



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**  
**Scuola di Dottorato di Ricerca in Scienze dell'Ingegneria**  
**Curriculum in Ingegneria dei Materiali**

---

Dipartimento SIMAU  
Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica

**Studio di materiali avanzati a matrice cementizia per  
l'additive manufacturing**

*Study of advanced cement-based materials for additive  
manufacturing*

Tutor

***Prof.ssa Valeria Corinaldesi***

Dottorando

***Glauco Merlonetti***



# Sommario

---

<b>ABSTRACT</b>	<b>6</b>
<b>1 STATO DELL'ARTE</b>	<b>7</b>
1.1 INTRODUZIONE	7
1.2 ADDITIVE MANUFACTURING OF CONCRETE	8
1.3 SISTEMI DI ESTRUSIONE PER ADDITIVE MANUFACTURING OF CONCRETE	12
1.4 CARATTERISTICHE DELLE MISCELE ESTRUDIBILI	17
1.5 VANTAGGI DELLE TECNICHE DI STAMPA 3D DEL CALCESTRUZZO	19
1.6 PROGETTI DI ADDITIVE MANUFACTURING OF CONCRETE NEL MONDO	21
1.7 IMPATTI SULLA SOCIETÀ, SUL SETTORE DELLE COSTRUZIONI E SULL'AMBIENTE	24
<b>2 MATERIALI</b>	<b>27</b>
2.1 LEGANTI	27
2.2 AGGREGATI	34
2.3 FUMO DI SILICE	43
2.4 ACQUA	44
2.5 ADDITIVI	45
<b>3 INTRODUZIONE ALLE FASI SPERIMENTALI</b>	<b>49</b>
3.1 MODALITÀ DI PREPARAZIONE DELLE MISCELE	49
3.2 MODALITÀ DI ESTRUSIONE DEL MATERIALE	51
3.3 PROVE MECCANICHE	56
3.4 PROVE NON DISTRUTTIVE	61
<b>4 OTTIMIZZAZIONE DI MISCELE CEMENTIZIE ESTRUDIBILI</b>	<b>64</b>
4.1 STUDIO DEL MIX DESIGN DELLE MISCELE	64
4.2 PROVE DI ESTRUDIBILITÀ	65
4.3 PROVE DI CARATTERIZZAZIONE MECCANICA	67
4.4 CONCLUSIONI	70
<b>5 OTTIMIZZAZIONE DI MISCELE CEMENTIZIE ESTRUDIBILI CONTENENTI AGGREGATI DA RICICLO</b>	<b>72</b>
5.1 STUDIO DEL MIX DESIGN DELLE MISCELE	72
5.2 PROVE DI ESTRUDIBILITÀ	73
5.3 PROVE DI CARATTERIZZAZIONE MECCANICA	76

5.4	DENSITÀ	79
5.5	CONCLUSIONI	80
<b>6</b>	<b>OTTIMIZZAZIONE DELL'EFFETTO SELF-PRESTRESS NELLE MISCELE ESTRUDIBILI</b>	<b>81</b>
6.1	MIX DESIGN	81
6.2	PROVE DI ESTRUDIBILITÀ	82
6.3	PROVE DI CARATTERIZZAZIONE MECCANICA	83
6.4	RITIRO IGROMETRICO	86
6.5	ADESIONE TRA STRATI CONTIGUI	88
6.6	CONCLUSIONI	89
<b>7</b>	<b>STUDIO DEL COMPORTAMENTO MECCANICO DI UNA MISCELA ESTRUDIBILE AL VARIARE DELL'ORDITURA DEI LAYERS E DELLA DIREZIONE DI APPLICAZIONE DELLA FORZA</b>	<b>90</b>
7.1	PROCEDURA SPERIMENTALE	90
7.2	OTTIMIZZAZIONE DEL MIX DESIGN	94
7.3	CONFRONTO DEL COMPORTAMENTO MECCANICO AL VARIARE DEL PERCORSO DI ESTRUSIONE E DELLA DIREZIONE DI APPLICAZIONE DELLA FORZA	95
7.4	CONFRONTO CON TECNICHE TRADIZIONALI	100
7.5	CONCLUSIONI	106
<b>8</b>	<b>STUDIO DI UNA MISCELA CEMENTIZIA ESTRUDIBILE REFRAATTARIA PER PROCESSI DI MANIFATTURA ADDITIVA</b>	<b>107</b>
8.1	STUDIO DEL MIX DESIGN	108
8.2	PROVE DI ESTRUDIBILITÀ	108
8.3	PROVE DI CARATTERIZZAZIONE MECCANICA	109
8.4	CONCLUSIONI	111
<b>9</b>	<b>STUDIO DI UNA MISCELA ALLEGGERITA ED ESTRUDIBILE CON AGGREGATO DI RICICLO</b>	<b>113</b>
9.1	PROCEDURA SPERIMENTALE	113
9.2	MIX DESIGN	114
9.3	PROVE DI ESTRUDIBILITÀ	115
9.4	PREPARAZIONE DEI CAMPIONI	116
9.5	PROVE DI CARATTERIZZAZIONE MECCANICA	120
9.6	DENSITÀ	126
9.7	CONCLUSIONI	127
<b>10</b>	<b>PROCESSI DI MANIFATTURA ADDITIVA DEL CALCESTRUZZO IN AMBITO INDUSTRIALE</b>	<b>128</b>
10.1	OTTIMIZZAZIONE DELLA COMPOSIZIONE DELLA MISCELA	128
10.2	REALIZZAZIONE DI PROTOTIPI DI STAMPI PER FORMATURA	130
10.3	REALIZZAZIONE DEI PROTOTIPI	133

<b>11</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>137</b>
<b>12</b>	<b>SITOGRAFIA</b>	<b>142</b>
<b>13</b>	<b>INDICE DELLE FIGURE</b>	<b>144</b>
<b>14</b>	<b>INDICE DELLE TABELLE</b>	<b>148</b>
<b>15</b>	<b>INDICE DEI GRAFICI</b>	<b>150</b>

# Abstract

---

L'additive manufacturing è uno dei temi principali della quarta rivoluzione industriale; definita come Industry 4.0.

L'uso del calcestruzzo nelle tecnologie additive è molto promettente e consente lo sviluppo di applicazioni innovative nel settore delle costruzioni; per l'architettura; nel campo del design ed in quello industriale. Le tecniche di additive manufacturing of concrete offrono numerosi vantaggi: riduzione dei tempi e dei costi di produzione, maggiore personalizzazione e libertà nella progettazione, minore spreco di materiale e minori emissioni inquinanti, maggiore sicurezza sul lavoro.

Nel presente lavoro è stata effettuata una revisione delle tecniche esistenti e dei vantaggi legati a questo tipo di produzione e sono state descritte le caratteristiche richieste al calcestruzzo affinché possa risultare estrudibile con lo scopo di sviluppare materiali innovativi a base cementizia estrudibili con proprietà funzionali avanzate.

Sono state ottimizzate delle miscele a base cementizia stampabili con ottime proprietà meccaniche, contenenti aggregati di riciclo e resistenti alle alte temperature. Il processo di stampa del calcestruzzo utilizza una tecnica di produzione additiva, basata su strati per costruire forme geometriche complesse senza cassaforma e presenta quindi un vantaggio unico rispetto ai convenzionali metodi di costruzione.

Le proprietà indurite delle formulazioni e gli effetti del processo di stratificazione su densità, resistenze meccaniche e ritiro igrometrico sono presentati insieme alle implicazioni relative alle proporzioni della miscela.

Il lavoro sperimentale dimostrerà il potenziale della stampa del calcestruzzo come nuovo processo produttivo praticabile che può introdurre una maggiore libertà geometrica nel processo di progettazione, oltre a offrire un nuovo mezzo di produzione che potrebbe evitare la necessità di produrre in serie elementi identici in calcestruzzo con un numero limitato di varianti.

# 1 Stato dell'arte

---

## 1.1 Introduzione

A partire dalla seconda metà del XX secolo, i progressi dell'ingegneria meccanica, elettrica e del controllo dei processi lavorativi, uniti ai contributi forniti dalla modellistica matematica e dall'avvento dei primi computer, hanno condotto ad una rapida diffusione dell'automazione, dapprima nel settore automobilistico, per poi via via interessare gradualmente anche altri ambiti, determinando una progressiva riduzione dell'intervento umano.

Ultimamente, tuttavia, si sta assistendo ad un cambiamento nel quadro generale, grazie alla diffusione di una nuova metodologia produttiva che per molti esperti del settore è destinata ad avviare una nuova rivoluzione industriale: l'Additive Manufacturing (AM), conosciuto anche come Stampa 3D.

Per Additive Manufacturing, si intende l'insieme di quei processi produttivi in cui, partendo da un modello tridimensionale computerizzato suddiviso in strati (layers) da un software integrato nel sistema di controllo della macchina (o da servizi on-line) si ottiene uno schema di strati risultanti che guida poi la stampante nella deposizione di un materiale.

Le tecnologie di AM si contrappongono quindi alle tradizionali tecniche sottrattive (lavorazioni per asportazione di truciolo, taglio e foratura) e recentemente hanno conosciuto una rapida diffusione nel continente europeo, sia per la scadenza di alcuni brevetti chiave che hanno determinato una riduzione nel prezzo delle stampanti, sia grazie ai programmi per la ricerca e l'innovazione, ad esempio Horizon 2020 realizzato dall'Unione Europea, avente l'obiettivo di finanziare lo sviluppo di tecnologie emergenti, velocizzandone il trasferimento dal laboratorio al mercato.

Le applicazioni reali e potenziali di questo tipo di tecnologia sono ampie e diversificate. Questa tecnologia è ampiamente utilizzata in ambito industriale in quanto può essere utilizzata, ad esempio, per costruire prototipi con tempi e costi ridotti rispetto alle tecniche tradizionali. Negli ultimi anni, tuttavia, le applicazioni sono state diversificate, coinvolgendo ad esempio il campo medico, dove l'uso della stampa 3D riguarda principalmente la creazione di protesi. Altri settori di interesse potenziali e futuri sono quelli dei beni di consumo, veicoli a motore, dell'aviazione e, naturalmente, delle costruzioni.

Fino a poco tempo fa, le tecnologie di AM erano adoperate quasi esclusivamente nella produzione di prototipi (per lo più in materiale plastico) a supporto della progettazione, poiché non erano considerate idonee ad essere impiegate con i materiali comuni nelle applicazioni ingegneristiche, aventi sufficienti proprietà meccaniche e fisiche; oggi, invece, il loro utilizzo avviene con successo nella produzione di oggetti di ceramica, metallo o polimeri con adeguate proprietà meccaniche.

Inoltre, tali tecnologie stanno attirando un crescente interesse anche nel settore delle costruzioni ed in particolare nel settore del calcestruzzo, dove i processi produttivi sono principalmente basati o su tecnologie sottrattive, in cui il materiale viene lavorato per ottenere l'oggetto finale (pavimentazioni), o su tecnologie formative, dove invece il materiale viene colato in stampi allo stato liquido (calcestruzzo armato).

L'applicazione delle tecnologie di AM in edilizia, vede pertanto il suo interesse scaturire dalla possibilità di garantire maggiore libertà nella progettazione delle forme, degli elementi e delle strutture, con possibili vantaggi estetici e funzionali.

Attualmente, infatti, la progettazione architettonica viene spesso forzata a creare e riprodurre, attraverso tecnologie sottrattive o formative, oggetti identici, per ottimizzare la produzione riducendone i tempi ed i costi.

Cambiando il modo con cui componenti strutturali e non, vengono prodotti, le tecnologie di AM promettono di rivoluzionare questo paradigma consentendo maggiore libertà architettonica e lasciando i progettisti liberi di concepire ciascun componente con forme uniche, senza costi proibitivi.

## **1.2 Additive manufacturing of concrete**

Il calcestruzzo è il materiale da costruzione più utilizzato al mondo, infatti le materie prime per la produzione del calcestruzzo sono a buon mercato e facilmente reperibili. È un materiale che presenta alta resistenza a compressione, durezza, resistenza al fuoco e lavorabilità allo stato fluido, proprietà che permette di avere una notevole versatilità nella forma.

Con il termine calcestruzzo si indica, in realtà, una vasta gamma di compositi, con alcuni elementi comuni come: sabbia, ghiaia, o altro materiale granulare, legate da una matrice che è formata da una reazione di idratazione tra materiali cementizi (cemento o sostituti come ad esempio ceneri volanti) e acqua. Gli additivi aggiuntivi o alternativi, mescolanze, inerti e materiali cementizi particolari vengono usati per ottenere specifiche proprietà come auto-compattazione, alta resistenza e bassa emissione di CO<sub>2</sub>.

Nel settore dell'edilizia l'utilizzo dell'additive manufacturing ha come scopo fondamentale quello di modernizzare le tecniche realizzative al fine di superare le problematiche tipiche che si incontrano nella realizzazione di un manufatto. Infatti nelle tecniche di costruzione tradizionali, il calcestruzzo viene miscelato in stabilimento e successivamente viene trasportato in cantiere e viene messo in opera nelle casseforme. Durante il getto, il materiale deve essere compattato



introducendo dei vibratorii meccanici all'interno dei casseri in modo da rimuovere vuoti d'aria e garantire una corretta messa in opera. Nei processi AM, invece, le possibili soluzioni attualmente disponibili sono due: la realizzazione di elementi prefabbricati assemblati in loco oppure la realizzazione direttamente in situ.

Il primo approccio riguarda la produzione di elementi prefabbricati da trasportare e assemblare in sito dove si procede a realizzare impianti e finiture.

Un esempio di questo tipo di realizzazione è l'Office of the Future di Dubai (figura 1.1), realizzato stampando in elementi prefabbricati modulari in calcestruzzo trasportati e assemblati in sito. L'operazione di costruzione complessiva ha avuto una durata di 20 giorni di cui 17 dedicati alla produzione mediante stampa 3D degli elementi e 3 giorni per assemblaggio e finiture.



Figura 1.1 - "Office of the future", Dubai. Posa in opera di elementi modulari.

Il secondo approccio, invece, prevede l'uso di stampanti mobili, anche di dimensioni rilevanti, ma facilmente trasportabili sul posto; in questo caso la costruzione non è realizzata assemblando elementi prefabbricati, ma stampando direttamente l'intero edificio sul sito di costruzione.

Recentemente, questa tecnica è stata utilizzata in Russia dalla società Apis Cor (figura 1.2) che, adoperando una stampante mobile (un robot a tre assi), ha realizzato un modulo abitativo di 38 m<sup>2</sup>, un prototipo specificamente studiato per dimostrare la flessibilità e la capacità della tecnologia di stampa nella creazione di forme diverse e complesse.

Una volta completate le strutture esterne ed interne della parete, la stampante è stata rimossa da una gru e si è passati all'installazione manuale degli impianti, degli infissi e delle finiture.



Figura 1.2 - Modulo abitativo realizzato da Apis Cor (2017)

Per quanto detto, l'additive manufacturing costituisce un nuovo scenario di sviluppo per il settore delle costruzioni e per i materiali cementizi.

Attualmente le tecnologie sviluppate a supporto della produzione additiva sono di due tipi: sistemi di estrusione di materiale allo stato fluido o sistemi di solidificazione delle polveri.

Nel caso dei sistemi basati sulla solidificazione delle polveri, una soluzione legante viene deposta selettivamente da un ugello per indurire delle aree un layer alla volta fino a formare l'oggetto finale. Il prodotto solido viene quindi rimosso in seguito ad uno specifico tempo di maturazione e le polveri in eccesso vengono rimosse con un getto di aria compressa.

Negli ultimi anni sono state create diverse tecnologie basate sulla solidificazione delle polveri; tra queste la principale è la tecnica "D-Shape" sviluppata da Enrico Dini.

Nel caso della tecnologia "D-shape" vi è una pre-deposizione di materiale granulare che viene successivamente e selettivamente catalizzato per promuoverne l'indurimento. La stampante 3D impiegata è una sorta di plotter gigante, con una testa che si muove lungo due telai in direzione x-y e che è capace di spruzzare in modo selettivo in delle zone predefinite del letto di sabbia sottostante un liquido con capacità legante, chiamato 'inchiostro'. Infine quattro motori consentono il movimento del telaio lungo l'asse z (Figura 1.3). L'indurente è ottenuto combinando due reagenti inorganici: un ossido metallico in polvere che viene disperso tra i granuli di sabbia (che comprende almeno uno tra  $MgO$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $Al_2O_3$ ) ed una soluzione satura di cloruro di magnesio ( $MgCl_2$ ), comprese le sue forme idrate  $MgCl_2 \cdot (H_2O)_x$ , usato come 'inchiostro'. Il risultato è dato da una pietra artificiale simile ad una dolomite porosa con proprietà meccaniche ottimizzabili giocando sulla granulometria (densità di circa  $1,7 \text{ t/m}^3$ ).

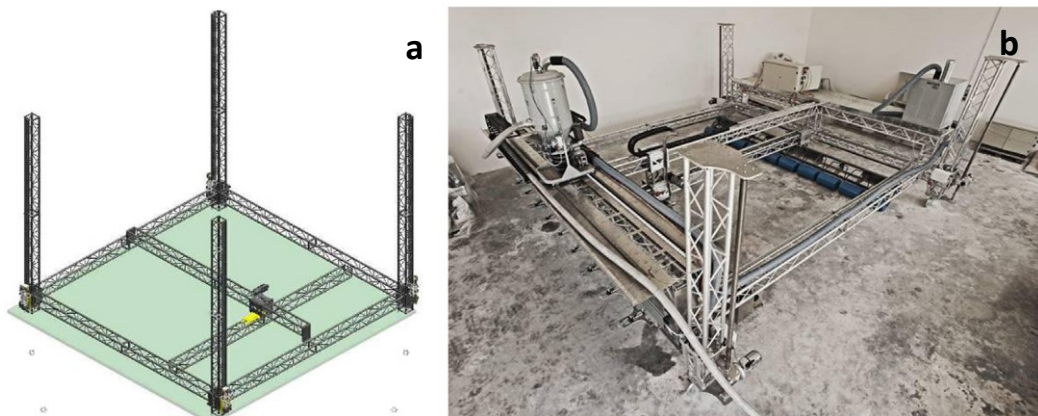


Figura 1.3 - Schema del setup per la deposizione con metodo D-shape (a); stampante D-shape (b)

Queste tecniche sono studiate appositamente per la produzione di manufatti di forma complessa e che richiedono un'ottima risoluzione di stampa, tuttavia, presentano diverse criticità. Le maggiori problematiche riscontrate sono relative all'impossibilità di introdurre dei rinforzi strutturali, la necessità di numerose operazioni post produzione con un conseguente incremento dei tempi di produzione e la delaminazione tra strati qualora vi sia stata un'interruzione durante il processo di stampa o se nel frattempo vi siano stati cambiamenti di temperatura o di umidità.

Nei sistemi basati sull'estrusione di materiale a base cementizia allo stato fluido, che appartengono alla categoria dei metodi FDM o Fused Deposition Modeling, il calcestruzzo è depositato strato su strato da un ugello di dimensioni variabili a formare l'oggetto finale.

Questi processi, sviluppati negli ultimi 20 anni, si avvalgono di sistemi automatizzati e robotizzati costituiti da una componente software e una hardware (figura 1.4).

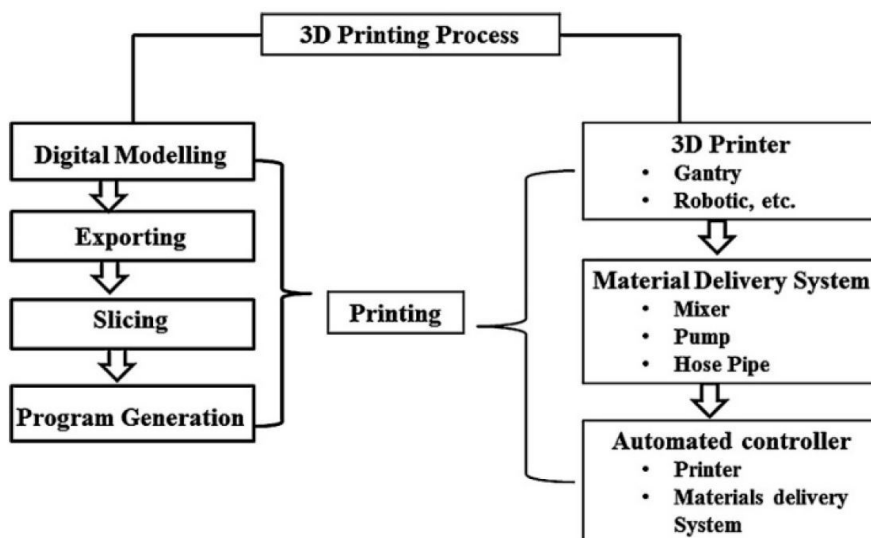


Figura 1.4 - Schema del processo di Additive Manufacturing

La componente software è relativa all'uso di programmi per la modellazione tridimensionale, come AutoCAD o software CAD generici, che vengono impiegati per la modellazione 3D del volume dell'oggetto da realizzare. Il modello 3D viene quindi processato da un software di slicing che suddivide l'intero volume in strati seguendo le impostazioni relative allo spessore dei layers e riempimento interno imposte dall'operatore.

Il prodotto di tale operazione è file formato G-code che contiene le informazioni, in linguaggio macchina, relative ai percorsi che il sistema deve seguire per trasformare il modello 3D in manufatto.

L'operazione di estrusione layer by layer è compiuta dalla parte hardware che è costituita da un sistema di mixaggio che produce il materiale cementizio da estrarre, da un sistema di trasporto costituito da tubi e sistemi di pompaggio per trasferire il materiale alla testa di stampa ed infine dalla testa di stampa, il cui terminale è un ugello, che deposita il materiale.

### **1.3 Sistemi di estrusione per Additive Manufacturing of Concrete**

Come descritto al paragrafo precedente, la maggior parte dei sistemi di stampa sono basati sull'ausilio di sistemi robotici automatizzati connessi con un sistema di mixaggio e approvvigionamento del materiale e comandati attraverso istruzioni macchina dettate da determinati software.

I vari sistemi esistenti utilizzati per l'estrusione del calcestruzzo si differenziano per la parte hardware impiegata nel processo, in particolare per quanto riguarda il supporto utilizzato nell'estrusione ed in base a questo è possibile classificarli come: sistemi basati sull'uso di un braccio robotico e sistemi a portale.

Nel primo sistema, la testa di stampa, che permette la fuoriuscita del materiale da un ugello, è collegata al braccio robotico ed è connessa al sistema di mixaggio attraverso tubi flessibili. Un sistema di pompaggio consente il passaggio del materiale fluido dal mixer all'ugello.

Esempi di applicazioni di questa tecnologia sono il sistema utilizzato dall'azienda Apis Cor e quelli utilizzati dal Singapore Center for 3D Printing.

Apis Cor è l'azienda creatrice della prima abitazione stampata in calcestruzzo e utilizza un sistema basato su un braccio robotico che consente la deposizione di layers di sezione trasversale pari a 2.5 x 2.5 cm, coprendo un'area di 132 m<sup>2</sup>. Le dimensioni della macchina, non in funzione, sono di 4 x 1.6 x 1.5 m e tonnellate di peso (figura 1.5). La stampante è capace di estrarre con una precisione

fino a 0.5 mm ed una velocità di 16 cm/s, ovviamente questi parametri dipendono dalla complessità del percorso di stampa.

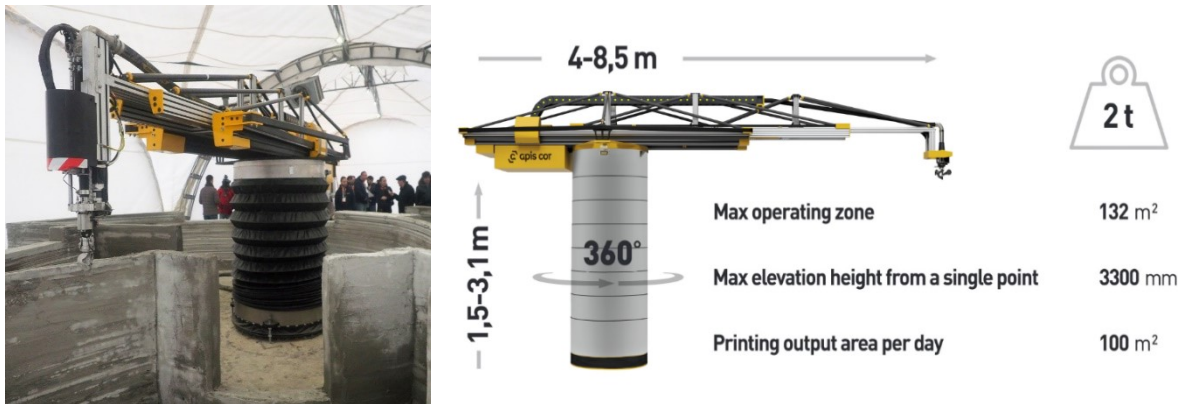


Figura 1.5 - Apis Cor 3D printer

I sistemi sviluppati dal Singapore Center for 3D Printing (SC3DP) sono di due tipi: un portale a 4 assi e un sistema robotico a 6 assi (figura 1.6). Il loro uso, avendo differenti gradi di libertà di movimento, dipende dalla complessità delle forme da riprodurre: il portale a 4 assi è più adatto per la stampa di dimensioni maggiori, mentre il robot a sei assi, grazie alla maggiore libertà nei movimenti, è utilizzato per la creazione di forme complesse. Se confrontato con il sistema della Apis Cor, il robot a sei assi sviluppato dal Singapore Centre garantisce una maggiore precisione nella riproduzione dei dettagli ma è limitato alla produzione di oggetti in piccola scala risultando più adatto allo sviluppo di componenti per l'edilizia.

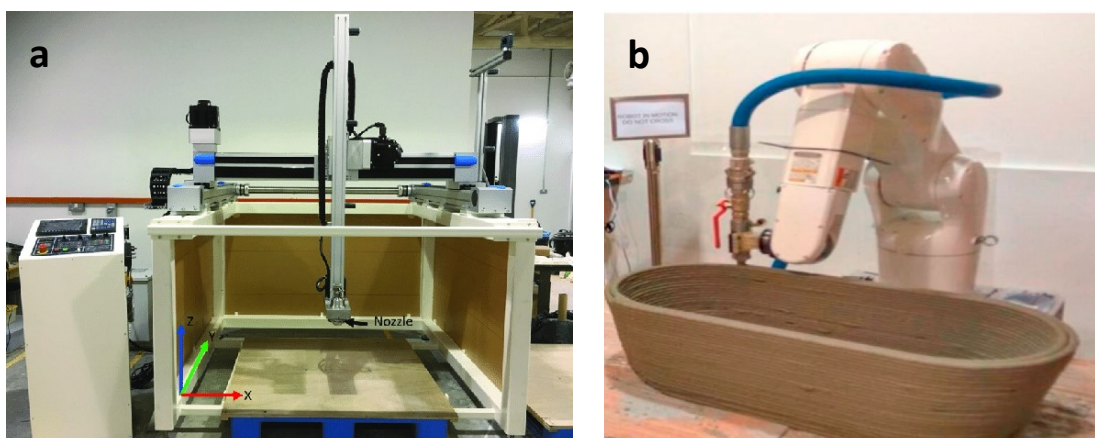


Figura 1.6 - Stampanti 3D del SC3DP: (a) portale a 4 assi; (b) sistema robotico autonomo a sei assi

Come anticipato, oltre ai sistemi che prevedono l'impiego di un braccio robotico, ci sono altre tecnologie denominate "sistemi a portale" simili ai carroporti e che possono muoversi su binari. La

stampante è composta da una testa di stampa rotante, a ugello singolo o multiplo, connessa al mixer tramite tubi e pompe e fissata su un supporto verticale formando un sistema a 4 gradi di libertà.

