alla definizione del seguente elemento.

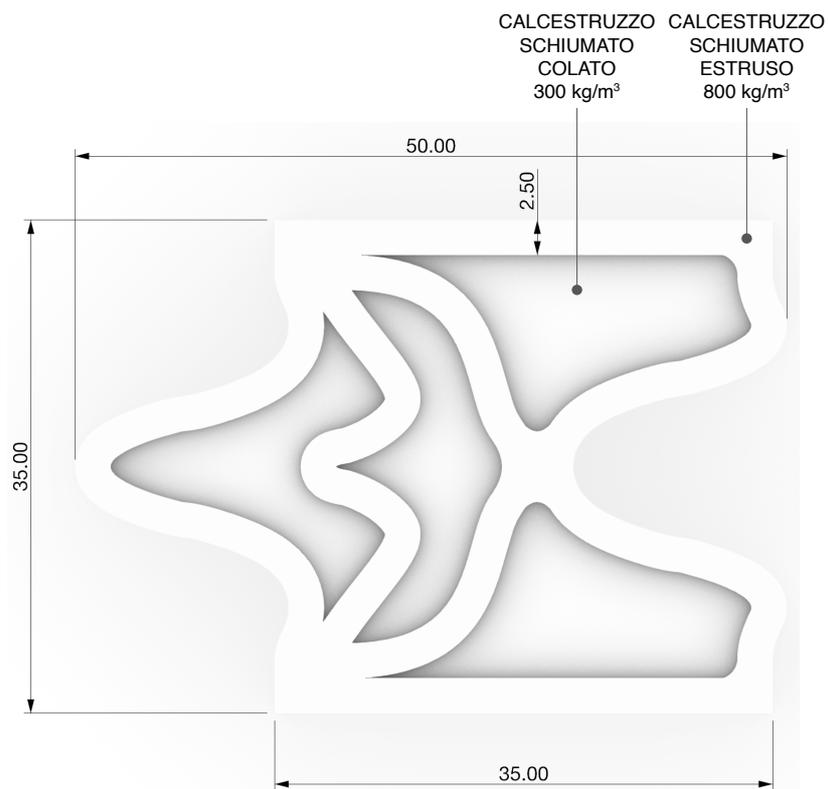


Figura 82 – Rappresentazione in sezione orizzontale del blocco prefabbricato ad incastro maschio-femmina.

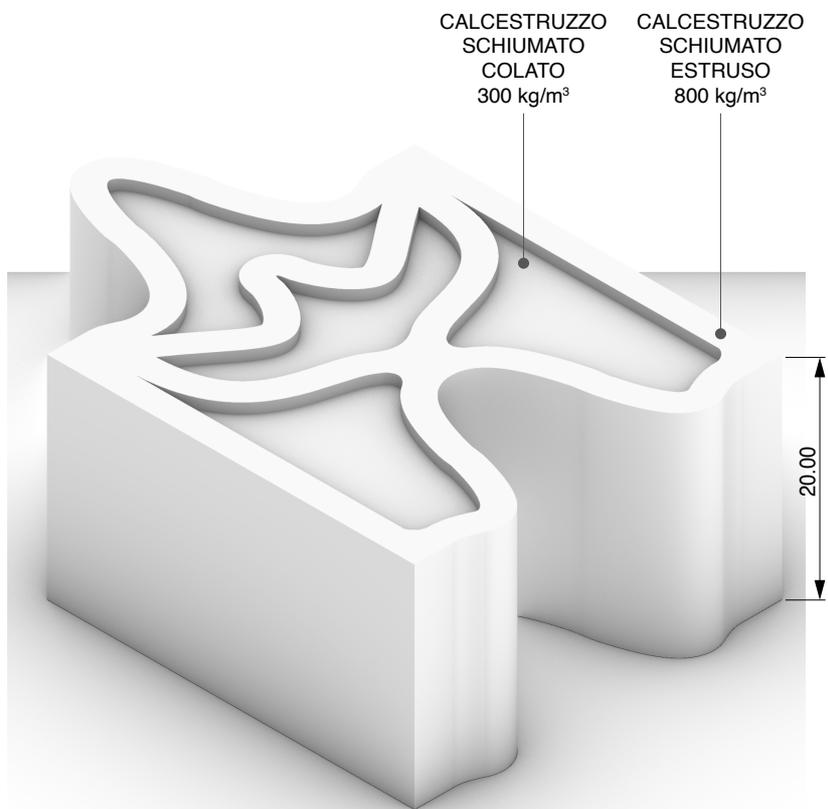


Figura 83 - Rappresentazione 3D del blocco prefabbricato ad incastro maschio-femmina.

Tabella 28 – Caratteristiche del blocco prefabbricato ad incastro maschio-femmina.

BLOCCO PREFABBRICATO AD INCASTRO MASCHIO-FEMMINA			
CARATTERISTICHE DEL BLOCCO		CARATTERISTICHE DEL MATERIALE (calcestruzzo schiumato estrudibile)	
Dimensioni	50 cm (L) x 20 cm (H)x 35 cm (Sp)	<u>FILAMENTO ESTRUSO:</u>	
Peso	11,2 kg	Densità fresca	800 kg/m ³
N. layers	8	Densità finale	650 kg/m ³
PRESTAZIONE TERMICA MEDIA DEL SISTEMA (Muro esistente + sistema a cappotto)		Conducibilità termica	0,1463 W/m ² K
Trasmittanza termica	0,2522 W/m ² K	<u>RIEMPIMENTO COLATO:</u>	
Massa superficiale	716,2 kg/m ²	Densità fresca	300 kg/m ³
Attenuazione	0,0082	Densità finale	244 kg/m ³
Sfasamento	> 24 h	Conducibilità termica	0,0624 W/m ² K
Trasmittanza termica periodica	0,0018 W/m ² K		

Per fini sia estetici che funzionali (quali la protezione della superficie più esposta ad infiltrazioni ed altre problematiche in grado di indebolire l'elemento e la sua *performance*), il percorso di stampa è stato progettato per garantire la continuità del filamento esterno, secondo il percorso rappresentato di seguito. Il punto di inizio percorso è stato posto volutamente all'interno del blocco per evitare che eventuali difetti e imprecisioni che possono caratterizzare tale punto potessero inficiare le caratteristiche estetiche e funzionali del blocco e la modalità di incastro prevista tra blocchi adiacenti.

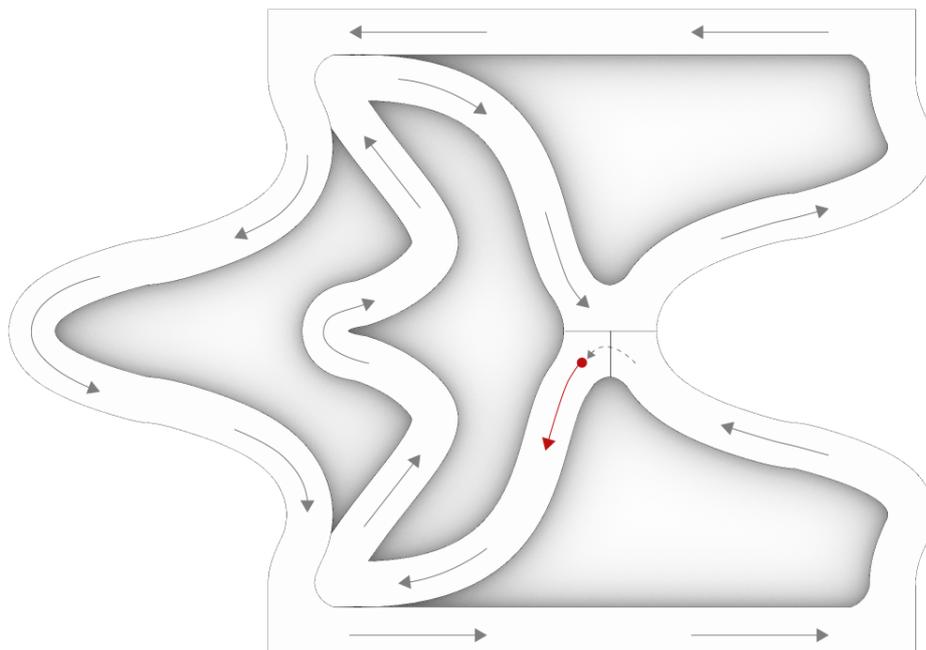


Figura 84 – Rappresentazione schematica del percorso di stampa ipotizzato per la realizzazione del blocco prefabbricato ad incastro maschio-femmina. In rosso è segnato il punto di partenza del percorso di stampa che corrisponde al contempo al punto di cambio di quota per la realizzazione di layers sovrapposti.

Per quanto riguarda l'assemblaggio tra i blocchi, si prevede l'impiego di una malta leggera (con caratteristiche prestazionali tali da non dar luogo a ponti termici) molto sottile che permetta l'incollaggio tra blocchi adiacenti in corrispondenza dell'incastro e tra file di blocchi da sovrapporre a giunti sfalsati. L'impiego di tale malta permette di garantire la solidità e la continuità del sistema offrendo al contempo un contributo estetico e funzionale per la protezione dagli agenti atmosferici.

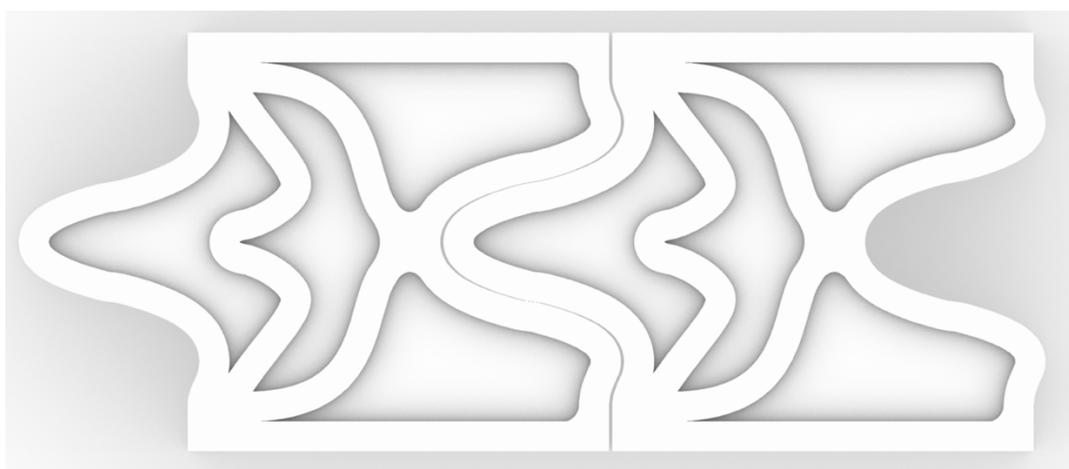


Figura 85 – Rappresentazione in sezione orizzontale della modalità di incastro maschio-femmina tra due blocchi adiacenti.

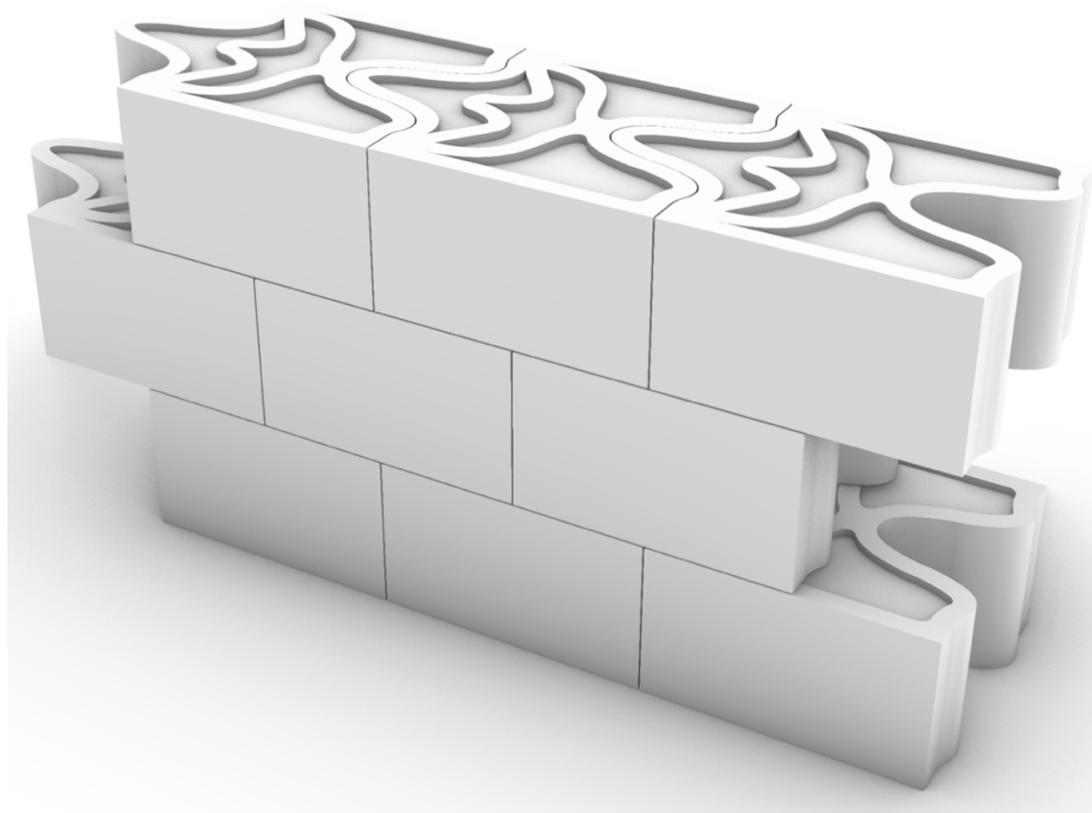


Figura 86 – Rappresentazione 3D della modalità di assemblaggio prevista tra blocchi adiacenti (incastro e incollaggio) e tra file di blocchi sovrapposte a giunti sfalsati (incollaggio).

5.1.3_CompONENTI destinati alla fabbricazione *in situ*

In fase progettuale è stato affrontato anche il tema della fabbricazione automatizzata svolta direttamente *in situ* tramite la metodologia del *3D Concrete Printing* per applicazioni su sistemi, di tipo cappotto termico e cappotto termico con facciata ventilata. Tutte le soluzioni progettuali presentate in tale ambito si caratterizzano per l'utilizzo di calcestruzzo schiumato estraibile impiegato in due modalità e due densità differenti: per la parte "strutturale" estrusa (con funzione di cassaforma a perdere) si assume l'impiego di calcestruzzo schiumato estraibile di densità fresca pari a 800 kg/m^3 (funzione non portante), mentre per la parte di "riempimento", realizzata tramite colatura nelle cavità definite dal percorso di stampa eseguito precedentemente durante l'estrusione, si assume l'impiego di calcestruzzo schiumato ultraleggero con densità fresca pari a 300 kg/m^3 . Essendo progettati per la fabbricazione da svolgere direttamente in cantiere, a differenza delle soluzioni previste in ambito di prefabbricazione, per questi componenti non sono stati posti limiti a livello dimensionale e di peso per cui è stato possibile impiegare un materiale a densità più elevata per l'estrusione.

Tutte le soluzioni progettate in questa sezione si presentano in due varianti che differiscono a livello formale esclusivamente per il percorso di stampa seguito dal filamento posto verso l'esterno: uno più semplice con andamento rettilineo e costante, ed uno più complesso con andamento ondulato e variabile tra strati sovrapposti. Ad oggi, secondo l'avanzamento tecnologico che caratterizza l'ambito dell'*Additive Manufacturing* tramite *3D Concrete Printing*, la realizzazione di sbalzi tra filamenti sovrapposti risulta ancora difficile da compiere con successo senza incorrere nell'indebolimento e collasso della struttura. In fase realizzativa sarebbe necessario l'utilizzo del metodo della continuità tangenziale (poco frequente rispetto al metodo classico del «*2D slicing*») e l'impiego di particolari ugelli con più di tre assi di rotazione, ma le sperimentazioni in tale campo sono ancora molto scarse. Tuttavia, per il prossimo futuro, la seconda soluzione incarna maggiormente le potenzialità estetiche ed espressive che possono caratterizzare componenti di facciata realizzati attraverso l'innovativo metodo di produzione del *3D Concrete Printing* per cui risulta particolarmente interessante proporre anche la variante più complessa. In merito all'ampiezza degli sbalzi tra livelli sovrapposti, la terza soluzione differisce dalle precedenti per una riduzione di tale dimensione, offrendo un'alternativa al momento più realistica a livello di realizzabilità rispetto alle precedenti. Questa variazione offre l'occasione per evidenziare la pluralità di effetti finali tridimensionali ottenibili modificando ad esempio solamente la frequenza e l'ampiezza degli sbalzi.

Le tre soluzioni presentate in questo contesto si caratterizzano per una lunghezza d'onda del filamento ad andamento ondulato pari a 40 cm. Tale distanza è stata individuata sulla base di alcune considerazioni in merito al posizionamento dei sistemi di ancoraggio del nuovo elemento all'esistente ma, a seconda dei risultati derivanti dal progetto strutturale svolto nel caso specifico, è

possibile variare tale dimensione per modificare la distanza tra punti di contatto con la struttura. Tuttavia, è bene tenere presente che l'andamento ondulato dei filamenti contribuisce a creare un irrigidimento dell'elemento e a contribuire alla sua stabilità per cui la lunghezza d'onda dev'essere valutata in base sia al sistema di ancoraggio che alla funzione stabilizzante svolta in fase di costruzione e di irrigidimento a livello di componente indurito.

Sebbene a livello di rappresentazione sia possibile visualizzare solo una piccola porzione di sistema, il numero pari di filamenti estrusi che costituiscono in direzione trasversale la stratigrafia di ogni elemento permette di realizzare un percorso di stampa chiuso in modo che il processo estrusivo possa essere svolto senza interruzioni.

Soluzione 1 (cappotto termico)

Tale soluzione si caratterizza essenzialmente per i seguenti aspetti:

- la presenza, tra le sezioni trasversali, di una stratigrafia costituita da una singola cavità.
- Il riempimento di tutte le cavità definite dal percorso di stampa estruso con materiale ultraleggero colato.
- La predisposizione di riempimenti ultraleggeri solamente in cavità definite, a livello di perimetro, interamente dal percorso di stampa.
- L'andamento lineare (in sezione orizzontale) del filamento posto in adiacenza al muro esistente.
- Uno spessore minimo del sistema pari a 26 cm (filamento esterno rettilineo).

Il risultato formale che caratterizza questa prima soluzione ha due vantaggi:

- la possibilità di fissare i sistemi di ancoraggio (anche o solo) al doppio filamento che si presenta in adiacenza al muro esistente con un passo di 40 cm (in sezione orizzontale) e che permette una maggiore resistenza e solidità del sistema nel suo complesso.
- La previsione di colatura di materiale ultraleggero esclusivamente all'interno di cavità definite interamente dal percorso di stampa seguito dal materiale estruso. Tale aspetto permette di realizzare la colatura in modo sicuro ed efficace evitando problemi di fuoriuscita del materiale e di incompleto riempimento.

Di contro, vi è un altro aspetto da tenere in considerazione che rappresenta uno svantaggio del sistema: la difficoltà realizzativa di un filamento rettilineo continuo in aderenza al muro esistente (e di una superficie continua considerando l'intero sistema a cappotto), soprattutto nel caso in cui quest'ultimo non presenti un andamento perfettamente piano (a tal proposito sarebbe necessario costruire precedentemente un modello 3D delle chiusure verticali esistenti per poter definire in modo più preciso l'andamento del filamento posto in corrispondenza dell'interfaccia tra i due sistemi).

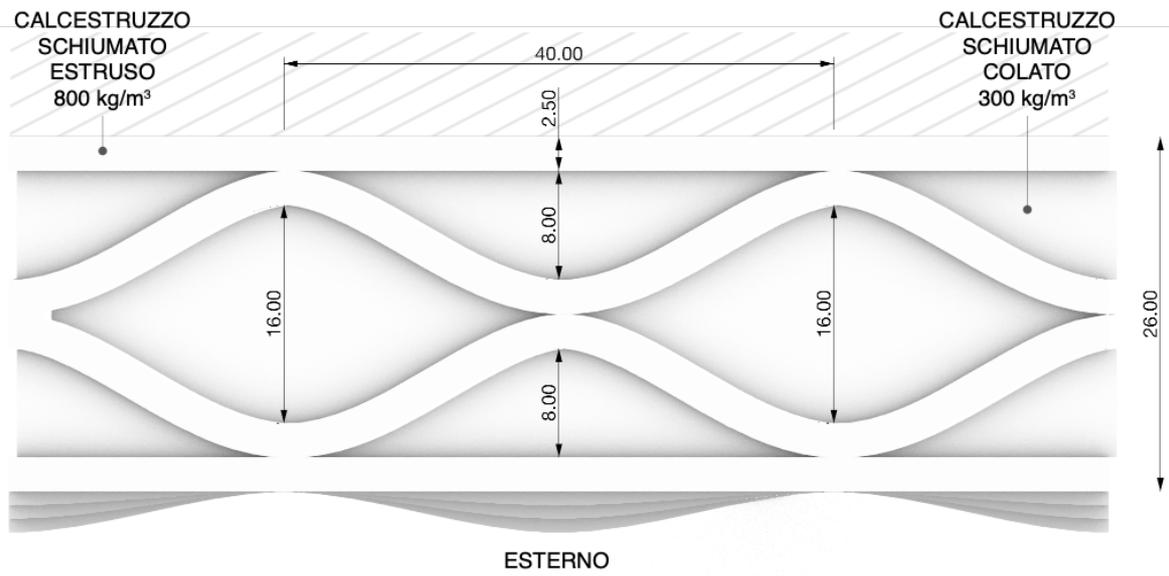


Figura 87 – Rappresentazione in sezione orizzontale della soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ nella versione a filamento esterno ondulato e con sbalzi.

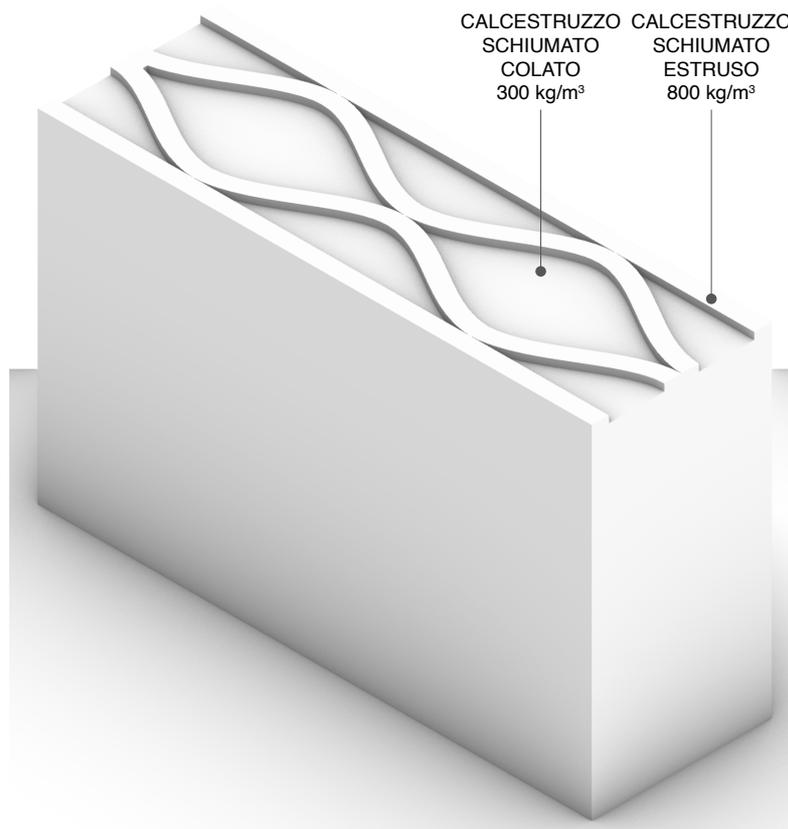


Figura 88 - Rappresentazione 3D della soluzione 1 progettata per la realizzazione in situ nella versione base a filamento esterno rettilineo e senza sbalzi.