Le origini di questa tecnologia sono ricondotte alla tecnica del Contour Crafting (CC) pubblicata per la prima volta nel 1998 dal prof. Behrokh Khoshnevis (University of Southern California). Il Contour Crafting è una tecnica di produzione additiva che prevede l'impiego di materiali diversi, ad esempio ceramica e polimeri, ma ottimizzata per l'estrusione del calcestruzzo e studiata appositamente per la costruzione di oggetti di grandi dimensioni con superfici lisce.



Figura 1.7 - Sezione di muro estruso con la tecnica del Contour Crafting

La finitura liscia dell'estrusione è ottenuta lisciando, in direzione verticale e orizzontale, il materiale deposto con un sistema di spatole integrate nella testa di stampa. Il sistema di stampa prevede la creazione di un contorno che funge da cassaforma con un rinforzo interno ad U (figura 1.7) e di un riempimento. La co-estrusione del materiale o di materiali diversi per contorno e riempimento è possibile impiegando ugelli con fuoriuscite multiple (figura 1.8 e 1.9)

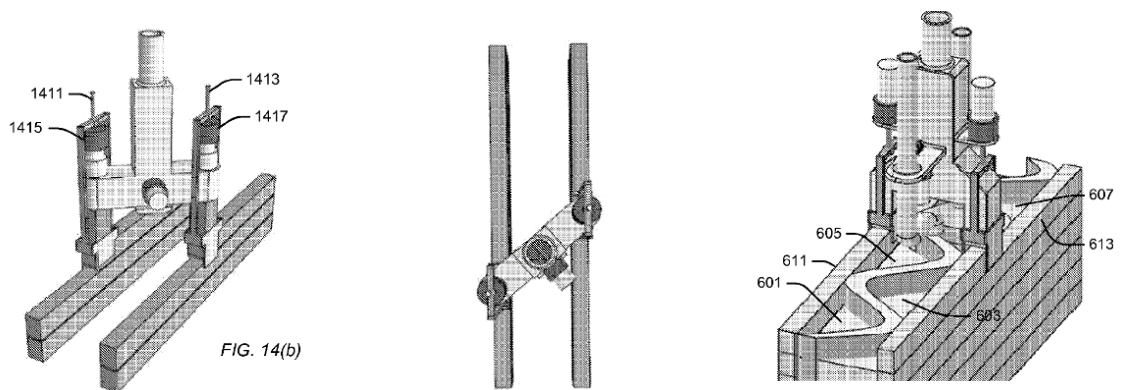


Figura 1.8 - "Nozzle for forming an extruded wall with rib like interior", US patent n°US7874825 (2011)

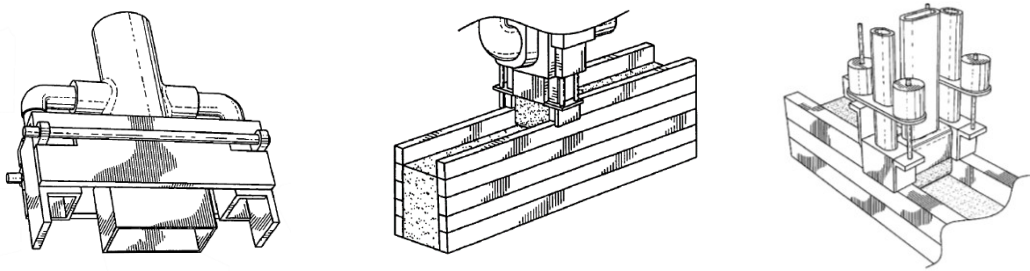


Figura 1.9 - "Multi-nozzle assembly for extrusion wall", US patent n°US7153454 (2006)

Anche il sistema denominato 3D Concrete Printing (3DCP), sviluppato presso la University of Technology di Eindhoven (TU/e) adotta l'approccio Contour Crafting (NOS 2015, Wolfs and Salet 2015, Wolfs et al. 2015, Salet and Wolfs 2016) (figura 1.10). Il calcestruzzo, in seguito alla miscelazione, viene pompato in un tubo da una pompa, il tubo flessibile è collegato alla testina di stampa situata all'estremità del braccio verticale di un sistema a portale a 4 gradi di libertà che serve un'area di stampa di  $9 \times 4,5 \times 2,8$  m ad una velocità massima di 10 cm/s. La struttura è operativa da settembre 2015.

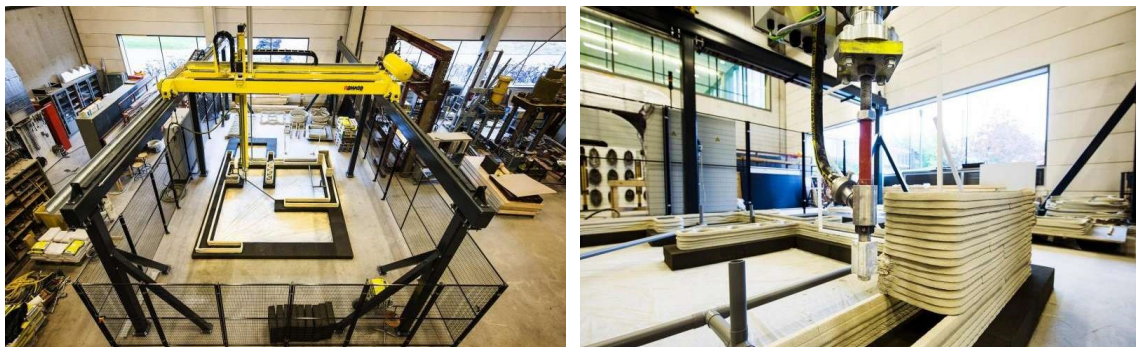


Figura 1.10 - Sistema "3D Concrete Printing", Eindhoven University of Technology

Sotto la pressione della pompa, il calcestruzzo viene condotto verso la testa della stampante (figura 1.11 - a). La parte terminale della testina di stampa è l'ugello, un elemento di acciaio cavo con una sezione designata da cui il "filamento" di cemento lascia la stampante (figura 1.11 - b) e si deposita sulla superficie di stampa.

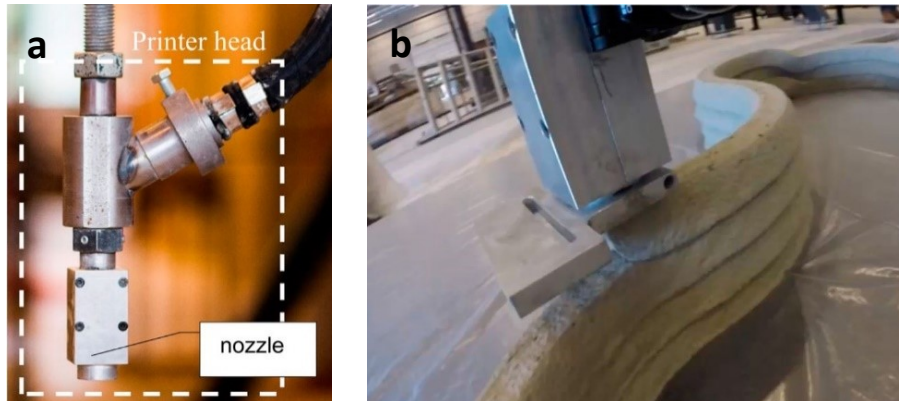


Figura 1.11 - (a) Particolare della testa di stampa; (b)ugello

Un'ulteriore sistema a portale è il Vulcan II (figura 1.12), progettato e sviluppato da ICON, un'azienda di costruzioni situate in Austin, Texas. La stampante ha dimensioni di 3.5 m e può creare strutture alte fino a 2.6 m. In profondità le componenti possono estendersi fino a 8.5 m e la velocità di stampa è di circa 13-18 cm/s.

Questa tecnologia è stata impiegata per la costruzione della prima casa low cost stampata in 3D negli Stati Uniti con una superficie di 32m<sup>2</sup>, costruita in 48 ore. Le strutture verticali sono state estruse in calcestruzzo mentre il tetto, le finestre e le porte sono state installate in seguito.



Figura 1.12 - Stampante 3D "ICON Vulcan II"

Altri sistemi a portale sono stato sviluppato dall'azienda italiana WASP. Si tratta dei due stampanti "Big Delta" e "Crane" (figura 1.13). La "Big Delta" è formata da una struttura alta 12 m e profonda 7 m, che è assemblata mediante bracci modulari da 6 m. La lunghezza di ogni componente è di 3 m in modo tale da poter trasportare la stampante in un container.

La velocità massima di stampa è di 40 cm/s ma dipende fortemente dalla quantità di materiale nell'estrusore. L'ugello di stampa è progettato per la deposizione di materiale contenente fibre lunghe seguendo lo scopo perseguito da WASP: l'estrusione di materiali da costruzione composti da terra e paglia, ottimizzate con fibre sintetiche.



La "Crane" è un'evoluzione del sistema precedente e costituisce un elemento di un sistema di produzione modulare e potenzialmente infinito. Ogni modulo "Crane" ha un diametro di 6.60 m e un'altezza di 3 m. Tale sistema è stato impiegato per la costruzione di "GAIA", una casa stampata utilizzando terra prelevata nello stesso sito di costruzione, paglia e loppa di riso. Le pareti estruse con la miscela di terra e paglia per una altezza di 40 cm al giorno, sono state riempite all'interno con la loppa di riso per l'isolamento termico.



Figura 1.13 - Sistemi di estrusione WASP: (a) "Big Delta"; (b) "Crane"

## 1.4 Caratteristiche delle miscele estrudibili

Le miscele a base cementizia estrudibili devono essere studiate in modo tale da ottenere determinate caratteristiche allo stato fresco e a indurimento avvenuto.

Per quanto riguarda le prime, la composizione delle miscele è volta a soddisfare quattro parametri principali: l'estrudibilità (extrudability), la scorrevolezza (flowability), la costruibilità (buildability) e l'open time.

Il raggiungimento di questi quattro parametri non dipende soltanto dalla bontà del mix design ma anche dalle caratteristiche del sistema di stampa.

L'estrudibilità esprime la capacità del materiale di fuoriuscire dall'ugello senza causare interruzioni o intasamenti nel canale di uscita. Questo parametro dipende sia dalle proprietà chimico-fisiche della miscela sia dalle caratteristiche del sistema di estrusione, ad esempio, dalla geometria dell'ugello, dal sistema di pompaggio e altri parametri di stampa. Una miscela risulta estrudibile quando la deposizione avviene senza discontinuità o deformazioni.

La scorrevolezza (flowability) si riferisce alla facilità con cui la miscela riesce a fuoriuscire dall'ugello senza discontinuità.

La costruibilità (definita buildability) descrive la capacità dei layers di autosostenersi e sostenere il peso dei layers sovrastanti senza collassare. Questa proprietà può essere valutata sia contando il numero di layers sovrapposti fino al collasso sia considerando il grado di deformazione dei layers sottostanti in seguito alla sovrapposizione di un nuovo strato. Si ha un'ottima buildability quando la struttura estrusa è caratterizzata da un buon numero di layers poco deformati in relazione alle dimensioni dell'ugello.

L'open time si riferisce alla perdita di estrudibilità nel tempo. La miscela deve garantire che ogni layer sia capace di sostenere e autosostenersi ma rimanere fluida abbastanza per massimizzare l'adesione tra due layers successivi. Questa finestra temporale deve essere impostata secondo due fattori: il tempo totale di stampa e la capacità totale del serbatoio.

Questi parametri, su cui è basato il mix design, influenzano i requisiti fondamentali della miscela estrudibile: print quality, shape stability e printability window.

Con print quality si intende il livello di finitura della superficie che deve essere priva di fessure o buchi, con bordi uniformi e coerenza dimensionale.

Per il requisito definito shape stability non deve risultare visibile alcuna deformazione e non dovrebbero verificarsi collassi della struttura durante l'estrusione degli strati.

La printability window rappresenta l'arco temporale entro cui la miscela risulta estrudibile, considerando la perdita di lavorabilità nel tempo. Questa finestra temporale ha inizio con la fine della miscelazione fino al printability limit, cioè il momento in cui la miscela non può più essere estrusa con una qualità accettabile.

A questi requisiti se ne aggiungono altri tre che descrivono la qualità del materiale estruso in seguito all'indurimento in termini di caratteristiche meccaniche e la durabilità del prodotto finito:

- Compattazione: è necessario un alto grado di compattazione senza l'ausilio della vibrazione;
- Totale assenza di fessurazioni che comprometterebbero la durabilità del manufatto e ne intaccherebbero la finitura;
- Forte adesione nell'interfaccia interlayer per garantire integrità strutturale. La zona di adesione tra layers è una zona di discontinuità che può favorire l'innescarsi di cricche e divenire quindi una via preferenziale su cui si indirizza la rottura.

Per soddisfare questi requisiti è necessario trovare il giusto bilanciamento tra proprietà meccaniche e stampabilità della miscela.

Per quanto detto, le miscele cementizie per additive manufacturing devono avere sia appropriate caratteristiche reologiche allo stato fresco, con lo scopo di garantire un processo di stampa ottimale in termini di estrudibilità, shape stability e printability window, sia soddisfacenti proprietà del

materiale indurito come una buona adesione interlayer e buone prestazioni meccaniche. Oltre a questo, dal momento che la maturazione del materiale avviene all'aria senza la protezione di casseforme, è importante che il materiale estruso non evidenzii deformazioni post-estrusione rilevanti.

I punti cruciali nello studio di una miscela estrudibile riguardano la granulometria degli aggregati e il rapporto acqua cemento. In presenza di ugelli di stampa fino ad 1 cm, con lo scopo di minimizzare le ostruzioni dell'ugello e assicurare la giusta fluidità della miscela sono preferibili mix design basati su aggregati fini, con un diametro massimo non superiore ai 300 $\mu$ m. L'introduzione di frazioni grossolane di aggregato, fino a 2 mm di diametro, è prevista per incrementare proprietà meccaniche o ridurre le fessure da ritiro nei manufatti stampati. Questa integrazione richiede tuttavia l'adozione di ugelli di stampa di dimensioni superiori e influenza negativamente la risoluzione di stampa e le caratteristiche estetiche del prodotto finale.

Il rapporto acqua/cemento influenza la scorrevolezza della miscela e le proprietà meccaniche del materiale dopo l'indurimento. Minimizzando il rapporto acqua/cemento è possibile incrementare le resistenze meccaniche, tuttavia, questa operazione richiede che non venga superato un determinato limite posto a garantire una giusta lavorabilità della miscela da estrudere. Per soddisfare tali requisiti, le miscele per additive manufacturing presentano rapporti acqua/cemento tra 0.3 e 0.4.

## **1.5 Vantaggi delle tecniche di stampa 3D del calcestruzzo**

Nonostante l'additive manufacturing sia ancora una tecnica con un ampio margine di sviluppo, specie nell'ambito edilizio, ci sono comunque alcuni aspetti che dimostrano un reale vantaggio nell'uso di questa tecnologia rispetto alle tecniche tradizionali. Di seguito sono elencati i principali punti di forza delle tecniche di stampa 3D per il calcestruzzo.

### Libertà nel design e personalizzazione

Nei processi tradizionali si ha una bassa versatilità ed è possibile realizzare oggetti con forme ben definite ed il più semplici possibile; nell'AM la realizzazione di elementi con una geometria complessa non richiede alcuno sforzo aggiuntivo rispetto ad uno con forme semplici. Inoltre la realizzazione di elementi con forme complesse e personalizzate non implica costi o tempi aggiuntivi;

### Riduzione dei costi e tempi di produzione

Attraverso la realizzazione di oggetti layer by layer, è possibile ottenere un elemento completo nella stessa fase e senza assemblaggio a posteriori. Questo comporta una riduzione delle operazioni di assemblaggio con conseguente riduzione dei costi legati al lavoro e al trasporto.

La realizzazione di un manufatto con tecnica additiva è legata alla progettazione tridimensionale dello stesso, per questo motivo, la produzione può iniziare nel momento in cui l'oggetto viene commissionato senza alcun tempo tecnico di attesa.

Grazie all'impiego dell'AM per la realizzazione delle strutture in calcestruzzo non si avrà più bisogno di casseforme, si ridurrà l'uso di ponteggi e di opere provvisorie.

Queste tecniche consentono di realizzare strutture leggere con adeguata resistenza: un minor peso della struttura implica di conseguenza, minori sollecitazioni trasmesse al terreno e quindi una riduzione delle dimensioni e degli ingombri richiesti per le fondazioni, inoltre, nel caso di strutture assemblate in seguito all'estrusione, un alleggerimento dei manufatti comporta minori costi di trasporto rispetto alla tradizionale prefabbricazione e minori emissioni inquinanti.

### Riduzione dei rifiuti, delle emissioni inquinanti e dell'energia consumata

La possibilità di realizzare strutture ottimizzando le forme e deponendo il materiale solo dove necessario comporta una riduzione del quantitativo di materie prime utilizzate e degli scarti di lavorazione.

La velocità del processo produttivo, la facilità di trasporto, di messa in opera permettono di ridurre in maniera considerevole i tempi di realizzazione, con ripercussioni positive sull'energia consumata e sulle emissioni di anidride carbonica in atmosfera.

### Riduzione dei rischi per la salute dei lavoratori

Un aspetto estremamente significativo è legato, inoltre, alla mole di lavoro fisico richiesto alle maestranze in cantiere, in particolare per quanto riguarda la costruzione con la tecnica tradizionale di getto del calcestruzzo in situ; la movimentazione delle casseforme e il posizionamento delle armature, infatti, richiedono un notevole impegno fisico con conseguenti rischi e pericoli per la salute dei lavoratori. Le tecniche di additive manufacturing applicate alle costruzioni ridurrebbero notevolmente il lavoro fisico degli operatori edili e, di conseguenza, comporterebbero una riconversione del lavoro da compiti di manovalanza a compiti di controllo e assistenza alla produzione automatizzata.

## 1.6 Progetti di Additive Manufacturing of Concrete nel mondo

Dal 2012 il numero di aziende che esplorano la stampa 3D per l'edilizia aumenta vertiginosamente, trasformando lo sviluppo precedentemente più o meno lineare in uno quasi esponenziale. Nuovi progetti sono presentati regolarmente in diversi settori delle costruzioni: edilizia, infrastrutture, componenti. Di seguito sono presentati alcuni esempi.

Il progetto "the Office of the future" (Dubai), realizzato nel 2016 dall'azienda di costruzioni cinese WinSun per la Dubai Foundation, è un ufficio di 250 m<sup>2</sup> prodotto con tecniche di additive manufacturing. La costruzione è stata realizzata con l'assemblaggio in situ di blocchi estrusi utilizzando una stampante 3D di dimensioni 36.6 × 12.2 × 6.1 m, costituita da un braccio robotizzato automatizzato. La costruzione è stata completata in 19 giorni, 17 dedicati all'estrusione dei blocchi e 2 per assemblaggio, allacci e finiture. La stessa azienda WinSun aveva realizzato, nel 2014, dieci moduli abitativi in 24 ore, costruite in pezzi, estrusi utilizzando quattro stampanti, assemblati in sito.

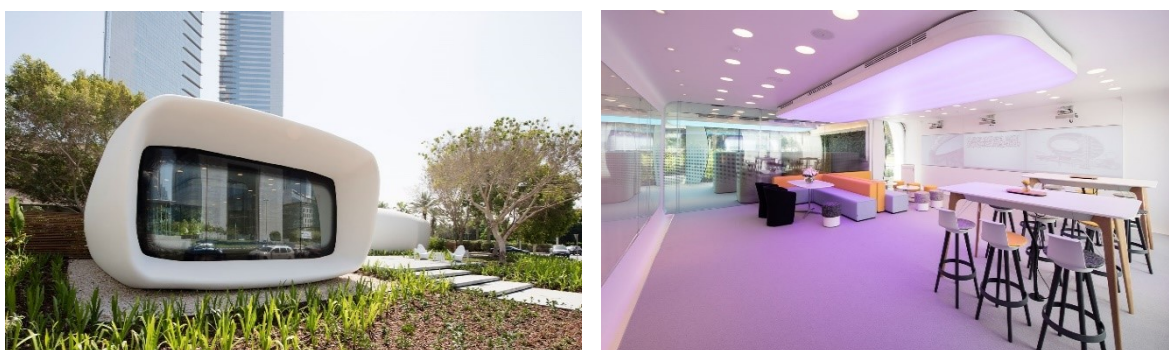


Figura 1.14 - "Office of the Future", Dubai - WinSun (2017)

Altri due esempi di additive manufacturing applicato alle costruzioni sono lo "Hotel Suite Interior" e il "Children's Castle" realizzati dall'azienda Total Kustom di Andrey Rudenko rispettivamente nel 2015 e nel 2014. Lo "Hotel Suite Interior" è la prima struttura commerciale creata al mondo con stampa 3D, si tratta della suite di un hotel di circa 130 m<sup>2</sup> e di dimensioni pari a 12.5 × 10.5 × 4 m realizzata nelle Filippine che include due camere da letto, una sala da pranzo e una sala relax con una Jacuzzi stampata in calcestruzzo. Il "Children's Castle", realizzato in Minnesota (USA), è stato il primo tentativo realizzato dalla Total Kustom nel 2014 ed è la prima costruzione stampata in 3D realizzata in blocchi assemblati.



Figura 1.15 - (a) "Children's castle", USA (2014); (b) "Hotel suite interior", Filippine (2015) – Total Kustom

"3D Housing 05" è la prima casa stampata in opera con tecnologia 3D in Italia, ideata e progettata dall'architetto Massimiliano Locatelli insieme a Italcementi, Arup e Cybe. Si tratta di una casa di circa 100 metri quadrati, con zona giorno, zona notte, cucina, bagno, realizzata nell'arco di due settimane.



Figura 1.16 - "3D Housing 05", Milano - Italcementi, Arup, Cybe (2018)

Il primo progetto per la realizzazione di un'infrastruttura estrusa in calcestruzzo è stato realizzato a Gemert, nei Paesi Bassi, ed è il risultato della ricerca della Eindhoven University of Technology. Si tratta di un ponte ciclopedonale che è parte di un progetto di riqualificazione di un percorso ciclabile esistente chiamato Lieve Vrouwensteeg.

Il ponte è formato da circa 800 strati in calcestruzzo rinforzato con un cavo in acciaio inserito gestire al meglio le sollecitazioni a trazione. È stato realizzato mediante assemblaggio di blocchi, stampati in 3D, la cui sezione è stata progettata per ottimizzare le resistenze a flessione e a taglio della struttura lavorando sulla complessità geometrica. Il ponte è formato da 6 elementi per un totale di 8 m di lunghezza, 3.5 m di larghezza e 90 cm di spessore.

La struttura è resa unica dalla tecnica costruttiva. I suoi elementi sono infatti stati prefabbricati nei laboratori della TU di Eindhoven attraverso l'utilizzo di una stampante 3d costituita da una grande struttura a cremagliera a cui sono stati collegati un braccio e una testina di stampa guidata da una macchina a controllo numerico. Questa è stata a sua volta collegata a un impianto di miscelazione del cemento attraverso un tubo flessibile che ha permesso di estrarre gli strati alti 1 cm e tutti armati: lo scorrimento nella testina di 20 km di filo metallico ha infatti permesso di inserire un rinforzo continuo in ogni strato di cemento. Ogni elemento ha una sezione ad alveare, che ha permesso di mantenere la portanza risparmiando materiale e minimizzando il peso.



Figura 1.17 - Ponte ciclopedonale in calcestruzzo estruso, Gemert (Paesi Bassi) - Eindhoven University of Technology (2017)

I progetti in figura 1.18, realizzati dai ricercatori della Loughborough University, hanno lo scopo di dimostrare le potenzialità dell'additive manufacturing per la realizzazione di componenti funzionali con geometrie complesse in breve tempo. La tecnologia può essere utilizzata per ottenere componenti essenziali, nonché caratteristiche architettoniche e complessi pannelli di facciata che non possono essere prodotti in modo conveniente con processi convenzionali.



Figura 1.18 - Elementi realizzati con tecniche AMoC: (a) “Wonder bench”; (b) Elemento di parete con proprietà di isolamento acustico; (c) Pannello a strati curvi - Loughborough University

## 1.7 Impatti sulla società, sul settore delle costruzioni e sull’ambiente

Le implicazioni ambientali dell’AM assumono connotati sempre più rilevanti soprattutto per l’opinione pubblica in quanto condizionano in maniera significativa la vita e la salute delle persone. Invece per quanto riguarda l’impatto dell’additive manufacturing sull’ambiente possiamo affermare che tale tecnica consente di ridurre il materiale utilizzato, i rifiuti prodotti, l’energia impiegata nelle diverse fasi produttive e le emissioni di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>).

È interessante quantificare e confrontare le emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte dal cemento confezionato con due diversi metodi quale il metodo automatizzato con tecniche di produzione additiva e il classico metodo per la costruzione di calcestruzzo.

I modelli comparati dei cicli di vita indicano che usando la produzione additiva, si può raggiungere una riduzione del 75% in termini di emissioni totali di CO<sub>2</sub> rispetto al metodo tradizionale (Mansour Rahimi, Mahdi Arhami e Behrokh Khoshnevis).

La produzione con metodi classici ha un maggiore consumo di energia nel ciclo di vita e le emissioni di CO<sub>2</sub> sono in gran parte dovute al trasporto. La produzione additiva, che prevede la realizzazione in loco, consente invece una maggiore continuità tra le diverse fasi di produzione.

La ricerca presa in considerazione valuta anche la riduzione di rifiuti solidi prodotti durante le fasi di costruzione che li quantifica in una riduzione di circa un settimo. La ricerca a cui si è fatto riferimento prende in considerazioni anche le fasi del ciclo di vita quali estrazione del cemento e produzione, trasporto e utilizzo di robot con alimentazione elettrica in loco.



Inoltre, i modelli considerati per il confronto sono gli stessi per entrambe le tecniche di costruzione, in termini di design, funzionalità e quantità di calcestruzzo utilizzato.

I dati sono stati ottenuti e sono riportati nelle tabelle successive. Si precisa che nelle tabelle precedenti si indica con CMU il calcestruzzo convenzionale mentre CC indica la stampa 3D con il metodo Contour Crafting.

Tabella 1.1 - Tabella riassuntiva delle emissioni di anidride carbonica

<b>Summary of CO<sub>2</sub> emission (kg) by life-cycle phase</b>		
<b>Phase</b>	<b>CMU</b>	<b>CC</b>
Extraction, transportation and manufacturing	1,32E+05	1,27E+05
To and on-site transportation	4,58E+05	1,97E+04
On -site construction	-	1,46E+02
<b>Total</b>	<b>5,90E+05</b>	<b>1,47E+05</b>

Tabella 1.2 - Tabella riassuntiva dell'energia consumata

<b>Summary of embodied energy (GJ) by life-cycle phase</b>		
<b>Phase</b>	<b>CMU</b>	<b>CC</b>
Extraction, transportation and manufacturing	7,92E+02	7,02E+02
To and on-site transportation	2,90E+03	1,18E+03
On -site construction	-	8,64E-01
<b>Total</b>	<b>3,69E+03</b>	<b>1,88E+03</b>

Tabella 1.3 - Tabella riassunti dell'impatto ambientale della produzione di calcestruzzo

<b>Embodied energy (GJ) and CO<sub>2</sub> (kg) for a square foot of wall</b>		
<b>Environmental impact</b>	<b>CMU</b>	<b>CC</b>
CO <sub>2</sub>	13,62	3,34
Embodied energy	0,08	0,04

Nella tabella precedente, per una superficie di un metro quadrato, la stampa 3D riduce la CO<sub>2</sub> totale prodotta del 70% e l'energia totale del 50% rispetto al metodo di costruzione classico.

Per quanto riguarda i rifiuti solidi, considerando lo scarto totale per metro quadrato, come mostrato nella tabella 1.4, c'è una diminuzione che può raggiungere il 15-20% durante le due fasi del ciclo di vita, ovvero produzione e messa in opera.

Tabella 1.4 - Rifiuti solidi prodotti nelle fasi realizzative di un manufatto

<b>Solid waste (kg/ft2) during manufacturing and construction phases</b>		
<b>Phase</b>	<b>CMU</b>	<b>CC</b>
<b>Manufacturing</b>		
Concrete solid waste	3,89E-02	1,38E-02
Blast furnace dust	1,19E-03	1,17E-03
Blast furnace slag	5,80E-03	5,70E-03
<b>Sub-total</b>	<b>4,59E-02</b>	<b>2,06E-02</b>
<b>Construction</b>		
Concrete solid waste	9,81E-02	0,00E+00
<b>Sub-total</b>	<b>9,81E-02</b>	<b>0,00E+00</b>
<b>Total</b>	<b>1,44E-01</b>	<b>2,06E-02</b>

Dai dati riportati si può notare che l'AM ha un significativo vantaggio rispetto all'attuale metodo di costruzione in termini di emissioni di anidride carbonica ed energia impiegata nel processo produttivo. È quindi possibile affermare che la tendenza alla riduzione delle emissioni di gas serra e dell'energia utilizzata in futuro potrebbero incentivare lo sviluppo dell'AM.

## 2 Materiali

---

Nello sviluppo di miscele cementizie per la stampa 3D si usano componenti e additivi ad altissime prestazioni affinché l'impasto risulti estrudibile e performante dal punto di vista della qualità della rifinitura, ma possenga anche le caratteristiche meccaniche e funzionali richieste dalla destinazione d'uso dell'elemento in considerazione.

Lavorando con ugelli ed estrusori di piccole dimensioni e considerando che la tecnica in sé richiede un "ambiente" di lavoro preciso e dettagliato, la miscela di calcestruzzo dovrà essere a sua volta estremamente prestazionale e si dovranno ottenere le stesse caratteristiche finali di un calcestruzzo gettato in opera con i metodi tradizionali. Questo implica l'utilizzo di materiali fini e dall'elevata superficie specifica come il fumo di silice, aggregati fini con buona resistenza meccanica, additivi fluidificanti e riduttori di ritiro, e soprattutto la pasta cementizia che rappresenta il collante e la matrice vera e propria del calcestruzzo, nonché la componente che attribuisce alla miscela le caratteristiche meccaniche richieste.

L'operazione preliminare alla realizzazione di una qualsiasi miscela è l'ottimizzazione del mix design ovvero il progetto della miscela in funzione delle prestazioni richieste e delle materie prime disponibili. Nella prima fase del presente lavoro si analizza quindi, quali materiali risultino più idonei all'applicazione nel campo dell'Additive manufacturing.

Nei successivi paragrafi si riporta un'analisi approfondita dei materiali utilizzati nella preparazione delle miscele.

### 2.1 Leganti

#### 2.1.1 Il cemento portland

Il cemento Portland è il tipo di cemento più utilizzato, ed è impiegato come legante nella preparazione del calcestruzzo. Questo materiale è il prodotto che si ottiene dalla miscelazione del clinker, con l'aggiunta di gesso nella quantità necessaria per regolarizzare il processo di idratazione. L'analisi microscopica eseguita su pezzi di cemento scorificato ha rilevato la presenza di quattro componenti principali e precisamente l'alite (silicato tricalcico), la belite (silicato bicalcico), la celite (alluminato tricalcico) e la brownmillerite (alluminato ferrito tetracalcico). Le materie prime per la produzione del Portland sono minerali contenenti: ossido di calcio  $\text{CaO}$  (44%), ossido di silicio  $\text{SiO}_2$  (14,5%), ossido di alluminio  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (3,5%), ossido di ferro  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (2%) e ossido di magnesio  $\text{MgO}$

(1,6%). L'estrazione avviene in miniere, in sotterraneo o a cielo aperto, poste in prossimità della fabbrica, che in genere hanno già la composizione desiderata, mentre in alcuni casi è necessario aggiungere argilla o calcare, oppure minerale di ferro, bauxite o altri materiali residui di fonderia.

La miscela viene riscaldata in un forno speciale costituito da un enorme cilindro disposto orizzontalmente con leggera inclinazione e ruotante lentamente.

La temperatura cresce lungo il cilindro fino a circa 1480 °C; questa è determinata in modo che i minerali si aggregino ma non fondano e vetrifichino. Nella sezione a temperatura minore il carbonato di calcio (calcare) si scinde in ossido di calcio e biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>). Nella zona ad alta temperatura l'ossido di calcio reagisce con i silicati a formare metasilicato di calcio (CaSiO<sub>3</sub> e Ca<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Si forma anche una piccola quantità di alluminato tricalcico Ca<sub>3</sub>(AlO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> e di alluminato ferrito tetracalcico (C<sub>4</sub>AF, risultato della reazione 4CaO+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Il materiale risultante è complessivamente denominato clinker. Il clinker può essere conservato per anni prima di essere impiegato per produrre il cemento, a condizione di evitare il contatto con l'acqua. Per migliorare le caratteristiche del prodotto finito al clinker viene aggiunto circa il 2% di gesso o di solfato di calcio e la miscela è finemente macinata. La polvere ottenuta è il cemento pronto per l'uso. La polvere di cemento è costituita da grani aventi diametro da 1 a 100 µm. Il cemento ottenuto ha una composizione del tipo:

- 64% ossido di calcio
- 21% ossido di silicio
- 6,5% ossido di alluminio
- 4,5% ossido di ferro
- 1,5% ossido di magnesio
- 1,6% solfati
- 1% altri materiali, tra cui soprattutto acqua.

Quando il cemento Portland viene miscelato con l'acqua, il prodotto solidifica in alcune ore e indurisce progressivamente nell'arco di diverse settimane. Infatti una volta mescolato con l'acqua, ad indurimento avvenuto, il cemento dà origine alla pasta di cemento che si presenta come un materiale poroso (porosità fino al 40% del volume apparente) e disomogeneo, con pori del gel di dimensioni dell'ordine di qualche nanometro e di qualche micrometro per la porosità capillare. L'indurimento iniziale è provocato dalla reazione tra acqua, gesso e l'alluminato di tricalcico, a formare una struttura cristallina di alluminato di calcio idrato (CAH) ed ettringite (EEF). Il successivo indurimento e lo sviluppo di forze interne di tensione derivano dalla più lenta reazione dell'acqua con il silicato di tricalcico, a formare una struttura amorfa chiamata silicato di calcio idrato (CSH gel). In entrambi i casi le strutture avvolgono e legano i singoli granuli di materiale presenti. Il CAH

è responsabile, grazie alla sua matrice fibrosa, dello sviluppo della resistenza meccanica del calcestruzzo, specialmente nelle prime ore.

Con l'aggiunta di calce, invece, si evita che l'idratazione degli alluminati sia eccessivamente veloce; quindi, fungendo da regolatore di presa, la calce o il gesso vanno a formare un prodotto chiamato ettringite primaria.

Ogni cemento è caratterizzato da una classe di resistenza che dipende dalla finezza di macinazione del cemento e dalla percentuale di silicato tricalcico rispetto a quello bicalcico; maggiore è la finezza di macinazione del cemento e maggiore è il tenore di silicato tricalcico rispetto a quello bicalcico e più rapido è lo sviluppo della resistenza meccanica. Ogni tipo di cemento è potenzialmente disponibile in sei diverse classi di resistenza normalizzata (a 28 giorni). Per ogni classe di resistenza normalizzata si definiscono due classi di resistenza iniziale (2-7 giorni):

- La prima con resistenza iniziale ordinaria contrassegnata con la lettera N;
- La seconda con resistenza iniziale elevata contrassegnata con la lettera R.

Pertanto, secondo le norme UNI EN 197-1, si hanno le seguenti classi di resistenza del cemento:

- Classe 32.5 N: resistenza a compressione iniziale a 7 giorni  $\geq 16$  MPa e resistenza a compressione standard a 28 giorni  $\geq 32.5$  MPa e  $\leq 52.5$  MPa;
- Classe 32.5 R: resistenza a compressione iniziale a 2 giorni  $\geq 10$  MPa e resistenza a compressione standard a 28 giorni  $\geq 32.5$  MPa e  $\leq 52.5$  MPa;
- Classe 42.5 N: resistenza a compressione iniziale a 2 giorni  $\geq 10$  MPa e resistenza a compressione standard a 28 giorni  $\geq 42.5$  MPa e  $\leq 52.5$  MPa;
- Classe 42.5 R: resistenza a compressione iniziale a 2 giorni  $\geq 20$  MPa e resistenza a compressione standard a 28 giorni  $\geq 42.5$  MPa e  $\leq 62.5$  MPa;
- Classe 52.5 N: resistenza a compressione iniziale a 2 giorni  $\geq 20$  MPa e resistenza a compressione standard a 28 giorni  $\geq 52.5$  MPa;
- Classe 52.5 R: resistenza a compressione iniziale a 2 giorni  $\geq 30$  MPa e resistenza a compressione standard a 28 giorni  $\geq 52.5$  MPa;

Per le sperimentazioni di laboratorio che seguiranno è stato utilizzato un cemento tipo I 42,5 R (classificazione conforme alla norma UNI EN 197-1) contenente almeno il 95% di clinker e fino ad un massimo del 5% di costituenti minori (come fillers o alti materiali), non considerando le aggiunte di solfato di calcio e additivi, dalle caratteristiche indicate nelle tabelle 2.1 e 2.2. Il cemento, caratterizzato dal rapido sviluppo delle resistenze iniziali, è conforme alla norma europea armonizzata UNI EN 197/1 ed è dotato di marchio come previsto dal regolamento europeo 305/2011 (CPR).

Tabella 2.1 - Caratteristiche chimiche del cemento Portland

Parametro	Metodo di prova	Valori indicativi	Limiti di norma
Solfati (SO <sub>3</sub> )	UNI EN 196/2	< 3,5 %	< = 4,0 %
Cloruri (Cl <sup>-</sup> )	UNI EN 196/2	< 0,08%	< = 0,1 %
Perdita al fuoco	UNI EN 196/3	< 4,0 %	< = 5,0 %
Residuo insolubile	UNI EN 196/4	< 1,5 %	< = 5,0 %
Cromo VI solubile in acqua	UNI EN 196/10	< = 2 ppm	< = 2 ppm

Tabella 2.2 - Caratteristiche fisico - meccaniche del cemento Portland

Parametro	Metodo di prova	Valori indicativi	Limiti di norma
Spandimento	UNI 7044	> 80 %	
Resistenza a compressione dopo	UNI EN 196/1		
2 giorni	UNI EN 196/2	> 26,0 Mpa	> = 20,0 Mpa
28 giorni	UNI EN 196/3	> 48,0 Mpa	> = 42,5 Mpa

Riducendo il rapporto acqua/cemento la matrice cementizia aumenta la sua resistenza meccanica ed in generale migliorano le prestazioni del conglomerato. La riduzione dell'acqua d'impasto ha però due limiti inferiori quali la quantità stechiometrica necessaria (22% in peso del cemento anidro) e la lavorabilità del materiale (tale problema può però essere in parte superato con l'aggiunta di additivi superfluidificanti). Nel presente lavoro si è fatto riferimento ad una miscela con un rapporto a/c di 0.288 al fine di garantire l'ottenimento di buone prestazioni meccaniche ed una lavorabilità compatibile con il sistema di estrusione adottato nella messa in opera.



Figura 2.1 - Cemento Portland 52.5 R

### 2.1.2 Calce idraulica

La calce idraulica è un legante a base di idrossido di calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) che può far presa anche se immersa in acqua. Nell'antichità venivano usati calcari marnosi, cioè contenenti quantità intorno al 25% di argilla, cotti in forni che potevano arrivare ad una temperatura massima di circa 1000 °C. Il prodotto ottenuto in cottura dalla fusione del calcare con l'argilla fu chiamato dai romani calce idraulica, perché era un legante che aveva come caratteristica la possibilità di indurire sia all'aria aperta che sott'acqua (idro). Da non confondere assolutamente con la calce "idrata", in quanto appartengono a due famiglie diverse. La calce comune (calce idrata, calce viva, calce spenta, grassello di calce) e che si usa in edilizia e in agricoltura è data dalla cottura di sabbie calcaree pure, appartiene alla famiglia dei leganti aerei, cioè non ha la capacità di indurire sott'acqua.

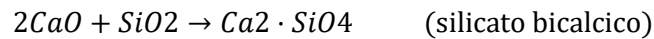
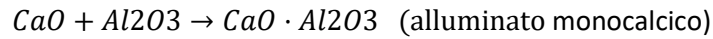
La calce idraulica invece appartiene alla famiglia dei leganti idraulici, cioè alla famiglia dei cementi. Infatti, oltre ad essere chiamata calce idraulica, viene comunemente detta "cemento povero". Infatti ne ha tutte le caratteristiche, sia di struttura che di resistenza. Le uniche due cose in cui si differenziano sono il tempo di cottura e la quantità di argilla contenuta nell'una e nell'altra. I tempi di cottura vanno dalle 36 ore circa a 1000 °C della calce idraulica naturale ai 45 minuti circa a 1450 °C per il cemento. Le quantità di argilla invece vanno dal 20-22% per la calce idraulica ai 25-27% per il cemento.

Oggi si possono ottenere calce idrauliche naturali anche dalla cottura di calcari silicei anziché argillosi, sicuramente questo metodo è molto più rapido ed economico, consente di ottenere un prezzo di mercato più abbordabile ma ha anche dei contro. In particolare, ha l'handicap della silice contenuta nella sabbia silicea usata al posto dei calcari marnosi in cottura, e che quindi troveremo nel prodotto finito. La presenza di quest'ultima obbliga ad uno smaltimento come rifiuto pericoloso o speciale del materiale e ad una protezione minuziosa dei lavoratori esposti. Si può comunque venire a conoscenza delle protezioni individuali da usare durante il contatto attraverso le schede di sicurezza dei prodotti.

Per le calce idrauliche vere e proprie, il materiale di partenza, costituito da calcare impuro per argilla, viene frantumato e cotto alla temperatura di circa 1000- 1100 °C e pertanto alquanto superiore a quella che si realizza nella normale cottura della calce aerea.

La cottura avviene in forni a tino verticali dello stesso tipo di quelli utilizzati per la preparazione della calce aerea.

Intorno ai 900 °C si ha la decomposizione termica del calcare ( $\text{CaCO}_3$ ) in calce viva ( $\text{CaO}$ ) e anidride carbonica e dei silicati idrati di alluminio costituenti l'argilla. Intorno ai 1000-1100° invece, i prodotti della decomposizione dell'argilla si legano con l'ossido di calcio ( $\text{CaO}$ ):



Rispetto ai cementi il silicato tricalcico non si forma poiché la sua formazione si ha solo per temperature sopra i 1250 °C. La calce viva residua, subirà la stessa reazione di spegnimento che si ha per la calce aerea per produrre la calce spenta o idrossido di calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>).

La calce risultante sarà così composta da:

- Parte attiva
  - 60-70% di Ca(OH)<sub>2</sub>
  - 10-20% di frazione idraulica (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>; CaOAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
  - 5-10% di CaO
- 10-30% di incotto (materiale che non ha reagito e fungerà da inerte).

### 2.1.3 Malta refrattaria

Nei capitoli successivi sono state studiate alcune formulazioni basate anche sull'impegno di una malta refrattaria commerciale opportunamente combinata con altri ingredienti per conseguire i requisiti di estrudibilità. La malta impiegata è una malta cementizia refrattaria premiscelata a base di argilla, chamotte e alluminato di calcio.

La malta refrattaria infatti è un materiale adatto a resistere, per tempi anche lunghi, a temperature particolarmente elevate (fino a valori di 500/600°C) senza sgretolarsi e senza reagire chimicamente con le sostanze che con essa sono a contatto.

Essa è una miscela composta da:

- una componente legante stabile alle alte temperature che è capace come il cemento comune di reagire con l'aria o l'acqua dando il via alla progressiva presa seguita dal processo di indurimento;
- una componente inerte, ovvero materiale lapideo granulare che non partecipa attivamente alle reazioni di cui sopra ma che grazie alla particolare composizione mineralogica è in grado di resistere bene alle alte temperature.

Entrando nel dettaglio della composizione chimica della malta refrattaria commerciale impiegata nel corso della sperimentazione essa è costituita da:

- SiO<sub>2</sub> (silice) in percentuale compresa tra il 44/46%;
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (allumina) in percentuale compresa tra 16/18%;
- CaO (ossido di calce o calce viva) in percentuale compresa tra 28/30%;



- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (ossido ferrico) con percentuale compresa tra 4/5%.

Le caratteristiche peculiari di una malta refrattaria comune sono:

- Ottima resistenza a temperature considerevoli dell'ordine dei 500/600°C, in alcune tipologie, come quella impiegata, si arriva anche ai 1000°C ed oltre (la temperatura elevata nel caso delle malte refrattarie non induce i componenti della malta a reagire con gli elementi vicini né provoca cambiamenti nella struttura della malta indurita compromettendone la capacità di presa ed indurimento; inoltre, anche le considerevoli sollecitazioni provocate dalle ampie escursioni termiche tra la temperatura ambiente e 500/600°C vengono superate senza evidenti conseguenze a livello microstrutturale);
- Rapida presa ed indurimento, generalmente una malta refrattaria fa presa in meno di una ora ed indurisce nell'ordine di 5/6 ore;
- Buona resistenza meccanica alle sollecitazioni;
- Applicabilità su qualunque tipo di supporto siano essi manufatti cementizi che mattoni refrattari;
- Non può essere lavorata con temperature dell'ambiente inferiori ai 5° C e superiori ai 35° C pena la perdita delle sue caratteristiche.

Nella sperimentazione in oggetto è stata utilizzata una malta refrattaria avente le caratteristiche riportate nelle seguenti tabelle.

Tabella 2.3 - Proprietà della malta refrattaria

<b>Caratteristica</b>	<b>Risultato</b>
Stato	Polvere
Colore	Grigio – beige
Peso specifico apparente	1,30 g/cm <sup>3</sup>
Peso specifico dell'impasto	2,0 g/cm <sup>3</sup>
pH dell'impasto	≥ 12
Granulometria massima	0,7 mm
Rapporto di miscelazione	ca. 3,5 litri di acqua per 10 kg di polvere
Temperatura di applicazione permessa	da +5 °C a +35 °C
Tempo di inizio presa	ca. 45 minuti
Tempo di fine presa	ca. 90 minuti
Spandimento impasto	60%
Durata di vita dell'impasto	ca. 30 minuti
Consumo	1,90 kg/m <sup>2</sup> per mm di spessore

Tabella 2.4 -Composizione chimica della malta refrattaria

Elemento	Quantità (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16 – 18%
SiO <sub>2</sub>	44 – 46%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4 – 5%
CaO	28 – 30%

## 2.2 Aggregati

Gli aggregati costituiscono una componente di fondamentale importanza in ogni miscela cementizia. Si tratta di elementi sciolti, di dimensioni e pezzatura variabili, che non partecipano ai processi chimici di presa ed indurimento del calcestruzzo ma che contribuiscono al raggiungimento delle caratteristiche meccaniche. Hanno una funzione tecnica in quanto contribuiscono al raggiungimento delle caratteristiche di resistenza, di deformabilità e durabilità del prodotto finito. L'importanza degli aggregati nella miscela è dovuta al notevole volume occupato dai granuli dispersi nella matrice cementizia, pari a circa 650-700 l/m<sup>3</sup> ovvero circa il 65-70 % del volume totale. L'aggregato costituisce lo scheletro solido del calcestruzzo, contribuendo allo sviluppo delle caratteristiche meccaniche e consente di ridurre la quantità di legante, riducendo così il calore d'idratazione e quindi l'eccessiva tendenza alla fessurazione. Infine contrasta il ritiro della pasta legante, avendo un elevato modulo elastico.

Gli aggregati possono essere classificati in base alla provenienza, tra aggregati artificiali o da riciclo. Gli aggregati naturali sono quelli utilizzati senza alcuna modifica sulle dimensioni e sulla composizione originaria e provengono da depositi in alveo fluviale, depositi marini o dalla frantumazione di rocce. Gli aggregati artificiali, invece, si ottengono sottoponendo le materie prime organiche e inorganiche a processi industriali. Gli aggregati di riciclo sono quelli ottenuti dalla selezione e successiva frantumazione di materiale proveniente dalla demolizione di edifici. Le percentuali massime di impiego degli aggregati sono limitate, secondo la normativa, in funzione della loro origine e della classe di resistenza del calcestruzzo insieme al quale sono miscelati.

## 2.2.1 Aggregati naturali

### 2.2.1.1 Aggregato siliceo

L'aggregato utilizzato in alcune sperimentazioni descritte nei capitoli successivi è una sabbia silicea.



Figura 2.2 - Sabbia silicea 0-1 mm

In particolare, quella adottata in alcuni mix design è una sabbia, comunemente conosciuta come sabbia del Po, di cui vengono mostrate le caratteristiche tecniche e chimiche nella tabella 2.5 seguente.

Tabella 2.5 - Dati tecnici e caratteristiche chimiche della sabbia silicea

<b>Dati tecnici</b>	
Tipo di sabbia	Sabbia silicea 0 – 1 mm
Peso specifico	1460 kg/ m <sup>3</sup>
Umidità	< 0,5 %
Forma	Granuli tondeggianti
Durezza MOHS	6
<b>Analisi chimica</b>	
Silice	80,80 %
Ferro	1,73 %
Alluminio	6,19 %
Calcio	4,60 %
Magnesio	2,18 %
Sodio	2,00 %
Potassio	1,96 %
PH	7,00 %

Con il fine di mantenere un basso rapporto acqua/cemento per raggiungere resistenze elevate, occorre utilizzare un aggregato che assorba poca acqua, ciò dipende dalla sua composizione chimica e dalla granulometria.

Un aspetto fondamentale è, pertanto, la determinazione della distribuzione granulometrica ovvero l'assortimento dimensionale degli elementi granulari. La distribuzione granulometrica influenza la lavorabilità, la richiesta d'acqua e la massa volumica della miscela. L'aggregato deve essere ben assortito affinché i granuli più fini si possano allocare nei vuoti interstiziali creati tra i granuli più grossi e si possa garantire la massima densità raggiungibile. Ciò contribuirà alla formazione di uno scheletro di elementi lapidei con un contenuto di vuoti interstiziali relativamente ridotto. Quindi una buona distribuzione granulometrica degli inerti garantisce un buon equilibrio nella miscela tra pasta cementizia ed aggregati nel rispetto del rapporto acqua-cemento, la massima lavorabilità e la minima segregazione dell'impasto fresco.

Di seguito è riportata la curva granulometrica della sabbia silicea (dimensioni 0-1 mm).

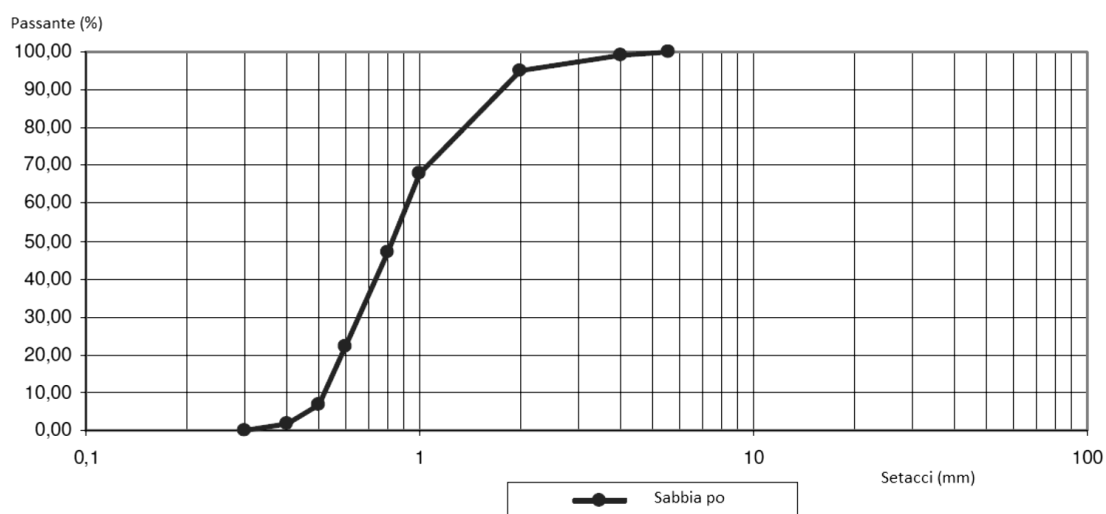


Figura 2.3 - Curva granulometrica della sabbia silicea (0-1 mm) – [www.esincalce.com](http://www.esincalce.com)

### 2.2.1.2 Aggregato calcareo

Un altro tipo di inerte impiegato in alcune sperimentazioni che saranno descritte nei capitoli successivi è un aggregato calcareo in polvere derivante dalla frantumazione di rocce sedimentarie, nello specifico si tratta di un carbonato di calcio. Nei capitoli successivi sarà denominato CA400.