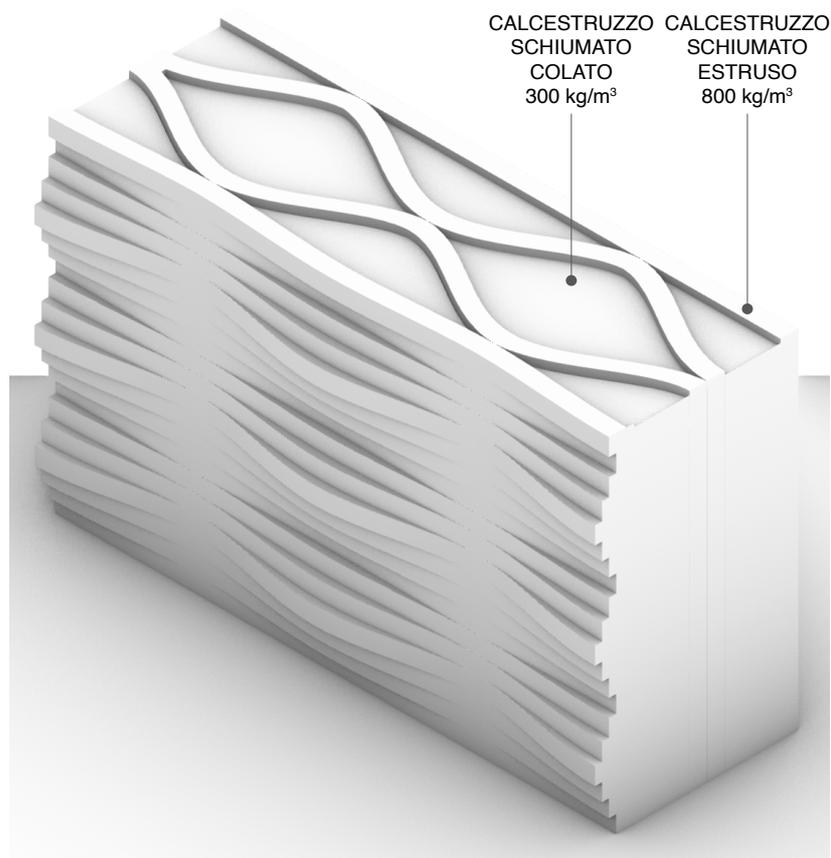


Figura 89 - Rappresentazione 3D della soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ nella versione a filamento esterno ondulato e con sbalzi.

Tabella 29 – Caratteristiche della soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ nella versione base a filamento esterno rettilineo e senza sbalzi.

SOLUZIONE 1 (VERSIONE BASE): SISTEMA A CAPPOTTO PER REALIZZAZIONI IN SITU			
CARATTERISTICHE DI UN MQ DI SISTEMA		CARATTERISTICHE DEL MATERIALE (calcestruzzo schiumato estraibile)	
Dimensioni	100 cm (L) x 100 cm (H) x 26 cm (Sp)	FILAMENTO ESTRUSO:	
Peso	106 kg	Densità fresca	800 kg/m ³
N. layers	40	Densità finale	650 kg/m ³
PRESTAZIONE TERMICA MEDIA DEL SISTEMA (Muro esistente + sistema a cappotto)		Conducibilità termica	0,1463 W/m ² K
Trasmittanza termica	0,260 W/m ² K	RIEMPIMENTO COLATO:	
Massa superficiale	637 kg/m ²	Densità fresca	300 kg/m ³
Attenuazione	0,024	Densità finale	244 kg/m ³
Sfasamento	21,06 h	Conducibilità termica	0,0624 W/m ² K
Trasmittanza termica periodica	0,0065 W/m ² K		

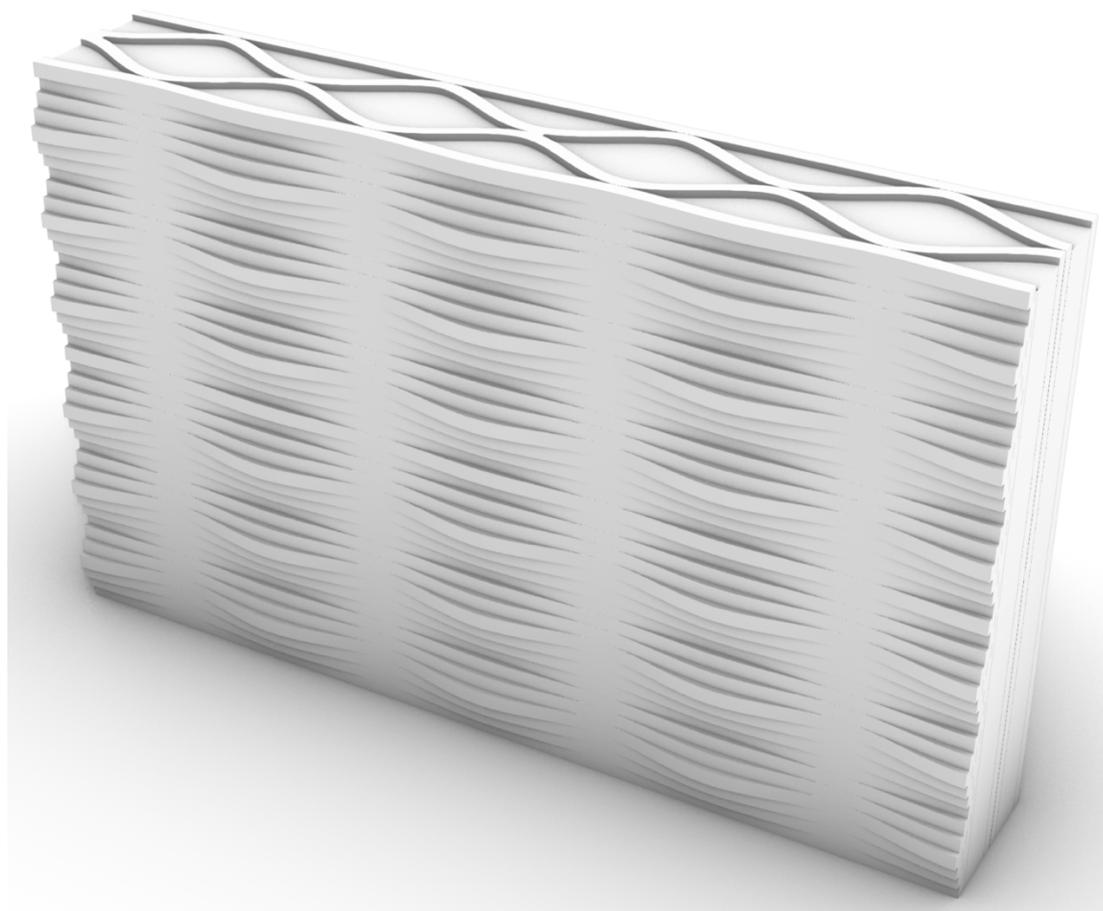


Figura 90 – Rappresentazione 3D di una porzione (160 cm di larghezza e 100 cm di altezza) di sistema a cappotto realizzato con la soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ nella versione a filamento esterno ondulato e con sbalzi.

Soluzione 2 (cappotto termico)

La seconda soluzione si caratterizza per i seguenti aspetti:

- la presenza di sezioni trasversali costituite, a livello di stratigrafia, da almeno due cavità.
- Il riempimento di tutte le cavità definite dal percorso di stampa estruso con materiale ultraleggero colato.
- La predisposizione di riempimenti ultraleggeri non solamente in cavità definite, a livello di perimetro, interamente dal percorso di stampa ma anche in cavità generatesi tra percorso di stampa estruso e muro esistente.
- L'andamento ondulatorio del filamento posto in adiacenza al muro esistente, per cui l'interfaccia tra esistente e nuovo sistema risulta costituita da contatti puntuali per ciascun livello di stratificazione e da contatti lineari verticali considerando l'intero elemento.
- Uno spessore minimo del sistema pari a 26 cm (filamento esterno rettilineo).

Gli aspetti negativi più significativi che caratterizzano questa soluzione sono i seguenti:

- la presenza, ogni 40 cm in sezione orizzontale, di un singolo filamento estruso adiacente al muro esistente sul quale dovrà basarsi il sistema di ancoraggio al muro esistente. Tale aspetto comporta la necessità, a parità di peso dell'elemento e di caratteristiche del muro esistente, di aumentare il numero di fissaggi meccanici rispetto alla soluzione precedente poiché ciascuno sarà in grado di offrire un contributo inferiore a livello di sostegno.
- La presenza di contatti puntuali in sezione orizzontale tra nuovo ed esistente. In questo caso il sistema di ancoraggio dovrà essere predisposto sulla base della lunghezza d'onda del filamento per cui in direzione orizzontale il posizionamento degli ancoraggi risulta maggiormente vincolato rispetto alla soluzione precedente.
- La presenza di cavità da riempire con materiale ultraleggero colato definite in parte anche dal muro esistente. Tale aspetto può generare maggiori problematiche in fase di costruzione poiché è necessario valutare attentamente lo stato di degrado del muro esistente al fine di evitare la fuoriuscita del materiale colato a bassa densità e di garantire il completo riempimento delle cavità.

Tra i vantaggi, la soluzione 2 si caratterizza per una maggior facilità a livello realizzativo in termini di interfaccia tra nuovo ed esistente, poiché il contatto tra i due elementi non è continuo su tutta la superficie.

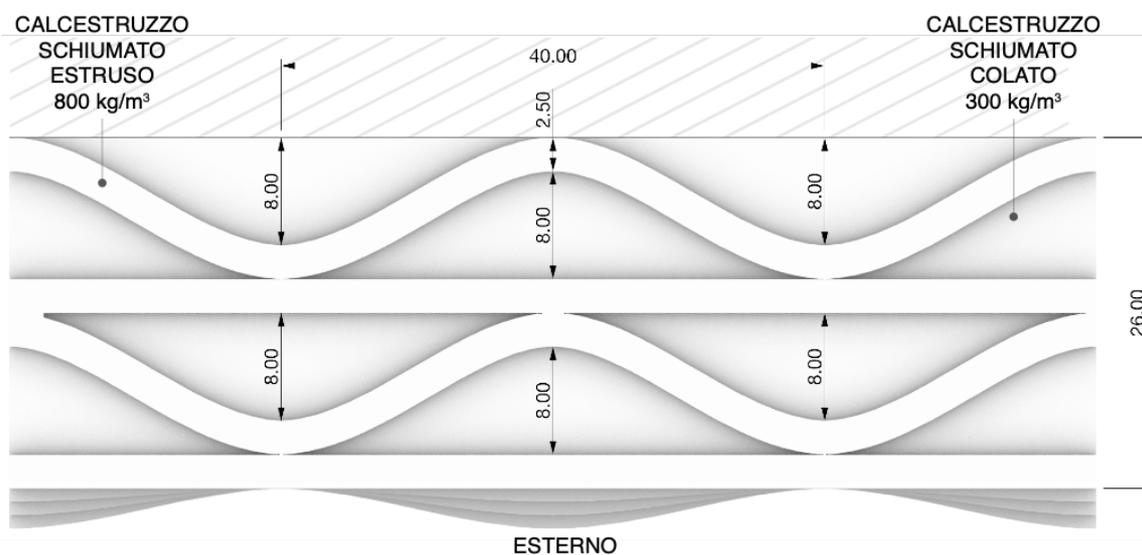


Figura 91 - Rappresentazione in sezione orizzontale della soluzione 2 progettata per la fabbricazione in situ nella versione a filamento esterno ondulato e con sbalzi.

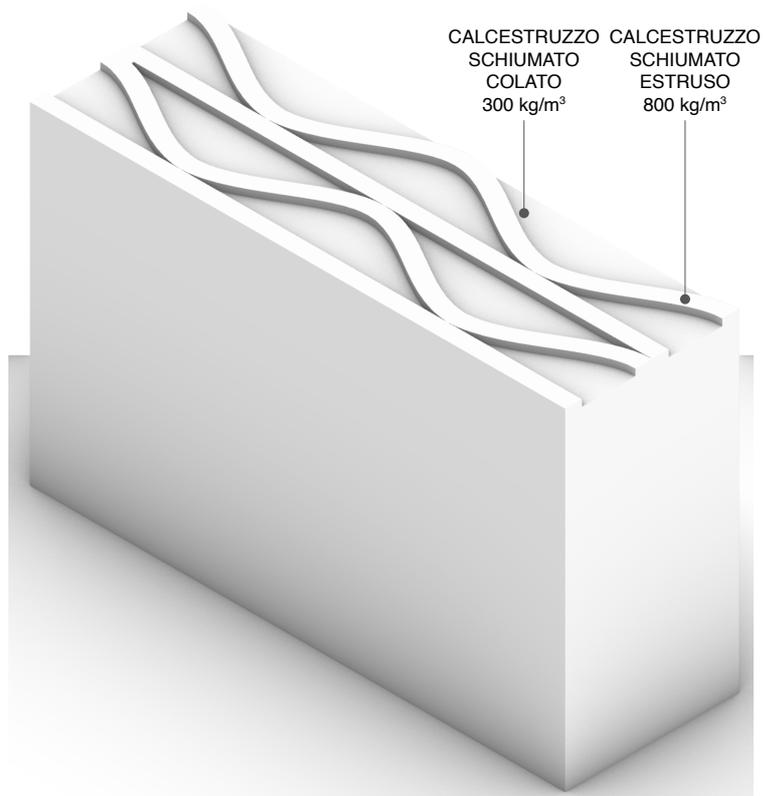


Figura 92 - Rappresentazione 3D della soluzione 2 progettata per la realizzazione in situ nella versione base a filamento esterno rettilineo e senza sbalzi.

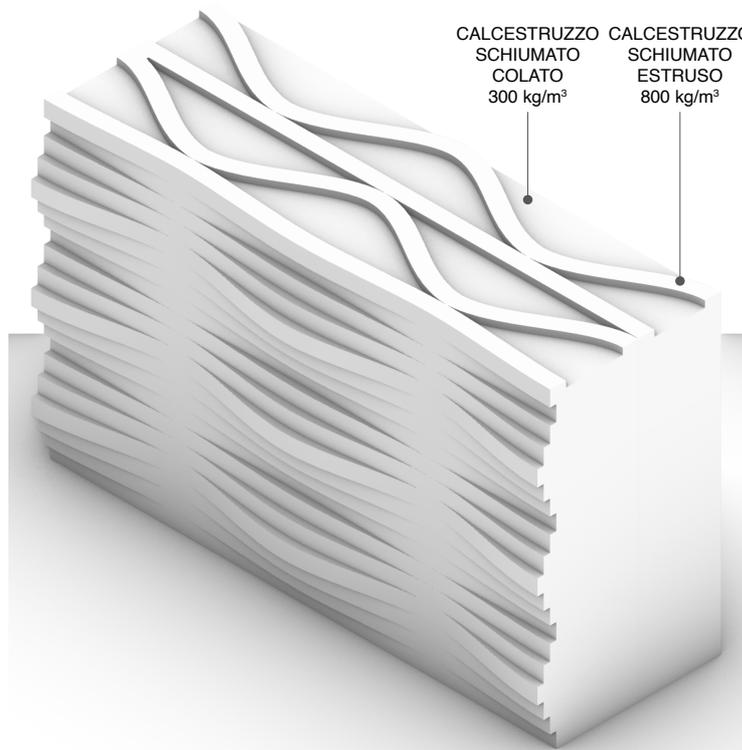


Figura 93 - Rappresentazione 3D della soluzione 2 progettata per la fabbricazione in situ nella versione a filamento esterno ondulato e con sbalzi.

Tabella 30 - Caratteristiche della soluzione 2 progettata per la fabbricazione in situ nella versione base a filamento esterno rettilineo e senza sbalzi.

SOLUZIONE 2 (VERSIONE BASE): SISTEMA A CAPPOTTO PER REALIZZAZIONI IN SITU			
CARATTERISTICHE DI UN MQ DI SISTEMA		CARATTERISTICHE DEL MATERIALE (calcestruzzo schiumato estrudibile)	
Dimensioni	100 cm (L) x 100 cm (H) x 26 cm (Sp)	<u>FILAMENTO ESTRUSO:</u>	
Peso	106 kg	Densità fresca	800 kg/m ³
N. layers	40	Densità finale	650 kg/m ³
PRESTAZIONE TERMICA MEDIA DEL SISTEMA (Muro esistente + sistema a cappotto)		Conducibilità termica	0,1463 W/m ² K
Trasmittanza termica	0,260 W/m ² K	<u>RIEMPIMENTO COLATO:</u>	
Massa superficiale	637 kg/m ²	Densità fresca	300 kg/m ³
Attenuazione	0,020	Densità finale	244 kg/m ³
Sfasamento	21,44 h	Conducibilità termica	0,0624 W/m ² K
Trasmittanza termica periodica	0,005 W/m ² K		

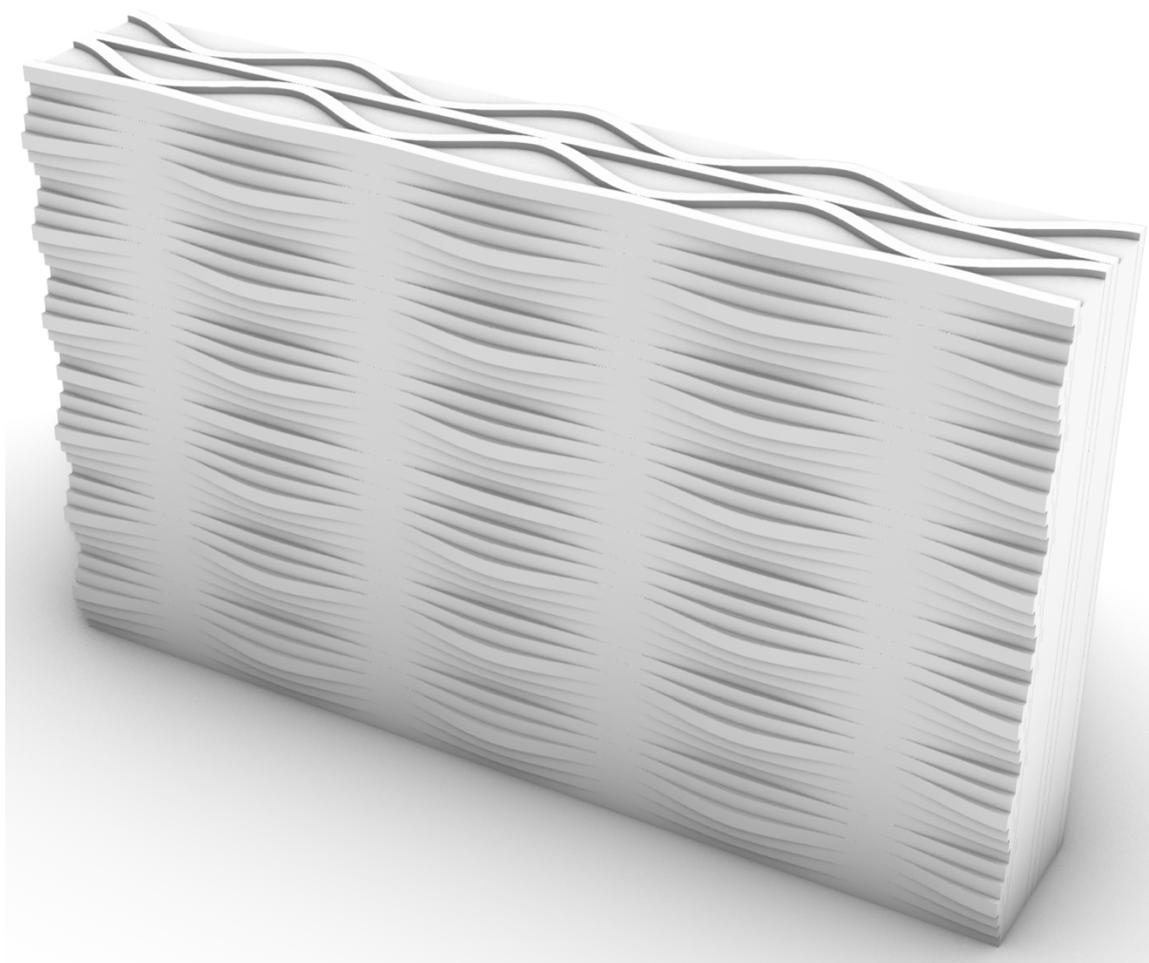


Figura 94 - Rappresentazione 3D di una porzione (160 cm di larghezza e 100 cm di altezza) di sistema a cappotto realizzato con la soluzione 2 progettata per la fabbricazione in situ nella versione a filamento esterno ondulato e con sbalzi.

Soluzione 3 (cappotto termico con facciata ventilata)

La terza soluzione si caratterizza per i seguenti aspetti:

- la presenza di sezioni trasversali costituite, a livello di stratigrafia, da almeno tre cavità.
- Il riempimento solamente di alcune delle cavità definite dal percorso di stampa estruso con colatura di materiale ultraleggero. In questa soluzione, infatti, vi sono anche intercapedini d'aria ferma, che svolgono funzione isolante senza impiego di materiale (con conseguente risparmio di risorse), e cavità destinate alla ventilazione. In entrambi i casi, le dimensioni sono state valutate con particolare cura per evitare la formazione di moti convettivi nelle prime e per favorire l'effetto camino nelle seconde.
- La predisposizione di riempimenti ultraleggeri non solamente in cavità definite (a livello di perimetro) interamente dal percorso di stampa ma anche in cavità costituite dall'intercapedine generata tra percorso di stampa e muro esistente.
- L'andamento ondulatorio del filamento posto in adiacenza al muro esistente, per cui l'interfaccia tra esistente e nuovo sistema risulta costituita da contatti puntuali per ciascun livello di stratificazione e da contatti lineari verticali considerando l'intero elemento.
- Uno spessore minimo del sistema pari a 39 cm (filamento esterno rettilineo).

A livello di vantaggi e svantaggi, la soluzione 3 presenta le stesse caratteristiche evidenziate nel caso precedente (soluzione 2) con l'aggravante del maggior peso e, di conseguenza, del maggiore rilievo che assume la questione relativa al sistema di ancoraggio. La soluzione 3, infine, offre un importante vantaggio, rispetto alle precedenti soluzioni, che consiste nell'elevata multifunzionalità che la caratterizza, comprendendo anche la funzione di facciata ventilata.

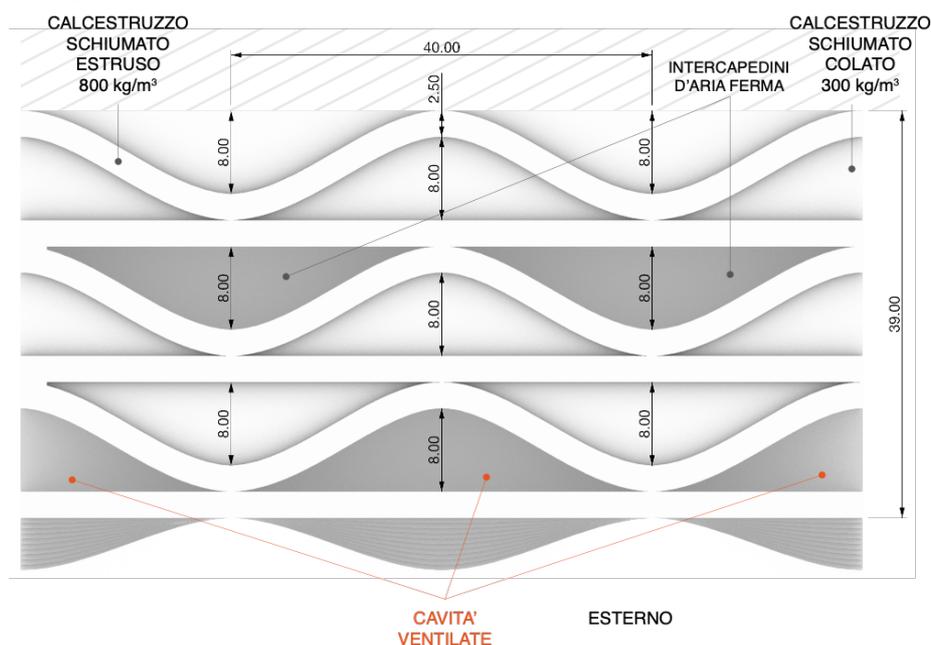


Figura 95 - Rappresentazione in sezione orizzontale della soluzione 3 (cappotto con facciata ventilata) progettata per la fabbricazione in situ nella versione a filamento esterno ondulato e con sbalzi.

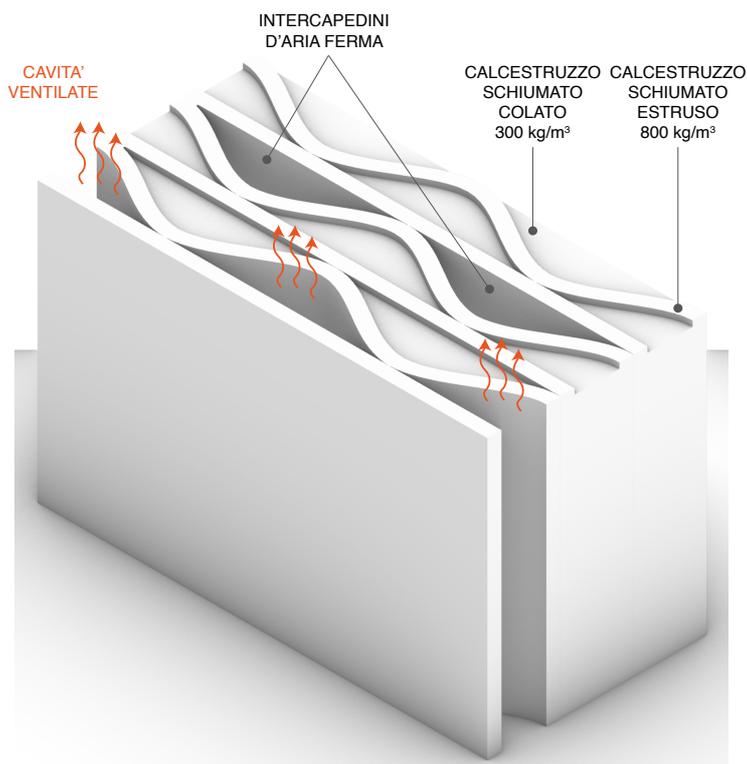


Figura 96 - Rappresentazione 3D della soluzione 3 (cappotto con facciata ventilata) progettata per la realizzazione in situ nella versione base a filamento esterno rettilineo e senza sbalzi.

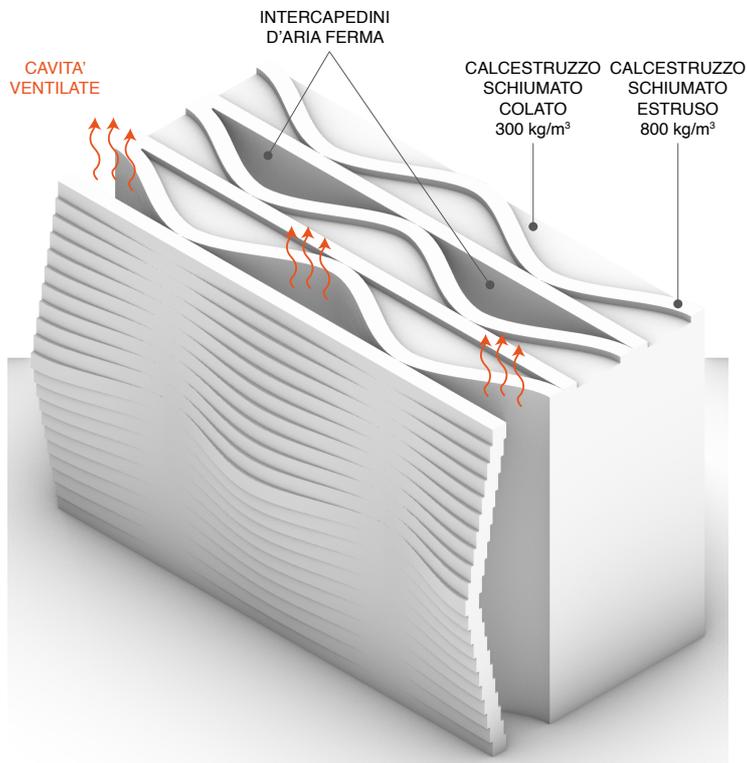


Figura 97 - Rappresentazione 3D della soluzione 3 (cappotto con facciata ventilata) progettata per la fabbricazione in situ nella versione a filamento esterno ondulato e con sbalzi.

Tabella 31 - Caratteristiche della soluzione 3 progettata per la fabbricazione in situ nella versione base a filamento esterno rettilineo e senza sbalzi.

SOLUZIONE 3 (VERSIONE BASE): SISTEMA A CAPPOTTO E FACCIATA VENTILATA PER REALIZZAZIONI IN SITU			
CARATTERISTICHE DI UN MQ DI SISTEMA		CARATTERISTICHE DEL MATERIALE (calcestruzzo schiumato estrudibile)	
Dimensioni	100 cm (L) x 100 cm (H) x 39 cm (Sp)	<u>FILAMENTO ESTRUSO:</u>	
Peso	140 kg	Densità fresca	800 kg/m ³
N. layers	40	Densità finale	650 kg/m ³
PRESTAZIONE TERMICA MEDIA DEL SISTEMA (Muro esistente + sistema a cappotto)		Conducibilità termica	0,1463 W/m ² K
Trasmittanza termica	0,237 W/m ² K	<u>RIEMPIMENTO COLATO:</u>	
Massa superficiale	661 kg/m ²	Densità fresca	300 kg/m ³
Attenuazione	0,013	Densità finale	244 kg/m ³
Sfasamento	23,72 h	Conducibilità termica	0,0624 W/m ² K
Trasmittanza termica periodica	0,003 W/m ² K		

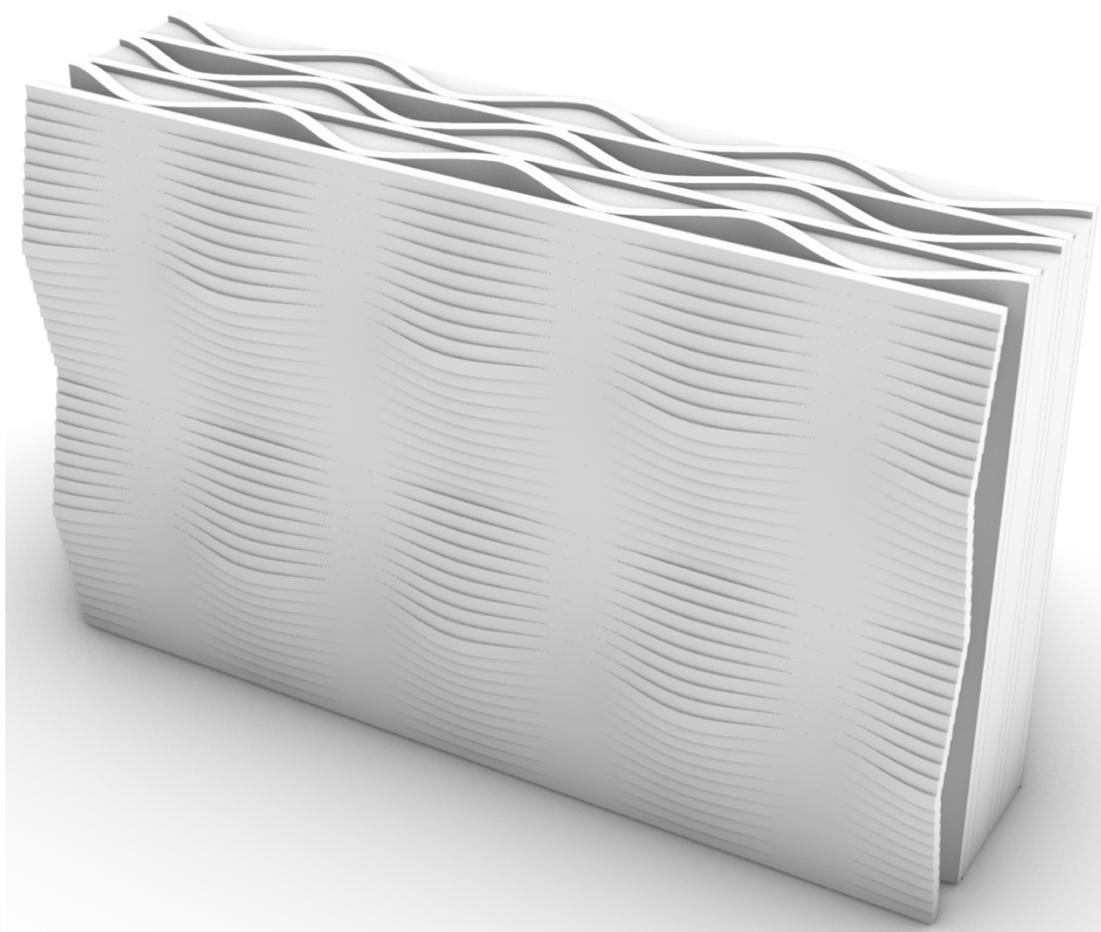


Figura 98 - Rappresentazione 3D di una porzione (160 cm di larghezza e 100 cm di altezza) di sistema a cappotto realizzato con la soluzione 3 progettata per la fabbricazione in situ nella versione a filamento esterno ondulato e con sbalzi.

5.1.4_Sistemi di ancoraggio all'esistente

Le tipologie di componenti oggetto di progettazione, essendo pensate per applicazioni in interventi di efficientamento energetico su chiusure verticali opache, necessitano di sistemi di fissaggio al muro esistente al fine di generare con esso un sistema unico in grado di offrire stabilità e sicurezza, sia in condizioni ordinarie che straordinarie, per resistere alle sollecitazioni derivanti da carichi verticali e, soprattutto, orizzontali (dovuti all'azione del vento e all'azione sismica). A tal proposito, è essenziale che il sistema nel complesso risulti stabile e l'adesione tra i due elementi sia in grado di evitarne la separazione e il conseguente ribaltamento del nuovo sistema a cappotto.

Nella realtà applicativa, a seconda del caso specifico di intervento previsto, è necessario svolgere un progetto strutturale per definire le caratteristiche tecniche dello specifico sistema di ancoraggio da predisporre, in modo da rendere efficace la solidarizzazione tra nuovo ed esistente. Poiché vi sono molte variabili che influenzano la scelta di un sistema di ancoraggio e le sue caratteristiche (e in questo contesto tale tema non è stato affrontato a livello di progetto strutturale) i sistemi di ancoraggio successivamente indicati rappresentano solamente delle ipotesi e non sono stati oggetto di verifica tramite sperimentazione pratica.

In merito al tema dell'ancoraggio, a causa delle differenze che caratterizzano intrinsecamente la produzione prefabbricata in stabilimento dalla fabbricazione *in situ*, sia a livello di fase produttiva (ad esempio per la possibilità di impiegare supporti, il maggior controllo sulle condizioni ambientali, la maggiore libertà di movimentazione dell'elemento, la maggior facilità di inserimento di elementi di vario tipo, e molti altri aspetti che caratterizzano e semplificano i processi svolti in stabilimento) che di prodotto realizzato (in particolare, in tale contesto, in termini di peso e dimensioni dei componenti), è opportuno trattare separatamente i sistemi prefabbricati rispetto a quelli destinati alla realizzazione in cantiere.

5.1.4.1_Sistemi per componenti prefabbricati

Incollaggio

A livello progettuale, i componenti prefabbricati sono stati ipotizzati sulla base di alcune limitazioni a livello di dimensioni e peso massimi in vista della specifica modalità applicativa cui sono destinati, cioè la posa in opera in cantiere tramite forza lavoro umana o, nell'ottica di una futura automatizzazione anche di questa fase del processo edilizio, tramite l'impiego di robot con funzione di «*pick and place*». Grazie a tali caratteristiche, per i componenti prefabbricati si prevede in primo luogo la possibilità di un ancoraggio tramite semplice incollaggio in corrispondenza dell'interfaccia tra nuovo ed esistente. Tale soluzione è inoltre favorita dalla presenza, in tutti i componenti prefabbricati oggetto di progettazione, di una superficie piana e continua in corrispondenza del lato da porre in adiacenza al muro esistente.

Ancoraggio a barre lineari o con terminazione a “fiocco”

Una seconda soluzione, in grado di offrire una maggiore resistenza rispetto all’incollaggio, è rappresentata dalla possibilità di realizzare l’ancoraggio attraverso la predisposizione di elementi in acciaio (barre) da inserire in maniera puntuale in direzione trasversale nella muratura esistente e nel nuovo sistema a cappotto secondo una predisposizione e una frequenza da definire in ambito di progetto strutturale insieme alle caratteristiche tecniche delle barre. Tale soluzione può essere realizzata con due differenti tipologie a seconda del tipo di componente e della resistenza necessaria per garantire l’efficacia dell’ancoraggio: sistema a barre lineari e sistema con barre o tessuti di fibra di acciaio ad altissima resistenza con terminazione a “fiocco”.

La prima tipologia si caratterizza per l’impiego di barre lineari e la solidarizzazione tra le barre e gli elementi della chiusura verticale opaca (esistente e nuovo) è garantita dall’impiego di una malta iperfluida specifica per interventi di ripristino oppure, al fine di ridurre (quasi della metà) la lunghezza e quindi la profondità di inserimento della barra, di ancorante chimico, che garantisce l’unione non solo tramite aderenza ma anche sviluppando un’adesione di tipo chimico. Tale tipologia di ancoraggio può essere applicata secondo due differenti modalità (da decidere in base al caso specifico): posizionando le barre nel muro esistente e predisponendo, in fase di prefabbricazione, i fori sui nuovi elementi; oppure, viceversa, predisponendo le barre già all’interno dei componenti prefabbricati e realizzando i fori sul muro esistente. Date le condizioni di controllo e precisione che si possono ottenere nel contesto di prefabbricazione in stabilimento, probabilmente tra le due modalità è preferibile la seconda ma anche la prima risulta fattibile.

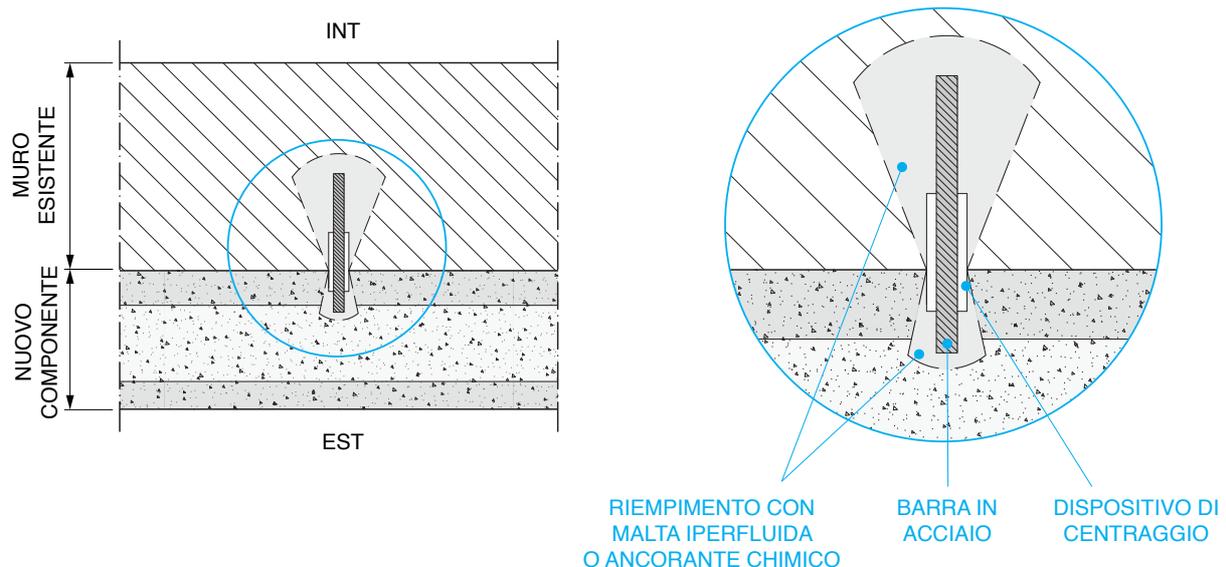


Figura 99 – Sezione orizzontale e dettaglio del sistema di ancoraggio a barra lineare applicato al pannello multistrato prefabbricato (pannello tipo 1). Da notare la completa penetrazione dell’elemento metallico nel primo strato ad elevata densità.

Tabella 32 - Rappresentazione schematica della tipologia di ancoraggio a barra lineare.

BARRA IN ACCIAIO LINEARE E DISPOSITIVO DI CENTRAGGIO		
PROSPETTO DALL'ALTO	PROSPETTO LATERALE	PROSPETTO FRONTALE
		

La seconda tipologia prevede invece l'impiego di barre o tessuti in fibra di acciaio ad altissima resistenza con terminazione a "fiocco" ed è stata ipotizzata per l'impiego in casi in cui sia necessaria una resistenza ancora maggiore del sistema di ancoraggio. Tale soluzione consiste nella predisposizione all'interno del nuovo componente prefabbricato di un elemento costituito da una barra o un tessuto in fibre di acciaio da modellare opportunamente così da ottenere in sommità un sistema di elementi trasversali che permettono di allargare la superficie di ancoraggio e, nel caso di pannelli multistrato e blocchi ad incastro maschio-femmina in cui lo strato resistente risulta di spessore contenuto, di sfruttare al meglio la resistenza del primo strato a maggiore densità. La presenza del fiocco sostanzialmente aumenta la resistenza al ribaltamento del nuovo sistema verso l'esterno tramite l'aumento della superficie su cui vengono ripartite le tensioni per sforzo di taglio. Per impiegare tale sistema, l'elemento metallico può essere posizionato durante il processo di prefabbricazione nei nuovi componenti e, a seconda del tipo di componente, verrà posto: tramite annegamento nel caso dei componenti colati; e tramite posizionamento in corrispondenza dell'interfaccia tra *layers* sovrapposti e con il fiocco posto in aderenza al filamento ad alta densità, nel caso di componenti estrusi. Il componente arriverà quindi in cantiere con l'elemento metallico già posizionato e, in fase di costruzione, sarà necessario realizzare solamente i fori nel muro esistente per ospitare la barra in maniera analoga alla tipologia precedente.

Nel caso di impiego per pannelli multistrato, vi potrebbe essere il rischio di incorrere nella separazione tra strati a densità differente a causa di una possibile delaminazione tra gli stessi (a proposito di tale comportamento mancano ancora sperimentazioni approfondite) per cui, nel caso si verificasse questa eventualità, si potrebbero inserire sistemi atti ad impedire la separazione tra strati tramite, ad esempio, l'impiego di fibre o tessuti in corrispondenza dell'interfaccia tra strati oppure di sistemi trasversali in grado di fornire un collegamento tra i due strati a maggior densità del pannello (cioè quelli posti sui due lati esterni), cercando al contempo di evitare la formazione di un ponte termico.

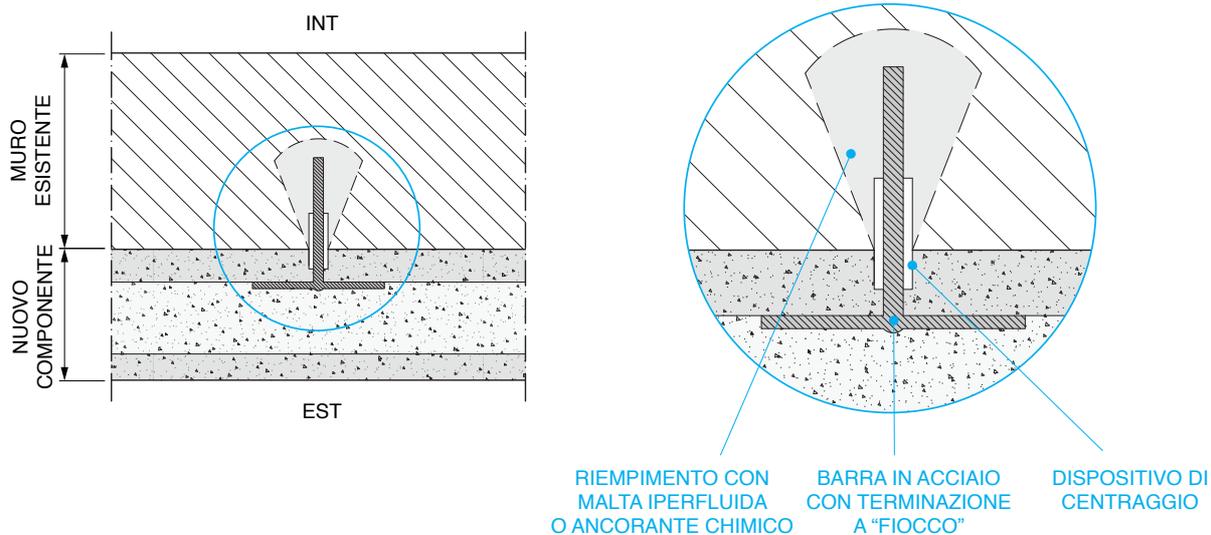


Figura 100 - Sezione orizzontale e dettaglio del sistema di ancoraggio a barra con terminazione a "fiocco" applicato al pannello multistrato prefabbricato (pannello tipo 1) con aggancio al primo strato ad elevata densità.

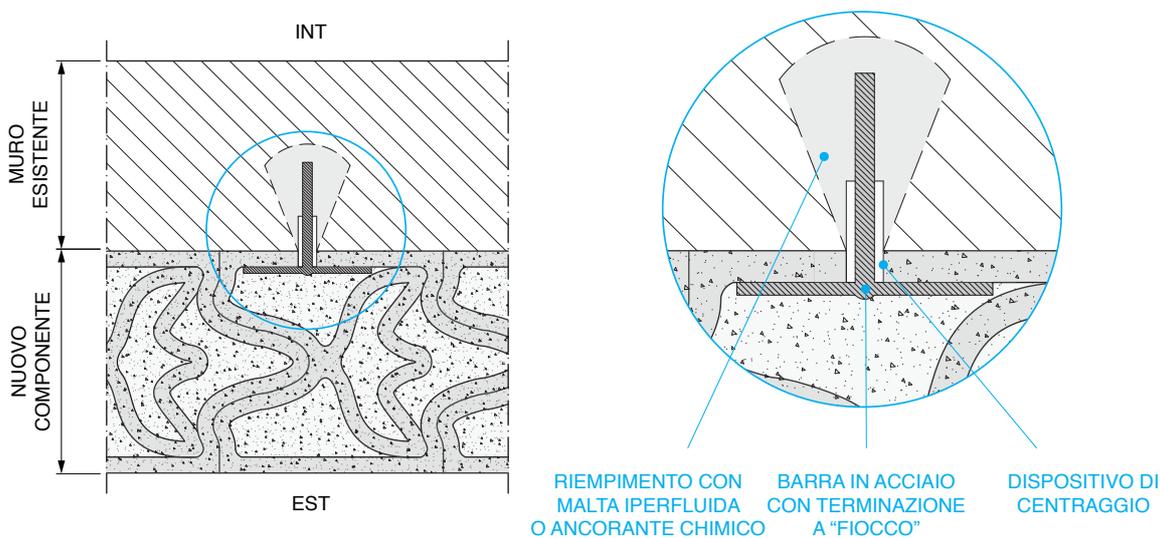


Figura 101 - Sezione orizzontale e dettaglio del sistema di ancoraggio a barra con terminazione a "fiocco" applicato ai blocchi prefabbricati ad incastro maschio femmina con aggancio allo strato estruso ad alta densità adiacente al muro esistente.