Tale aggregato presenta le seguenti caratteristiche:

- purezza > 98%;

- esente da ferro, silice ed altre sostanze;
- nessuna eterogeneità significativa;
- di colore bianco;
- materiale compatto privo di alterazioni;
- non presenta alcuna caratteristica sfavorevole all'impiego;
- calcare definito pelsparite compatto, non poroso, bene cementato e principalmente costituito da micrite (microcristalli di calcite inferiori a 1  $\mu\text{m}$ ).

Tabella 2.6 - Proprietà dell'aggregato calcareo

Caratteristica	Risultato
Stato	Polvere
Colore	Bianco
Umidità	< 0,5%

Il carbonato di calcio è quindi, per le sue specifiche proprietà di non reattività agli alcali-silice, particolarmente indicato per la produzione di conglomerati cementizi, bituminosi e premiscelati cementizi di alta qualità.



Figura 2.4 - Carbonato di calcio (0-400 $\mu\text{m}$ )

Il materiale utilizzato nelle sperimentazioni, descritte nei successivi capitoli, è caratterizzato dal fuso granulometrico riportato in Figura 2.5:

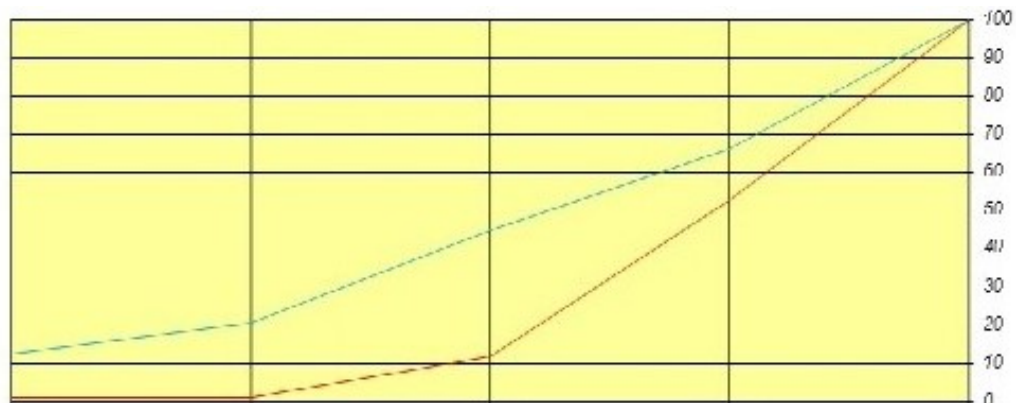


Figura 2.5 - Fuso granulometrico del carbonato di calcio (0-400 $\mu\text{m}$ ) – [www.gdrmineraria.com](http://www.gdrmineraria.com)

## 2.2.2 Aggregati da riciclo di materiali di scarto

### 2.2.2.1 Pet

Il PET, polietilentereftalato, è il più importante tra i poliesteri termoplastici. La sua struttura è caratterizzata da gruppi di etilene (-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-) e gruppi di tereftalato (due gruppi estere -O-C=O e un anello benzenico). Viene ottenuto per policondensazione dell'acido tereftalico con il glicole etilenico.

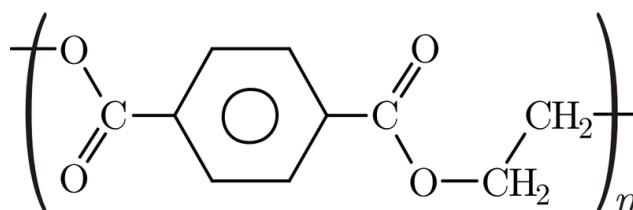


Figura 2.6 - Composizione chimica del polietilentereftalato

Il PET viene utilizzato come fibra per la produzione di tessuti invernali, rinforzi di pneumatici, canne, nastri trasportatori, come film per imballaggi, o per la produzione di prodotti stampati. Il suo vasto impiego nella produzione di bottiglie è dovuto alla sua resistenza meccanica, trasparenza, bassa permeabilità alla CO<sub>2</sub> e agli odori, alla sua stabilità chimica e alla sua completa riciclabilità.

Il PET può avere struttura amorfa, ma può anche raggiungere un grado di cristallinità del 50%; nella produzione di bottiglie si dovrebbe avere cristallinità intorno al 20-25%. La cristallinità favorisce l'effetto barriera ai gas e la resistenza agli agenti chimici e rallenta l'assorbimento di acqua, fa aumentare la temperatura di transizione vetrosa e la temperatura di fusione, ma diminuisce la trasparenza. Le condizioni che favoriscono la cristallizzazione sono tra 85°C e 250°C, con un massimo in corrispondenza di 165°C.

Il PET cristallino non ha transizione vetrosa, passa direttamente dallo stato solido allo stato fuso oltre i 250°C e questo ne permette l'essiccamento prima della lavorazione.

Il PET riciclato ha una temperatura di inizio della cristallizzazione minore rispetto al PET vergine, questo probabilmente è dovuto alla presenza di impurità come residui di PVC e adesivi, che fungono da agenti nucleanti facilitando la cristallizzazione. La cristallizzazione è inoltre indotta dall'abbassamento della viscosità intrinseca del peso molecolare medio, e dall'umidità residua. La maggior cristallinità del materiale rende il suo comportamento più fragile.

Il PET è un polimero igroscopico, esso cioè ha tendenza ad assorbire umidità molto rapidamente, inoltre le molecole d'acqua si distribuiscono non solo sulla superficie, ma anche all'interno del granulo.

Nello studio in esame, questo materiale viene utilizzato per conferire al calcestruzzo non solo una ecocompatibilità in linea con le tendenze degli ultimi anni, ma anche per ottenere calcestruzzi coibenti, fonoassorbenti e allo stesso tempo più leggeri, in combinazione con una percentuale di schiuma di vetro; argomento che verrà trattato nei capitoli successivi.



Figura 2.7 - Pet riciclato utilizzato nella sperimentazione

### 2.2.2.2 Schiuma di vetro

La schiuma di vetro, detto anche vetro cellulare, è un materiale isolante e leggero destinato all'edilizia, settore nel quale favorisce in modo determinante un notevole risparmio delle risorse energetiche. Il vetro riciclato macinato viene miscelato con attivatori ecologicamente innocui e poi espanso in un forno continuo.

Nel successivo raffreddamento si possono scegliere due strade diverse e realizzare, a seconda dei casi, due prodotti differenti:

- granulato in vetro cellulare
- lastre in vetro cellulare

Per produrre il granulato la massa di vetro fusa viene raffreddata rapidamente subito dopo l'uscita dal forno continuo. Le notevoli tensioni che si creano frammentano la barra di vetro in tanti pezzettini. Il vetro cellulare resiste bene al gelo e agli sbalzi termici legati alle diverse condizioni atmosferiche, quindi l'alternanza delle stagioni e del giorno e della notte non influiscono minimamente sulle capacità termoisolanti di questo materiale.

L'applicazione di questi pannelli in qualsiasi parte dell'edificio, non comporta alcun aggravio in termini di carico sulla struttura dell'edificio poiché i pannelli in vetro cellulare sono abbastanza leggeri. Tra le tante caratteristiche inoltre questi pannelli hanno una buona resistenza al fuoco, non sono putrescibili e difficilmente vengono attaccati da insetti e parassiti.

Proprio grazie a queste caratteristiche, i calcestruzzi confezionati con questo materiale presentano ottima capacità termoisolanti e coibenti, oltre ad essere particolarmente leggeri e con ridotta massa volumica. Il rovescio della medaglia, però, comporta una notevole perdita di resistenza meccanica, molto più rispetto all'utilizzo del solo PET, il che conferisce al calcestruzzo caratteristiche funzionali più che strutturali, soprattutto in quello confezionato con la calce in sostituzione del cemento. L'utilizzo di questi composti quindi riguarda maggiormente l'uso propriamente coibente in aggiunta alla struttura, tramite l'applicazione di pannelli o intonaci. La granulometria utilizzata rientra nel range 0.5/4 mm dato che la miscela deve essere estrusa dall'ugello per la stampa, e quindi grani più grandi avrebbero creato ostacoli e ostruzioni e quindi difficoltà di stampa.



Figura 2.8 - Schiuma di vetro

### **2.2.2.3 Pneumatici fuori uso (PFU)**

Con il termine Pneumatici Fuori Uso (PFU) si fa riferimento a quella parte dei pneumatici usati giunti alla fine del loro ciclo di vita che, non potendo più essere riutilizzati, costituiscono un rifiuto.

Sino a qualche anno fa un'elevata percentuale di PFU veniva smaltita in discarica (circa il 50% in Europa sino al 1998). Successivamente alla Direttiva Europea sulle discariche (European Union Landfill, 1999) molti stati dell'UE hanno emanato leggi ed istruzioni per l'applicazione della stessa, miranti sia a ridurre la formazione di PFU sia ad ottimizzarne il recupero.

Ciò ha condotto, negli ultimi anni, alla drastica riduzione dei PFU destinati a discarica, che risultava pari al 6% nel 2008 contro il 35% circa del 2002. Nel contempo si registrava un notevole aumento dei PFU destinati sia a recupero energetico sia a recupero di materiale. A livello nazionale, il principale riferimento legislativo è costituito dal D.L. n. 152 del 2006; tuttavia i dati italiani sulla destinazione dei PFU risultano meno confortanti rispetto a quelli Europei.



Appare ancora elevata la percentuale di PFU smaltita nelle discariche (più del 20% contro il 6% in Europa), il recupero energetico costituisce circa il 25% dei PFU (più del 35% in Europa) ed il recupero in termini di materiale, che si attesta intorno al 20%, è ancora troppo basso rispetto alla percentuale Europea, prossima al 40%. In tale contesto risulta quanto mai necessario focalizzare la ricerca allo studio di soluzioni efficaci per il recupero dei PFU in modo da contribuire a rendere quello dei pneumatici un mercato sostenibile.

Il riciclo dei PFU si traduce fondamentalmente nel recupero di energia (eseguito principalmente nelle cementerie) e nel recupero di materia prima.

Infatti, attraverso processi di triturazione, pirolisi e riduzione criogenica è possibile ricavare dai PFU particelle di gomma e fibre d'acciaio potenzialmente riutilizzabili in svariate applicazioni. Le particelle ed il polverino di gomma possono trovare impiego nell'ambito dell'arredo urbano e stradale, per la realizzazione di dossi artificiali, cordoli, barriere new jersey, rotonde spartitraffico, pavimentazioni in conglomerato resino-gommoso, sottofondi drenanti, rilevati per opere stradali, barriere antirumore fonoassorbenti. Fra le altre applicazioni della gomma si annoverano argini, scogliere artificiali, balle per il controllo dell'erosione costiera, gabbioni per il controllo della stabilità dei pendii .

La ricerca relativa all'utilizzo di particelle di gomma ricavate da PFU nel calcestruzzo si è particolarmente sviluppata negli ultimi anni.

Infatti si è valutata la possibilità di impiego del calcestruzzo con aggiunta di gomma riciclata, al fine di utilizzare queste particelle nelle miscele di calcestruzzo, in sostituzione degli aggregati, per ottenere un calcestruzzo leggero.

L'aggiunta di particelle di gomma al conglomerato cementizio riduce, fra l'altro, l'assorbimento di acqua conferendo una migliore protezione alle barre di armatura nei confronti della corrosione.

Naturalmente questo materiale coibente ha delle caratteristiche talvolta molto differenti dal calcestruzzo standard.

Queste variazioni dipendono dal tipo di elementi usati (dimensioni, pulizia) e dal loro volume relativo, ossia quanto inerte naturale viene sostituito con il polverino di gomma. L'introduzione di particelle di gomma al conglomerato cementizio porta diversi vantaggi quali:

- Costituisce in modo efficace e poco costoso di provvedere al riciclaggio degli PFU
- Riduce la rigidità del calcestruzzo permettendo una maggiore deformabilità (grazie alla diminuzione del modulo di Young);
- Come alternativa ai materiali primari riduce sul profilo ambientale l'onere per l'estrazione di nuovi inerti;
- Modifica alcune proprietà del calcestruzzo quali l'elasticità, la duttilità, la durezza, la resistenza agli urti e la capacità di assorbire energia dovuta ad azioni dinamiche (assorbe

- miglior gli impatti, le vibrazioni e le onde sonore); in altre parole migliora lo smorzamento (cioè la capacità di assorbire e ridurre gli effetti delle vibrazioni e delle emissioni acustiche);
- In condizioni di gelo e disgelo fornisce risultati migliori rispetto al calcestruzzo ordinario in quanto presenta una buona resistenza agli agenti atmosferici;
  - All'aumentare della frazione di gomma si riduce la densità di massa rispetto al calcestruzzo ordinario, fino a  $100 \text{ Kg/m}^3$  (a spese di una notevole riduzione delle caratteristiche meccaniche);
  - Presenta fino a circa il 30% del peso di cemento, una migliore resistenza non strutturale alle fessure;
  - Migliora le prestazioni in termini di resistenza al fuoco.

Nei capitoli che seguiranno è stata condotta un'indagine sperimentale finalizzata alla valutazione delle proprietà di estrusione di miscele ottenute con l'aggiunta di particelle di gomma in sostituzione dell'inerte.

In questo ambito, sono stati utilizzati due frazioni di aggregato di gomma con granulometrie differenti, in particolare:

- Un polverino di gomma, caratterizzato da:  $d = (0,5 - 1,1) \text{ mm}$  e  $\rho = (1209 \pm 2) \text{ kg/m}^3$
- Un granulato di gomma, caratterizzato da:  $d = (2,5 - 3,7) \text{ mm}$  e  $\rho = (1195 \pm 1) \text{ kg/m}^3$

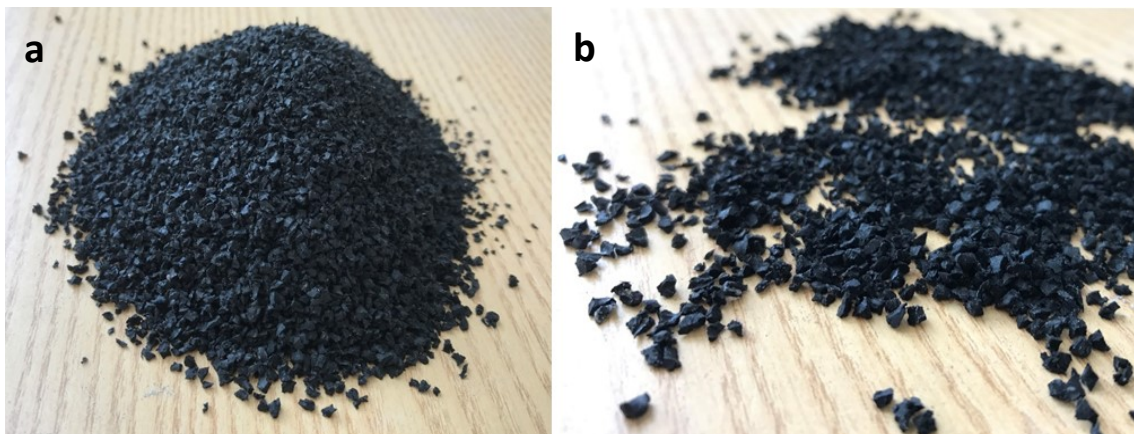


Figura 2.9 - Pneumatici fuori uso (PFU): (a) polverino di gomma; (b) granulato di gomma

## 2.3 Fumo di silice

Rispetto alle miscele cementizie convenzionali al fine di conferire allo stesso tempo fluidità all'impasto, quando posto in movimento, e coesività all'impasto, in fase di arresto del flusso, si è pensato di impiegare un'aggiunta minerale tixotropica. Tra le varie possibilità, dopo una serie di test condotti mediante misure reologiche su paste cementizie, si è optato per un fumo di silice con finezza pari a  $18 \text{ m}^2/\text{g}$ . Il fumo di silice è un sottoprodotto della lavorazione del silicio e delle leghe ferro-silicio. Esso si presenta sotto forma pressoché pura di silice amorfa finemente suddivisa.



Figura 2.10 - Fumo di silice

Se usato congiuntamente ad un additivo superfluidificante permette di raggiungere rapporti di acqua/cemento eccezionalmente bassi, pur conservando una buona lavorabilità nell'impasto.

Le miscele cementizie confezionate con impiego di fumo di silice raggiungono elevate resistenze meccaniche a compressione e vedono aumentare la loro impermeabilità e la loro durabilità.

I possibili meccanismi, attraverso i quali il fumo di silice migliora in modo straordinario le proprietà dei materiali cementizi, potrebbero essere fondamentalmente ricondotti a due effetti: l'effetto filler e quello pozzolanico. Le particelle di fumo di silice sono da 10 a 100 volte più piccole dei granuli di cemento, perciò vanno a sistemarsi negli spazi esistenti tra i granuli di cemento grazie all'effetto deflocculante imputabile alla presenza di additivo superfluidificante. Come è noto in letteratura scientifica si definisce pozzolanico un materiale ricco in silice amorfa e ad elevato sviluppo superficiale, capace di combinarsi, a temperatura ambiente, con l'idrossido di calcio liberato dall'idratazione del cemento così da provocare una struttura più ricca in idrosilicati di calcio. Il fumo di silice è un eccellente materiale pozzolanico grazie all'elevato contenuto di silice amorfa ed all'elevata area superficiale.

Nella sperimentazione in oggetto è stato utilizzato un fumo di silice avente le caratteristiche riportate nella tabella 2.7 seguente.

Tabella 2.7 - Caratteristiche del fumo di silice

<b>Caratteristica</b>	<b>Risultato</b>	<b>Metodo</b>
Stato	Polvere	Visivo
Colore	Grigio scuro	Visivo
Umidità	Max 40%	IST. 10.04
Massa volumica	$0,750 \pm 0,1 \text{ kg/dm}^3$	IST. 10.07
Solubilità in acqua	Insolubile	IST. 10.21
Granulometria	Min 98% < 0,18 mm	IST. 10.09

## 2.4 Acqua

La presenza di acqua è indispensabile nel processo produttivo del calcestruzzo. Senza l'acqua è impossibile realizzare il conglomerato cementizio dal momento che il cemento non viene idratato e quindi non indurisce.

Parallelamente, l'impiego di un'eccessiva quantità di acqua può interferire con le proprietà del calcestruzzo stesso: un elevato rapporto acqua-cemento (a/c) favorisce la lavorabilità, andando però a discapito della resistenza meccanica e della durabilità del conglomerato cementizio, di conseguenza tale rapporto deve essere opportunamente determinato.

La scelta del rapporto a/c è stata effettuata con lo scopo di raggiungere il massimo della resistenza meccanica possibile tenendo tuttavia presente anche l'influenza che il quantitativo di acqua svolge nei confronti della lavorabilità del materiale, quest'ultima va scelta, soprattutto, in funzione della tecnica di formatura degli elementi strutturali.

La diminuzione dell'acqua d'impasto comporta una riduzione della lavorabilità che può essere, però, compensata con l'impiego di additivi superfluidificanti. Tuttavia, oltre un certo dosaggio di questi additivi (1-2%), soprattutto in calcestruzzi con dosaggi non elevati di cemento, si verificano fenomeni di segregazione, di bleeding e ritardi nell'idratazione del cemento. Alla luce di queste considerazioni, il rapporto a/c viene ottimizzato cercando di ottenere un buon compromesso tra caratteristiche meccaniche e lavorabilità.

## 2.5 Additivi

### 2.5.1 Additivo superfluidificante

Come già accennato un altro ingrediente fondamentale per la messa a punto della reologia delle miscele cementizie estrudibili è stato un additivo chimico con effetto superfluidificante.

L'additivo superfluidificante migliora la lavorabilità dell'impasto e la sua messa in opera facendo risultare il calcestruzzo e le malte più plastici e più lavorabili, più coesivi e più pompabili. Gli additivi superfluidificanti sono aggiunti all'impasto in misura variabile tra lo 0.6-2.0 % e consentono di ridurre l'acqua di impasto rispetto a quella di un conglomerato di pari consistenza non additivato. La riduzione dell'acqua d'impasto è finalizzata alla diminuzione del rapporto a/c, lasciando invariato il dosaggio di cemento, e ciò consente di diminuire la porosità e la capillarità del conglomerato ottenendo calcestruzzi con maggiore impermeabilità e durabilità oltre ad un miglior faccia-vista, minor ritiro e deformazioni viscosse. In alternativa tale additivo può consentire di lasciare invariato il rapporto a/c diminuendo il dosaggio di cemento. Ciò consente di ridurre i costi di produzione della miscela, lo sviluppo di calore a seguito della reazione di idratazione del cemento con l'acqua ed aumentare il volume della frazione lapidea nella miscela al fine di attenuare il ritiro igrometrico e minimizzare il quadro fessurativo.

Tra vari prodotti esistenti in commercio con diverse formulazioni sulla base di test reologiche condotti con reometro rotazionale su paste cementizie si è optato per un additivo in polvere a base di polimeri policarbossilici di ultima generazione che ha permesso di soddisfare sia il requisito di fluidità in fase di estrusione sia di garantire una adeguata cinetica di reazione del cemento e del fumo di silice nei dosaggi previsti.

Si tratta di un superfluidificante in polvere con le caratteristiche presentate nella tabella 2.7 seguente.

Tabella 2.8 - Proprietà dell'additivo superfluidificante

Caratteristica	Risultato
Composizione chimica	Polimerico policarbossilico
Stato	Polvere
Colore	bianco-beige
Densità	max. 0,750 kg/dm <sup>3</sup>
Granulometria	min. 96% < 0,600 mm
Contenuto in cloro	max. 0,05%
Umidità	max. 4%
Solubilità in acqua	totale
Temperatura d'impiego	>0 °C

Tale additivo migliora la lavorabilità dell'impasto, la sua messa in opera rendendo il calcestruzzo più lavorabile, plastico, coeso e pompabile.

Nella sperimentazione oggetto di analisi l'impiego di additivi superfluidificanti è stato giustificato dalla necessità di ottenere una buona lavorabilità delle miscele che fosse compatibile con il sistema di estrusione adottato e che risulta essere difficilmente ottenibile in assenza di additivo, dati i bassi valori del rapporto acqua/cemento prefissati.

### 2.5.1.1 Additivo riduttore del ritiro

Si è ritenuto opportuno impiegare anche un additivo riduttore del ritiro.

Gli additivi riduttori del ritiro per i sistemi cementizi riducono sia il ritiro plastico sia il ritiro igrometrico agendo sulla tensione superficiale dell'acqua prima della fine presa e durante l'indurimento. Il prodotto selezionato è costituito da una polvere costituita da una miscela di alcoli alifatici polifunzionali.

Tabella 2.9 - Proprietà dell'additivo riduttore del ritiro

Caratteristica	Risultato	Metodo
Stato	Polvere igroscopica	
Colore	Bianco	visivo
Densità	0,300-0,450 kg/dm <sup>3</sup>	visivo
Materia attiva	min, 60% Anti cracking max. 40%	IST 10.04
Granulometria	min. 90% < 0,180 mm	IST 10.09
Umidità	max.5,0%	IST 10.04
Contenuto in Cl <sup>-</sup>	<0,05%	IST 10.34
Solubilità in acqua	Parzialmente solubile	IST 10.21

Permette una riduzione del ritiro complessivo di circa il 50% dopo 28 giorni e del 30% dopo un anno, per cui la tendenza alla fessurazione si riduce notevolmente. Il problema della fessurazione è particolarmente significativo per miscele cementizie estruse in assenza di casseforme in quanto il materiale risulta subito esposto all'aria e non può giovare dell'effetto protettivo dello stampo. Il ritiro infatti è una contrazione del materiale che si manifesta subito dopo la posa in opera del calcestruzzo con l'evaporazione dell'acqua d'impasto. La conseguente fessurazione comporta conseguenze negative sia dal punto di vista estetico che di durata dell'opera.

Se l'utilizzo di additivi SRA è accompagnato da quello di superfluidificanti policarbossilici, è possibile ottenere una serie di effetti estremamente benefici per la riduzione del ritiro, ovvero:

- riduzione della tensione superficiale dell'acqua contenuta nei pori capillari per la presenza dell'SRA, con conseguente diminuzione della pressione capillare che spinge l'una verso l'altra le particelle di cemento;
- riduzione dell'acqua d'impasto e del contenuto di cemento a pari rapporto acqua/cemento, con conseguente aumento del contenuto degli aggregati che provoca una diminuzione del ritiro.

Tuttavia, sebbene l'unione tra additivi SRA e superfluidificanti policarbossilici permetta di ridurre il ritiro, dando origine ad una miscela a ritiro compensato, non è in grado di annullarlo completamente.

### 2.5.1.2 Agente espansivo

Proprio per preservare l'integrità del manufatto da eventuali microfessure si è deciso di adottare una precauzione aggiuntiva ovvero l'impiego di un agente espansivo.



Figura 2.11 - Agente espansivo

L'agente espansivo ha il compito di provocare un aumento di volume nel materiale cementizio tale da poter compensare il ritiro.

L'idea di base è quella bilanciare le sollecitazioni di trazione differite prodotte dal ritiro igrometrico impedito con una pre-compressione del calcestruzzo ottenuta mediante l'introduzione di un agente espansivo.

Nel caso in esame, dopo una comparazione tra diversi tipi disponibili in commercio, si è optato per un agente espansivo a base di ossido di calcio le cui caratteristiche sono riportate nella seguente tabella.

Tabella 2.10 - Proprietà dell'agente espansivo

<b>Caratteristiche</b>	<b>Risultato</b>
Stato	Polvere
Colore	Bianco
Densità	2,86 g/cm <sup>3</sup>
Massa volumica apparente	0,8-0,9 g/cm <sup>3</sup>
Superficie specifica	3700 cm <sup>2</sup> /g



## 3 Introduzione alle fasi sperimentali

---

Nel capitolo precedente sono state descritte le caratteristiche dei principali materiali utilizzati nella preparazione delle miscele oggetto di studio. Di seguito saranno descritte le modalità di confezionamento delle miscele, le diverse tecniche di estrusione e le prove di caratterizzazione meccanica condotte nel corso della sperimentazione.

### 3.1 Modalità di preparazione delle miscele

Il confezionamento della miscela allo stato fluido è un processo composto da diverse fasi consequenziali di diversa durata. Tale procedimento è stato standardizzato per tutti i lavori che saranno presentati nei capitoli successivi.

La prima fase della preparazione della miscela è consistita nella pesatura dei singoli ingredienti, a questa segue la fase della miscelazione.

Il primo step è quello relativo al premix di tutti gli elementi in polvere che compongono il mix design, questi vengono introdotti in un contenitore e miscelati a secco per rendere il composto più omogeneo possibile.