Tabella 33 - Rappresentazione schematica della tipologia di ancoraggio a barra con terminazione a "fiocco".

BARRA IN ACCIAIO CON TERMINAZIONE A "FIOCCO" E DISPOSITIVO DI CENTRAGGIO		
PROSPETTO DALL'ALTO	PROSPETTO LATERALE	PROSPETTO FRONTALE

A prescindere dalla tipologia impiegata (a barra lineare o con terminazione a “fiocco”), per questa soluzione di ancoraggio risulta ancora più rilevante ed essenziale la realizzazione di un progetto strutturale *ad hoc* attraverso il quale valutare, in particolare, la sollecitazione a trazione cui è sottoposto il collegamento tra nuovo sistema e muro esistente al fine di definire tutte le caratteristiche tecniche del sistema di ancoraggio, quali le caratteristiche delle barre (dimensioni, materiali, caratteristiche della sezione ecc.) e la loro disposizione e frequenza, in modo da poter procedere correttamente alla realizzazione del sistema stesso. A livello di progetto strutturale, tutte queste caratteristiche tecniche dipendono essenzialmente dal tipo di sistema a cappotto scelto, dalle caratteristiche del muro esistente, dai carichi agenti e dalla tipologia di barre e di ancorante utilizzati. In generale, l'impiego di tale sistema di ancoraggio con componenti prefabbricati risulta facilitato dalla presenza, in ciascuno di essi, di un primo strato continuo e rettilineo ad alta densità posto in adiacenza al muro esistente che permette di poter collocare i fori e gli elementi metallici con elevata libertà (tale strato è stato inoltre ipotizzato di spessore variabile in relazione alla densità più o meno elevata del materiale impiegato al fine di garantire in ogni caso una resistenza sufficiente per permettere l'ancoraggio) ma è necessario tenere in considerazione alcuni aspetti che costituiscono, al contempo, vincoli a livello di progetto strutturale, quali:

- *la profondità della barra.*

La profondità di inserimento della barra dev'essere tale da evitare di compromettere le prestazioni termiche e di dare origine alla formazione di ponti termici in corrispondenza dell'ancoraggio. Inoltre, la barra deve penetrare sufficientemente all'interno del nuovo componente (ed in particolare interamente nello strato ad alta densità posto in adiacenza al muro esistente nel caso di pannelli multistrato e di blocchi ad incastro maschio-femmina) per poter garantire una resistenza adeguata al sistema, ma al tempo stesso non deve arrivare alla superficie esterna del componente, sia per non generare ponte termico che per non intaccare la superficie di facciata poiché è previsto che sia lasciata faccia a vista.

- *La predisposizione dei fori e delle barre nel nuovo componente.*

I fori e le barre devono essere posti sulla base delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche del componente prefabbricato e anche in base alla metodologia impiegata per la realizzazione del componente stesso (colatura o estrusione). In particolare, in caso di estrusione è necessario considerare due aspetti: l'influenza della stratificazione sulla quota degli ancoraggi poiché tali elementi devono essere posti in corrispondenza dell'interfaccia tra due *layers* sovrapposti; e la specifica modalità di inserimento delle barre da attuare al fine di posizionare l'elemento metallico evitando che l'ingombro della barra stessa ostacoli il funzionamento del robot e la realizzazione del percorso di stampa previsto da progetto. In quest'ultimo caso, il posizionamento delle barre (e dell'ancorante chimico) può essere

svolto manualmente oppure, nell'ottica di una completa automatizzazione della produzione da un braccio robotico predisposto *ad hoc* per svolgere tale funzione. In un contesto di prefabbricazione, la predisposizione dei fori e l'eventuale inserimento degli elementi metallici risultano particolarmente semplici da eseguire in fase di produzione. A tal proposito, la predisposizione del progetto strutturale tramite l'impiego di un modello tridimensionale digitale permette di definire con precisione esatta la localizzazione e le caratteristiche dei fori o delle eventuali barre in acciaio da porre nei nuovi componenti. Lo stesso progetto strutturale definirà anche la posizione esatta dei fori da collocare nel muro esistente che saranno realizzati in un contesto meno controllato, il cantiere.

5.1.4.2_Sistemi per componenti fabbricati in situ

I componenti progettati per essere realizzati direttamente *in situ* si caratterizzano per dimensioni e pesi notevolmente maggiori rispetto ai singoli componenti prefabbricati, per cui necessitano di sistemi di ancoraggio molto resistenti per poter garantire in modo efficace la solidarizzazione con l'esistente. In questo ambito, l'unica soluzione impiegata già per la prefabbricazione che potrebbe risultare adeguata è costituita dalla barra con terminazione a "fiocco" (opportunamente modificato quando necessario secondo quanto successivamente esposto) poiché, soprattutto nel caso in cui il primo strato resistente ad alta densità posto in adiacenza al muro esistente e utile per l'ancoraggio sia costituito da un filamento singolo di spessore pari a 2,5 cm (sebbene si caratterizzi per una densità abbastanza elevata), è essenziale poter trasferire le tensioni su una superficie più ampia consentendo di raggiungere la resistenza adeguata per garantire la corretta efficacia dell'ancoraggio. Per la progettazione e realizzazione di questa tipologia di ancoraggio da impiegare nel caso di sistemi a cappotto (ed eventuale facciata ventilata) progettati per la fabbricazione *in situ* si devono tenere in considerazione alcuni aspetti, quali:

- *la profondità della barra (si veda 5.1.4.1).*
- *Le maggiori difficoltà e limitazioni imposte dalla fabbricazione in situ rispetto ad una produzione controllata svolta in stabilimento.*
- *Le modalità di predisposizione dei fori e di inserimento delle barre imposte dall'impiego del processo estrusivo con orientamento verticale nell'ambito della fabbricazione in situ.*

In tale contesto realizzativo, l'unica soluzione applicabile consiste nella realizzazione dei fori nel muro esistente e nel successivo posizionamento delle barre all'interno dei fori (con ancorante chimico per massimizzare la prestazione) da eseguire solamente in seguito al completamento dell'ultimo *layer* estruso adiacente al muro posto al di sotto del foro che dovrà accogliere la barra stessa. Tale accorgimento rappresenta l'unica possibilità per inglobare la barra in acciaio in corrispondenza dell'interfaccia tra due *layers* evitando che

l'ingombro della barra stessa ostacoli il funzionamento del robot e la realizzazione del percorso di stampa previsto. Il posizionamento delle barre (e dell'ancorante chimico) può essere svolto manualmente oppure, nell'ottica di una completa automatizzazione della costruzione in cantiere, da un braccio robotico predisposto *ad hoc* per svolgere tale funzione.

- *La conformazione specifica dei sistemi a cappotto oggetto di progettazione (si veda 5.1.3) e le relative conseguenze a livello di conformazione degli elementi di ancoraggio.*

Poiché i sistemi di ancoraggio devono essere posti in corrispondenza dei punti di contatto tra nuovo ed esistente, a livello di progetto strutturale è necessario tenere in considerazione la conformazione dei nuovi componenti, in particolare nel caso di andamento ondulato del primo filamento utile per l'ancoraggio, poiché, nei casi oggetto di progettazione, la distanza tra i punti di contatto tra nuovo ed esistente definisce di conseguenza la distanza minima, o in generale il passo, secondo cui possono essere posizionate le barre di ancoraggio in direzione orizzontale. Inoltre, la conformazione ondulata del filamento in cui è prevista l'adesione della terminazione della barra a fiocco determina la necessità di prevedere in direzione orizzontale la possibilità di realizzare il fiocco con elementi trasversali caratterizzati da una geometria variabile al fine di seguire perfettamente la direzione imposta dall'andamento del filamento stesso. Nella soluzione 1 (si veda 5.1.3), essendo previsto in sezione orizzontale un filamento rettilineo in adiacenza al muro esistente, è possibile porre i sistemi di ancoraggio senza vincoli in direzione sia verticale che orizzontale (sebbene sarebbe preferibile porre i sistemi in corrispondenza del doppio filamento e quindi, nel caso specifico, seguendo il modulo di 40 cm e prevedendo l'utilizzo di un fiocco modificato secondo quanto appena evidenziato). Nelle soluzioni 2 e 3 (si veda 5.1.3), invece, il posizionamento delle barre è sempre vincolato in direzione orizzontale dalla presenza di un filamento ad andamento ondulato sul lato adiacente al muro esistente per cui è sempre necessario prevedere l'impiego di barre a fiocco modificato affinché l'elemento metallico ne segua l'andamento garantendo la continuità di aderenza tra le due superfici.

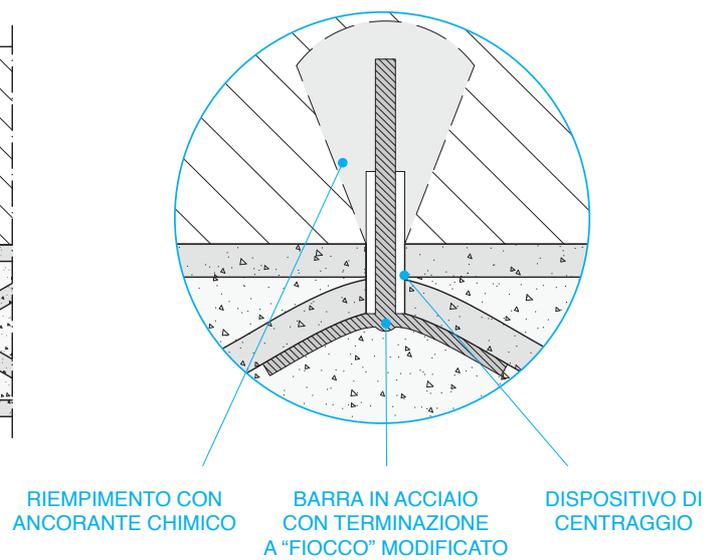
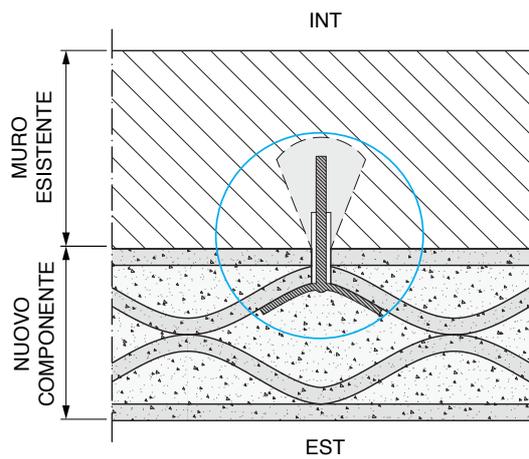
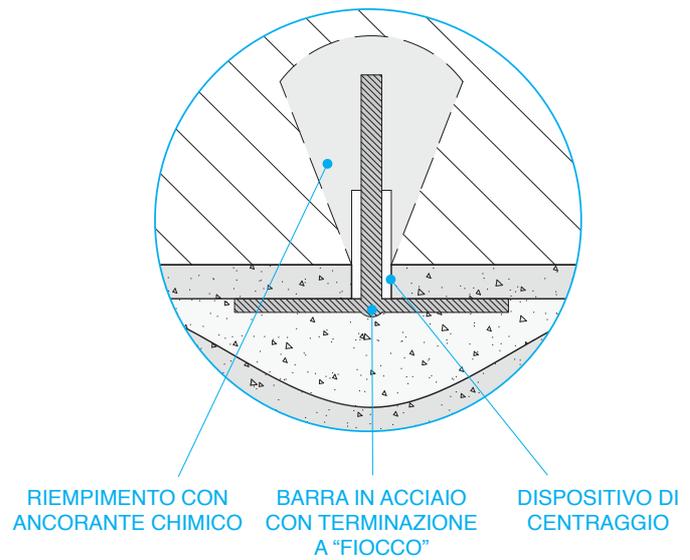
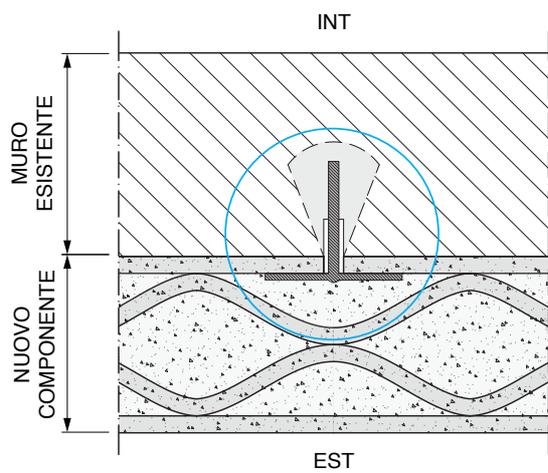


Figura 102 - Sezioni orizzontali e dettagli del sistema di ancoraggio a barra con terminazione a "fiocco" applicato alla soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ. Per questa soluzione è possibile fissare l'ancoraggio in corrispondenza del singolo filamento rettilineo impiegando un fiocco classico (sopra) oppure del doppio filamento (rettilineo e ondulato) impiegando un fiocco modificato per avere una prestazione maggiore in termini di resistenza (sotto).

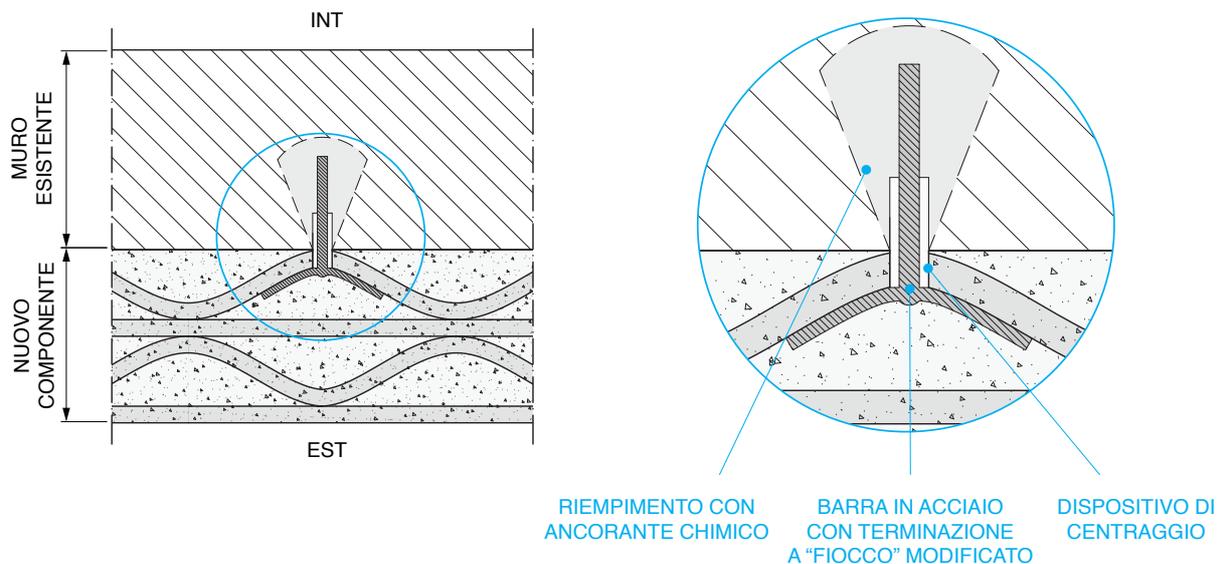


Figura 103 - Sezione orizzontale e dettaglio del sistema di ancoraggio a barra con terminazione a "fiocco" modificato applicato alla soluzione 2 progettata per la fabbricazione in situ. In questo caso è possibile fissare l'ancoraggio solamente in corrispondenza dei punti di contatto con il muro esistente. Tale soluzione è la medesima applicabile alla soluzione 3 progettata per la fabbricazione in situ.

Tabella 34 - Rappresentazione schematica della tipologia di ancoraggio a barra con terminazione a "fiocco" modificato per aderire alla conformazione curvilinea del filamento estruso.

BARRA IN ACCIAIO CON TERMINAZIONE A "FIOCCO" MODIFICATO E DISPOSITIVO DI CENTRAGGIO		
<p>PROSPETTO DALL'ALTO</p>	<p>PROSPETTO LATERALE</p>	<p>PROSPETTO FRONTALE</p>

5.1.5_Progettazione parametrica

La digitalizzazione del processo di progettazione tramite l'impiego del cosiddetto *computational design* permette di sfruttare al massimo gli sviluppi più recenti avvenuti in ambito informatico, offrendo la possibilità di realizzare - in maniera abbastanza semplice e senza bisogno di conoscenze approfondite in ambito di programmazione - una modellazione tridimensionale in cui i processi, le azioni e le geometrie sono definite attraverso una serie di parametri posti in relazione tra loro sulla base di collegamenti di varia natura. Tale strumento in pratica permette di semplificare una realtà complessa in singoli componenti più semplici concatenati in una rete di relazioni che consentono, in seguito alla modifica anche di un solo parametro, di aggiornare in modo automatico tutto il

modello tridimensionale. Questa peculiarità permette di apportare modifiche al progetto in maniera precisa e veloce evitando le elevate perdite di tempo, costi e energie che comporterebbe l'impiego dei classici strumenti di rappresentazione CAD.

In ambito di costruzione automatizzata tale approccio assume un ruolo ancora più importante poiché permette di trattare l'intero processo progettuale e costruttivo in maniera unitaria attraverso l'impiego di un unico *software*. Nel contesto parametrico è infatti possibile inserire dati relativi a vari aspetti e fasi del processo edilizio (progettazione architettonica, progettazione strutturale, valutazione delle prestazioni termiche, costruzione automatizzata ecc.) mettendo in atto un approccio parametrico multidisciplinare in grado di coinvolgere contemporaneamente tutti gli attori del processo ed una pluralità di punti di vista, permettendo inoltre un elevato controllo e velocità di elaborazione a livello di *design* e di modifica delle componenti (anche nell'eventualità di dover prevedere varianti da realizzare in corso d'opera).

Nel contesto del *3D Concrete Printing*, alla luce delle potenzialità che esso offre in ambito di produzione edilizia in termini di libertà formale e ottimizzazione topologica, l'approccio di tipo parametrico rappresenta la migliore modalità (e anche l'unica in caso di elevato grado di complessità formale) per poter gestire in modo semplice un'estrema complessità e ricchezza formale (ad esempio forme organiche, geometrie frattali e forme fluide) impensabile da realizzare in modo adeguato con le classiche modalità di progettazione CAD. La modellazione parametrica permette quindi di superare qualsiasi limite geometrico e di ottenere forme e soluzioni uniche grazie alle infinite possibilità offerte dalla modifica di dati e parametri. In tale ambito, il progettista assume un nuovo ruolo di co-sviluppatore di algoritmi all'interno di un *software* che permette di gestire in maniera unitaria tutto il processo progettuale e costruttivo.

Nel contesto di questo lavoro, le varie tipologie di componenti sono state progettate e modificate fino all'ultima versione attraverso l'impiego del *software* di modellazione tridimensionale *Rhinceros* spesso realizzata in modalità parametrica tramite *Grasshopper*. In questo ambito, tale strumento è stato impiegato esclusivamente per la definizione delle geometrie dei componenti e per la progettazione e realizzazione del percorso di stampa degli elementi estrusi (si veda 5.2.1), ma potenzialmente potrebbe essere utilizzato per svolgere altre funzioni quali ad esempio: il controllo dei parametri di prestazione termica in relazione ai cambiamenti di materiali e di geometrie a livello stratigrafico, e la definizione della posizione esatta di realizzazione dei fori e/o di inserimento delle barre in acciaio (sia nei nuovi componenti che nel muro esistente) nel caso di impiego di un sistema di ancoraggio a barre lineari o a "fiocco".

5.2_REALIZZAZIONE DEI COMPONENTI

5.2.1_Introduzione

La seconda parte di sperimentazione ha avuto come oggetto la realizzazione pratica di alcuni degli elementi progettati. In questo contesto, le soluzioni ipotizzate a livello progettuale hanno subito alcune variazioni (sia a livello di densità dei materiali che di conformazione geometrica) rese necessarie da una serie di ragioni quali, ad esempio, le limitazioni dimensionali imposte dal robot collaborativo impiegato per l'estrusione, la necessità di produrre oggetti facilmente manovrabili nello specifico contesto produttivo, gli adattamenti effettuati in corso d'opera per risolvere alcune problematiche evidenziate in fase di realizzazione e, in generale, le condizioni contestuali alla realizzazione pratica nello specifico ambito di svolgimento della sperimentazione. In particolare, le soluzioni ipotizzate per la fabbricazione *in situ* hanno subito un ridimensionamento notevole per poterne garantire la realizzabilità e la manovrabilità nel contesto di produzione. Visto il carattere sperimentale di tale studio, tutti gli adattamenti e variazioni sono stati accolti, sebbene risultassero in alcuni casi incoerenti soprattutto rispetto alle previsioni definite a livello di *performance* termica dei componenti.

La parte pratica di realizzazione di alcuni elementi tramite *3D Concrete Printing* ha permesso di valutare due aspetti essenziali relativi all'ambito dell'estrusione applicata a un materiale cementizio alleggerito con schiuma, quali:

- La realizzazione degli impasti per ottenere allo stato fresco le proprietà adeguate al corretto svolgimento del processo estrusivo (pompabilità, estrudibilità e stampabilità) e le densità necessarie per ottenere le proprietà finali definite in fase di progetto.
- Il corretto svolgimento del processo di estrusione, finalizzato all'ottenimento di un elemento finale con ottime proprietà allo stato indurito (conformità geometrica, adesione tra strati, densità costante del filamento ecc.), trovando spesso anche soluzioni in corso d'opera per eventuali difetti o problemi causati dal processo stesso e/o dal materiale impiegato.

Attraverso vari tentativi e in seguito ad una serie di adattamenti messi in opera al fine di ridurre l'occorrenza di alcuni difetti e/o ostacoli al corretto svolgimento del processo produttivo, si è giunti alla realizzazione di alcuni elementi in calcestruzzo schiumato estrudibile realizzati tramite *3D Concrete Printing* o colatura, che sono stati oggetto di esposizione durante la Fiera delle Costruzioni SAIE di Bologna nel mese di ottobre 2020.

Nell'ambito di questa sperimentazione, la parte inerente alla robotica, in termini sia di progettazione parametrica della modalità di realizzazione di ciascun componente estruso che di gestione pratica del processo di estrusione, è stata gestita interamente da INDEXLAB, laboratorio di ricerca di sistemi costruttivi innovativi del Politecnico di Milano con sede a Lecco.

5.2.2_Materiali e metodi

Tutti gli elementi realizzati in ambito di sperimentazione pratica si caratterizzano per l'impiego di calcestruzzo schiumato estrudibile a densità allo stato fresco variabile (anche a seconda della specifica funzione svolta nel singolo componente) all'interno di un *range* compreso tra 1090 kg/m³ e 300 kg/m³.

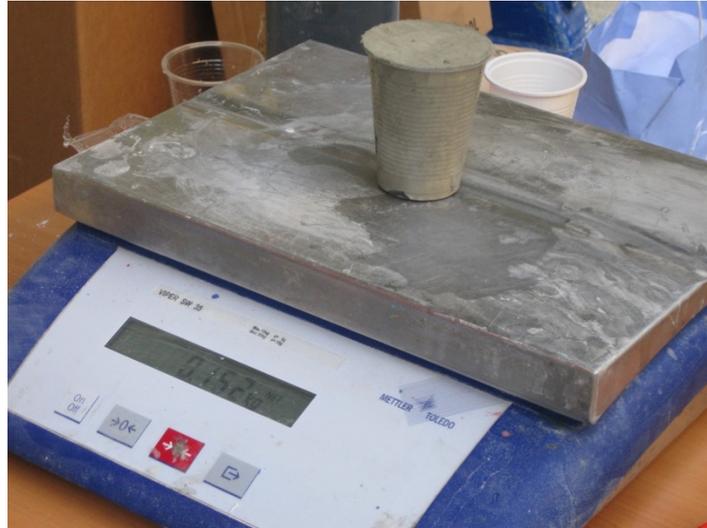


Figura 104 – Ripresa fotografica della fase di valutazione della densità allo stato fresco dell'impasto di calcestruzzo schiumato estrudibile realizzato.

Per la realizzazione degli impasti, sono stati impiegati i seguenti ingredienti: cemento (52,5 R o 32,5 R), viscosizzante, additivo superfluidificante per calcestruzzi a bassa viscosità (*MasterEASE* dell'azienda *Master Builders*), agente tensioattivo schiumogeno a base proteica (*Foamin C* dell'azienda *Mibo S.r.l.*) e acqua.



Figura 105 – Riprese fotografiche degli ingredienti in stato di polveri (sinistra) e di liquidi (destra) impiegati per la realizzazione del calcestruzzo schiumato estrudibile. Tra le polveri vi sono il cemento e il viscosizzante; mentre tra i liquidi vi sono l'acqua, il tensioattivo schiumogeno e l'additivo superfluidificante.

A seconda dello specifico componente, il materiale è stato realizzato tramite miscelazione secondo due differenti modalità, con schiuma preformata o con aerazione per agitazione violenta, ed è stato sottoposto a due differenti processi, colatura o estrusione. Gli impasti impiegati in caso di colatura sono stati realizzati secondo la metodologia della schiuma preformata, mentre quelli impiegati in processi estrusivi sono stati realizzati secondo la metodologia dell'aerazione per agitazione violenta. In caso di colatura il materiale è stato semplicemente impastato e versato successivamente all'interno di una cassaforma (removibile in seguito all'indurimento). In caso di estrusione, in seguito alla realizzazione di uno o più impasti a densità costante, il materiale è stato versato all'interno di una pompa per calcestruzzo per essere condotto fino alla testa del robot collaborativo impiegato per svolgere il processo di estrusione. La pompa, prima di essere impiegata per l'estrusione del calcestruzzo schiumato estrudibile, è stata riempita e svuotata più volte con boiaccia a base cementizia per lubrificare la superficie del tubo in modo da non creare impedimenti durante la fase di stampa. Il robot impiegato durante la sperimentazione è un macchinario di piccole dimensioni (con peso del braccio di circa 35 kg) ed è di tipo collaborativo, in grado di fermarsi o cambiare percorso nel caso in cui sia applicata al braccio una forza superiore a 10 kg. Il sistema nel complesso è costituito dal macchinario e dal relativo monitor di controllo su cui devono essere caricati i file predisposti per l'esecuzione dell'estrusione e attraverso il quale è possibile interagire con il robot per impartire gli ordini e modificare alcuni parametri come, ad esempio, la velocità di stampa. Al fine di realizzare un filamento estruso di larghezza in pianta pari a 2,5 cm, è stato impiegato un ugello a sezione circolare di diametro pari a 1,2 cm che, visto lo "schiacciamento" che naturalmente si verifica in direzione verticale a causa del peso dei *layers* sovrapposti, ha comportato una riduzione dell'altezza di ciascun *layer* per cui, per raggiungere l'altezza definita a livello progettuale è stato necessario realizzare un numero maggiore di livelli rispetto a quelli previsti in precedenza.



Figura 106 – Riprese fotografiche degli strumenti impiegati durante il processo di realizzazione dei componenti: miscelatore (sinistra), pompa per calcestruzzo (centro) e robot collaborativo (destra).

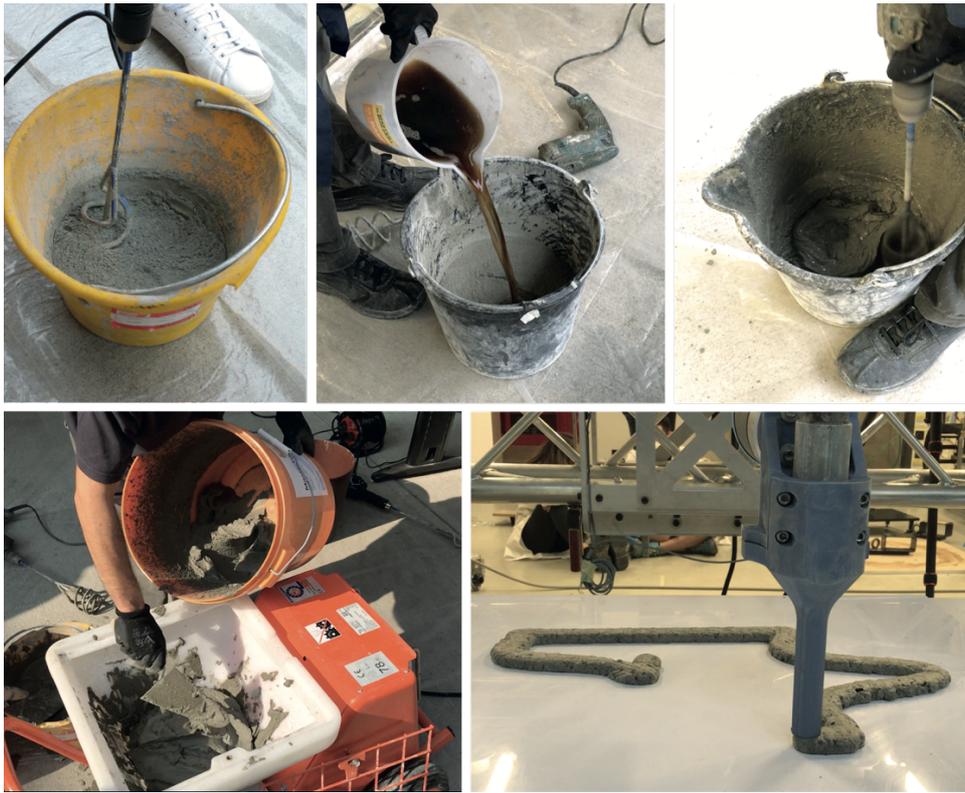


Figura 107 – Riprese fotografiche delle fasi del processo produttivo impiegato per la realizzazione di tutti i componenti estrusi: miscelazione delle polveri (in alto a sinistra); aggiunta dei liquidi (in alto al centro); miscelazione del composto formato da polveri e liquidi (in alto a destra); caricamento della pompa (in basso a sinistra); svolgimento del processo estrusivo (in basso a destra). Per la realizzazione dell'impasto è stata impiegata la modalità di aerazione per agitazione violenta (schiuma non preformata).



Figura 108 – Ripresa fotografica eseguita alla fine del processo di miscelazione del calcestruzzo schiumato estraibile impiegato per il processo estrusivo.



Figura109 – Riprese fotografiche della schiuma preformata impiegata per la realizzazione dei pannelli colati. Fase di miscelazione di acqua e tensioattivo schiumogeno (sinistra) e schiuma alla fine del processo di miscelazione (destra).

5.2.3_Pannelli colati o estrusi in cassaforma removibile

I pannelli in cassaforma removibile sono stati realizzati in calcestruzzo schiumato estraibile secondo differenti tipologie e modalità:

- pannello colato multistrato multi-densità (densità fresca pari a 600 kg/m^3 per gli strati esterni di spessore 1,7 cm e 0,8 cm, e pari a 300 kg/m^3 per lo strato interno di spessore 3,2 cm).
- Pannello colato mono-densità (densità fresca pari a 900 kg/m^3).
- Pannello colato mono-densità (densità fresca pari a 600 kg/m^3).
- Pannello estruso mono-densità (densità fresca pari a 1090 kg/m^3).

Tutti gli impasti colati sono stati realizzati secondo il metodo della schiuma preformata e la variazione di densità di ciascuno di essi è dipesa dal quantitativo di schiuma incorporata nell'impasto base. L'impasto impiegato per il pannello estruso è stato realizzato secondo il metodo dell'aerazione per agitazione violenta.

Ad eccezione del pannello multistrato multi-densità, che è stato realizzato in una cassaforma con superfici piane e con base rettangolare, gli altri pannelli sono stati realizzati all'interno di una cassaforma con base quadrata (di lato pari a 60 cm) e caratterizzata da superficie superiore e inferiore di forma complessa con andamento curvilineo variabile e con spessore compreso tra 8,3 e 3,3 cm. Prima di accogliere il materiale, tutte le casseforme sono state lubrificate con olio disarmante per facilitare il procedimento da eseguire in seguito all'indurimento.



Figura 110 – Ripresa fotografica della cassaforma impiegata per la realizzazione dei pannelli colati a mono-densità e del pannello estruso.

Pannelli colati

Per la realizzazione dei pannelli colati, il materiale è stato semplicemente versato all'interno della cassaforma e, dopo circa 5 giorni, si è proceduto con la scasseratura dei pannelli induriti.



Figura 111 – Ripresa fotografica del pannello multistrato colato in cassaforma removibile.



Figura 112 – Ripresa fotografica della stratificazione del pannello multistrato colato in cassaforma removibile. Si evidenzia l'adesione tra strati a differente densità.

Tabella 35 – Caratteristiche del pannello multistrato colato in cassaforma removibile.

PANNELLO MULTISTRATO COLATO IN CASSAFORMA REMOVIBILE		
CARATTERISTICHE DEL MATERIALE		
Calcestruzzo schiumato estrudibile realizzato con il metodo della schiuma preformata.		
Cemento 52,5 R	2000 g	
Cemento 32,5 R	2000 g	
Viscosizzante/stabilizzante	600 g	(15% sul cemento)
Superfluidificante (MasterEASE)	40 g	(1% sul cemento)
Acqua	1320 g	(a/c = 0,33)
Schiuma preformata:		
Tensioattivo (Foamin C)	20 g	(5%)
Acqua	380 g	(95%)
Densità allo stato fresco:	600 kg/m ³	(strati 1 e 3)
	300 kg/m ³	(strato 2)
CARATTERISTICHE FINALI DEL PANNELLO		
Dimensioni: 60 cm x 60 cm x 5,7 cm		
- Adesione tra strati (assenza di <i>cold joints</i>);		
- Superficie omogenea e opaca.		



Figura 113 – Riprese fotografiche eseguite alla fine del processo di scasseratura del pannello colato a densità fresca pari a 600 kg/m^3 .



Figura 114 – Ripresa fotografica dei pannelli colati mono-densità esposti al SAIE di Bologna nel mese di ottobre 2020. I pannelli si caratterizzano per densità fresca pari a 600 kg/m^3 (sinistra) e 900 kg/m^3 (destra).

Tabella 36 – Caratteristiche del pannello a densità fresca pari a 900 kg/m^3 colato in cassaforma removibile.

PANNELLO MONOSTRATO 1 COLATO IN CASSAFORMA REMOVIBILE		
CARATTERISTICHE DEL MATERIALE		
Calcestruzzo schiumato estraibile realizzato con il metodo della schiuma preformata.		
Cemento 52,5 R	2000 g	
Cemento 32,5 R	2000 g	
Viscosizzante/stabilizzante	600 g	(15% sul cemento)
Superfluidificante (MasterEASE)	40 g	(1% sul cemento)
Acqua	1320 g	(a/c = 0,33)
Schiuma preformata:		
Tensioattivo (Foamin C)	20 g	(5%)
Acqua	380 g	(95%)
Densità allo stato fresco	900 kg/m^3	
CARATTERISTICHE FINALI DEL PANNELLO		
Dimensioni:		
60 cm x 60 cm		
altezza variabile tra 8,3 e 3,3 cm.		
Superficie omogenea e opaca.		

Tabella 37 – Caratteristiche del pannello a densità fresca pari a 600 kg/m³ colato in cassaforma removibile.

PANNELLO MONOSTRATO 2 COLATO IN CASSAFORMA REMOVIBILE		
CARATTERISTICHE DEL MATERIALE		
Calcestruzzo schiumato estrudibile realizzato con il metodo della schiuma preformata.		
Cemento 52,5 R	2000 g	
Cemento 32,5 R	2000 g	
Viscosizzante/stabilizzante	600 g	(15% sul cemento)
Superfluidificante (MasterEASE)	40 g	(1% sul cemento)
Acqua	1320 g	(a/c = 0,33)
Schiuma preformata:		
Tensioattivo (Foamin C)	20 g	(5%)
Acqua	380 g	(95%)
Densità allo stato fresco	600 kg/m ³	
CARATTERISTICHE FINALI DEL PANNELLO		
Dimensioni:		
60 cm x 60 cm		
altezza variabile tra 8,3 e 3,3 cm.		
Superficie omogenea e opaca.		

Pannello estruso

Mentre nel caso di colatura la scelta di una cassaforma con geometria complessa è dipesa esclusivamente dall'effetto formale finale desiderato, nel caso del pannello realizzato tramite estrusione, essa è derivata dalla volontà di evidenziare sia le potenzialità d'impiego del processo estrusivo realizzato tramite robot collaborativo in caso di superficie di stampa non piana sia eventuali modifiche e problematiche inerenti a questa particolare condizione realizzativa. Ad esempio, per la realizzazione di questo tipo di pannelli, è stato necessario predisporre il percorso di stampa sia sulla base del movimento dell'ugello sul piano orizzontale che della necessità di seguire, attraverso una variazione di quota dell'ugello stesso, l'andamento curvilineo della superficie sul piano verticale con l'obiettivo di mantenere costante la distanza tra ugello e superficie di stampa. In tale ambito, l'impiego della progettazione parametrica è stato fondamentale per rappresentare una realtà formale molto complessa come quella che caratterizza la base della cassaforma utilizzata per l'estrusione (la base stessa era stata generata in materiale plastico con finitura lucida attraverso un processo di progettazione parametrico per cui, nell'ambito di questa sperimentazione, il corretto percorso di stampa è stata definito tramite un semplice *offset* rispetto alla superficie della base curvilinea).

Nell'ambito estrusivo, visto il rischio di scivolamento del materiale, dovuto sia alla superficie lucida della base della cassaforma che alle caratteristiche formali rispetto alla direzione verticale di stampa, al fine di realizzare un componente a riempimento costante, il percorso di stampa per la

realizzazione del secondo *layer* è stato ruotato di 90 gradi rispetto al primo. Tale scelta, sebbene non risulti appropriata per il processo di *3D Concrete Printing*, che prevede di realizzare i *layers* sovrapponendo lo stesso percorso (o uno molto simile in caso di sbalzi), è stata ritenuta adeguata in questo caso specifico poiché l'estrusione è stata realizzata all'interno di una cassaforma e su di essa, alla fine della stampa, era stato previsto di porre un'altra base (con conformazione analoga alla prima) che, tramite l'applicazione di una leggera pressione necessaria per far aderire la base all'ultimo strato di stampa, avrebbe permesso di solidarizzare tra loro i due strati sovrapposti impiegati per la realizzazione del pannello.

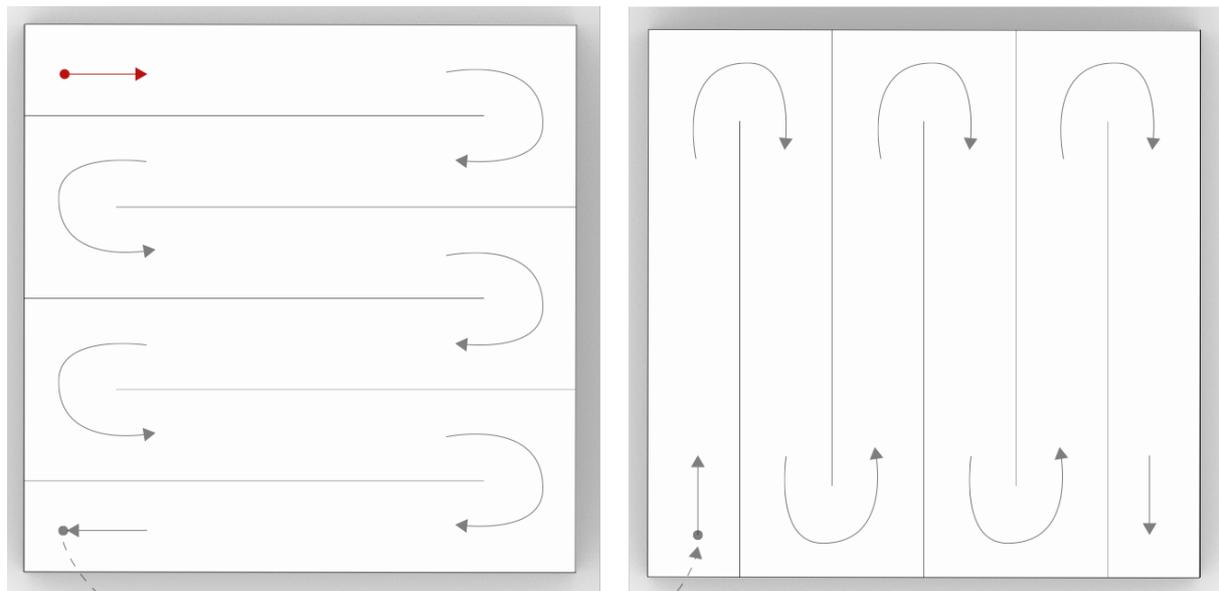


Figura 115 - Rappresentazione schematica semplificata del percorso di stampa impiegato per la realizzazione del primo strato (sinistra) e del secondo strato (destra) del pannello estruso in cassaforma removibile. Si evidenzia la rotazione di 90 gradi che differenzia i due livelli. In rosso è segnato il punto di partenza del percorso di stampa.

Come previsto già in fase di ideazione, durante il processo estrusivo il materiale ha subito scivolamenti nelle zone della superficie a maggior ripidità, ma la realizzazione del secondo strato in direzione perpendicolare rispetto al primo ha permesso di compensare i difetti presenti a livello del primo strato. L'impiego di una cassaforma con superficie caratterizzata da meno ripidità o semplicemente con finitura superficiale meno lucida e scivolosa, avrebbe probabilmente permesso di svolgere il processo estrusivo impiegando un unico percorso di stampa ripetuto su livelli sovrapposti senza incorrere in problemi di questo genere.



Figura 116 – Ripresa fotografica eseguita durante la realizzazione del primo strato del pannello estruso in cassaforma removibile. Si evidenziano le discontinuità causate dallo scivolamento del filamento sulla superficie di base della cassaforma in corrispondenza delle zone a maggiore ripidità.



Figura 117 – Ripresa fotografica eseguita durante la realizzazione del secondo ed ultimo strato del pannello estruso in cassaforma removibile. Si evidenzia la rotazione di 90 gradi del percorso di stampa seguito per questo strato rispetto a quello sottostante.



Figura 118 – Ripresa fotografica eseguita alla fine del processo estrusivo di realizzazione del pannello estruso in cassaforma removibile.



Figura 119 – Ripresa fotografica eseguita al momento del posizionamento della superficie superiore di chiusura della cassaforma removibile impiegata per la realizzazione del pannello estruso.

Il pannello realizzato si caratterizza per la visibilità del percorso di stampa eseguito per la realizzazione degli strati e per una finitura superficiale lucida. Quest'ultima è dovuta all'emersione, in corrispondenza della superficie di contatto con la cassaforma, del tensioattivo impiegato per la realizzazione dell'impasto. Tale fenomeno è stato causato dalla pressione esercitata dallo stampo su un materiale già caratterizzato al momento della deposizione da un sottile strato di tensioattivo presente sulla superficie esterna dei *layers* (come si poteva già vedere dalle striature presenti sul filamento estruso) dovuto probabilmente alla movimentazione subita dal materiale stesso durante il pompaggio e il processo di stampa.



Figura 120 – Ripresa fotografica della sezione di pannello estruso esposta al SAIE di Bologna nel mese di ottobre 2020. Si evidenziano la finitura lucida che caratterizza la superficie del pannello, la visibilità del percorso di stampa eseguito per la realizzazione dello strato superficiale, e la presenza di alcune cavità causate dalla presenza di bolle di dimensione eccessive nell'impasto impiegato per l'estrusione.

Tabella 38 – Caratteristiche del pannello estruso in cassaforma removibile.

PANNELLO ESTRUSO IN CASSAFORMA REMOVIBILE		
CARATTERISTICHE DEL MATERIALE		
Calcestruzzo schiumato estrudibile realizzato con il metodo della schiuma miscelata (non preformata).		
Cemento 52,5 R	4500 g	
Viscosizzante/stabilizzante	700 g	(≈15% sul cemento)
Superfluidificante (MasterEASE)	12 g	(≈2,7% sul cemento)
Acqua	1800 g	(a/c = 0,4)
Tensioattivo (Foamin C)	140 g	
Tempo di miscelazione	7 minuti	
Densità allo stato fresco	1090 kg/m ³	
IMPOSTAZIONI ROBOT		
Velocità di stampa: variabile nell'intervallo 10-30 mm/s per necessità di adattamento alla portata irregolare del flusso in uscita (velocità ideale ipotizzata: 20 mm/s).		
Diametro ugello: 12 mm.		
PROBLEMATICHES RISCOSTRATE DURANTE IL PROCESSO ESTRUSIVO		
- “Scivolamenti” del materiale stampato sulla superficie della cassaforma (il percorso di stampa è stato adattato per minimizzare l'occorrenza di conseguenti difetti a livello estetico);		
- Presenza di bolle d'aria di dimensione eccessiva.		
CARATTERISTICHE FINALI DEL COMPONENTE ESTRUSO		
Altezza singolo <i>layer</i> : 12 mm		
Larghezza <i>layer</i> : variabile nell'intervallo 24-30 mm		
Altezza totale del componente: 24 mm		
Numero livelli realizzati: 2		
Caratteristiche allo stato indurito:		
- Adesione tra strati (assenza di <i>cold joints</i>);		
- Superficie omogenea lucida con visibilità del percorso di stampa e delle striature di schiuma emerse sul filamento a causa della movimentazione del materiale durante il processo di stampa;		
- Presenza di piccole cavità dovute alla presenza di bolle di dimensioni eccessive nell'impasto estruso.		

5.2.4 Componenti estrusi in assenza di cassaforma

I componenti realizzati tramite *3D Concrete Printing* in assenza di cassaforma sono di due tipologie: un blocco ad incastro maschio-femmina e un componente rappresentativo (seppur con notevoli modifiche) della soluzione progettuale 1 precedentemente ipotizzata per l'ambito della fabbricazione *in situ* (si veda 5.1.3).

Blocco ad incastro maschio-femmina

Rispetto a quanto progettato per la porzione estrusa, il blocco ha subito solamente alcune variazioni a livello di percorso interno all'elemento per la necessità, evidenziata durante la fase realizzativa, di maggior sostegno dei filamenti rettilinei posti sui due lati paralleli del blocco stesso. Inoltre, per motivi di comodità realizzativa, l'altezza totale del componente è stata ridimensionata a 12 cm.

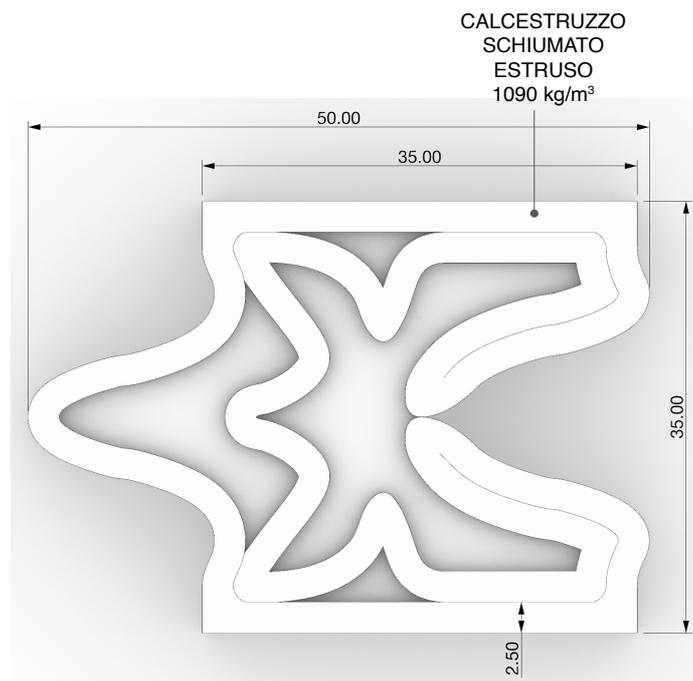


Figura 121 – Rappresentazione in sezione orizzontale del blocco ad incastro maschio-femmina realizzato tramite 3D Concrete Printing.