Al premix così ottenuto va aggiunta l'acqua che costituisce la componente necessaria ad innescare la reazione di idratazione del cemento. Ovviamente il quantitativo di acqua aggiunto all'impasto è stabilito per ottenere un determinato rapporto acqua/cemento e quindi raggiungere ben definite caratteristiche meccaniche del materiale. Tale quantitativo, inoltre, deve essere definito anche in funzione della tipologia e del dosaggio di additivi utilizzati nella miscela.

In seguito all'aggiunta dell'acqua si passa alla miscelazione che, nella presente sperimentazione, avviene mediante l'impiego di un trapano miscelatore elettrico.

La durata della fase di miscelazione è tarata in funzione delle condizioni di temperatura e umidità relativa nelle quali ci si trova ad operare ma non supera mai i 12 minuti, durata che consente all'additivo superfluidificante di sviluppare la sua piena efficacia e garantisce l'ottenimento di una lavorabilità del materiale compatibile con il sistema di estrusione adottato.

Le tempistiche divise per fase sono presentate in tabella 3.1.

Tabella 3.1 - Durata delle fasi della miscelazione

FASI DELLA MISCELAZIONE	
LAVORAZIONE	DURATA
Premix delle polveri	45 sec
Aggiunta acqua	15 sec
Miscelazione	9 - 11 min

Il prodotto finale deve presentare una consistenza tale da essere estraribile ma allo stesso tempo consentire, una volta deposto per estrusione, la deposizione degli strati sovrastanti senza spanciare o crollare.



Figura 3.1 - Fasi della miscelazione

L'impasto così ottenuto viene quindi messo in opera con le modalità e le tecniche descritte nei paragrafi successivi.

## 3.2 Modalità di estrusione del materiale

In questo capitolo saranno descritte le diverse modalità di estrusione di cui ci si è avvalsi nel corso delle varie sperimentazioni che saranno trattate nei capitoli successivi.

Si noterà un'evoluzione del sistema dovuta ad una crescente comprensione delle problematiche relative al tema trattato e alla crescente disponibilità di attrezzature.

### 3.2.1 Sistema di estrusione iniziale

Il primo sistema di estrusione impiegato nel corso della ricerca è costituito da una sac à poche da pasticceria. L'impiego di tale sistema home-made è giustificato dal fatto che esso rappresenta un efficace strumento per validare le tre caratteristiche reologiche allo stato fresco della miscela da estrudere (print quality, shape stability, printability window).

La procedura di estrusione con l'ausilio di tale strumento prevede che il materiale allo stato fluido venga introdotto all'interno della sacca (sac à poche) e poi estruso utilizzando una pressione manuale che ne consente la fuoriuscita dal beccuccio.

La dimensione di apertura della sacca può essere modificata di volta in volta simulando anche l'utilizzo di ugelli di diversa dimensione.



Figura 3.2 - Esempio di estrusione tramite sac à poche

### 3.2.2 Sistema di estrusione di laboratorio

In una seconda fase è stato realizzato un sistema che non prevede sistemi di controllo elettronici e ausili robotizzati per la guida dell'ugello di estrusione, composto da attrezzature facilmente reperibili in commercio ed in laboratorio (Figura 3.3).



Figura 3.3 - Sistema di estrusione di prova

Tale sistema di estrusione è composto da tre elementi: un compressore, un serbatoio e una tavola vibrante collegati come mostrato nello schema di figura 3.4.

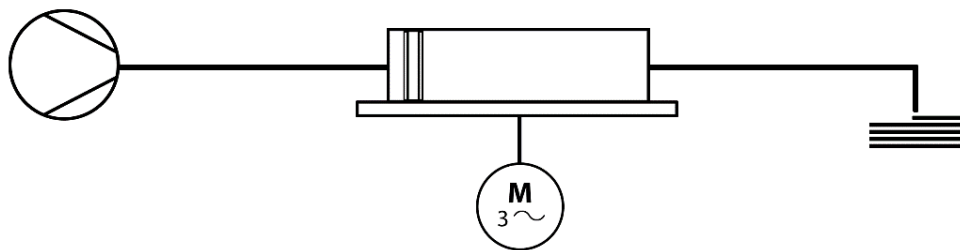


Figura 3.4 - Schema di collegamento dell'impianto

Il compressore è stato collegato tramite un tubo in pvc ad attacco rapido con un serbatoio cilindrico in alluminio tornito formato da:

- corpo cilindrico centrale in alluminio (in grado di contenere circa tre litri di miscela);
- tappo in entrata provvisto di valvola di sicurezza e di attacco rapido per aria compressa;
- tappo in uscita provvisto di innesto del tubo per l'espulsione del materiale;
- pistone in nylon;
- regolatore di pressione dotato di rubinetto;

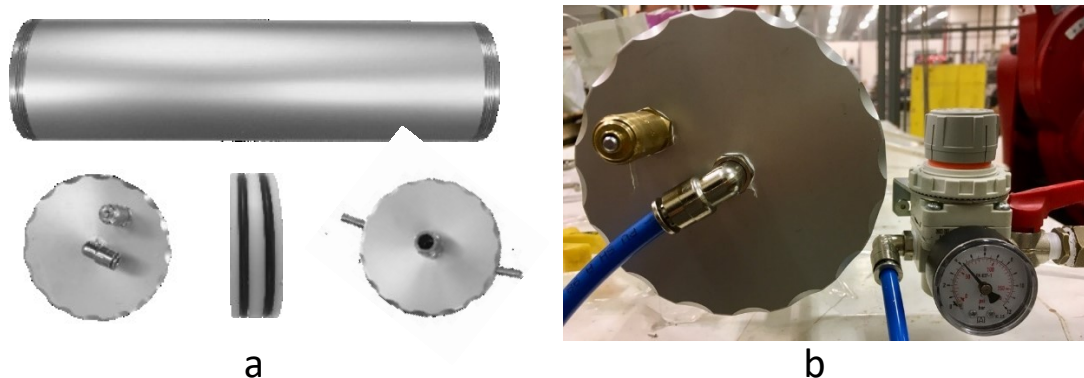


Figura 3.5 - Particolari del sistema di estrusione di prova: (a) componenti del serbatoio cilindrico in alluminio; (b) sistema di regolazione di pressione.

Il materiale allo stato fluido, preparato seguendo la procedura descritta al paragrafo 3.1, viene introdotto per colatura all'interno del serbatoio cilindrico che viene chiuso e connesso al compressore e al tubo di estrusione.

Il compressore mette in pressione il cilindro al cui interno il pistone cilindrico in nylon spinge il materiale in uscita verso un tubo in pvc da cui avviene l'estrusione per pressione. Il serbatoio è posto su una tavola vibrante per mantenere la lavorabilità richiesta dal sistema d'estrusione e la pressione può essere modificata tramite un regolatore di pressione.

Nel corso delle varie sperimentazioni condotte e descritte nei successivi capitoli, sono stati utilizzati due tubi in pvc di diverso diametro per l'estrusione. In particolare, un tubo di diametro interno pari ad 1 cm ed uno di diametro pari a 0,6 cm.

Le caratteristiche del sistema sono riportate nella tabella seguente.

Tabella 3.2 - Caratteristiche tecniche del sistema

CARATTERISTICHE SISTEMA DI ESTRUSIONE		
$r_{\text{SERBATOIO}}$	[cm]	5
$l_{\text{SERBATOIO}}$	[cm]	32
$h_{\text{PISTONE}}$	[cm]	5
$V_{\text{SERBATOIO}}$	[cm <sup>3</sup> ]	2121
$P_{\text{SERBATOIO}}$	[bar]	4

### 3.2.3 Sistema di estrusione robotizzato

Nel corso della sperimentazione e nell'ambito di un progetto di ricerca interdipartimentale si è riusciti ad apportare delle modifiche al sistema di stampa descritto al precedente paragrafo. In particolare, tale impianto è stato collegato ad un sistema di controllo del movimento robotizzato. Tale sistema prevede l'impiego di un computer che tramite un software di controllo impartisce comandi ad un robot Comau a tre assi (figura 3.6).

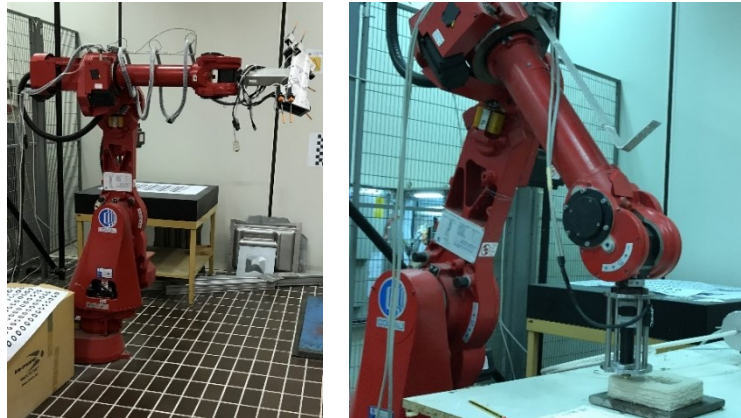


Figura 3.6 - Braccio robotico Comau a tre assi

Il sistema nel suo complesso è schematizzato in figura 3.7 ed è costituito dalle seguenti parti:

- a: compressore
- b: serbatoio cilindrico in alluminio con pistone
- c: pedana vibrante
- d: software di controllo
- e: braccio robotico e ugello di estrusione
- f: piano di stampa

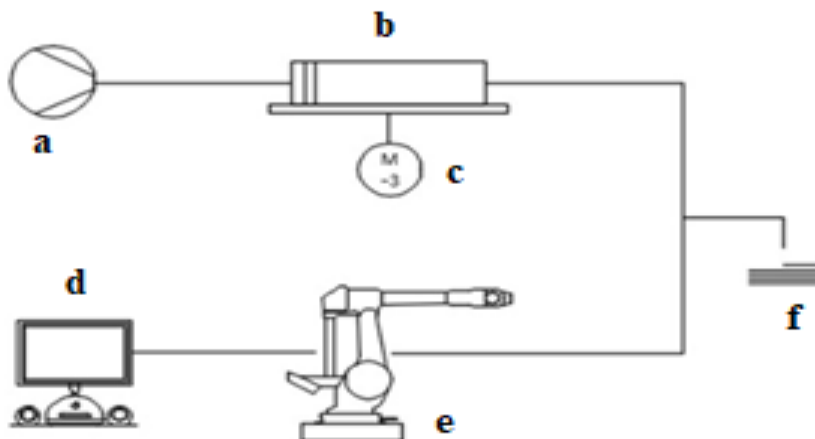


Figura 3.7 - Schema di collegamento del sistema di estrusione

In presenza di questo sistema la precedente procedura prevede delle fasi aggiuntive.

Come descritto nel paragrafo precedente il serbatoio contenente la miscela è messo in pressione da un sistema ad aria compressa, questa volta centralizzato, che garantisce una pressione costante di 4 bar controllata tramite manometro. Il serbatoio è posto su una pedana vibrante che tiene in movimento il materiale mantenendone la lavorabilità sfruttando la tixotropia della miscela. La pressione spinge il pistone interno che favorisce la fuoriuscita del materiale da un tubo in pvc che è utilizzato come terminale dell'estrusione a pressione (figura 3.8). Il tubo che diventa quindi l'ugello di estrusione è collegato alla testa del robot Comau che segue i movimenti impartiti da un software di controllo.



Figura 3.8 - Dettaglio dell'ugello di estrusione

L'ausilio del braccio robotico ha consentito di ottenere campioni e prototipi di geometria prefissata ottenendo un'ottima corrispondenza tra modello tridimensionale e oggetto finale.

La procedura prevede l'uso di un software per la modellazione solida tridimensionale, generalmente un software CAD, che permette di ottenere un disegno della geometria esterna dell'oggetto da stampare.

In seguito si procede con la conversione del disegno CAD in formato STL (*Standard Triangulation Language to Layer*). Il file in questione, considerando le superfici che sono state rappresentate con il modello CAD, calcola le sezioni triangolari nelle quali l'oggetto viene suddiviso.

Il file di tipo STL ottenuto viene quindi processato da software, denominati slicer, che suddividono il modello 3D in layers e traducono il file in istruzioni che guidano il braccio robotico nei movimenti e permettono la riproduzione tramite estrusione dell'oggetto.

Il software di slicing Cura® ha fornito il file di tipo GCode contenente le informazioni relative ai percorsi che il braccio ha seguito per la stampa di ciascuno strato. Tale software consente inoltre di impostare alcuni parametri necessari alla macchina per poter procedere con la sua messa in

funzione come, ad esempio, eventuali vincoli dei materiali, riempimento (infill) e spessore degli strati.

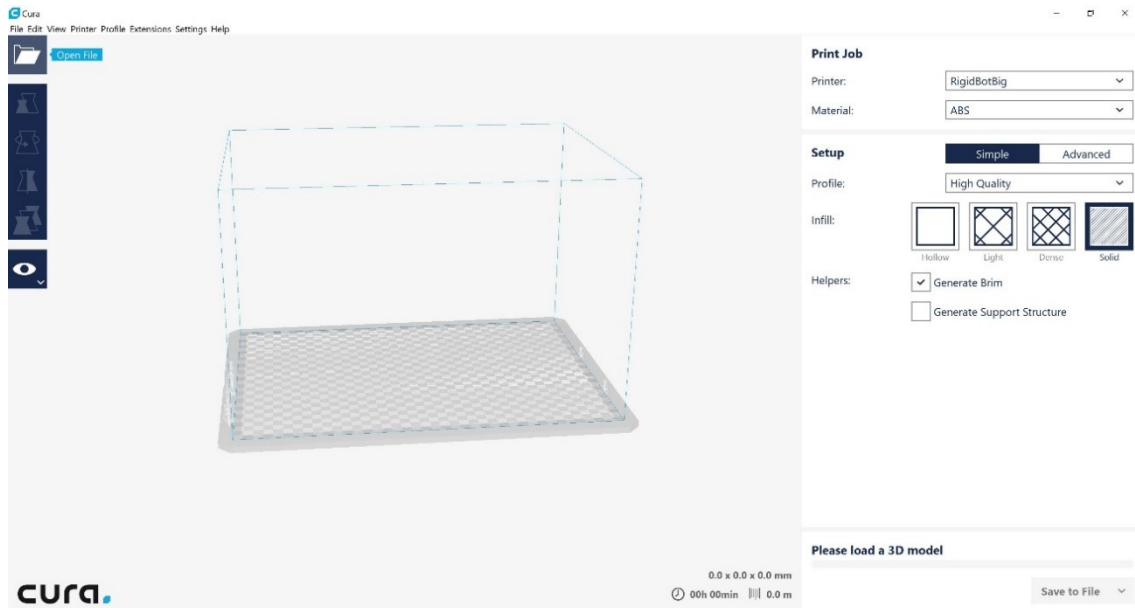


Figura 3.9 - Interfaccia grafica del software di slicing Cura®

Nelle varie sperimentazioni, lo spessore di ogni layer è stato inserito manualmente tenendo conto di un abbassamento dello strato di materiale estruso, dovuto alla consistenza plastica del materiale appena fuoriuscito dall'ugello e influenzato, in parte, anche dalla velocità di stampa. Questo abbassamento è pari a circa il 10-20% del diametro dell'ugello di estrusione ed è influenzato dalla fluidità del materiale.

### 3.3 Prove meccaniche

Sui provini ottenuti con le miscele e le modalità descritte nei paragrafi successivi, vengono effettuate delle prove di resistenza meccanica per caratterizzare il materiale da un punto di vista prestazionale e con l'obiettivo di validare il mix design di partenza ed eventualmente modificandolo per ottenere le resistenze ipotizzate in fase progettuale. A questo scopo le prove di resistenza saranno del tipo:

- Prova di resistenza a compressione;
- Prova di resistenza a flessione su tre punti.

Tali prove sono state condotte mediante l'utilizzo di una pressa idraulica munita di cella di carico collegata ad un terminale, in accordo alla norma UNI EN 196-1:2016. Attraverso la cella stato



possibile ricavare il valore della forza opposta dal provino all'avanzamento del pistone cilindrico, determinando quindi la resistenza a flessione e a compressione dei provini.

Le prove di resistenza meccanica a compressione e a flessione su tre punti saranno eseguite a diverse scadenze temporali. In particolare, sono state effettuate le prove di resistenza ad 1 giorno, 3 giorni, 7 giorni e 28 giorni di stagionatura.

Ciascun provino viene misurato e pesato al fine di determinarne la massa volumica. Per le caratteristiche dei provini si rimanda ai paragrafi successivi.



Figura 3.10 - Operazioni di misurazione e peso dei provini

### 3.3.1 Prova di flessione a tre punti

La prova consiste nell'applicare, mediante una pressa idraulica, una forza concentrata nella sezione di mezzeria del provino che risulta appoggiato alle estremità. In questo modo nella sezione di mezzeria si genera un momento flettente. Nel corso della prova si misurano lo spostamento del traverso della macchina di prova (coincidente con la freccia in mezzeria) ed il carico applicato (F). Da tali dati è possibile esprimere il risultato della prova su di un grafico sforzo-deformazione e calcolare le tensioni normali di trazione ( $\sigma_t$ ) nel lembo inferiore della sezione di mezzeria del provino dove viene applicata la forza concentrata. Nel calcolo viene adottata la formula di Navier che viene di seguito riportata:

$$\sigma_t = \frac{3}{2} \cdot \frac{FL}{B \cdot H^2}$$

Dove:

F: forza applicata (espressa in N);

L: interasse tra gli appoggi dell'apparecchiatura di prova (pari a 100 mm);

H: altezza del provino (espressa in mm)

B: base del provino (espressa in mm).

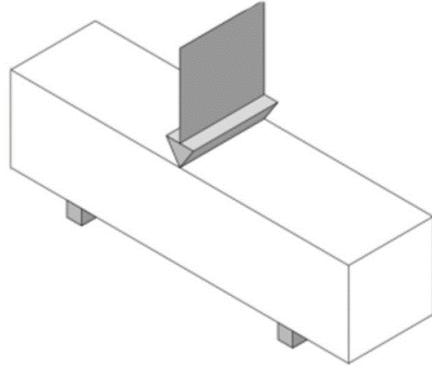


Figura 3.11 - Schema di carico della prova di flessione a 3 punti

Nella figura seguente è riportata l'apparecchiatura di prova utilizzata.



Figura 3.12 - Esecuzione della prova di flessione su 3 punti

La prova di flessione permette di determinare il modulo di Young e di stimare la tensione di rottura di materiali fragili; tale tensione deve essere indicata come la tensione di rottura a flessione ( $\sigma_f$ ).

La prova di flessione presenta i seguenti vantaggi:

- semplicità di esecuzione;
- geometria del provino semplice (generalmente si utilizzano provini di forma rettangolare);
- misurazione degli spostamenti più precisa.

Si precisa però che in tale prova la tensione varia linearmente lungo lo spessore, quindi lo snervamento viene raggiunto inizialmente solo in un sottile strato superficiale e superato il campo elastico gli spostamenti misurati non possono essere utilizzati per calcolare le deformazioni e di conseguenza l'unica informazione utile è la rottura. La prova a flessione risulta quindi poco sensibile per la determinazione dell'inizio dello snervamento ed è adatta alla caratterizzazione di materiali con comportamento lineare.

### 3.3.2 Prova di compressione

La macchina utilizzata è una pressa idraulica collegata ad un calcolatore per l'applicazione dei dati relativi al valore numerico della forza applicata e dello spostamento in termini di deformazione del provino attraverso l'utilizzo di un micrometro solidale al telaio della pressa e collegato al calcolatore. I risultati della prova sono dati numerici indicanti il valore della forza applicata dalla pressa sul provino (espressa in kN) ed il valore del corrispondente spostamento (espresso in mm), a partire dai quali è possibile esprimere il risultato della prova in un grafico forza-spostamento. A partire da tale grafico si ricava un ulteriore grafico in termini di sforzo-deformazione, note le dimensioni del provino dalle quali è possibile ricavare l'area di carico della pressa. Le tensioni normali ( $\sigma_c$ ), espresse in MPa, sono ricavate dividendo la forza per l'area di carico della pressa e sono state calcolate con la seguente espressione:

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

Dove:

F: forza applicata (espressa in N);

A: area (espressa in mm<sup>2</sup>).

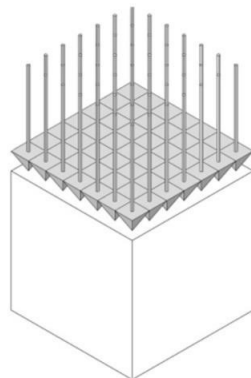


Figura 3.13 - Schema di carico di una prova di compressione



Figura 3.14 - Esecuzione di una prova di resistenza a compressione

Le deformazioni ( $\varepsilon$ ), espresse in mm, sono ricavate dividendo lo spostamento registrato dal micrometro per l'altezza del provino e sono state calcolate con la seguente espressione:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{H}$$

Dove:

$\delta$ : spostamento registrato dal micrometro (espressa in mm);

H: altezza del provino (espresso in mm).

Nella seguente figura sono riportate le modalità di rottura dei provini soggetti a prova di compressione, a sinistra le modalità ricorrenti di rottura, a destra quelle non corrette:

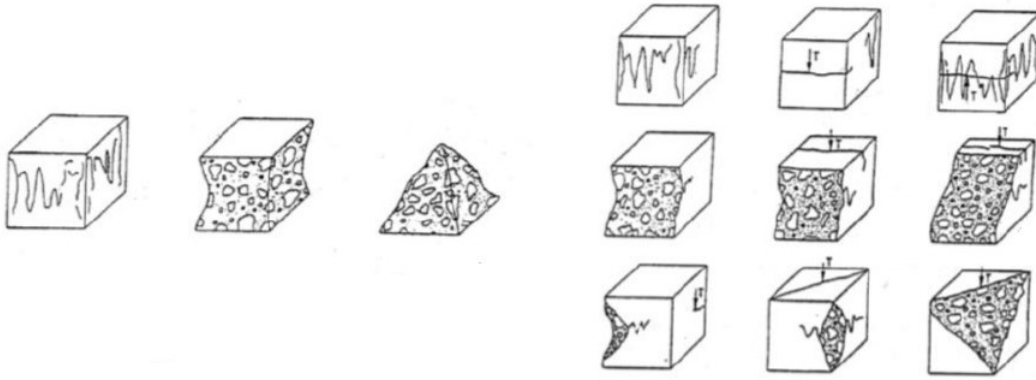


Figura 3.15 - Modalità di rottura possibili dei provini soggetti sforzi di compressione

La relazione tra tensione e deformazione ( $\sigma$ - $\epsilon$ ), consente di ricavare il legame costitutivo del calcestruzzo che è caratterizzato da un primo breve tratto (per valori di tensione del 30% della tensione di picco) che, a livello macroscopico, può essere considerato elastico-lineare. Si verifica, quindi un comportamento non lineare, con riduzione di rigidità, fino al raggiungimento della tensione di picco. Al crescere dello spostamento, si verifica un comportamento post-picco di tipo degradante, ossia con riduzione del carico al crescere della deformazione, fino al raggiungimento della rottura.

### 3.4 Prove non distruttive

#### 3.4.1 Print quality, shape stability, printability window

Lo studio oggetto di questa tesi si basa sull'ottimizzazione di materiali avanzati a base cementizia con diverse caratteristiche prestazionali e funzionali che hanno però, come punto comune, la condizione di dover soddisfare le caratteristiche di estrudibilità della miscela allo stato fresco.

Come già introdotto nel capitolo 1, le proprietà fondamentali da soddisfare sono:

- print quality
- shape stability
- printability window

Per verificare che tali requisiti siano soddisfatti si procede con prove di validazione non distruttive. È stata effettuata una valutazione puramente qualitativa per verificare quanto detto precedentemente.

La print quality è la proprietà che descrive la finitura superficiale, esprime la proprietà del materiale di consentire un'estrusione continua e priva di interruzioni, mantenendo una consistenza regolare che garantisce una stampa pulita e senza grumi, buchi e fessurazioni.

La seguente figura 3.16 mostra un esempio di buona e scadente print quality.

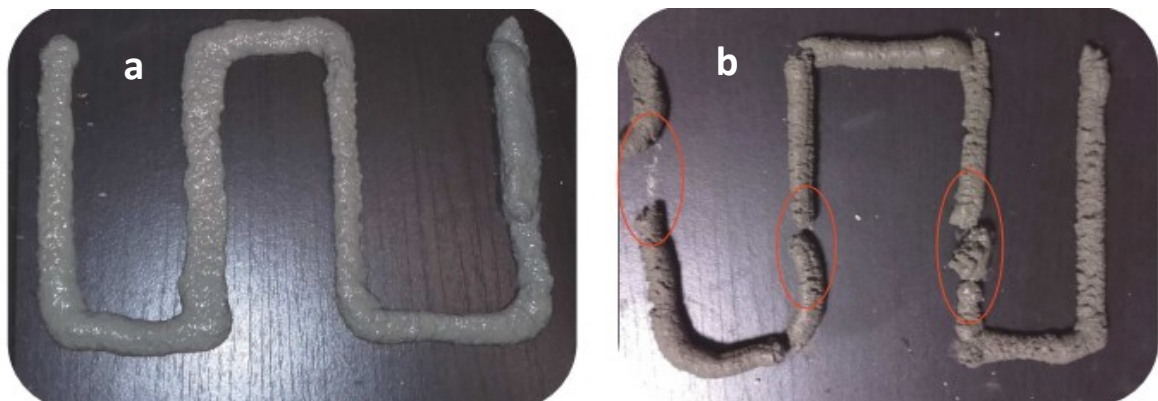


Figura 3.16 - Print quality test: (a) buona print quality; (b) print quality non accettabile

Per shape stability si intende, invece, la proprietà del materiale di non collassare, o sfaldarsi con spanciamenti eccessivi, durante la deposizione di layers successivi consentendo così il completamento della stampa.

Con lo scopo di verificare la capacità del materiale di autosostenersi e sopportare il peso dei layers superiori sono stati estrusi, con il metodo presentato al paragrafo 3.1, dei campioni composti da alcuni stati di materiale da cui è stato analizzato visivamente il comportamento dei layers di base (figura 3.17).



Figura 3.17 - Shape stability test effettuati in laboratorio: esempi di buona shape stability

Per printability window si intende il periodo utile durante il quale la miscela di stampa può essere estrusa dall'ugello mantenendo una qualità accettabile, considerando la perdita di lavorabilità in funzione del tempo. Tale parametro, influenzato sia dal mix design che dalla tipologia di estrusione adottata, deve essere sufficientemente lungo da consentire l'intera estrusione del manufatto in corrispondenza al modello da realizzare senza giungere al blocking limit, ossia il momento in cui non è più possibile far fuoriuscire la miscela dall'ugello.

Per quanto detto la printability window è un parametro facilmente controllabile e può essere modulato con un opportuno mix design che tenga conto delle esigenze realizzative, come ad esempio grandezza del manufatto da riprodurre, stima tempo necessario per l'estrusione, condizioni ambientali e sistema di estrusione.