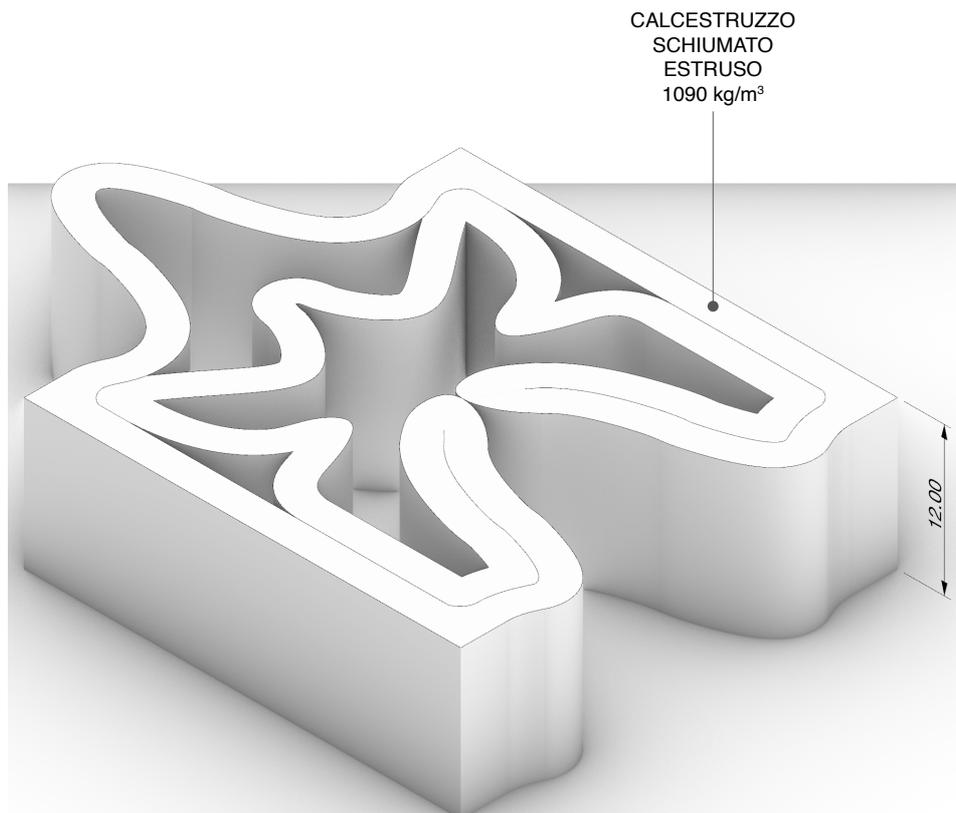


Figura 122 – Rappresentazione 3D del blocco ad incastro maschio-femmina realizzato tramite 3D Concrete Printing.

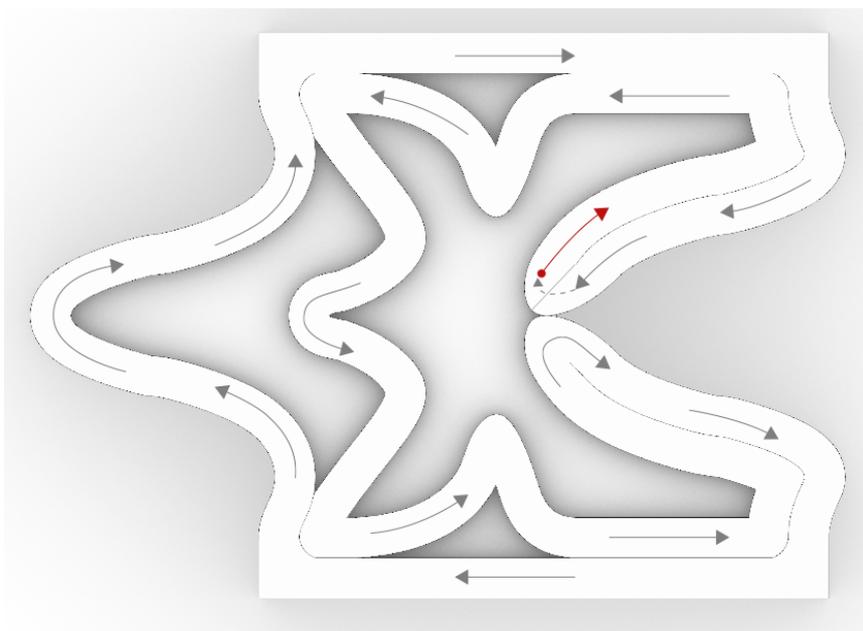


Figura 123 - Rappresentazione schematica del percorso di stampa impiegato per la realizzazione del blocco ad incastro maschio-femmina. In rosso è segnato il punto di partenza del percorso di stampa che corrisponde al contempo al punto di cambio di quota per la realizzazione dei layers sovrapposti.



Figura 124 – Ripresa fotografica eseguita durante il processo estrusivo svolto per la realizzazione del blocco ad incastro maschio-femmina.



Figura 125 – Ripresa fotografica eseguita alla fine del processo estrusivo svolto per la realizzazione del blocco ad incastro-maschio femmina.



Figura 126 - Ripresa fotografica del blocco ad incastro maschio-femmina esposto al SAIE di Bologna nel mese di ottobre 2020.



Figura 127 - Ripresa fotografica del blocco ad incastro maschio-femmina esposto al SAIE di Bologna nel mese di ottobre 2020.



Figura 128 - Ripresa fotografica del blocco ad incastro maschio-femmina esposto al SAIE di Bologna nel mese di ottobre 2020, con evidenziazione dei principali difetti presenti allo stato indurito: "scivolamenti" (in rosso), "spaccature" (in giallo) e cavità dovute alla presenza di bolle di dimensioni eccessiva (in azzurro).

Tabella 39 -Caratteristiche del blocco ad incastro maschio-femmina estruso tramite 3D Concrete Printing.

COMPONENTE ESTRUSO 1 (BLOCCO AD INCASTRO MASCHIO-FEMMINA)		
CARATTERISTICHE DEL MATERIALE		
Calcestruzzo schiumato estrudibile realizzato con il metodo della schiuma miscelata (non preformata).		
Cemento 52,5 R	4500 g	
Viscosizzante/stabilizzante	990 g	(22% sul cemento)
Superfluidificante (MasterEASE)	12 g	(≈2,7% sul cemento)
Acqua	1710 g	(a/c = 0,38)
Tensioattivo (Foamin C)	140 g	
Tempo di miscelazione	7 minuti	
Densità allo stato fresco	1090 kg/m ³	
IMPOSTAZIONI ROBOT		
Velocità di stampa: variabile nell'intervallo 10-30 mm/s per necessità di adattamento alla portata irregolare del flusso in uscita (velocità ideale ipotizzata: 20 mm/s).		
Diametro ugello: 12 mm.		
PROBLEMATICHE RISCONTRATE DURANTE IL PROCESSO ESTRUSIVO		
<ul style="list-style-type: none"> - Brevi interruzioni durante il processo di stampa; - Problemi di pompaggio; - Presenza di bolle d'aria di dimensioni eccessive; - Variabilità del flusso a livello di portata; - Presenza di "spaccature" nei filamenti stampati; - "Scivolamenti" del materiale stampato all'esterno del percorso di stampa. 		
CARATTERISTICHE FINALI DEL COMPONENTE ESTRUSO		
Altezza singolo <i>layer</i> : 12 mm		
Larghezza <i>layer</i> : variabile nell'intervallo 24-30 mm		
Altezza totale del componente: 120 mm		
Numero livelli realizzati interamente: 10		
Caratteristiche allo stato indurito:		
<ul style="list-style-type: none"> - Adesione tra strati (assenza di <i>cold joints</i>); - Difformità geometrica localizzata ("scivolamenti" del materiale stampato all'esterno del percorso di stampa; "spaccature" nei filamenti stampati; cavità); - Superficie omogenea e opaca. 		

Componente rappresentativo della soluzione 1 ipotizzata per la fabbricazione in situ

In ambito realizzativo, a causa delle limitazioni dimensionali imposte da una serie di ragioni (quali il robot impiegato e l'esigenza di manovrabilità all'interno del contesto di produzione), tale soluzione è stata ridimensionata dal punto di vista della lunghezza d'onda del filamento ad andamento ondulato (dai 40 cm previsti in fase progettuale ai 15 cm del componente realizzato).

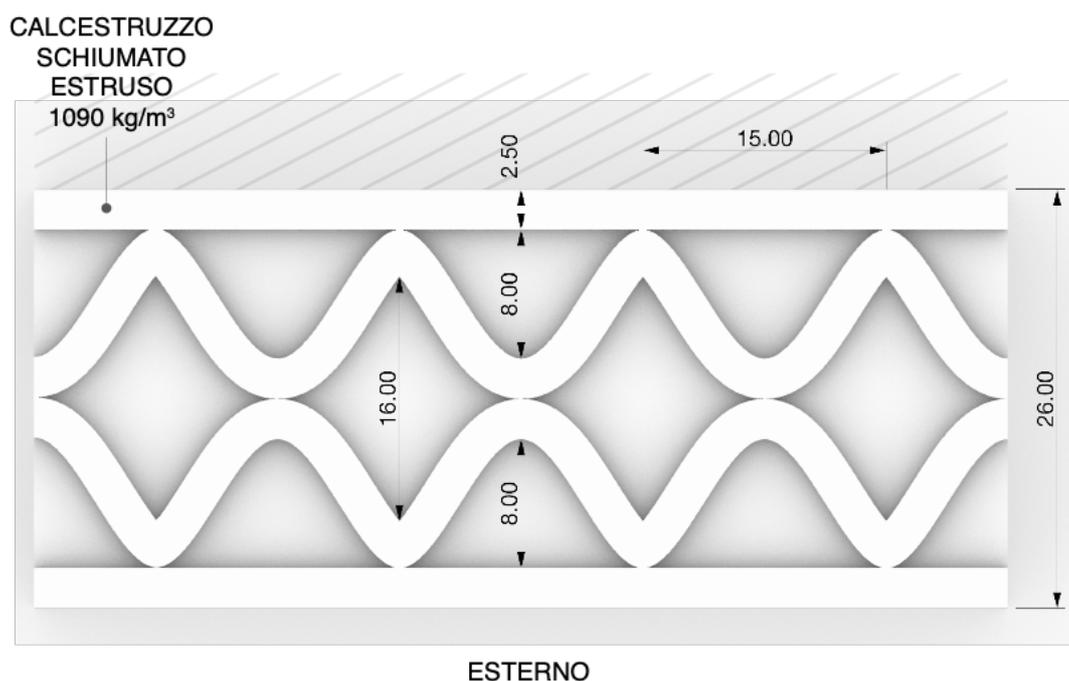


Figura 129 – Rappresentazione in sezione orizzontale della soluzione 1 del sistema progettato per la fabbricazione in situ adattato alla nuova lunghezza d'onda pari a 15 cm.

Per la necessità di realizzare solamente una porzione ridotta di tale soluzione, l'elemento oggetto di realizzazione rappresentato nelle immagini seguenti presenta alle due estremità trasversali un elemento di chiusura che permette in questo ambito di poter realizzare l'estrusione dei vari livelli sovrapposti in modo continuativo grazie alla presenza a ciascun livello di un percorso chiuso che termina in corrispondenza del cambiamento di quota da cui ricomincia il percorso stesso per il livello successivo. Nella realtà costruttiva della fabbricazione *in situ*, questa situazione non si presenterà secondo questa modalità poiché il lato di chiusura trasversale rettilineo presente ai due lati dell'elemento genererebbe un ponte termico nel sistema, ma si svolgerà in modo continuo lungo tutto il perimetro dei muri perimetrali dell'edificio esistente oggetto di intervento. Attraverso l'impiego di un braccio robotico multi-ugello, questo processo potrebbe essere svolto in continuità costruendo contemporaneamente i filamenti perimetrali del nuovo cappotto e i filamenti interni ad essi.

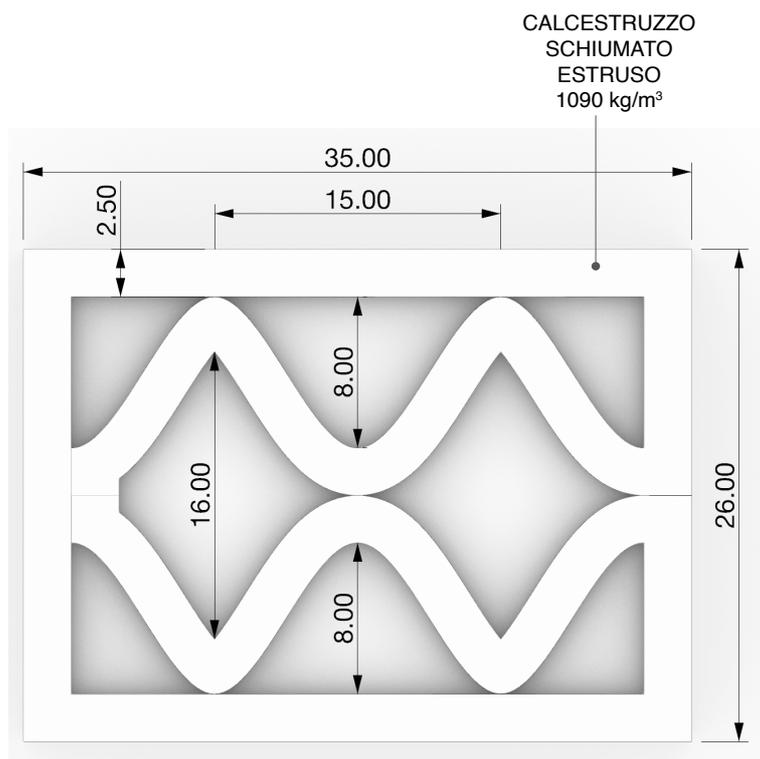


Figura 130 - Rappresentazione in sezione orizzontale del componente effettivamente realizzato in seguito al ridimensionamento della soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ.

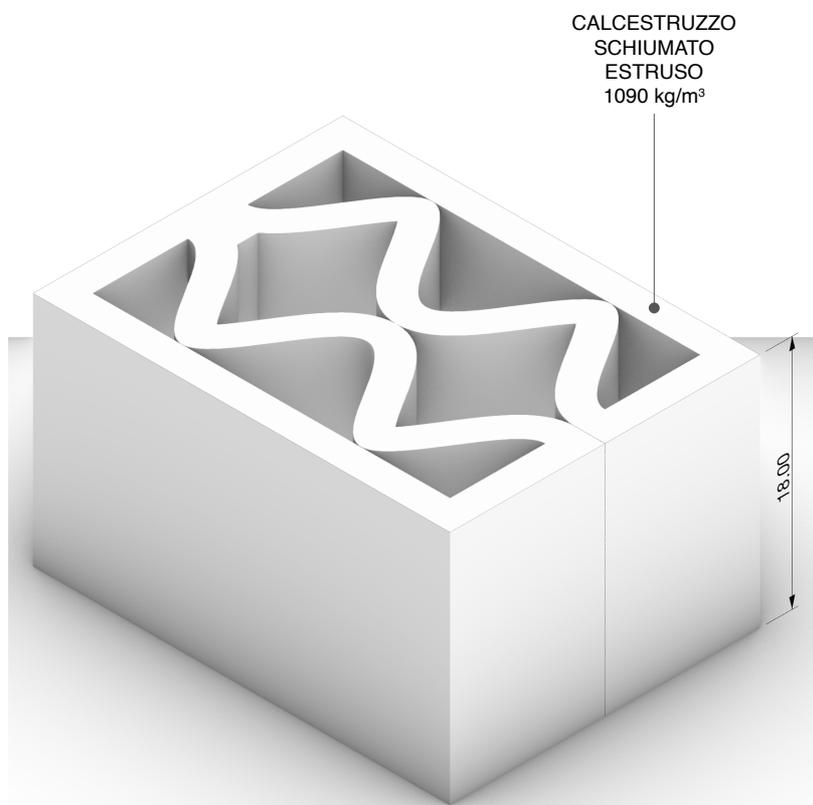


Figura 131 - Rappresentazione 3D del componente effettivamente realizzato in seguito al ridimensionamento della soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ.



Figura 134 - Ripresa fotografica eseguita lateralmente alla fine del processo estrusivo del componente effettivamente realizzato in seguito al ridimensionamento della soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ.



Figura 135 - Ripresa fotografica eseguita frontalmente alla fine del processo estrusivo del componente effettivamente realizzato in seguito al ridimensionamento della soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ.



Figure 136 - Ripresa fotografica eseguita lateralmente alla fine del processo estrusivo del componente effettivamente realizzato in seguito al ridimensionamento della soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ.

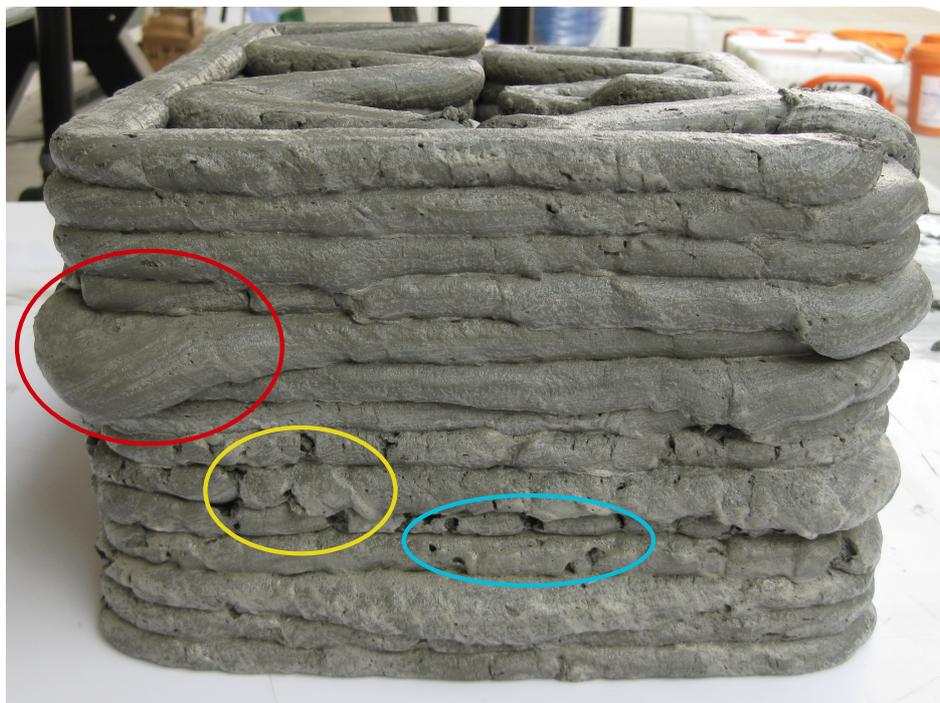


Figura 137 - Ripresa fotografica del componente effettivamente realizzato in seguito al ridimensionamento della soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ, con evidenziazione dei principali difetti presenti alla fine del processo estrusivo: "scivolamenti" (in rosso), "spaccature" (in giallo) e cavità dovute alla presenza di bolle di dimensioni eccessiva (in azzurro).

Tabella 40 – Caratteristiche del componente effettivamente realizzato in seguito al ridimensionamento della soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ.

COMPONENTE ESTRUSO 2 (SISTEMA PER FABBRICAZIONE IN SITU)		
CARATTERISTICHE DEL MATERIALE		
Calcestruzzo schiumato estraribile realizzato con il metodo della schiuma miscelata (non preformata).		
Cemento 52,5 R	4500 g	
Viscosizzante/stabilizzante	700 g	(≈15% sul cemento)
Superfluidificante (MasterEASE)	12 g	(≈2,7% sul cemento)
Acqua	1800 g	(a/c = 0,4)
Tensioattivo (Foamin C)	140 g	
Tempo di miscelazione	7 minuti	
Densità allo stato fresco	1090 kg/m ³	
IMPOSTAZIONI ROBOT		
Velocità di stampa: variabile nell'intervallo 10-30 mm/s per necessità di adattamento alla portata irregolare del flusso in uscita (velocità ideale ipotizzata: 20 mm/s).		
Diametro ugello: 12 mm.		
PROBLEMATICHE RICONTRATE DURANTE IL PROCESSO ESTRUSIVO		
<ul style="list-style-type: none"> - Interruzioni durante il processo di stampa; - Problemi di pompaggio; - Presenza di bolle d'aria di dimensioni eccessive; - Variabilità del flusso a livello di portata; - Irregolarità a livello di consistenza del mix; - Presenza di "spaccature" nei filamenti stampati; - "Scivolamenti" del materiale stampato all'esterno del percorso di stampa. 		
CARATTERISTICHE FINALI DEL COMPONENTE ESTRUSO		
Altezza singolo layer: 12 mm		
Larghezza layer: variabile nell'intervallo 24-30 mm		
Altezza totale del componente: 170 mm		
Numero livelli realizzati interamente: 13		
Numero massimo di livelli sovrapposti estrusi: 14		
Caratteristiche allo stato indurito:		
<ul style="list-style-type: none"> - Adesione tra strati (assenza di <i>cold joints</i>); - Diformità geometrica ("scivolamenti" del materiale stampato all'esterno del percorso di stampa; "spaccature" nei filamenti stampati; cavità). - Gli ultimi tre livelli estrusi si caratterizzano per maggiore conformità geometrica e omogeneità del materiale; - Superficie omogenea e opaca. 		

5.3_CONSIDERAZIONI E RICERCA

La progettazione e realizzazione pratica oggetto di questa sezione del lavoro di tesi ha offerto l'opportunità di seguire interamente un processo che dal *concept* iniziale, attraverso la progettazione, ha portato alla realizzazione (sebbene con una serie di modifiche) di alcuni degli elementi ideati per lo specifico ambito di applicazione considerato nel presente studio. Tale lavoro ha permesso di approfondire, a livello pratico, la conoscenza relativa ai processi, le metodologie, le problematiche e le possibili soluzioni che caratterizzano in generale la produzione di componenti innovativi in calcestruzzo schiumato estrudibile e, in particolare, il processo altrettanto innovativo del *3D Concrete Printing* con il quale possono essere realizzati. In altri termini, attraverso la pratica di questa esperienza, sono emerse, da una parte, le enormi potenzialità che caratterizzano l'ambito oggetto di studio e, dall'altra, gli attuali limiti ancora da superare e le prospettive aperte alla sperimentazione futura (a livello sia di ambito generale che della specifica sperimentazione e applicazione svolta durante la tesi). In futuro, il medesimo processo, sia progettuale che realizzativo, potrebbe essere impiegato per approfondire ulteriormente la tematica di applicazione oggetto di questo studio (cioè la realizzazione di componenti energeticamente efficienti per interventi di riqualificazione energetica sull'esistente) oppure per addentrarsi in altri innumerevoli ambiti altrettanto validi, attualmente inesplorati o scarsamente approfonditi.

In generale, il vero punto di forza e di innovazione di questo lavoro (oltre allo specifico ambito di applicazione che risulta particolarmente attuale) è rappresentato sostanzialmente dall'impiego di tre elementi, la progettazione parametrica, il calcestruzzo schiumato estrudibile, e il *3D Concrete Printing*, che tutti insieme offrono enormi potenzialità di sviluppo nel prossimo futuro grazie ad una serie di ragioni quali:

- la futura automatizzazione dei processi produttivi e costruttivi (sia in stabilimento che *in situ*).
- Le possibilità offerte dall'impiego del *computational Design* (che risultano essenziali soprattutto in vista della prossima diffusione del *3D Concrete Printing*) dal punto di vista sia della gestione unitaria dell'intero processo progettuale e realizzativo, che della piena libertà formale ed espressiva garantita dalla possibilità di trattare geometrie estremamente complesse attraverso uno strumento relativamente semplice.
- La possibilità di impiegare un materiale molto versatile, economico, multifunzionale e semplice da produrre e gestire per ottenere densità molto differenti all'interno di un *range* molto ampio (che si sta cercando di ampliare ulteriormente) che consente di generare elementi multifunzionali a comune matrice cementizia.

Sebbene le possibilità di ricerca e sperimentazione riguardino un'innumerevole quantità di ambiti e approfondimenti tematici su una serie infinita di aspetti, cercando di circoscrivere il discorso allo

specifico ambito del presente lavoro, quest'ultimo potrebbe essere proseguito attraverso le seguenti azioni:

- completare i componenti (ad esempio realizzando i riempimenti colati all'interno delle cavità degli elementi estrusi ed eventualmente prevedendo caratteristiche del materiale colato differenti per rientrare nei valori limite assunti all'inizio della fase di progettazione) oppure realizzarli nuovamente in modo puntuale rispetto a quanto definito a livello progettuale sia in termini di materiali impiegati (densità allo stato fresco, realizzazione delle colature all'interno delle cavità ecc.) e di geometrie (dimensioni degli elementi nel complesso ed in ogni singola parte).
- Provare a realizzare i pannelli estrusi in cassaforma removibile su una superficie di base meno scivolosa in modo da non dover ruotare di 90 gradi il percorso di stampa nel secondo livello di filamento estruso, ma seguendo la normale procedura di realizzazione che caratterizza questo tipo di processo tramite la sovrapposizione di percorsi di stampa uguali.
- Ripetere più volte il processo di realizzazione dei componenti al fine di: migliorare le proprietà e caratteristiche del materiale allo stato fresco, ottenendo un maggiore controllo su esso (stabilità delle bolle, omogeneità del composto, consistenza adeguata ecc.); provare a risolvere le problematiche evidenziate durante il processo estrusivo (come, ad esempio, i problemi di pompaggio e la presenza di bolle di dimensioni eccessive che potrebbero essere risolti con un maggior controllo sulla pressione esercitata dalla pompa e/o posizionando un estrusore in testa all'ugello); e migliorare le proprietà e le caratteristiche finali dei componenti induriti (conformità geometrica, densità costante del filamento, estetica, assenza di difetti quali "scivolamenti", "spaccature", cavità ecc.).
- Sottoporre tutti i componenti realizzati ai test di valutazione delle *performance* effettivamente offerte in particolare a livello di prestazione termica e meccanica.

Successivamente, si potrebbe proseguire ulteriormente secondo le seguenti strade:

- provare a realizzare attraverso il *3D Concrete Printing* i componenti progettati che non sono stati oggetto di realizzazione (anche nelle varianti caratterizzate da sbalzi a livello di percorso di stampa).
- Provare a realizzare i componenti ideati per la fabbricazione *in situ* all'interno di un contesto maggiormente verosimile rispetto al cantiere, tramite l'impiego di un robot di dimensioni maggiori per produrre porzioni più ampie del sistema.
- Provare a spingersi oltre in modo da ottenere prestazioni termiche ancora migliori (ad esempio impiegando un materiale a densità fresca pari a 100 kg/m^3 per la realizzazione di tutti i riempimenti).

- Provare a ridurre lo spessore complessivo ed eventualmente il peso dei differenti sistemi a cappotto attraverso l'impiego di calcestruzzi schiumati estrudibili a densità ancora più basse (ad esempio impiegando un materiale a densità fresca pari a 100 kg/m^3 per la realizzazione dei riempimenti).
- Provare conformazioni geometriche ancora più complesse, grazie al supporto della progettazione parametrica, al fine di comprendere il grado di complessità raggiungibile con il tipo di processo impiegato, le relative strumentazioni (robot collaborativo) e le specifiche metodologie realizzative (*2D Slicing*).
- Provare a realizzare elementi caratterizzati da filamenti ondulati con lunghezza d'onda differente in modo da testarne la stabilità.
- Testare i sistemi di assemblaggio e di ancoraggio previsti in fase progettuale.
- Provare a modificare alcune condizioni al fine di ottenere un materiale/processo/prodotto più performante a livello tecnico ed ambientale.
- Valutare altri tipi di prestazioni oltre a quella termica e meccanica come ad esempio la prestazione acustica.

In realtà, vi sarebbero ancora infinite opportunità di sviluppo, proprio per il carattere innovativo e di recente interesse di questo ambito (come testimoniano i numerosi studi di ricerca emersi negli ultimi anni a livello internazionale). Chiaramente, come si evince dall'elenco appena svolto relativo alle possibilità di studio ancora aperte, vi è sempre qualcosa in più da studiare, qualche ambito da approfondire, qualche aspetto non ancora trattato. Tuttavia, per arrivare a raggiungere gli obiettivi principali della ricerca e della sperimentazione, cioè la conoscenza approfondita di materiali, processi e prodotti finalizzata alla realizzazione di prodotti realizzati con tali metodo, materiale e caratteristiche, è bene, al punto di conoscenze attualmente già sviluppate in tema sia di *3D Concrete Printing* che di calcestruzzo schiumato estrudibile, procedere perseguendo l'obiettivo principale di arrivare a concludere un percorso in modo completo, focalizzandosi ad esempio sulla realizzazione di uno specifico tipo di prodotto di qualità e ad altre prestazioni al fine di poterlo porre nel prossimo futuro sul mercato.

CAPITOLO 6

CONCLUSIONE E SCENARI FUTURI

Nel corso del presente lavoro di tesi sono state evidenziate le caratteristiche e le potenzialità del calcestruzzo schiumato estrudibile, nonché il suo possibile impiego nel settore delle costruzioni per la realizzazione di componenti innovativi, monomaterici e multifunzionali, realizzabili in contesti di produzione prefabbricata o *in situ*, anche mediante l'impiego di processi automatizzati come il *3D Concrete Printing*.

In generale, dalla trattazione svolta, risulta evidente il potenziale contributo che il complesso delle innovazioni - a livello di materiale, processo di produzione e prodotti finali - potrebbe apportare in un settore ancora molto legato ad una pratica tradizionale spesso poco efficiente e caratterizzata da elevati costi, tempi ed impatti ambientali. La crescente richiesta di nuovi materiali, processi e prodotti più efficienti, economici ed eco-sostenibili, in grado di promuovere un'inversione di rotta rispetto alla situazione della pratica edilizia attuale, potrebbe rappresentare una sfida alla quale rispondere proprio tramite l'impiego del calcestruzzo schiumato estrudibile.

L'innovazione a livello di materiale, processo e prodotto necessita dello sviluppo di una conoscenza quanto più ampia possibile delle caratteristiche e proprietà dell'oggetto di indagine e dei relativi limiti e problematiche aperte, che ancora impediscono e/o ritardano l'introduzione di tali innovazioni nella pratica quotidiana.

Proprio a ragione di ciò, il presente studio sperimentale si è proposto di offrire un contributo nel quadro della conoscenza del calcestruzzo schiumato estrudibile e delle relative innovazioni a livello di processo produttivo e di prodotti finali attraverso la trattazione di due aspetti essenziali:

- lo sviluppo e l'approfondimento conoscitivo del calcestruzzo schiumato estrudibile in una versione innovativa ultra-leggera a densità estremamente bassa, che risultava ancora inesplorata.
- L'ideazione, la sperimentazione e la realizzazione dell'intero processo progettuale (dal *concept* alla prototipazione) di componenti innovativi multifunzionali per impieghi in ambito di *retrofit* energetico e compositivo-architettonico degli edifici esistenti.

Oltre alle conoscenze specifiche scaturite dallo svolgimento delle sperimentazioni e presentate nei capitoli 4 e 5, nel corso della trattazione svolta durante il lavoro di tesi sono stati delineati i possibili sviluppi futuri, sia a livello teorico che di sperimentazione pratica, delle tematiche trattate.

Da un punto di vista teorico e sperimentale, sono ancora molteplici gli aspetti che necessitano di approfondimenti a livello sia di materiale che di processi di produzione e di componenti edilizi; sarebbe pertanto interessante svolgere altre sperimentazioni in contesti quanto più assimilabili ai reali ambiti di produzione edilizia, basate sull'adozione di un approccio multidisciplinare.

Date le enormi potenzialità che caratterizzano il calcestruzzo schiumato estrudibile - e le correlate innovazioni in termini di processi di produzione automatizzata e prodotti finali - ci si augura che nel prossimo futuro tali approfondimenti sperimentali possano evolversi ulteriormente, con il fine ultimo di giungere alla realizzazione *in situ* tramite il processo di estrusione (o co-estrusione), nell'ottica della trasformazione del cantiere tradizionale in Industria delle costruzioni 4.0.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Asprone D., Auricchio F., Menna C., Mercuri V., (2018), 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach, *Construction and Building Materials*, 165, 218-231. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.018>
- [2] Brito j., Kurda R., (2020), The past and future of sustainable concrete: A critical review and new strategies on cement-based materials, *Journal of Cleaner Production*, 281, 1-72. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123558>
- [3] Buchli J., Giftthaler M., Kumar N., Lussi M., Sandy T., Dörfler K., Hack N., (2018), Digital in situ fabrication – Challenges and opportunities for robotic in situ fabrication in architecture, construction, and beyond, *Cement and Concrete Research*, 112, 66-75. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.013>
- [4] Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J., (2018), 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research, *Cement and Concrete Research*, 112, 37-49. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>
- [5] Chica L., Alzate A., (2018), Cellular concrete review: New trends for application in construction, *Construction and Building Materials*, 200, 637-647. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.136>
- [6] 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>
- [7] Di Perna C., Stazi F., Ursini Casalena A., D’Orazio M., (2011), Influence of the internal inertia of the building envelope on summertime comfort in buildings with high internal heat loads, *Energy and Buildings*, 43, 200-206. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.007>
- [8] Di Perna C., Stazi F., Ursini Casalena A., Stazi A., (2008), Massa e comfort: necessità di una adeguata capacità termica areica interna periodica, *L’industria dei Laterizi*, 110, 88-101.
- [9] Falliano D., De Domenico D., Ricciardi G., Gugliandolo E., (2018), Improving the flexural capacity of extrudable foamed concrete with glass-fiber bi-directional grid reinforcement: An experimental study, *Composite Structures*, 209, 45-59. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.092>
- [10] Falliano D., De Domenico D., Ricciardi G., Gugliandolo E., (2020), 3D-printable lightweight foamed concrete and comparison with classical foamed concrete in terms of fresh state properties and mechanical strength, *Construction and Building Materials*, 254, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.11.9271>

- [11] Falliano D., De Domenico D., Sciarrone A., Ricciardi G., Restuccia L., Ferro G., Tulliani J.M., Gugliandolo E., (2020), Influence of biochar additions on the fracture behavior of foamed concrete, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 51, 189-198.
<https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.51.15>
- [12] Falliano D., Gugliandolo E., De Domenico D., Ricciardi G., (2018), Experimental investigation on the mechanical strength and thermal conductivity of extrudable foamed concrete and preliminary views on its potential application in 3D printed multilayer insulating panels, *RILEM Bookseries*, 19, 277-286.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-99519-9_26
- [13] Hager I., Golonka A., Putanowicz R., (2016), 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction?, *Procedia Engineering*, 151, 292-299.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>
- [14] Jones M.R., Ozlutas K., Zheng L., (2016), Stability and instability of foamed concrete, *Magazine of Concrete Research*, 68(11), 542-549.
<https://doi.org/10.1680/macr.15.00097>
- [15] Marchon D., Kawashima S., Bessaies-Bey H., Mantellato S., Ng S., (2018), Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry, *Cement and Concrete Research*, 112, 96-110.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.014>
- [16] Pessoa S., Guimarães A.S., (2020), The 3D printing challenge in buildings, *E3S Web of Conferences*, 172 (NSB 2020), 1-7.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017219005>
- [17] 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>
- [18] Ramamurthy K., Nambiar E.K.K., (2007), Air-void characterization of foam concrete, *Cement and Concrete Research*, 37, 221-230.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.009>
- [19] Ramamurthy K., Nambiar E.K.K., Ranjani G.I.S., (2009), A classification of studies on properties of foam concrete, *Cement and Concrete Composites*, 31, 388-396.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006>
- [20] Van Woensel R., Van Oirschot T., Burgmans M., Mohammadi M., Hermans K., (2018), Printing architecture: An overview of existing and promising Additive Manufacturing methods and their application in the building industry, *The International Journal of the Constructed Environment*, 9 (1), 57-81.
<https://doi.org/10.18848/2154-8587/CGP/v09i01/57-81>

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 – Emissioni mondiali di gas ad effetto serra suddivise per processi produttivi di differenti materiali impiegati nell'industria delle costruzioni nell'anno 2019 [Statista, 2021].	6
Figura 2 – Produzione di cemento a livello mondiale dal 1995 al 2019 [Statista, 2020].	7
Figura 3 – Fasi del ciclo di vita del calcestruzzo e relative strategie di sostenibilità [2].	9
Figura 4 – Distribuzione delle emissioni di CO ₂ prodotte durante le varie fasi del processo di produzione del cemento [2].	16
Figura 5 – Linea del tempo con i metodi di AM impiegati nel settore delle costruzioni [20].	21
Figura 6 – La crescita delle applicazioni sperimentali di AM a larga scala nel settore delle costruzioni a partire dal lavoro seminale di <i>Solid Freeform Construction</i> di Pegna del 1997 [4].	22
Figura 7 – Schematizzazione dei processi e metodi di AM impiegati nel settore delle costruzioni [20].	22
Figura 8 – Modello di funzionamento del metodo di <i>Contour Crafting</i> (sinistra). Dettaglio di pareti rettilinee e curvilinee costruite tramite tale metodo con evidenza del tipico andamento sinusoidale del filamento interno (destra) [20].	26
Figura 9 – Fase costruttiva e risultato finale dell'edificio più grande al mondo realizzato tramite <i>Contour Crafting</i> a Dubai a inizio 2020 su progetto di Apis Cor (www.apis-cor.com).	27
Figura 10 – Funzionamento del processo di <i>3D Concrete Printing</i> (sinistra). Esempi di realizzazioni: muro panchina (centro) e elemento di facciata progettato in modo parametrico da Bruil (2017) [20].	27
Figura 11 – Esempi applicativi di <i>3D Concrete Printing</i> con differenti tipologie e orientamento di stampa [4].	28
Figura 12 – Esempio di test di stampabilità finalizzato ad individuare la finestra di tempo ideale per ottenere una struttura in grado di auto-sostenersi [4].	30
Figura 13 – Esempio di elemento caratterizzato da insufficiente adesione tra strati e probabile presenza di <i>cold joints</i> (sinistra) a confronto con elemento caratterizzato da un'ottima adesione	

tra strati non più riconoscibili (destra). Nel caso specifico, i difetti del primo elemento dipendono da un'estrusione avvenuta in seguito al momento di inizio presa dell'impasto [4]. 34

Figura 14 – Esempio di elementi caratterizzati da densità di filamento variabile (sinistra) e costante (destra). Nel primo caso si possono riconoscere chiaramente i vari strati e si riscontra la presenza di vuoti di varie dimensioni, mentre nel secondo l'elemento risulta omogeneo, coerente, frutto di un'estrusione di qualità [4]. 34

Figura 15 – Esempio di fessurazioni da ritiro in un elemento realizzato tramite *3D Concrete Printing* [6]. 35

Figura 16 – Esempio di «tratteggio» in cui è evidente l'effetto del cambiamento di direzione dell'ugello sulla densità dello strato (sinistra) [4] ed esempio di riempimento colato all'interno di un perimetro estruso (destra) [fotografia dell'autore]. 36

Figura 17 – Confronto tra il metodo del *2D slicing* (sinistra) e il metodo della continuità tangenziale (destra) per la realizzazione di sbalzi. La validità del secondo metodo deriva dalla costante superficie di contatto tra gli strati che riduce notevolmente il rischio di collasso della stratificazione [4]. 37

Figura 18 – Esempio di integrazione delle classiche armature in acciaio in un elemento stampato con funzione di cassaforma permanente [4]. 38

Figura 19 – Confronto tra l'approccio classico di integrazione di armature in un muro a doppia curvatura (sinistra) e l'approccio adottato nel caso studio *Mesh Mould Metal* dell'ETH di Zurigo (destra). Nel secondo caso l'armatura consiste in una fitta rete metallica con funzione di cassaforma a perdere all'interno della quale il materiale cementizio verrà colato in un secondo momento [3]. 38

Figura 20 – Provini con rinforzo in griglia bidirezionale in fibra di vetro e fibre disperse in seguito alla prova di trazione per flessione [9]. 39

Figura 21 – Esempio di realizzazione di una trave a sezione variabile stampata in 3D con integrazione successiva delle armature di rinforzo in acciaio [1]. 39

Figura 22 – Esempi di realizzazioni tramite *3D Concrete Printing*: un elemento formalmente complesso e a doppia curvatura (in alto a sinistra) (www.parametric-architecture.com); un elemento strutturale realizzato tramite ottimizzazione topologica (in alto a destra) [6];

elementi realizzati tramite ibridazione funzionale per mezzo della forma (in basso a sinistra) [6] e combinando sia la forma che materiali di riempimento a densità inferiore rispetto al perimetro (in basso a destra) [fotografia dell'autore].	42
Figura 23 – Confronto tra il vantaggio ambientale della fabbricazione digitalizzata e una costruzione convenzionale al crescere della complessità formale. L'impatto ambientale è espresso tramite percentuale di <i>Global Warming Potential</i> (kg CO ₂ eq.) per m ² di muro in calcestruzzo [6].	43
Figura 24 – Schematizzazione del principio di ottimizzazione topologica (o strutturale) [6].	44
Figura 25 – Schematizzazione del principio di ibridazione funzionale [6].	45
Figura 26 – Classificazione dei calcestruzzi alleggeriti [5].	54
Figura 27 – Esempio di instabilità del mix fresco sperimentata in laboratorio in impasti <i>ultra-low density</i> di calcestruzzo schiumato. Partendo da sinistra la densità finale del mix è pari a 300, 200 e 150 kg/m ³ [14].	59
Figura 28 – Rappresentazione schematica del sistema di forze agente su una singola bolla d'aria all'interno di un impasto fresco di calcestruzzo schiumato [14].	59
Figura 29 – Confronto tra immagini relative a calcestruzzi schiumati ad alta (sinistra) e bassa (destra) densità. In questo secondo caso si evidenzia la dimensione maggiore delle bolle e la presenza di micro-bolle all'interno delle pareti divisorie tra bolle [14].	60
Figura 30 – Rappresentazione schematica di confronto a livello di dimensione delle bolle tra impasti di calcestruzzo schiumato a densità finale 600 e 300 kg/m ³ [14].	61
Figura 31 – Rappresentazione schematica del processo di diffusione del gas in impasti di calcestruzzo schiumato a densità finale 600 (sopra) e 300 kg/m ³ (sotto). In quest'ultimo caso si evidenzia il fenomeno di instabilità che porta alla segregazione del composto [14].	61
Figura 32 – Confronto qualitativo a livello di consistenza, coesione e viscosità allo stato fresco tra un impasto di calcestruzzo schiumato estrudibile (sopra) e uno di calcestruzzo schiumato classico (sotto) realizzati entrambi per ottenere una densità finale pari a 600 kg/m ³ [9].	63

- Figura 33 – Confronto a livello di configurazione finale in seguito a test di estrusione e dopo un tempo di riposo di 5 minuti tra impasti a differenti densità realizzati con calcestruzzo schiumato classico (sopra) e con calcestruzzo schiumato estrudibile (sotto). Nel secondo caso si assiste al fenomeno della *green strength* con il conseguente mantenimento della forma in seguito all'estrusione [10]. 63
- Figura 34 – Confronto a livello di dimensione e distribuzione dei pori tra sezioni trasversali effettuate su un elemento in classico calcestruzzo schiumato (sinistra) ed uno in calcestruzzo schiumato estrudibile (destra) a parità di densità finale, velocità di miscelazione e condizione di indurimento. Nella seconda immagine si nota che la dimensione dei vuoti è inferiore e la distribuzione risulta più omogenea [10]. 65
- Figura 35 – Confronto a livello di dimensione e distribuzione dei pori tra sezioni trasversali effettuate su un elemento in calcestruzzo schiumato estrudibile (sinistra) ed uno in calcestruzzo aerato autoclavato (destra) a parità di densità finale. Nella prima immagine si nota che la dimensione dei pori è inferiore e la distribuzione risulta più omogenea [12]. 65
- Figura 36 – Riprese fotografiche degli ingredienti base costituenti tutti gli impasti: cemento e viscosizzante (sinistra), acqua e superfluidificante (centro), e schiuma preformata costituita da acqua e agente tensioattivo (destra). 78
- Figura 37 – Riprese fotografiche delle schiume preformate realizzate con due differenti agenti tensioattivi schiumogeni: *Foamin C* (sinistra) e *Isocem S/B* (destra). Le schiume appaiono differenti sia per consistenza che per colore (bianca la prima e giallina la seconda). 78
- Figura 38 – Riprese fotografiche degli impasti finali realizzato con due differenti agenti tensioattivi schiumogeni: *Foamin C* (sinistra) e *Isocem S/B* (destra). Gli impasti appaiono differenti per consistenza e aspetto. 79
- Figura 39 – Riprese fotografiche delle microfibre in polipropilene Masterfiber012 impiegate nella realizzazione degli impasti ULFC Iso_4 e ULFC Foamin_5. 79
- Figura 40 – Riprese fotografiche dei campioni cubici e prismatici allo stato fresco relativi agli impasti ULFC Iso_4 (sinistra), ULFC Iso_3 (centro) e ULFC Foamin_2 (destra). 80
- Figura 41 – Riprese fotografiche del campione cubico e di uno prismatico allo stato indurito relativi agli impasti ULFC Iso_4 (sinistra), ULFC Iso_3 (centro) e ULFC Foamin_2 (destra). 80