## 4 Ottimizzazione di miscele cementizie estrudibili

La sperimentazione presentata in questo capitolo è volta allo studio e caratterizzazione meccanica di materiali a base cementizia con la comune caratteristica di risultare estrudibili, cioè di consentire la costruzione di un oggetto mediante la sovrapposizione di layers.

I vari mix design presentati differiscono nella composizione per indagare, attraverso step successivi, circa l'influenza di un determinato elemento sulle caratteristiche basilari che rendono il materiale adatto all'applicazione ai sistemi di estrusione e sulle prestazioni meccaniche del materiale allo stato indurito.

### 4.1 Studio del mix design delle miscele

Nel presente lavoro sono stati studiati 4 mix design differenti riportati in tabella 4.1. Il primo mix denominato riferimento è composto da cemento 42.5R, sabbia calcarea 0-0,4 mm, superfluidificante a base carbossilica in polvere e fumo di silice.

A partire dal riferimento sono state ottimizzate le successive due miscele denominate SRA e SRA+CaO che differiscono dalla prima rispettivamente per la presenza di un additivo riduttore del ritiro e la presenza congiunta di additivo riduttore del ritiro e di un agente espansivo a base di ossido di calcio.

Nell'ultimo mix, denominato SRA+CaO-FS, è stata prevista invece una riduzione del quantitativo di fumo di silice con lo scopo di diminuire il quantitativo di polveri fini e facilitare l'estrusione del materiale.

Tabella 4.1 – Mix design delle miscele oggetto della sperimentazione

MIX DESIGN	RIF [kg/m <sup>3</sup> ]	SRA [kg/m <sup>3</sup> ]	SRA+CaO [kg/m <sup>3</sup> ]	SRA+CaO-FS [kg/m <sup>3</sup> ]
Cemento 42,5R	800	800	800	800
Sabbia	1100	1100	1100	1100
Acqua	280	280	280	280
Superfluidificante	4	4	4	4
Fumo di silice	150	150	150	120
SRA	0	8	8	8
Agente espansivo	0	0	20	20



Per ciascuna miscela sono state effettuate prove non distruttive per la valutazione di print quality, shape stability e printability window, e prove di caratterizzazione meccanica di flessione su tre punti e di compressione.

## 4.2 Prove di estrudibilità

### 4.2.1 Print quality, shape stability, printability window

Il primo passo della sperimentazione è stato quello di valutare l'estrudibilità della miscela, questo ha richiesto, come descritto nei capitoli precedenti, la valutazione dei tre parametri: print quality, shape stability e printability window.

Il materiale allo stato fluido, preparato secondo la sequenza descritta al paragrafo 3.1 del capitolo 3, è stato colato all'interno di sac à poche per essere estruso secondo la modalità descritta al paragrafo 3.2.

L'estrusione manuale avvenuta attraverso un'apertura circolare praticata sulla sacca di diametro pari a 2 cm ha consentito la deposizione di alcuni strati di materiale col fine di valutare il grado di finitura dell'estrusione (print quality) e la capacità del materiale di sostenere il peso degli strati sovrastanti.



Figura 4.1 – Prove di estrusione: (a) RIF; (b) SRA; (c) SRA+CaO; (d) SRA+CaO-FS

Come visibile dalla figura 4.1, tutti i mix sono risultati estrudibili tramite sac à poche.

Il mix di riferimento ha presentato dei fenomeni fessurativi dopo l'indurimento e un'estrusione non omogenea come mostrato in figura 4.2 denotando una stabilità dimensionale scadente.

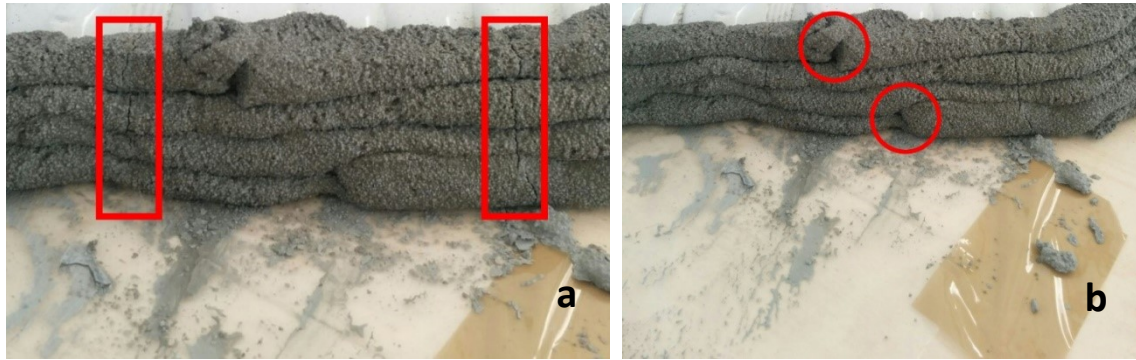


Figura 4.2 – Prova di estrudibilità della miscela RIF: (a) fessurazioni; (b) interruzioni di stampa

I mix che prevedono l'introduzione di un additivo riduttore del ritiro (SRA) e l'azione congiunta di riduttore di ritiro e agente espansivo (SRA+CaO) hanno eliminato i problemi di fessurazione che il riferimento aveva presentato 7 giorni di maturazione.

D'altra parte, è risultato evidente che l'aggiunta di agente espansivo (SRA+CaO) ha conferito maggiore viscosità alla miscela e conseguente difficoltà di estrusione, in particolare si nota una buona finitura ma un'estrusione discontinua. (figura 4.2).

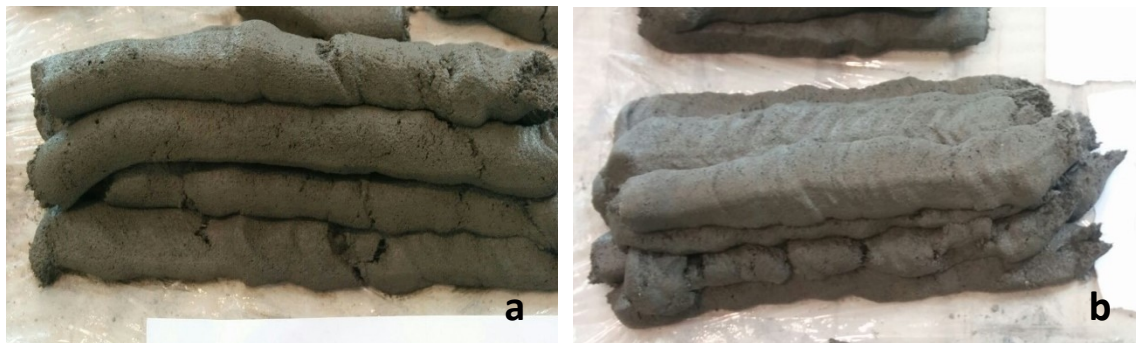


Figura 4.3 – Prova di estrudibilità delle miscele: (a) SRA, (b) SRA+CaO

Come è possibile vedere dalla immagine di figura 4.4, i problemi riscontrati durante l'estrusione del mix SRA+CaO sono stati risolti riducendo il quantitativo di fumo di silice nel mix SRA+CaO-FS.

Tale intervento ha apportato un miglioramento nella qualità della finitura superficiale e della stabilità dimensionale dell'estrusione, inoltre, l'assenza di collasso dimostra un'ottima shape stability.



Figura 4.4 – Prove di estrudibilità della miscela SRA+CaO-FS: (a) ottima shape stability; (b) buona conformità dimensionale; (c) ottima print quality.

### 4.3 Prove di caratterizzazione meccanica

In seguito alla verifica di estrudibilità delle miscele, come descritto al paragrafo precedente, si è passati ad una seconda fase di studio del comportamento meccanico.

A tale scopo, per ciascun mix design (precedente tabella 4.1) sono stati realizzati 9 campioni, prodotti colando la miscela allo stato fluido all'interno di casseforme senza l'ausilio della vibrazione. I provini di dimensioni 40x40x160 mm sono stati testati, con prove di flessione su tre punti e prove di compressione, a scadenze temporali di 1, 7, 28 giorni di maturazione, secondo le modalità descritte al precedente paragrafo 3.3. I risultati delle prove sono riportati di seguito.

#### 4.3.1 Prova di flessione a tre punti

La tabella 4.2 e il grafico 4.1 seguenti mostrano i risultati del confronto fra i risultati delle prove di resistenza meccanica a flessione per i 4 mix design in tabella 4.1.

Tabella 4.2 – Risultati delle prove meccaniche di flessione a tre punti

MATURAZIONE [gg]	$\sigma_{F\text{ MEDIA}}$ [MPa]			
	RIF	SRA	SRA+CaO	SRA+CaO-FS
1	7,09	6,30	5,87	7,63
7	8,60	8,66	7,18	8,38
28	9,57	8,59	9,33	9,53

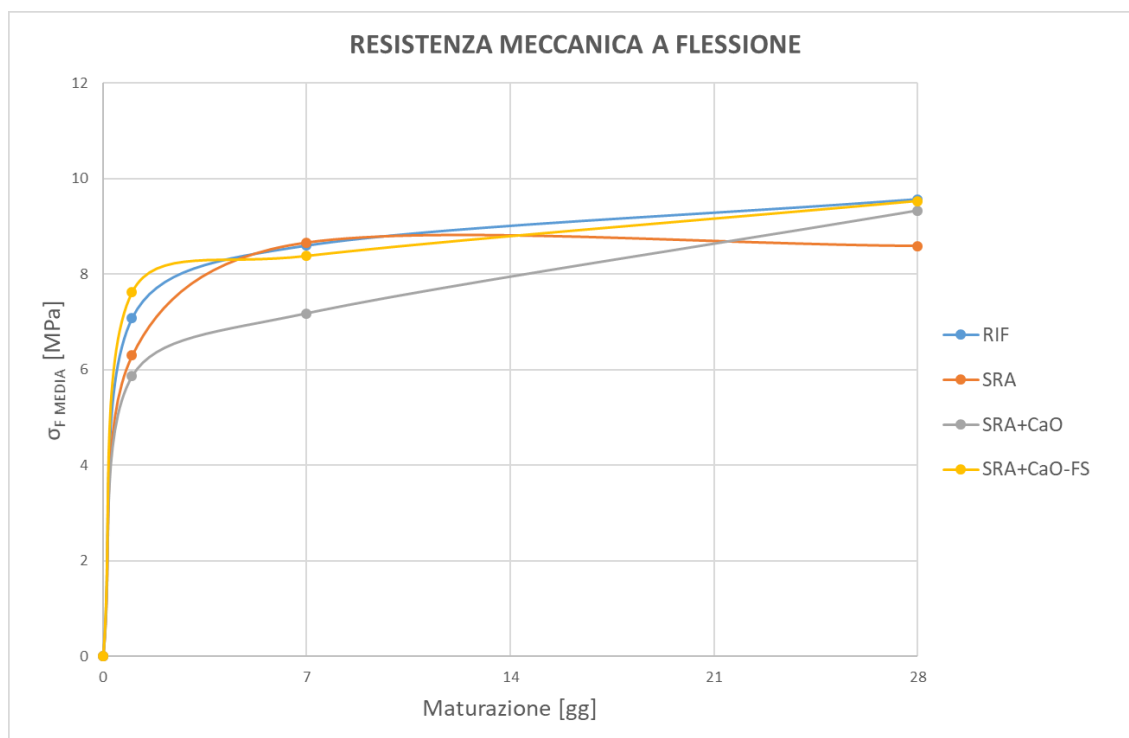


Grafico 4.1 – Resistenza meccanica a flessione su tre punti delle miscele

I risultati mostrati evidenziano un trend piuttosto uniforme, non si notano sostanziali differenze di valori medi di resistenza a flessione per le miscele studiate.

### 4.3.2 Prova di compressione

I risultati del confronto tra i valori medi di resistenza a compressione delle miscele sono mostrati nella tabella e nel grafico seguenti.

Tabella 4.3 - Risultati delle prove meccaniche di compressione

MATURAZIONE [gg]	$\sigma_{C\ MEDIA}$ [MPa]			
	RIF	SRA	SRA+CaO	SRA+CaO-FS
1	40,72	35,63	35,82	39,16
7	57,13	51,60	52,03	50,79
28	62,29	63,74	63,53	62,87

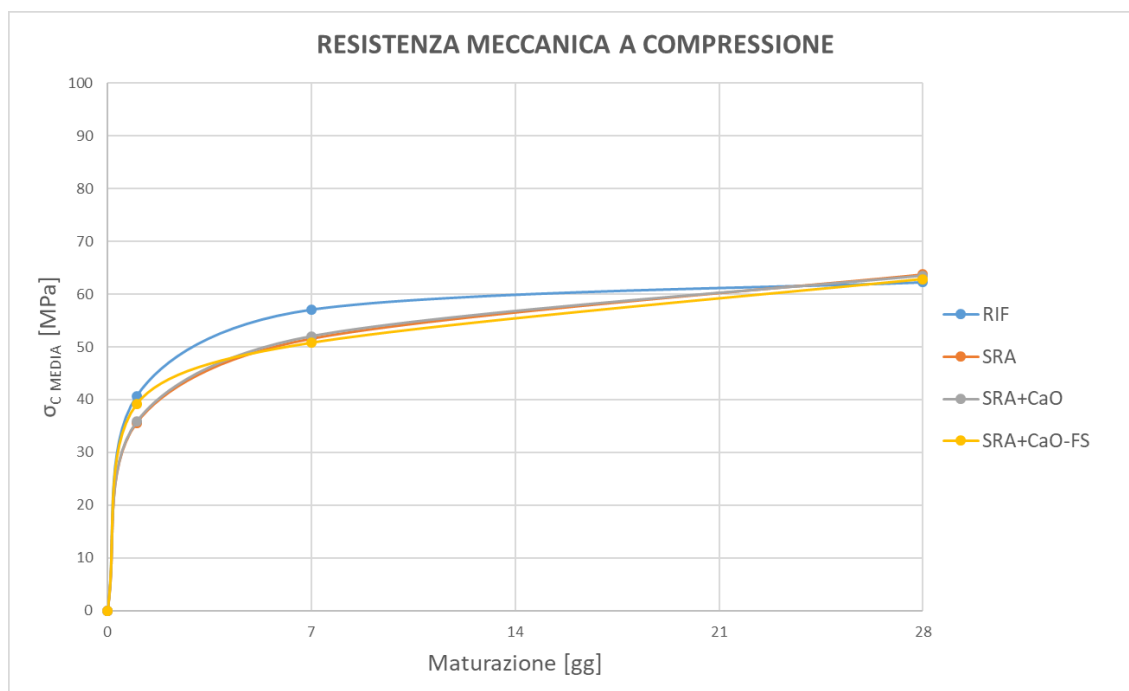


Grafico 4.2 - Resistenza meccanica a compressione delle miscele

Si noti che, anche per quanto riguarda il comportamento meccanico a compressione, i valori medi di resistenza a compressione variano in un range molto ristretto. I mix denominati SRA e SRA+CaO, contenenti rispettivamente additivo riduttore di ritiro e lo stesso additivo in combinazione con un agente espansivo a base di ossido di calcio, esprimono valori di resistenza minori alle brevi stagionature per poi recuperare a 28 giorni di maturazione, scadenza in cui evidenziano performances leggermente superiori rispetto al riferimento.

Oltre a ciò, è interessante notare inoltre che i valori di resistenza a compressione relativi alla miscela SRA+CaO-FS, contenente un quantitativo ridotto di fumo di silice, siano assolutamente in linea, sia alle brevi che alle lunghe maturazioni, con i risultati espressi dalle altre.

I risultati riportati suggeriscono anche che tutte le miscele hanno raggiunto un elevato grado di compattazione, anche in assenza di vibrazione. Questo è evidente anche dalla tabella 4.4 e grafico 4.3 seguenti in cui sono riportati i valori di densità.

Tabella 4.4 – Densità delle miscele

MATURAZIONE [gg]	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]			
	RIF	SRA	SRA+CaO	SRA+CaO-FS
1	2179,53	2119,95	2124,11	2207,68
7	2164,18	2114,67	2066,45	2134,91
28	2080,70	2135,04	2119,58	2089,87

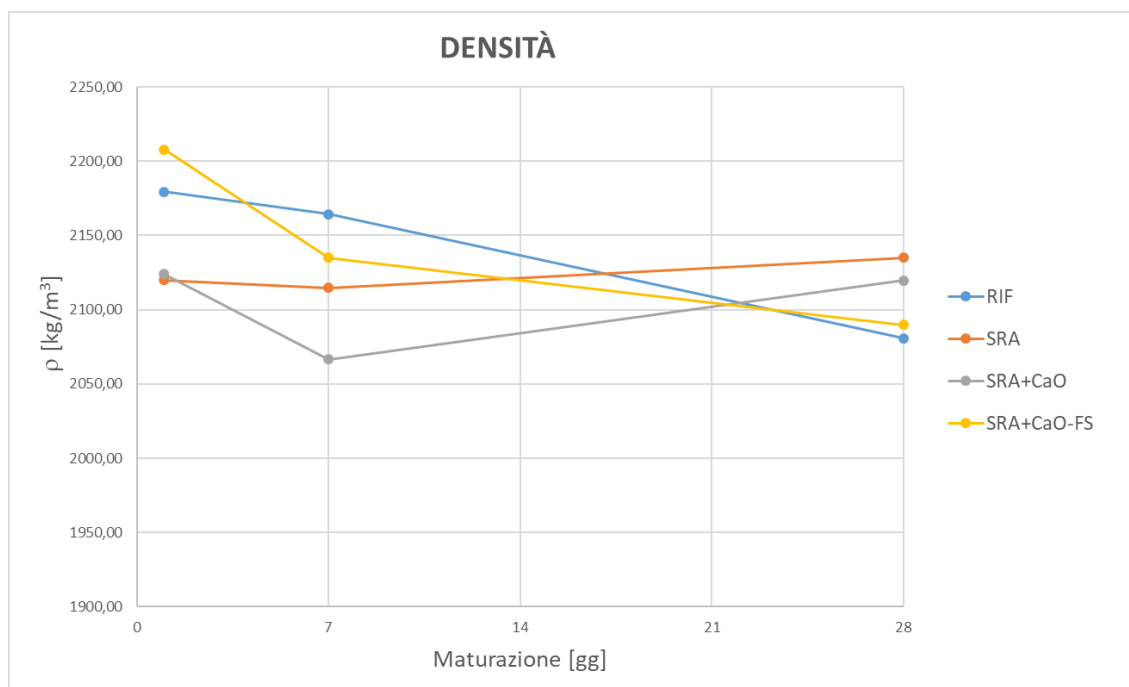


Grafico 4.3 - Densità delle miscele a 1, 7, 28 giorni di maturazione

Le densità dei 4 mix design sono paragonabili ed il loro andamento, come evidente dal grafico, rispecchia l'andamento rispecchia quello relativo ai valori medi di resistenza a compressione per i quali i mix SRA e SRA+CaO esprimono resistenze minori fino a 7 giorni per recuperare nel lungo periodo.

## 4.4 Conclusioni

L'attività di ricerca presentata in questo capitolo ha avuto come scopo quello di ottimizzare una formulazione di mix design che presentasse ottime caratteristiche meccaniche e risultasse allo stesso tempo estrudibile, rispondendo perfettamente ai requisiti fondamentali di print quality, shape stability e printability window.

Dal confronto tra le prestazioni meccaniche di flessione su tre punti e compressione condotte sulle 3 miscele, in seguito all'indurimento, è emerso che le variazioni apportate al mix design, in particolare l'aggiunta di un additivo riduttore di ritiro, di un agente espansivo e la riduzione del quantitativo di fumo di silice, non hanno influenzato in maniera evidente le prestazioni meccaniche che presentano valori paragonabili.

Al contrario, queste variazioni hanno influenzato le caratteristiche reologiche della miscela allo stato fresco condizionandone, di conseguenza, le possibilità di estruderle. Nello specifico l'aggiunta

di solo additivo riduttore di ritiro (SRA) e la combinazione congiunta di antiritiro e agente espansivo (SRA+CaO) hanno aumentato la viscosità della miscela a punto tale da rendere difficile l'estrusione e con un facing non rispondente ai requisiti di print quality. D'altra parte, queste aggiunte si sono rese necessarie per ovviare al problema della fessurazione presentato, ad indurimento avvenuto, dal mix di riferimento.

Le difficoltà legate all'estrudibilità e alla qualità di stampa dei primi tre mix design sono state risolte diminuendo il quantitativo di fumo di silice nel mix SRA+CaO-FS che è risultato estrudibile, con un'ottima finitura superficiale, stabilità dimensionale nel corso dell'estrusione e assenza di buchi o fessurazioni in seguito ad indurimento.

Per questi motivi il mix denominato SRA+CaO-FS è quello che presenta le caratteristiche più adatte per applicazioni nel campo dell'additive manufacturing.

## **5 Ottimizzazione di miscele cementizie estrudibili contenenti aggregati da riciclo**

---

Nella seguente sperimentazione sono state studiate miscele estrudibili contenenti aggregati di riciclo. A partire dal mix design di riferimento presentato al paragrafo 4.1 del capitolo precedente, denominato SRA+CaO-FS, sono state studiate tre differenti miscele: due contenenti PET e schiuma di vetro espanso, a sostituzione parziale dell'aggregato lapideo, ed una a base di calce idraulica a sostituzione totale del cemento come legante.

Su ciascuna delle miscele che saranno presentate nei paragrafi seguenti sono state condotte prove di estrusione e prove per valutarne il comportamento meccanico.

Di seguito si riportano in maniera maggiormente dettagliata il lavoro svolto, i risultati ottenuti e le conclusioni alle quali si è pervenuti.

### **5.1 Studio del mix design delle miscele**

Come descritto precedentemente, i mix design presentati nella seguente tabella XX, sono stati ricavati a partire dalla formulazione denominata SRA+CaO-FS, mantenendo di base gli stessi quantitativi di cemento, fumo di silice, additivo riduttore del ritiro, superfluidificante e agente espansivo e variando il quantitativo d'acqua in relazione alle necessità legate all'estrudibilità della miscela. Quindi si è intervenuti introducendo inizialmente il solo PET e in seguito PET e schiuma di vetro espanso a sostituzione parziale della sabbia calcarea presente nel mix di riferimento.

In particolare, è stata operata una sostituzione in volume: il 50% del volume di sabbia calcarea è stato sostituito, nella prima formulazione, da PET riciclato mentre nella seconda per il 25% da PET e per il restante 25% da vetro espanso.



Tabella 5.1 - Mix design delle miscele oggetto della sperimentazione

MIX DESIGN	PET [kg/m <sup>3</sup> ]	PET+VTR [kg/m <sup>3</sup> ]	NO CEM [kg/m <sup>3</sup> ]
Cemento	800	800	0
Calce idraulica	0	0	300
Fumo di silice	125	125	125
Sabbia calcarea 0-0,4 mm	550	550	550
PET 0-3 mm	190	95	95
Vetro espanso 0-3mm	0	25	25
Acqua	320	320	320
Superfluidificante	4	4	4
SRA	8	8	8
Agente espansivo	20	20	20

Come mostrato in tabella il mix denominato PET è stato ricavato utilizzando soltanto il PET riciclato sostituito al 50% dell'aggregato calcareo con lo scopo di rendere il composto più leggero.

Da questa prima formulazione è stato ottenuto il secondo mix denominato PET+VTR in cui il 25% del volume occupato dal PET è stato sostituito con lo stesso volume occupato dalla schiuma di vetro. Quindi, è stata ridotta la quantità di PET, che da 190 kg/m<sup>3</sup> è sceso a 95 kg/m<sup>3</sup>, introducendo 25 kg/m<sup>3</sup> di vetro espanso. Il vetro cellulare essendo più voluminoso e leggero del PET e dell'aggregato calcareo, occupa una porzione di volume maggiore ma minore in peso rispetto alla componente plastica. La componente vetrosa, infatti, ha una massa volumica compresa tra 120 e 190 kg/m<sup>3</sup> rispetto alla massa volumica del PET che è di circa 1380 kg/m<sup>3</sup>.

Il terzo mix presentato in tabella, denominato NO CEM, si differenzia rispetto ai due precedenti per il fatto che la matrice di cemento viene sostituita con la calce idraulica. In questo caso la sostituzione non è avvenuta in volume ma il contenuto di cemento è stato sostituito dalla quantità di calce idraulica che garantisce i medesimi risultati per quanto riguarda l'estrudibilità della miscela.

## 5.2 Prove di estrudibilità

### 5.2.1 Print quality, shape stability, printability window

Su ciascuno dei mix design in tabella 5.1 è stato eseguito un test per la valutazione dell'estrudibilità e delle capacità coesive del materiale.

In seguito alla realizzazione degli impasti, ottenuti tramite premiscelazione delle polveri e degli aggregati non lapidei a cui è poi seguita la miscelazione con aggiunta d'acqua, è stata simulata la realizzazione di un oggetto per sovrapposizione di strati (come mostrato in fig. 4.1) in modo tale da verificare la compatibilità di ciascuna miscela con le tecniche di produzione additiva.

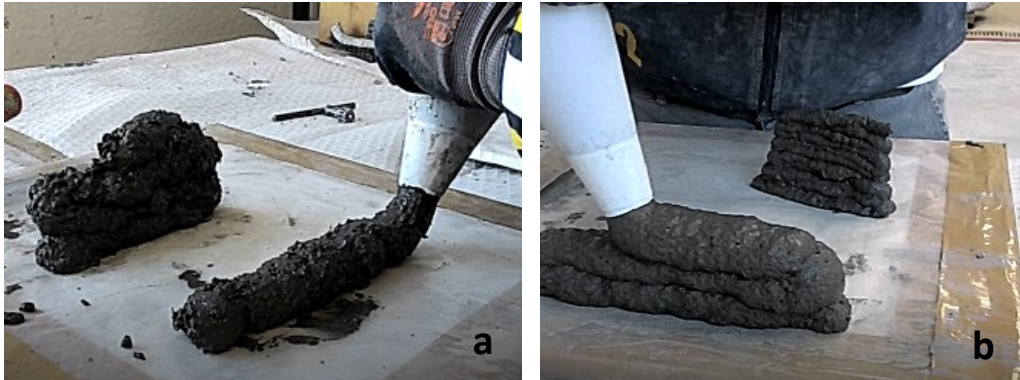


Figura 5.1 - Prove di estrusione delle miscele: (a) PET; (b) PET+VTR

Questi campioni hanno permesso la valutazione dell'estrudibilità, della finitura estetica (print quality) e della shape stability.



Figura 5.2 - Prova di estrusione della miscela PET

La figura 5.2 mostra la prova di estrudibilità condotta sulla miscela PET. Dall'immagine è visibile come la stabilità degli strati durante l'estrusione sia ottimale, non avviene uno sfaldamento degli strati inferiori e ogni strato, appunto, rimane delineato nel suo contorno. Per quanto riguarda la finitura, ha inciso negativamente la granulometria e l'irregolarità della forma del PET, che ha portato ad una superficie degli strati ruvida e granulosa, fattore comunque non preponderante ai fini dello studio, in quanto tutte le altre caratteristiche proprie della stampa additiva sono state ampiamente rispettate. Per quanto riguarda la printability window, per poter ricavare un intervallo

di tempo utile, è stato cronometrato il periodo dopo la miscelazione, entro il quale la miscela non sarebbe stata più estrudibile e nel quale la miscela non avrebbe offerto più la coesione necessaria a formare layer continui e di buona qualità. L'intervallo di tempo registrato è stato pari a 30 minuti. Questo dato, come espresso in precedenza, non ha alcun valore formale, ma serve in relazione alle altre miscele per valutare l'effetto dei diversi elementi presenti nell'impasto sulla printability window. Inoltre, è doveroso aggiungere che il tempo registrato deve essere relazionato con gli strumenti a disposizione in laboratorio, certamente non paragonabili con la tecnologia e le attrezzature robotiche di una stampante 3; in quel caso il periodo effettivo diventerebbe più lungo, tenendo presente la capacità di estrusione dell'ugello meccanico, in termini di pressione, e della possibilità di tenere la miscela sempre in movimento, evitando la presa e l'essiccamento che ne comprometterebbero la possibilità di stampa.

L'aggiunta della schiuma di vetro nella miscela PET+VTR, comporta una distribuzione granulometrica più assortita rispetto alla precedente, il che è di beneficio sia per la facilità di estrusione, provocando quindi meno ostruzioni all'imbocco della sac à poche (ugello), sia per il risultato estetico della finitura superficiale dei layer, come visibile nel dettaglio in figura 5.3.



Figura 5.3 - Prova di estrusione della miscela PET+VTR

In questo caso la qualità di stampa (print quality) risulta migliore rispetto al mix precedente, la stabilità degli strati durante la posa (shape stability) non ha subito modifiche così come la printability window, dato che i materiali all'interno dell'impasto sono in gran parte gli stessi, ad eccezione del vetro cellulare.

Per quanto riguarda la formulazione NO CEM, il quantitativo di calce, utilizzato come legante a sostituzione totale del cemento, è stato calibrato col fine di ottenere le stesse caratteristiche di estrudibilità della miscela di riferimento (SRA+CaO-FS). Come mostrato nella seguente figura 5.4, questo accorgimento ha permesso la deposizione layer by layer, il mantenimento di una buona shape stability e una finitura superficiale di scarsa qualità ma accettabile.



Figura 5.4 - Prova di estrusione della miscela NO CEM

### 5.3 Prove di caratterizzazione meccanica

Con il fine di indagare le caratteristiche meccaniche relative ad ogni miscela, per ciascuna di esse sono stati realizzati 9 provini prismatici di dimensioni 40x40x160 mm mediante l'utilizzo di casseforme in acciaio che permettono la preparazione contemporanea di tre campioni prismatici. La conservazione dei provini è avvenuta in ambiente interno, ad una temperatura di 20°C. Le prove meccaniche di flessione su tre punti e compressione sono state eseguite ad 1, 7, 28 giorni di maturazione.

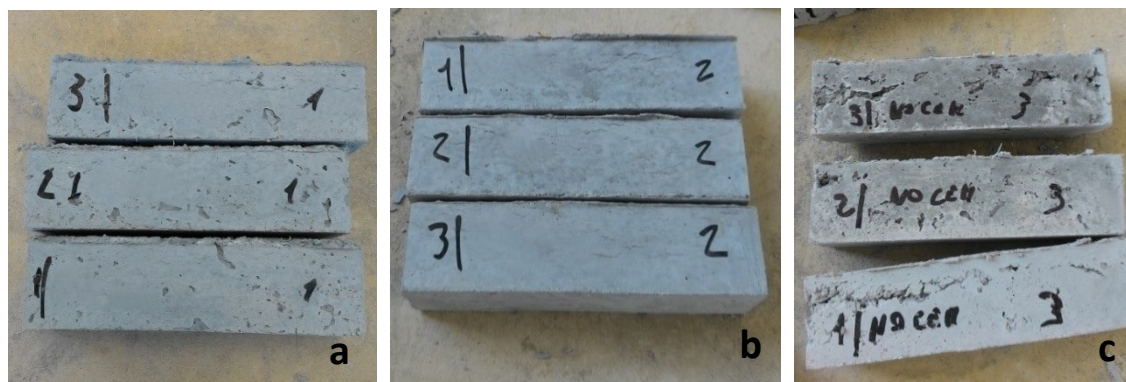


Figura 5.5 - Provini 40x40x160 mm: (a) PET; (b) PET+VTR; (c) NO CEM

### 5.3.1 Prove meccaniche di flessione a tre punti

La tabella ed il grafico seguenti mostrano i valori di resistenza media a flessione per ogni mix design ottenuti come media dei valori massimi di resistenza raggiunti da tre campioni per miscela ad ogni scadenza temporale.

Tabella 5.2 – Risultati delle prove di flessione a tre punti

MATURAZIONE [gg]	$\sigma_{F\text{ MEDIA}}$ [MPa]		
	PET	PET+VTR	NO CEM
1	4,25	4,13	1,81
7	5,05	5,37	3,07
28	5,75	5,60	3,15

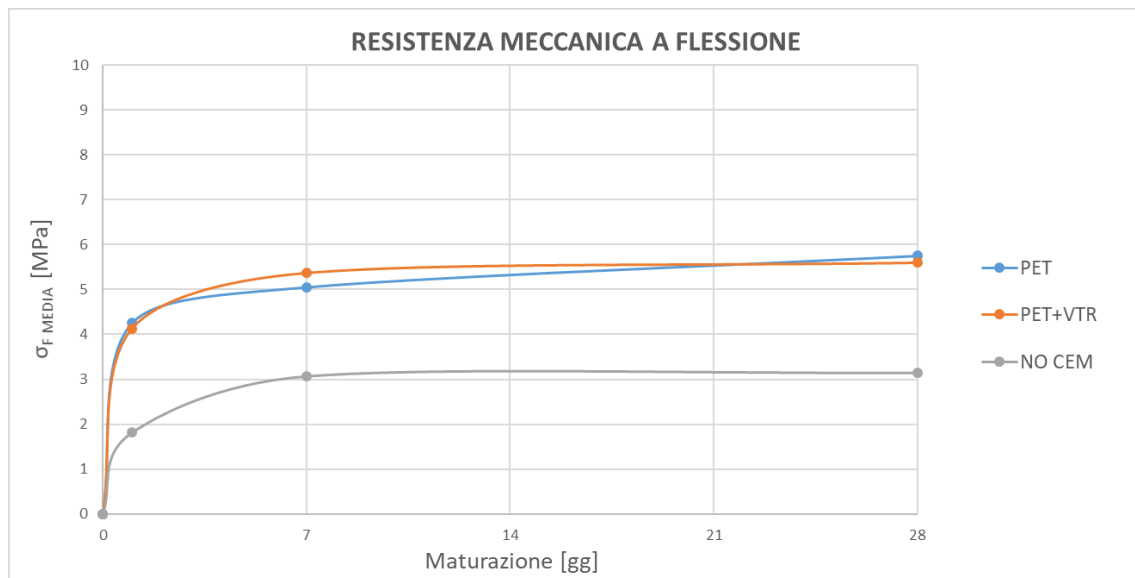


Grafico 5.1 - Resistenza meccanica a flessione su tre punti delle miscele

Dagli elaborati precedenti è possibile notare che le miscele PET e PET+VTR mostrano valori di resistenza a flessione variano in un range molto limitato; questo è dovuto al fatto che i due mix design sono molto simili per quanto riguarda i materiali contenuti e loro dosaggio.

La miscela denominata NO CEM, invece, presenta valori di resistenza a flessione minori rispetto alle altre due (in media -45% a 28 giorni) come ci si poteva aspettare visto la natura e la quantità di materiale legante utilizzato.

### 5.3.2 Prove meccaniche di compressione

I risultati delle prove meccaniche di compressione, condotte su sei campioni di ciascuna formulazione per ogni scadenza prefissata, sono illustrati nella tabella e nel grafico seguenti.

Tabella 5.3 - Risultati delle prove di compressione

MATURAZIONE [gg]	$\sigma_{C\text{ MEDIA}}$ [MPa]		
	PET	PET+VTR	NO CEM
1	15,86	17,34	4,77
7	21,38	27,54	11,45
28	23,50	28,50	14,50

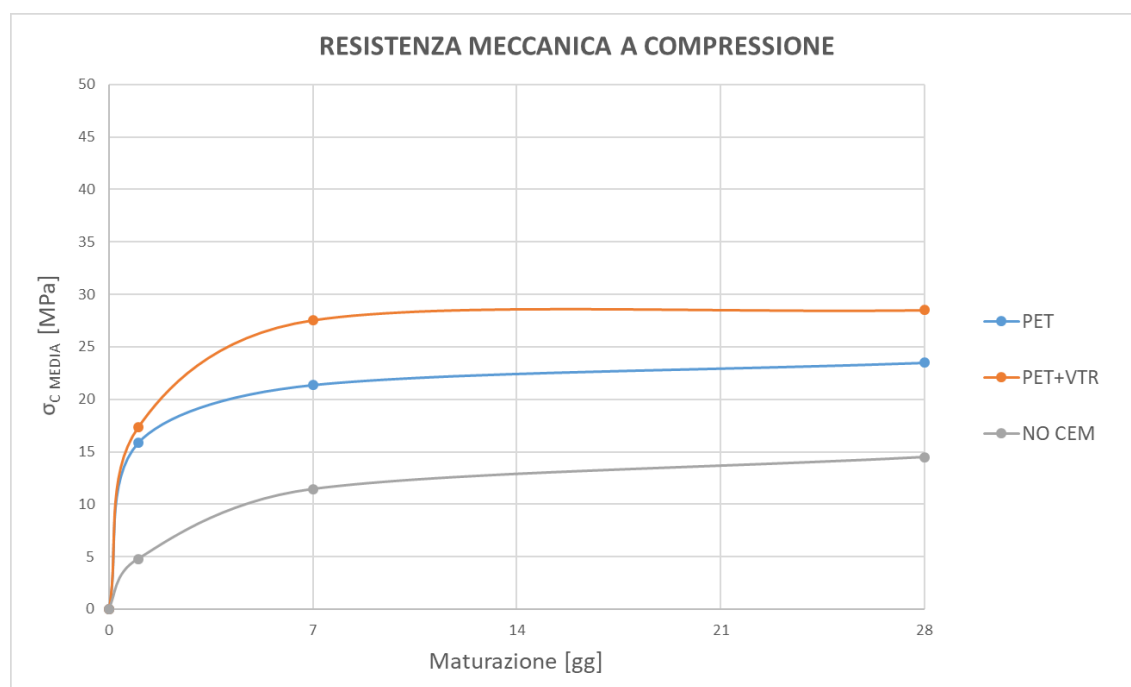


Grafico 5.2 - Resistenza meccanica a compressione delle miscele

Dall'elaborazione dei risultati emerge che la formulazione PET+VTR è quella che fornisce i migliori valori di resistenza a compressione sia alle brevi stagionature (1, 7 giorni) sia dopo 28 giorni di maturazione.

La miscela denominata PET mostra, invece, valori inferiori di circa il 20% rispetto alla prima, complice un peggior assortimento granulometrico come era parso evidente già dai test di estrusione.

Come ci si aspettava, la miscela NO CEM, anche a causa della scarsa quantità di legante e un conseguente rapporto acqua/legante più alto, è il mix che presenta i valori di resistenza a compressione più bassi.

## 5.4 Densità

I valori riportati di seguito nella tabella 5.4 e rappresentati nel grafico 5.3 dimostrano che, se da una parte l'introduzione di materiali di riciclo come aggregati, a sostituzione parziale della sabbia, e della calce idraulica, a sostituzione del cemento, hanno portato ad una perdita di prestazioni meccaniche ed estrudibilità nella miscela, dall'altra si è verificata una sostanziale diminuzione della densità.

Tabella 5.4 – Densità delle miscele

MATURAZIONE [gg]	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]		
	PET	PET+VTR	NO CEM
1	1881,45	1895,78	1637,42
7	1878,29	1868,43	1580,20
28	1867,15	1817,07	1508,78

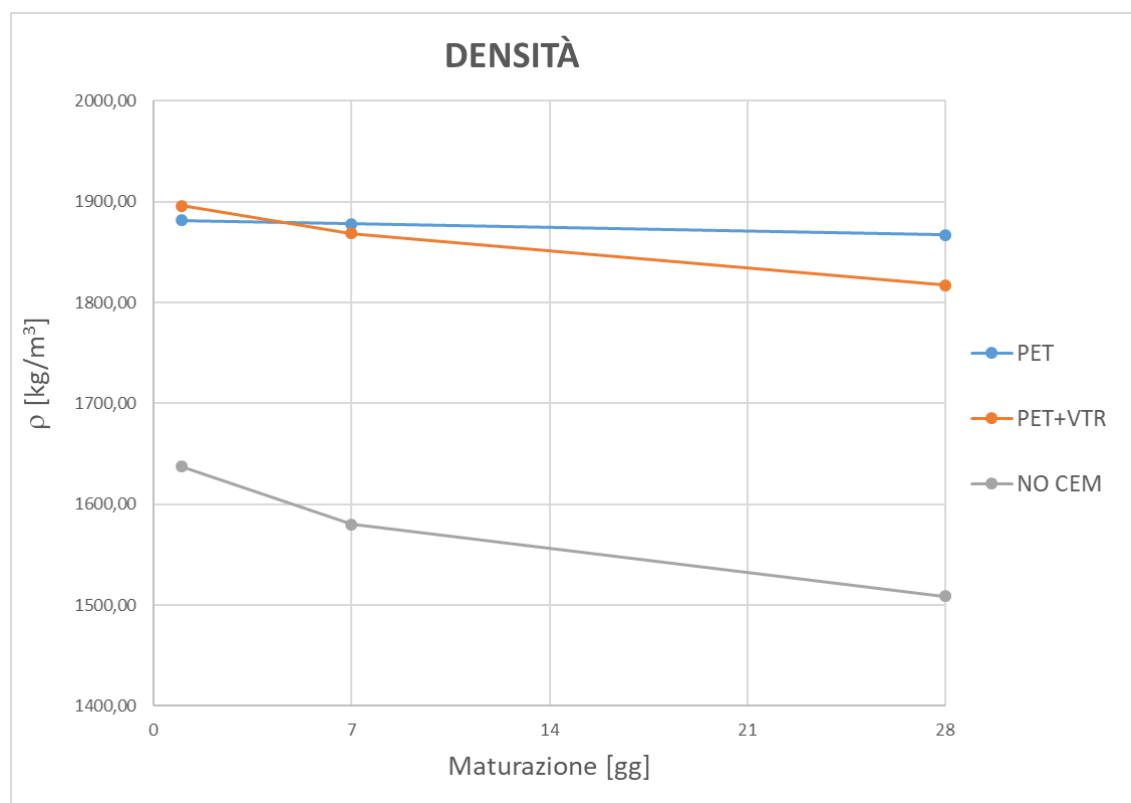


Grafico 5.3 - Densità delle miscele a 1, 7, 28 giorni di maturazione

I valori di densità relativi alla miscela PET e PET+VTR sono paragonabili, anche se a 28 giorni si può notare il beneficio portato dal vetro cellulare alla miscela PET+VTR. Questo gap, tuttavia, non è così importante come ci si aspettava perché, come dimostrato dalle prove di estrusione, l'introduzione della schiuma di vetro espanso ha migliorato la compattezza della matrice cementizia rispetto alla miscela PET.

## **5.5 Conclusioni**

In questo capitolo sono stati introdotti degli aggregati riciclati a sostituzione del 50% del volume di sabbia calcarea che componeva il mix di riferimento denominato SRA+CaO-FS, presentato al capitolo precedente. In un secondo momento è stata sostituita la componente di legante costituita dal cemento con la calce idraulica.

Lo scopo di tali interventi è stato quello di ottimizzare delle miscele estrudibili che risultassero leggere e consentissero il reimpiego di materiali di scarto o ecofriendly.

Alla luce di quanto detto e in base ai risultati ottenuti in termini di estrudibilità, densità e di prestazioni meccaniche, il mix PET+VTR è quello che si presta maggiormente per impieghi nell'additive manufacturing.



## 6 Ottimizzazione dell'effetto self-prestress nelle miscele estrudibili

---

Nella sperimentazione presentata di seguito, a partire dai mix design introdotti nel precedente capitolo 4, sono state ottimizzate due miscele su cui sono stati condotti test di resistenza meccanica, valutazione del ritiro e ulteriori test di resistenza meccanica per valutare l'adesione tra layers stampati (interlayered adhesion).

Come anticipato precedentemente è fondamentale che il calcestruzzo da estrarre raggiunga un alto grado di compattazione in assenza di vibrazione, la totale assenza di fessurazioni, che comprometterebbero la durabilità del manufatto e la finitura superficiale, ed infine una forte adesione nell'interfaccia tra strati successivi (interlayer) che garantisce l'integrità strutturale.

### 6.1 Mix design

Le due formulazioni testate differiscono per l'impiego di fibre metalliche in miscela, in particolare si definisce ordinary concrete (OC) il mix senza rinforzo fibroso, che corrisponde alla miscela ottimizzata al capitolo 4, e fiber reinforced high performance concrete (FRHPC) la miscela con l'aggiunta di fibre secondo il dosaggio ottimale. L'impiego del rinforzo fibroso è stato anche funzionale alla verifica dell'efficacia dell'effetto prestress, Sono state eseguite numerose prove e sono state selezionate tra tutte le due miscele aventi le ricette riportate in Tabella 5.

Tabella 6.1 - Mix design delle miscele OC e FRHPC

Materiale	OC [kg/m <sup>3</sup> ]	FRHPC [kg/m <sup>3</sup> ]
Cemento 52,5 R	800	800
Sabbia 0,4 mm	1100	1075
Fumo di silice	120	120
Additivo superfluidificante	4	4
Additivo antiritiro	8	8
Acqua	280	280
Agente espansivo	20	20
Fibre metalliche (l=12 mm)	-	75

Come indicato precedentemente, nel lavoro oggetto di studio si è fatto uso di fibre in acciaio flessibili (figura 6.1) capaci di amalgamarsi alla perfezione con la matrice cementizia, garantendone l'estrudibilità e allo stesso tempo ottime prestazioni meccaniche.



Figura 6.1 - Fibre d'acciaio impiegate nella miscela FRHPC

Le caratteristiche delle fibre adottate sono mostrate nella tabella seguente.

Tabella 6.2 - Caratteristiche delle fibre

<b>Fibre di acciaio flessibili</b>	
Lunghezza [mm]	12
Larghezza [mm]	1
Spessore [ $\mu\text{m}$ ]	24
Diametro equivalente [mm]	0.18
Rapporto lunghezza/diametro	83
Superficie specifica [ $\text{m}^2/\text{kg}$ ]	10
Densità [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	7200

## 6.2 Prove di estrudibilità

La verifica dell'estrudibilità della miscela ha richiesto, come descritto nei capitoli precedenti, la valutazione delle caratteristiche di print quality, shape stability e printability window in accordo con quanto descritto al paragrafo 3.4.1.

La valutazione delle 3 caratteristiche fondamentali è stata effettuata in seguito all'estrusione manuale delle miscele, secondo la procedura descritta al paragrafo 3.2.1. La deposizione di alcuni strati di materiale ha consentito di valutare il grado di finitura dell'estrusione (print quality) e la capacità del materiale di sostenere il peso degli strati sovrastanti. Come è possibile notare dalla figura 6.2, entrambe le formulazioni sono risultate estrudibili.

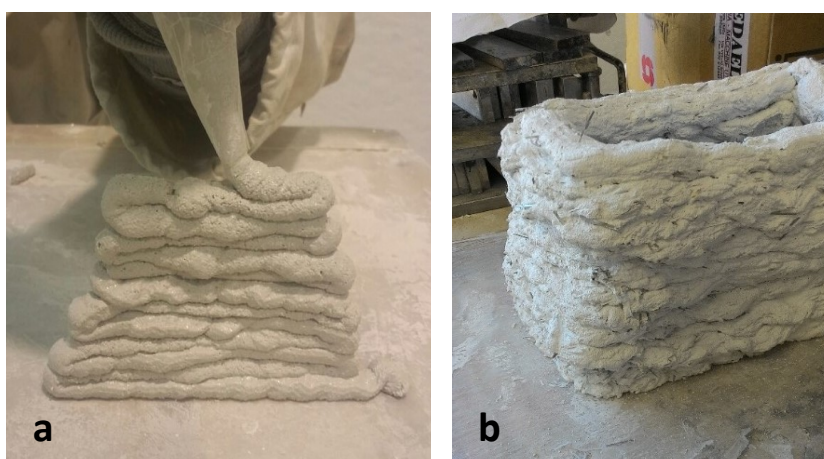


Figura 6.2 – Prove di estrudibilità: (a) OC; (b) FRHPC

## 6.3 Prove di caratterizzazione meccanica

Le prove di caratterizzazione meccanica sono state eseguite, per ciascun mix design (precedente tabella 4.1), su provini prodotti con la modalità descritta al precedente paragrafo 3.2.1.

I campioni sono stati testati, con prove di flessione a tre punti e prove di compressione, secondo le modalità descritte al precedente paragrafo 3.3. I risultati delle prove sono riportati di seguito.

### 6.3.1 Prove di flessione a 3 punti

La prova a flessione su provini 40 x 40 x 160 mm è stata condotta a 1, 7, 28 giorni di maturazione.

La tabella 6.3 e il grafico 6.1 seguenti mostrano i risultati del confronto fra i risultati delle prove di resistenza meccanica a flessione per i mix design in tabella 6.1.

Tabella 6.3 - Resistenza a flessione

MATURAZIONE [gg]	$\sigma_{F\text{ MEDIA}}$ [MPa]	
	OC	FRHPC
1	6,00	10,00
7	8,00	13,00
28	10,00	15,00

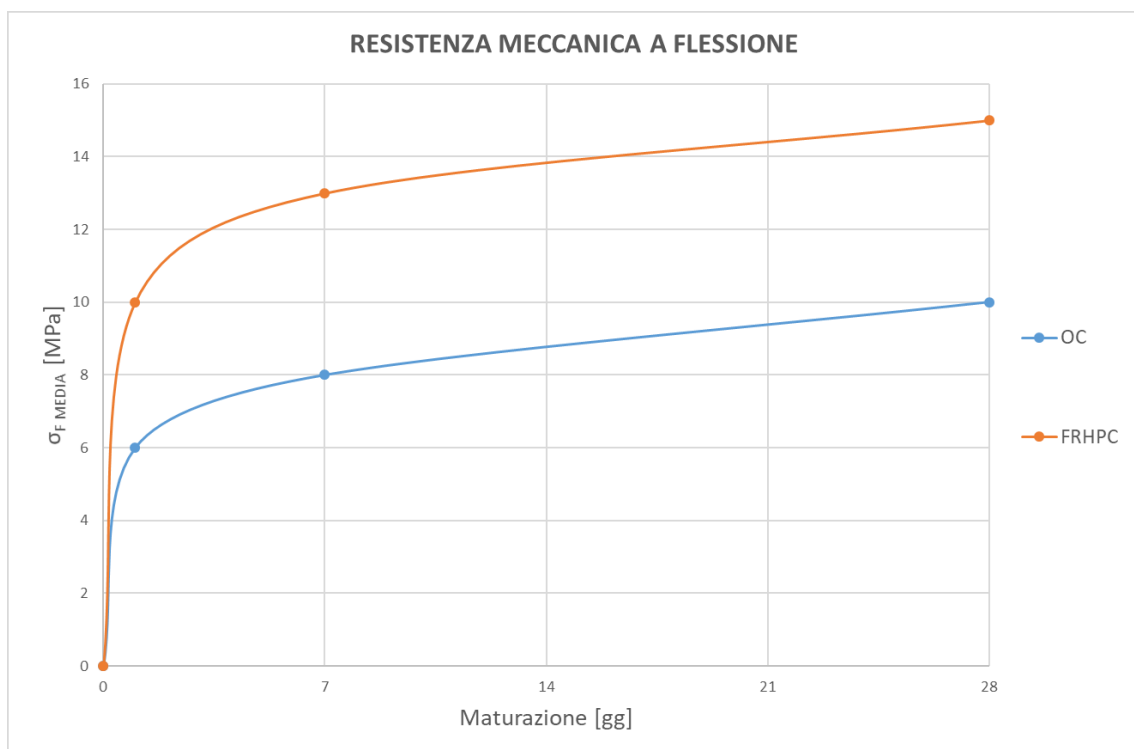


Grafico 6.1 - Resistenza a flessione (1, 7, 28 giorni di maturazione)

### 6.3.2 Prove di compressione

Le prove di resistenza a compressione sono state condotte su campioni cubici 40 x 40 x 40 mm a scadenze temporali di 75 min e 1, 3, 7, 28 giorni di maturazione.

I risultati del confronto fra i risultati relativi alle prove di resistenza meccanica a compressione dei mix OC e FRHPC sono riportati in tabella 6.4 e nel grafico 6.2 seguenti.