Figura 42 – Riprese fotografiche realizzate in durante lo svolgimento dello slump test realizzato con l’impasto ULFC Foamin_5.	81
Figura 43 – Riprese fotografiche dei campioni cubici sezionati in corrispondenza di due piani paralleli alla faccia esposta all’aria durante la maturazione.	85
Figura 44 – Riprese fotografiche di una delle facce interne emerse in seguito al taglio del campione cubico realizzato con gli impasti ULFC Foamin_2 (sinistra), ULFC Iso_3 (centro) e ULFC Iso_4 (destra).	85
Figura 45 – Rappresentazione schematica della porzione della faccia di ciascun campione su cui sono state eseguite le immagini con stereoscopio (in azzurro) e indicazione dell’ordine numerico seguito durante la realizzazione delle stesse.	86
Figura 46 – Immagine originale e binarizzata oggetto di analisi microstrutturale per l’impasto ULFC Foamin_2.	87
Figura 47 - Immagine originale e binarizzata oggetto di analisi microstrutturale per l’impasto ULFC Iso_3.	87
Figura 48 - Immagine originale e binarizzata oggetto di analisi microstrutturale per l’impasto ULFC Iso_4.	88
Figura 49 - Rappresentazione grafica della frequenza con cui si presentano i diametri equivalenti dei pori analizzati tramite analisi di immagine relativamente ai campioni realizzato con impasto ULFC Foamin_2.	89
Figura 50 - Rappresentazione grafica della frequenza con cui si presentano i diametri equivalenti dei pori analizzati tramite analisi di immagine relativamente ai campioni realizzato con impasto ULFC Iso_3.	89
Figura 51 - Rappresentazione grafica della frequenza con cui si presentano i diametri equivalenti dei pori analizzati tramite analisi di immagine relativamente ai campioni realizzato con impasto ULFC Iso_4.	90
Figura 52 – Riprese fotografiche realizzate al termine della prova di resistenza a trazione per flessione svolte sui campioni ULFC Foamin_2 – C (sinistra), ULFC Iso_3 – A (centro) e ULFC Iso_4 – B (destra). Si evidenzia che in quest’ultimo caso, data la presenta delle	

microfibre, la resistenza raggiunta dal provino è notevolmente superiore rispetto agli altri due casi e non avviene una separazione netta tra i due monconi.	91
Figura 53 – Ripresa fotografica dei monconi ottenuti alla fine delle prove di trazione per flessione eseguite sui campioni realizzati con l'impasto ULFC Foamin_2.	92
Figura 54 - Ripresa fotografica dei monconi ottenuti alla fine delle prove di trazione per flessione eseguite sui campioni realizzati con l'impasto ULFC Iso_3.	92
Figura 55 - Ripresa fotografica dei monconi ottenuti alla fine delle prove di trazione per flessione eseguite sui campioni realizzati con l'impasto ULFC Iso_4. Si evidenzia che nei campioni B e C non è avvenuta la netta separazione dei due monconi.	93
Figura 56 – Ripresa fotografica dei due monconi ottenuti alla fine della prova di trazione per flessione eseguita sul campione ULFC Iso_3 – A.	93
Figura 57 – Riprese fotografiche eseguite alla fine della prova a trazione per flessione relativa al campione ULFC Iso_4 – B. Si evidenzia, nelle prime due immagini, che la presenza delle fibre ha impedito la netta separazione tra i due monconi (realizzata in seguito manualmente).	94
Figura 58 – Rappresentazioni grafiche relative ai risultati emersi dalla prova di resistenza a trazione per flessione effettuata su ciascuno dei tre campioni prismatici realizzati con l'impasto ULFC Foamin_2.	95
Figura 59 - Rappresentazioni grafiche relative ai risultati emersi dalla prova di resistenza a trazione per flessione effettuata su ciascuno dei tre campioni prismatici realizzati con l'impasto ULFC Iso_3.	96
Figura 60 - Rappresentazioni grafiche relative ai risultati emersi dalla prova di resistenza a trazione per flessione effettuata su ciascuno dei tre campioni prismatici realizzati con l'impasto ULFC Iso_4.	97
Figura 61 – Rappresentazioni grafiche con sovrapposizione dei risultati emersi dalla prova di resistenza a trazione per flessione effettuata su ciascuno dei tre campioni prismatici realizzati con l'impasto ULFC Foamin_2 (in alto), ULFC Iso_3 (centro) e ULFC Iso_4 (in basso).	98
Figura 62 – Rappresentazione grafica con sovrapposizione dei risultati emersi dalla prova di resistenza a trazione per flessione effettuata su due campioni rappresentativi realizzati con	

due impasti caratterizzati dall'impiego di due tensioattivi differenti e dall'assenza di microfibre.	99
Figura 63 - Rappresentazione grafica con sovrapposizione dei risultati emersi dalla prova di resistenza a trazione per flessione effettuata su due campioni rappresentativi realizzati con due impasti caratterizzati dall'impiego dello stesso tensioattivo e dalla presenza solamente in uno dei due di microfibre.	99
Figura 64 - Rappresentazione grafica con sovrapposizione dei risultati emersi dalla prova di resistenza a trazione per flessione effettuata su tre campioni rappresentativi realizzati con i tre impasti su cui è stata svolta la valutazione.	100
Figura 65 - Riprese fotografiche realizzate al termine della prova di resistenza a compressione svolte sui campioni ULFC Foamin_2 – A1 (sinistra) e ULFC Iso_4 – A1 (destra).	102
Figura 66 – Ripresa fotografica realizzata alla fine della prova di resistenza a compressione svolta sul campione ULFC Foamin_2 – A1. Si evidenzia che la compressione esercitata sul campione ha prodotto solamente lo schiacciamento dello stesso per via dell'elevata porosità che caratterizza il campione.	103
Figura 67 - Ripresa fotografica realizzata alla fine della prova di resistenza a compressione svolta sul campione ULFC Iso_4 – A1. Si evidenzia che, anche nel caso di presenza di microfibre, la compressione esercitata sul campione ha prodotto solamente lo schiacciamento dello stesso.	103
Figura 68 - Rappresentazioni grafiche relative ai risultati emersi dalla prova di resistenza a compressione effettuata su ciascuno dei sei monconi derivanti dai campioni prismatici realizzati con l'impasto ULFC Foamin_2.	105
Figura 69 - Rappresentazioni grafiche relative ai risultati emersi dalla prova di resistenza a compressione effettuata su ciascuno dei sei monconi derivanti dai campioni prismatici realizzati con l'impasto ULFC Iso_3.	107
Figura 70 - Rappresentazioni grafiche relative ai risultati emersi dalla prova di resistenza a compressione effettuata su ciascuno dei sei monconi derivanti dai campioni prismatici realizzati con l'impasto ULFC Iso_4.	109

Figura 71 - Rappresentazioni grafiche con sovrapposizione dei risultati emersi dalla prova di resistenza a compressione effettuata su ciascuno dei sei monconi derivanti dai campioni prismatici realizzati con l'impasto ULFC Foamin_2 (in alto), ULFC Iso_3 (centro) e ULFC Iso_4 (in basso).	110
Figura 72 - Rappresentazione grafica con sovrapposizione dei risultati emersi dalla prova di resistenza a compressione effettuata su due campioni rappresentativi realizzati con due impasti caratterizzati dall'impiego di due tensioattivi differenti e dall'assenza di microfibre.	111
Figura 73 - Rappresentazione grafica con sovrapposizione dei risultati emersi dalla prova di resistenza a compressione effettuata su due campioni rappresentativi realizzati con due impasti caratterizzati dall'impiego dello stesso tensioattivo e dalla presenza solamente in uno dei due di microfibre.	111
Figura 74 - Rappresentazione grafica con sovrapposizione dei risultati emersi dalla prova di resistenza a compressione effettuata su tre campioni rappresentativi realizzati con i tre impasti su cui è stata svolta la valutazione.	112
Figura 75 – Riprese fotografiche eseguite sulla colonna alta 1 m in seguito all'indurimento. Si evidenzia il mancato collasso del materiale.	115
Figura 76 – Riprese fotografiche delle sezioni cilindriche effettuate sulla colonna alta 1 m a differenti quote: nella metà superiore (sinistra), in posizione mediana (centro) e nella metà inferiore (destra).	115
Figura 77 - Rappresentazione grafica della curva di regressione esponenziale ottenuta dai valori di conducibilità termica (asse delle ordinate) e di densità umida (asse delle ascisse) nell'ambito dello studio sperimentale svolto su campioni di calcestruzzo schiumato estraibile a densità umida compresa nel <i>range</i> 316-828 kg/m ³ [12].	116
Figura 78 – Rappresentazione 3D del pannello prefabbricato tipo 1.	125
Figura 79 – Rappresentazione 3D del pannello prefabbricato tipo 2.	126
Figura 80 - Rappresentazione 3D del pannello prefabbricato tipo 3.	127
Figura 81 – Rappresentazione schematica semplificata del percorso di stampa ipotizzato per la realizzazione del pannello prefabbricato tipo 3. In rosso è segnato il punto di partenza del	

percorso di stampa che corrisponde al contempo al punto di cambio di quota per la realizzazione di <i>layers</i> sovrapposti.	128
Figura 82 – Rappresentazione in sezione orizzontale del blocco prefabbricato ad incastro maschio-femmina.	130
Figura 83 – Rappresentazione 3D del blocco prefabbricato ad incastro maschio-femmina.	130
Figura 84 – Rappresentazione schematica del percorso di stampa ipotizzato per la realizzazione del blocco prefabbricato ad incastro maschio-femmina. In rosso è segnato il punto di partenza del percorso di stampa che corrisponde al contempo al punto di cambio di quota per la realizzazione di <i>layers</i> sovrapposti.	131
Figura 85 – Rappresentazione in sezione orizzontale della modalità di incastro maschio-femmina tra due blocchi adiacenti.	132
Figura 86 – Rappresentazione 3D della modalità di assemblaggio prevista tra blocchi adiacenti (incastro e incollaggio) e tra file di blocchi sovrapposte a giunti sfalsati (incollaggio).	132
Figura 87 – Rappresentazione in sezione orizzontale della soluzione 1 progettata per la fabbricazione <i>in situ</i> nella versione a filamento esterno ondulato e con sbalzi.	135
Figura 88 - Rappresentazione 3D della soluzione 1 progettata per la realizzazione in situ nella versione base a filamento esterno rettilineo e senza sbalzi.	135
Figura 89 - Rappresentazione 3D della soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ nella versione a filamento esterno ondulato e con sbalzi.	136
Figura 90 – Rappresentazione 3D di una porzione (160 cm di larghezza e 100 cm di altezza) di sistema a cappotto realizzato con la soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ nella versione a filamento esterno ondulato e con sbalzi.	137
Figura 91 - Rappresentazione in sezione orizzontale della soluzione 2 progettata per la fabbricazione in situ nella versione a filamento esterno ondulato e con sbalzi.	138
Figura 92 - Rappresentazione 3D della soluzione 2 progettata per la realizzazione in situ nella versione base a filamento esterno rettilineo e senza sbalzi.	139

Figura 93 - Rappresentazione 3D della soluzione 2 progettata per la fabbricazione in situ nella versione a filamento esterno ondulato e con sbalzi.	139
Figura 94 - Rappresentazione 3D di una porzione (160 cm di larghezza e 100 cm di altezza) di sistema a cappotto realizzato con la soluzione 2 progettata per la fabbricazione in situ nella versione a filamento esterno ondulato e con sbalzi.	140
Figura 95 - Rappresentazione in sezione orizzontale della soluzione 3 (cappotto con facciata ventilata) progettata per la fabbricazione in situ nella versione a filamento esterno ondulato e con sbalzi.	141
Figura 96 - Rappresentazione 3D della soluzione 3 (cappotto con facciata ventilata) progettata per la realizzazione in situ nella versione base a filamento esterno rettilineo e senza sbalzi.	142
Figura 97 - Rappresentazione 3D della soluzione 3 (cappotto con facciata ventilata) progettata per la fabbricazione in situ nella versione a filamento esterno ondulato e con sbalzi.	142
Figura 98 - Rappresentazione 3D di una porzione (160 cm di larghezza e 100 cm di altezza) di sistema a cappotto realizzato con la soluzione 3 progettata per la fabbricazione in situ nella versione a filamento esterno ondulato e con sbalzi.	143
Figura 99 – Sezione orizzontale e dettaglio del sistema di ancoraggio a barra lineare applicato al pannello multistrato prefabbricato (pannello tipo 1). Da notare la completa penetrazione dell'elemento metallico nel primo strato ad elevata densità.	145
Figura 100 - Sezione orizzontale e dettaglio del sistema di ancoraggio a barra con terminazione a “fiocco” applicato al pannello multistrato prefabbricato (pannello tipo 1) con aggancio al primo strato ad elevata densità.	147
Figura 101 - Sezione orizzontale e dettaglio del sistema di ancoraggio a barra con terminazione a “fiocco” applicato ai blocchi prefabbricati ad incastro maschio femmina con aggancio allo strato estruso ad alta densità adiacente al muro esistente.	147
Figura 102 - Sezioni orizzontali e dettagli del sistema di ancoraggio a barra con terminazione a “fiocco” applicato alla soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ. Per questa soluzione è possibile fissare l'ancoraggio in corrispondenza del singolo filamento rettilineo impiegando un fiocco classico (sopra) oppure del doppio filamento (rettilineo e ondulato)	

impiegando un fiocco modificato per avere una prestazione maggiore in termini di resistenza (sotto).	151
Figura 103 - Sezione orizzontale e dettaglio del sistema di ancoraggio a barra con terminazione a “fiocco” modificato applicato alla soluzione 2 progettata per la fabbricazione in situ. In questo caso è possibile fissare l’ancoraggio solamente in corrispondenza dei punti di contatto con il muro esistente. Tale soluzione è la medesima applicabile alla soluzione 3 progettata per la fabbricazione in situ.	152
Figura 104 – Ripresa fotografica della fase di valutazione della densità allo stato fresco dell’impasto di calcestruzzo schiumato estrudibile realizzato.	155
Figura 105 – Riprese fotografiche degli ingredienti in stato di polveri (sinistra) e di liquidi (destra) impiegati per la realizzazione del calcestruzzo schiumato estrudibile. Tra le polveri vi sono il cemento e il viscosizzante; mentre tra i liquidi vi sono l’acqua, il tensioattivo schiumogeno e l’additivo superfluidificante.	155
Figura 106 – Riprese fotografiche degli strumenti impiegati durante il processo di realizzazione dei componenti: miscelatore (sinistra), pompa per calcestruzzo (centro) e robot collaborativo (destra).	156
Figura 107 – Riprese fotografiche delle fasi del processo produttivo impiegato per la realizzazione di tutti i componenti estrusi: miscelazione delle polveri (in alto a sinistra); aggiunta dei liquidi (in alto al centro); miscelazione del composto formato da polveri e liquidi (in alto a destra); caricamento della pompa (in basso a sinistra); svolgimento del processo estrusivo (in basso a destra). Per la realizzazione dell’impasto è stata impiegata la modalità di aerazione per agitazione violenta (schiuma non preformata).	157
Figura 108 – Ripresa fotografica eseguita alla fine del processo di miscelazione del calcestruzzo schiumato estrudibile impiegato per il processo estrusivo.	157
Figura109 – Riprese fotografiche della schiuma preformata impiegata per la realizzazione dei pannelli colati. Fase di miscelazione di acqua e tensioattivo schiumogeno (sinistra) e schiuma alla fine del processo di miscelazione (destra).	158
Figura 110 – Ripresa fotografica della cassaforma impiegata per la realizzazione dei pannelli colati a mono-densità e del pannello estruso.	159

Figura 111 – Ripresa fotografica del pannello multistrato colato in cassaforma removibile.	159
Figura 112 – Ripresa fotografica della stratificazione del pannello multistrato colato in cassaforma removibile. Si evidenzia la l'adesione tra strati a differente densità.	160
Figura 113 – Riprese fotografiche eseguite alla fine del processo di scasseratura del pannello colato a densità fresca pari a 600 kg/m^3 .	161
Figura 114 – Ripresa fotografica dei pannelli colati mono-densità esposti al SAIE di Bologna nel mese di ottobre 2020. I pannelli si caratterizzano per densità fresca pari a 600 kg/m^3 (sinistra) e 900 kg/m^3 (destra).	162
Figura 115 - Rappresentazione schematica semplificata del percorso di stampa impiegato per la realizzazione del primo strato (sinistra) e del secondo strato (destra) del pannello estruso in cassaforma removibile. Si evidenzia la rotazione di 90 gradi che differenzia i due livelli. In rosso è segnato il punto di partenza del percorso di stampa.	164
Figura 116 – Ripresa fotografica eseguita durante la realizzazione del primo strato del pannello estruso in cassaforma removibile. Si evidenziano le discontinuità causate dallo scivolamento del filamento sulla superficie di base della cassaforma in corrispondenza delle zone a maggiore ripidità.	165
Figura 117 – Ripresa fotografica eseguita durante la realizzazione del secondo ed ultimo strato del pannello estruso in cassaforma removibile. Si evidenzia la rotazione di 90 gradi del percorso di stampa seguito per questo strato rispetto a quello sottostante.	165
Figura 118 – Ripresa fotografica eseguita alla fine del processo estrusivo di realizzazione del pannello estruso in cassaforma removibile.	166
Figura 119 – Ripresa fotografica eseguita al momento del posizionamento della superficie superiore di chiusura della cassaforma removibile impiegata per la realizzazione del pannello estruso.	166
Figura 120 – Ripresa fotografica della sezione di pannello estruso esposta al SAIE di Bologna nel mese di ottobre 2020. Si evidenziano la finitura lucida che caratterizza la superficie del pannello, la visibilità del percorso di stampa eseguito per la realizzazione dello strato superficiale, e la presenza di alcune cavità causate dalla presenza di bolle di dimensione eccessive nell'impasto impiegato per l'estrusione.	167

Figura 121 – Rappresentazione in sezione orizzontale del blocco ad incastro maschio-femmina realizzato tramite <i>3D Concrete Printing</i> .	169
Figura 122 – Rappresentazione 3D del blocco ad incastro maschio-femmina realizzato tramite <i>3D Concrete Printing</i> .	169
Figura 123 - Rappresentazione schematica del percorso di stampa impiegato per la realizzazione del blocco ad incastro maschio-femmina. In rosso è segnato il punto di partenza del percorso di stampa che corrisponde al contempo al punto di cambio di quota per la realizzazione dei <i>layers</i> sovrapposti.	170
Figura 124 – Ripresa fotografica eseguita durante il processo estrusivo svolto per la realizzazione del blocco ad incastro maschio-femmina.	170
Figura 125 – Ripresa fotografica eseguita alla fine del processo estrusivo svolto per la realizzazione del blocco ad incastro-maschio femmina.	171
Figura 126 - Ripresa fotografica del blocco ad incastro maschio-femmina esposto al SAIE di Bologna nel mese di ottobre 2020.	171
Figura 127 - Ripresa fotografica del blocco ad incastro maschio-femmina esposto al SAIE di Bologna nel mese di ottobre 2020.	172
Figura 128 - Ripresa fotografica del blocco ad incastro maschio-femmina esposto al SAIE di Bologna nel mese di ottobre 2020, con evidenziazione dei principali difetti presenti allo stato indurito: “scivolamenti” (in rosso), “spaccature” (in giallo) e cavità dovute alla presenza di bolle di dimensioni eccessiva (in azzurro).	172
Figura 129 – Rappresentazione in sezione orizzontale della soluzione 1 del sistema progettato per la fabbricazione in situ adattato alla nuova lunghezza d’onda pari a 15 cm.	174
Figura 130 - Rappresentazione in sezione orizzontale del componente effettivamente realizzato in seguito al ridimensionamento della soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ.	175
Figura 131 - Rappresentazione 3D del componente effettivamente realizzato in seguito al ridimensionamento della soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ.	175

Figura 132 - Rappresentazione schematica del percorso di stampa impiegato per la realizzazione del componente effettivamente realizzato in seguito al ridimensionamento della soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ. In rosso è segnato il punto di partenza del percorso di stampa che corrisponde al contempo al punto di cambio di quota per la realizzazione dei *layers* sovrapposti. 176

Figura 133 - Ripresa fotografica eseguita dall'alto alla fine del processo estrusivo del componente effettivamente realizzato in seguito al ridimensionamento della soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ. 176

Figura 134 - Ripresa fotografica eseguita lateralmente alla fine del processo estrusivo del componente effettivamente realizzato in seguito al ridimensionamento della soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ. 177

Figura 135 - Ripresa fotografica eseguita frontalmente alla fine del processo estrusivo del componente effettivamente realizzato in seguito al ridimensionamento della soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ. 177

Figure 136 - Ripresa fotografica eseguita lateralmente alla fine del processo estrusivo del componente effettivamente realizzato in seguito al ridimensionamento della soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ. 178

Figura 137 - Ripresa fotografica del componente effettivamente realizzato in seguito al ridimensionamento della soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ, con evidenziazione dei principali difetti presenti alla fine del processo estrusivo: “scivolamenti” (in rosso), “spaccature” (in giallo) e cavità dovute alla presenza di bolle di dimensioni eccessiva (in azzurro). 178

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 – Caratteristiche del processo e dei materiali per ciascun metodo di AM applicabile nel settore delle costruzioni [20].	23
Tabella 2 – Applicazioni pratiche di ciascun metodo di AM nel settore delle costruzioni [20].	24
Tabella 3 – Caratteristiche dell'impasto ULFC Foamin_2.	74
Tabella 4 – Caratteristiche dell'impasto ULFC Iso_3.	75
Tabella 5 - Caratteristiche dell'impasto ULFC Iso_4.	75
Tabella 6 - Caratteristiche dell'impasto ULFC Foamin_5.	75
Tabella 7 – Riepilogo caratteristiche impasti.	76
Tabella 8 – Valutazione della variazione di densità sui campioni realizzati con l'impasto ULFC Foamin_2.	82
Tabella 9 - Valutazione della variazione di densità sui campioni realizzati con l'impasto ULFC Iso_3.	83
Tabella 10 - Valutazione della variazione di densità sui campioni realizzati con l'impasto ULFC Iso_4.	83
Tabella 11 - Valutazione della variazione di densità sui campioni realizzati con l'impasto ULFC Foamin_5.	83
Tabella 12 – Riepilogo variazione di densità dei campioni.	84
Tabella 13 – Riepilogo dei risultati ottenuti dall'analisi microstrutturale svolta sull'area d'immagine selezionata per ciascuno degli impasti oggetto di valutazione.	89
Tabella 14 – Riepilogo dei risultati emersi dalla prova a trazione per flessione eseguita sui tre campioni ULFC Foamin_2.	100
Tabella 15 - Riepilogo dei risultati emersi dalla prova a trazione per flessione eseguita sui tre campioni ULFC Iso_3.	100

Tabella 16 - Riepilogo dei risultati emersi dalla prova a trazione per flessione eseguita sui tre campioni ULFC Iso_4.	100
Tabella 17 – Riepilogo dei risultati emersi dalle prove di resistenza a trazione per flessione eseguite sui campioni realizzati con gli impasti oggetto di valutazione.	101
Tabella 18 - Riepilogo dei risultati emersi dalla prova a compressione eseguita sui sei monconi derivanti dai tre campioni prismatici realizzati con impasto ULFC Foamin_2.	112
Tabella 19 - Riepilogo dei risultati emersi dalla prova a compressione eseguita sui sei monconi derivanti dai tre campioni prismatici realizzati con impasto ULFC Iso_3.	112
Tabella 20 - Riepilogo dei risultati emersi dalla prova a compressione eseguita sui sei monconi derivanti dai tre campioni prismatici realizzati con impasto ULFC Iso_4.	113
Tabella 21 - Riepilogo dei risultati emersi dalle prove di resistenza a compressione eseguite sui campioni realizzati con gli impasti oggetto di valutazione.	113
Tabella 22 – Valori di conducibilità termica ipotizzati per i campioni realizzati con impasti ULFC Foamin_2, Iso_3 e Iso_4.	117
Tabella 23 – Riepilogo delle prestazioni meccaniche di resistenza indiretta a trazione e resistenza a compressione degli impasti oggetto di valutazione.	118
Tabella 24 – Valori di trasmittanza termica U massima delle chiusure verticali opache oggetto di riqualificazione, differenziate a seconda della zona climatica di localizzazione dell'edificio (Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico del 26 giugno 2015, all. 1, cap. 4, app. B).	123
Tabella 25 – Caratteristiche del pannello prefabbricato tipo 1.	126
Tabella 26 – Caratteristiche del pannello prefabbricato tipo 2.	127
Tabella 27 – Caratteristiche del pannello prefabbricato tipo 3.	128
Tabella 28 – Caratteristiche del blocco prefabbricato ad incastro maschio-femmina.	131
Tabella 29 – Caratteristiche della soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ nella versione base a filamento esterno rettilineo e senza sbalzi.	136

Tabella 30 – Caratteristiche della soluzione 2 progettata per la fabbricazione in situ nella versione base a filamento esterno rettilineo e senza sbalzi.	140
Tabella 31 – Caratteristiche della soluzione 3 progettata per la fabbricazione in situ nella versione base a filamento esterno rettilineo e senza sbalzi.	143
Tabella 32 – Rappresentazione schematica della tipologia di ancoraggio a barra lineare.	146
Tabella 33 – Rappresentazione schematica della tipologia di ancoraggio a barra con terminazione a “fiocco”.	147
Tabella 34 – Rappresentazione schematica della tipologia di ancoraggio a barra con terminazione a “fiocco” modificato per aderire alla conformazione curvilinea del filamento estruso.	152
Tabella 35 – Caratteristiche del pannello multistrato colato in cassaforma removibile.	160
Tabella 36 – Caratteristiche del pannello a densità fresca pari a 900 kg/m^3 colato in cassaforma removibile.	162
Tabella 37 – Caratteristiche del pannello a densità fresca pari a 600 kg/m^3 colato in cassaforma removibile.	163
Tabella 38 – Caratteristiche del pannello estruso in cassaforma removibile.	168
Tabella 39 – Caratteristiche del blocco ad incastro maschio-femmina estruso tramite <i>3D Concrete Printing</i> .	173
Tabella 40 – Caratteristiche del componente effettivamente realizzato in seguito al ridimensionamento della soluzione 1 progettata per la fabbricazione in situ.	179