Tabella 6.4 - Resistenza a compressione

MATURAZIONE	$\sigma_{C\text{ MEDIA}}$ [MPa]	
	OC	FRHPC
75 min	12	14
1 giorno	27	49
3 giorno	42	63
7 giorno	53	74
28 giorno	60	91

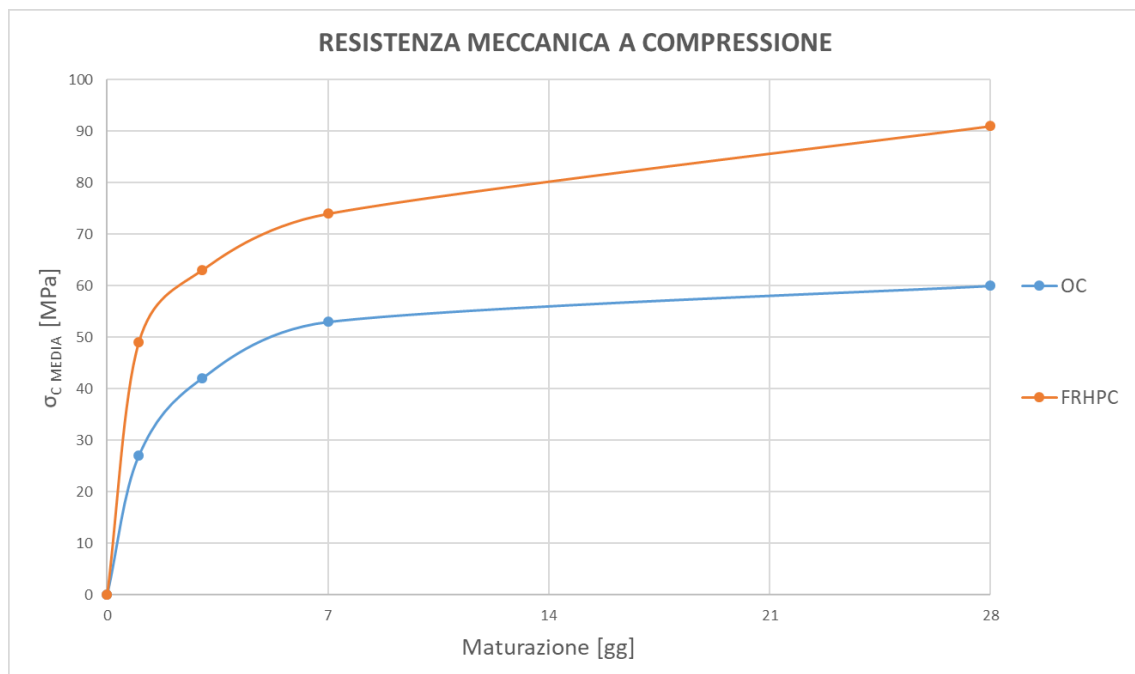


Grafico 6.2 - Resistenza a compressione (1, 3, 7, 28 giorni di maturazione)

### 6.3.3 Analisi dei risultati

Dai valori di resistenza meccanica espressi dalle miscele si nota che l'effetto self-prestress, indotto dall'interazione tra matrice espansiva e rinforzo fibroso, ha prodotto un incremento della resistenza a compressione e flessione dopo 28 giorni pari a circa il 50%. Tale incremento non è imputabile alla

sola aggiunta di fibre che, tenuto conto del dosaggio, in assenza di effetto sinergico avrebbero indotto incrementi dell'ordine del 15-20% e non oltre.

I risultati di resistenza meccanica relativi alla miscela OC, ottenuti presso i laboratori della UnivPM, sono stati confrontati (in Tabella 6.5) con i risultati ottenuti dal prof. Khoshnevis e Zareiyan presso la University of Southern California pubblicati nel 2017.

Tabella 6.5 - Confronto tra i risultati di resistenza meccanica a compressione e flessione ottenuti presso l'Università Politecnica delle Marche (■) e presso la University of Southern California (■)

Maturazione	Resistenza a compressione [MPa]	
75 min	12	2
1 giorno	27	-
3 giorno	42	12
7 giorno	53	16
28 giorno	60	32

Classe di resistenza	C 50/60	C 25/30
----------------------	---------	---------

Curing	Resistenza a flessione [MPa]	
1 giorno	6	-
7 giorno	8	1.5
28 giorno	10	3

È possibile notare come le resistenze meccaniche a compressione della miscela OC (colonna arancione) siano superiori rispetto alla miscela presa come riferimento (colonna azzurra) raggiungendo una classe di resistenza C 50/60.

Questo trend è confermato anche per le prestazioni meccaniche a flessione dove i risultati ottenuti sono circa il triplo rispetto alla miscela di riferimento.

## 6.4 Ritiro igrometrico

Per la valutazione del ritiro del calcestruzzo sono state comparate tre miscele: la ordinary concrete, la fiber reinforced high performance concrete, ottimizzate per l'applicazione in tecniche di additive

manufacturing, ed una miscela di riferimento relativa ad un calcestruzzo ordinario non applicabile ai sistemi di stampa 3D.

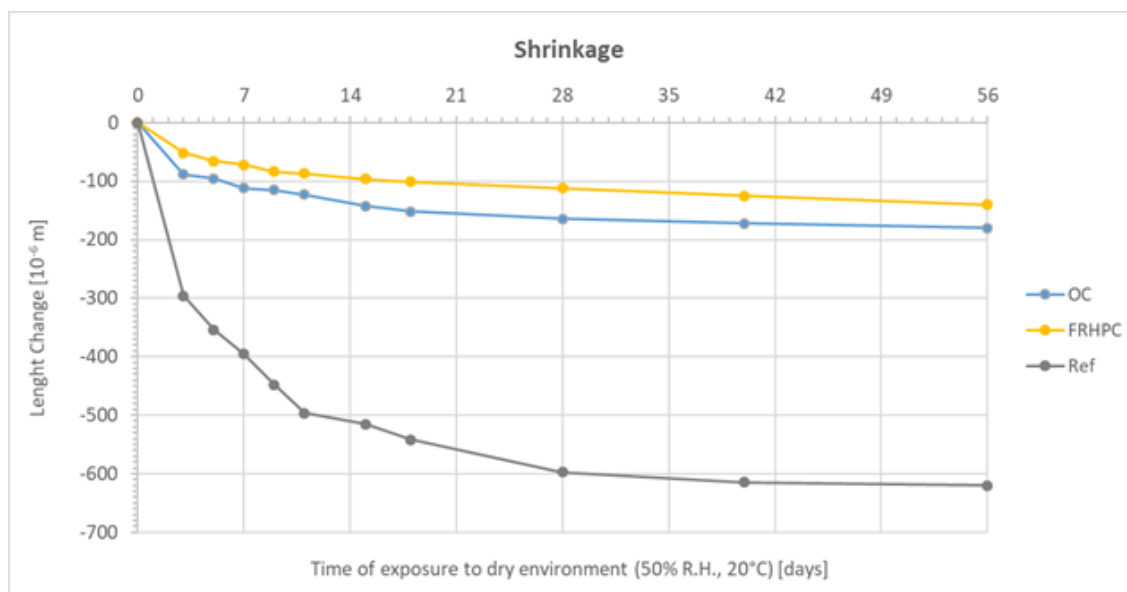


Grafico 6.3 - Risultati dei test di ritiro

Come mostrato dal grafico 6.3, i risultati dei test, condotti su provini esposti in un ambiente con 50% di umidità relativa e 20°C di temperatura fino a 56 giorni di stagionatura, evidenziano come i valori del ritiro misurati siano notevolmente inferiori per le miscele ottimizzate per la stampa 3D, con la formulazione ottenuta in fase di sperimentazione, rispetto ad un calcestruzzo ordinario.

In particolare, i valori di ritiro misurati sono stati:

- $180 \cdot 10^{-6}$  per l'ordinary concrete (OC mixture);
- $140 \cdot 10^{-6}$  per il fiber reinforced high performance concrete (FRHPC mixture);
- $620 \cdot 10^{-6}$  per il calcestruzzo ordinario di riferimento (Ref mixture).

Come è possibile notare dal grafico il ritiro è ridotto di 3 volte rispetto alla miscela di riferimento. Questo è un risultato molto importante perché nella produzione di manufatti mediante tecnica di stampa 3D il materiale, una volta estruso, viene subito a contatto con l'aria, cosa che invece non avviene per le tecniche tradizionali dove, almeno per le prime ore dal getto, il manufatto è protetto dalla cassaforma.

## 6.5 Adesione tra strati contigui

L'interazione e la connessione tra due layers di materiale estruso si definisce "adesione".

La resistenza dell'interfaccia è influenzata da proprietà chimiche e meccaniche del materiale e dalle configurazioni dei layers (come ad esempio incastri e rugosità superficiali).

Lo studio dell'adesione tra layers è molto importante perché tale zona costituisce, nei manufatti ottenuti per sovrapposizione di strati, una zona di debolezza e il luogo in cui possono crearsi dei piani preferenziali di rottura che indirizzano le cricche e influenzano le modalità di rottura con sensibili ripercussioni sulla resistenza meccanica del manufatto.

Per studiare la forza dell'adesione interlayer con prove di compressione uniassiali parallele alla direzione dell'interfaccia sono stati preparati dei provini di dimensioni 10 x10x10 cm composti da un unico blocco da 10 cm, due strati da 5 cm e 4 strati da 2,5 cm (figura 6.3).

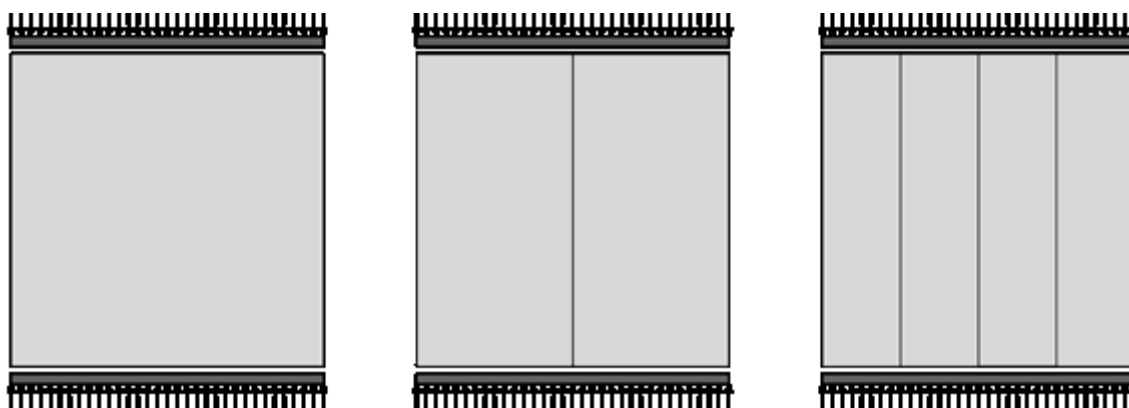


Figura 6.3 - Test di compressione uniassiale su provini di 10x10x10 cm composti da uno, due, quattro layers

I test di compressione monoassiale sono stati effettuati dopo 75 minuti, 1 giorno, 3 giorni, 7 giorni e 28 giorni dal getto su campioni 10x10x10 cm composti da 1, 2 o 4 strati. I risultati ottenuti sono riportati nella Tabella 6.6 (colonne arancioni) e confrontati con quelli ottenuti da Zareiyan e Khoshnevis presso la University of Southern California (colonne azzurre).

Zareiyan e Khoshnevis hanno eseguito test simili su campioni di dimensioni 4" (corrispondenti a 10,16 cm) fabbricati con la tecnica del Contour Crafting in tre diversi processi di stratificazione (composti da un blocco da 4", due strati da 2 "e quattro strati da 1").



Tabella 6.6 - Resistenza a compressione uniassiale su provini 10x10x10 cm composti rispettivamente da 1, 2, o 4 layers. Università Politecnica delle Marche (■); University of Southern California (■)

Uniaxial Compressive Strength (LAYER ADHESION)						
Curing	1 layer		2 layers		4 layers	
	1 x 10 cm layer [MPa]	1 x 4" layer [MPa]	2 x 5 cm layer [MPa]	2 x 2" layer [MPa]	4 x 2,5 cm layer [MPa]	4 x 1" layer [MPa]
75 mins	12.5	1.8	11.2	1.6	9.02	1.3
1 day	26.8	-	25.1	-	21.2	-
3 days	42.0	6.7	35.2	5.5	29.7	5.1
7 days	52.9	11.0	42.0	8.7	35.3	7.3
28 days	60.3	23.5	50.9	20.6	43.4	17.4

È possibile notare come l'adesione che si ottiene impiegando la miscela OC ottimizzata presso i laboratori dell'UnivPM è superiore rispetto al riferimento fino a circa 7 volte dopo 75 minuti e 2,5 volte dopo 28 giorni.

## 6.6 Conclusioni

In questo capitolo è stato ottimizzato il mix design di un materiale estrudibile rinforzato con fibre basato su una matrice a base di cemento attivata chimicamente. Grazie all'attivazione chimica la matrice del cemento tende ad espandersi e la sua espansione è limitata dal rinforzo in fibra. Questa interazione produce un'azione reciproca tra fibra e matrice (auto-precompressione), che è responsabile di un sensibile incremento delle resistenze meccaniche a flessione e compressione, e delle forze di adesione interlayer. Oltre ai benefici in termini meccanici, è evidente il vantaggio in termini di ritiro igrometrico e durabilità, fattori non trascurabili per le strutture estruse che vengono poste a contatto con l'aria appena prodotte.

L'incremento di resistenze e la riduzione del ritiro sono evidenti anche in assenza del vincolo imposto dal rinforzo fibroso grazie alla sola attivazione chimica della matrice cementizia, come è risultato dai valori espressi dalla miscela denominata OC.

I risultati ottenuti dimostrano una piena compatibilità dei calcestruzzi "self prestressed" con le tecniche di additive manufacturing in termini di estrudibilità e comportano un guadagno in termini di prestazioni meccaniche del materiale allo stato indurito e di durabilità.

## **7 Studio del comportamento meccanico di una miscela estrudibile al variare dell'orditura dei layers e della direzione di applicazione della forza**

---

Lo scopo del lavoro presentato in questo capitolo è quello di indagare sul comportamento meccanico di un materiale a base cementizia per applicazioni nel 3d printing ottenuto tramite estrusione layer by layer attraverso un ugello di diametro pari ad 1 cm. In particolare, verranno presentati i risultati del confronto tra campioni ottenuti con diversi percorsi di stampa, testati perpendicolarmente e parallelamente al piano di estrusione. A questo si aggiunge un confronto tra la tecnica tradizionale di getto nelle casseforme con quella di deposizione con tecniche di additive manufacturing.

### **7.1 Procedura sperimentale**

#### **7.1.1 Modalità di preparazione dei campioni**

I provini testati sono stati realizzati in due modalità differenti: la prima, che di qui in avanti sarà denominata "tecnica tradizionale" o "T1", prevede la realizzazione per colatura del calcestruzzo nello stampo, mentre la seconda prevede che i provini vengano ricavati mediante taglio da lastre ottenute mediante tecniche di deposizione strato su strato seguendo 3 percorsi di stampa diversi.

#### **7.1.2 Provini realizzati con tecnica tradizionale**

I provini ottenuti con tecnica tradizionale sono stati tutti ottenuti mediante colatura in casseforme di acciaio di dimensioni 40x40x160 mm contenenti 3 provini ciascuno, sottoposte a vibrazione. Sono stati realizzati 16 provini su cui effettuare prove di caratterizzazione meccanica (come descritto al paragrafo 3.3 del capitolo 3) a scadenze temporali di 1, 3, 7 e 28 giorni di maturazione.

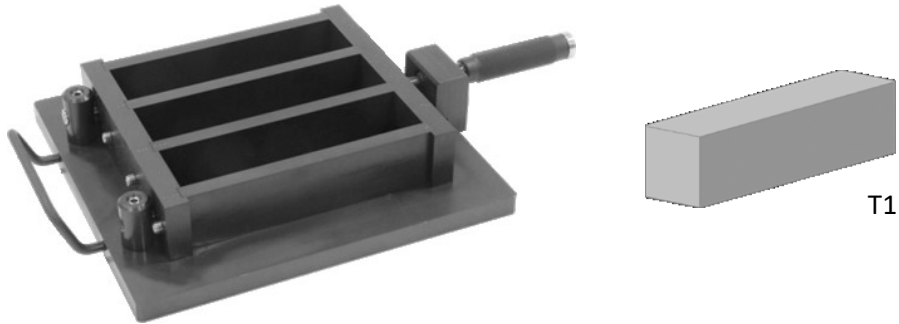


Figura 7.1 - Cassaforma utilizzata per il confezionamento di provini prismatici 40x40x160 mm

### 7.1.3 Provini realizzati con tecniche di additive manufacturing

Successivamente sono stati ottenuti provini a partire da lastre estruse col sistema di stampa presentato precedentemente al paragrafo 3.2.3.

Le lastre di dimensioni pari a 360 x 180 x 40 mm (rispettivamente lunghezza, larghezza e altezza) sono state tagliate per ottenere, da ciascuna di esse, 8 campioni di dimensioni 40 x 160 x 40 mm.

Ogni lastra di spessore pari a 40 mm è stata ottenuta con la sovrapposizione di 5 layers dello spessore di circa 8 mm in accordo con le dimensioni dell'ugello utilizzato nell'estrusione (pari ad 1 cm) considerando un abbassamento del layer, dovuto alla consistenza del materiale, pari al 20%.

Sono state realizzate 12 lastre, 4 per ciascuna delle seguenti tipologie:

- **T2:** lastre stampate con sovrapposizione di layer in direzione longitudinale e provini ricavati tagliando le lastre nella stessa direzione di sviluppo del layer;

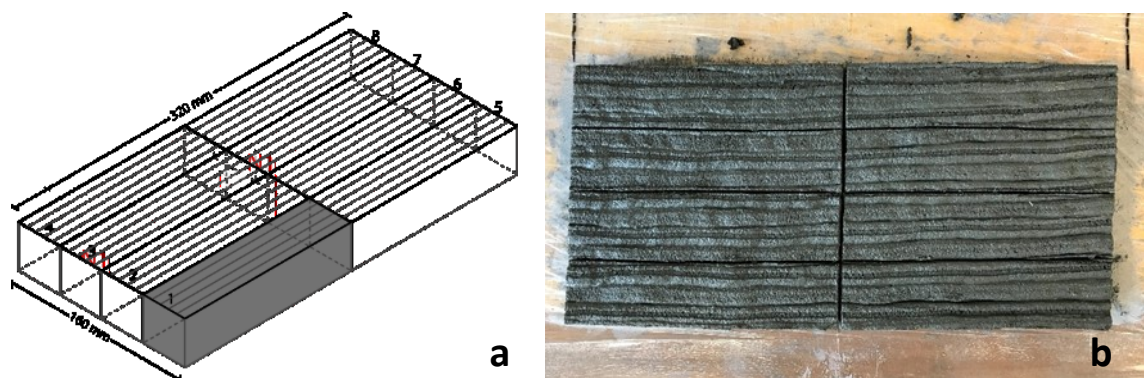


Figura 7.2 – Lastre della tipologia T2: (a) geometria della lastra e indicazioni di taglio; (b) lastra dopo il taglio

- **T3:** lastre stampate con sovrapposizione di layer in direzione longitudinale e provini ricavati tagliando le lastre nella direzione ortogonale a quella di sviluppo del layer;

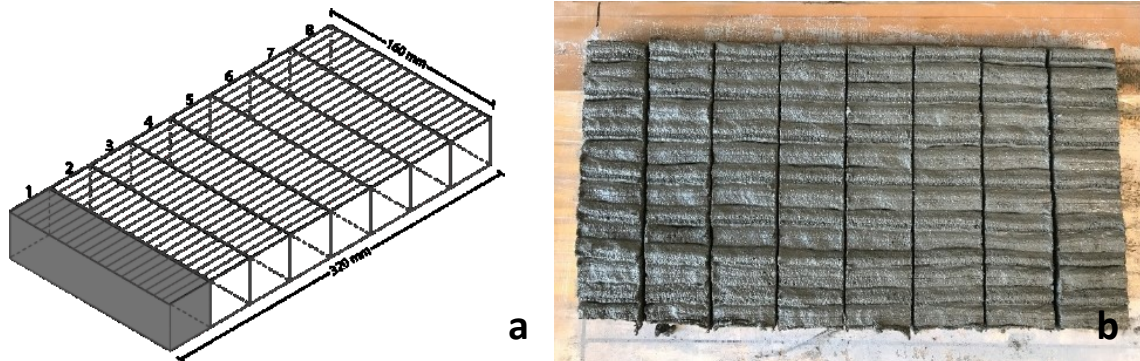


Figura 7.3 - Lastre della tipologia T3: (a) geometria della lastra e indicazioni di taglio; (b) lastra dopo il taglio

- **T4:** lastre stampate con sovrapposizione di layer realizzati in direzione ortogonale tra due layer consecutivi, provini ricavati tagliando le lastre nella stessa direzione di sviluppo dell'ultimo layer stampato;

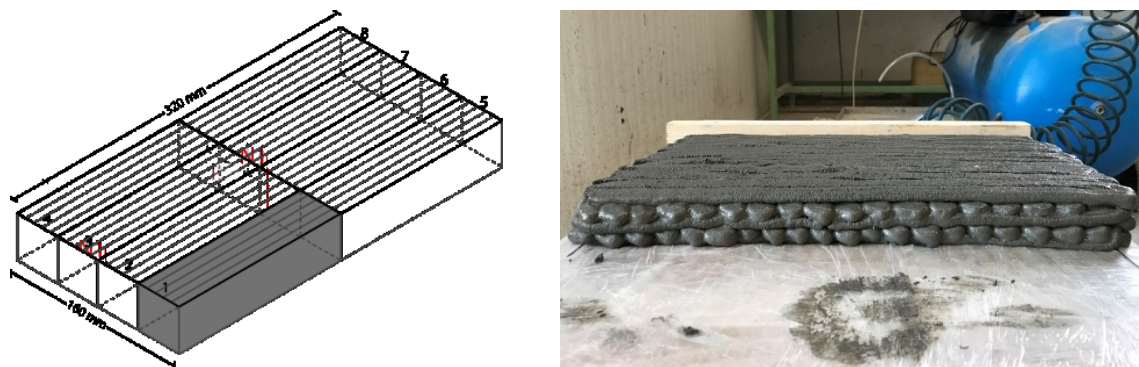


Figura 7.4 - Lastre della tipologia T4: (a) geometria della lastra e indicazioni di taglio; (b) lastra dopo il taglio

L'estrusione delle lastre della tipologia T2 e T3 è avvenuta seguendo il percorso di stampa mostrato in figura 7.5.

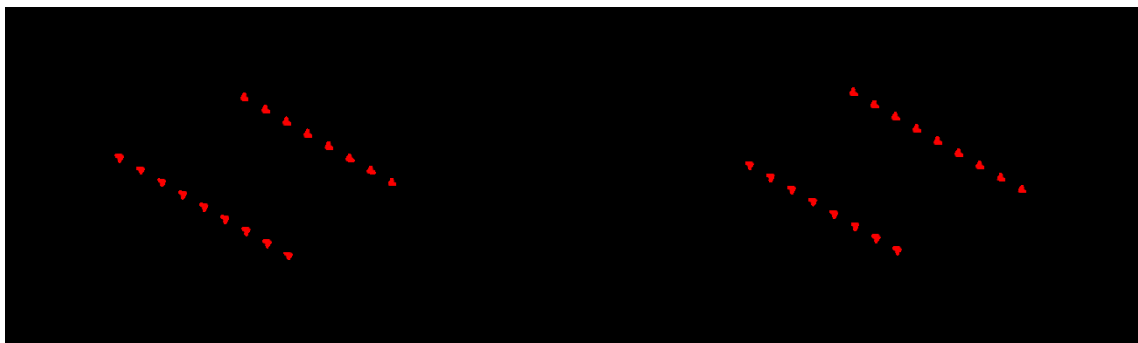


Figura 7.5 – Percorso di stampa dei layers 1 e 2 relativi alle tipologie T2 e T3

Il primo layer è stato estruso a partire dal punto A di coordinate (0, 0, 0), espresse in millimetri, fino al punto B di coordinate (360, 180, 0) seguendo un percorso lineare, con un infill del 100%. L'estrusione del secondo layer è partita dal punto B+ $\Delta z$  di coordinate (360, 180, 8), dove  $\Delta z$  corrisponde allo spessore del layer, fino ad arrivare al punto A+ $\Delta z$  (0, 0, 8). L'iterazione è stata ripetuta per 5 volte, tante quante il numero di layer che compongono la lastra, come riportato nella tabella 7.1.

Tabella 7.1 – Coordinate iniziali e finali di deposizione di ciascun layer

LAYER	P <sub>INIZIO</sub>	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	P <sub>FINE</sub>	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
1	A	0	0	0	B	360	180	0
2	B+ $\Delta z$	360	180	8	A+ $\Delta z$	0	0	8
3	A+2 $\Delta z$	0	0	16	B+2 $\Delta z$	360	180	16
4	B+3 $\Delta z$	360	180	24	A+3 $\Delta z$	0	0	24
5	A+4 $\Delta z$	0	0	32	B+4 $\Delta z$	360	180	32

Si noti che la coordinata z relativa all'ultimo layer deposto è pari a 32 mm a cui andrà sommato lo spessore del layer stesso per un totale di 40 mm e pari allo spessore della lastra come da progetto. L'estrusione delle lastre di tipologia T4 a layer incrociati ortogonalmente ha seguito invece il percorso in figura 7.6.

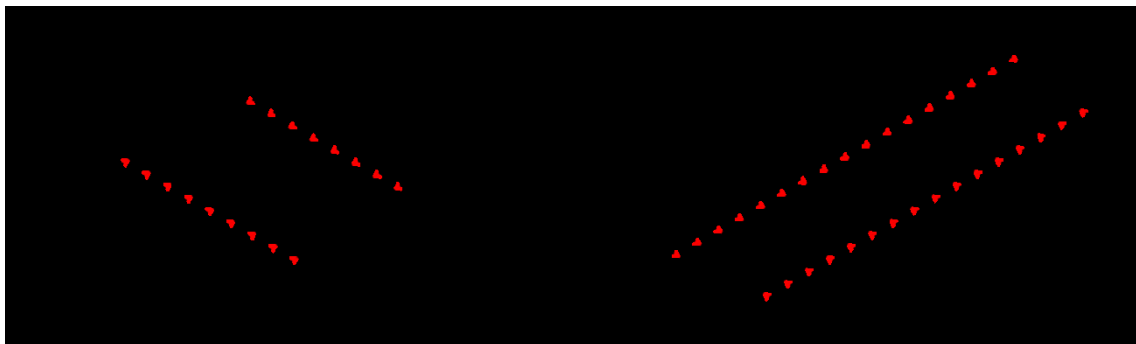


Figura 7.6 - Percorso di stampa dei layers 1 e 2 relativi alla tipologia T4

Le coordinate dei punti iniziali e finali di estrusione per ciascun layer sono gli stessi mostrati in tabella 7.1, la differenza però è da riscontrare nelle direzioni di estrusione dei vari filamenti, infatti, mentre per T2 e T3 l'estrusione avviene sempre in direzione parallela all'asse x, per T4 l'estrusione avviene parallelamente a x per un layer e parallelamente ad y per il successivo.

Dai percorsi e dalle direzioni di taglio mostrati in precedenza, sono stati ottenuti 32 provini per ciascuna tipologia (T2, T3, T4) le cui sezioni sono riportate in figura 7.7.

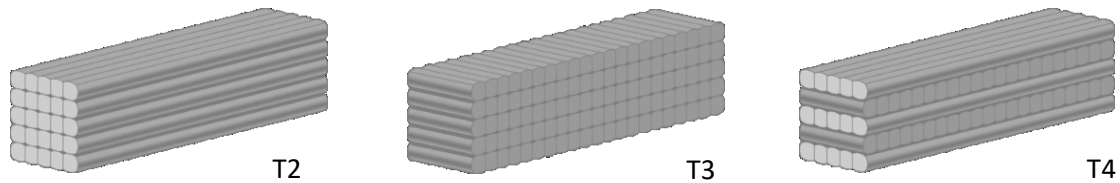


Figura 7.7 – Sezione dei provini ricavati dalle lastre per ciascun percorso di estrusione

Per ogni tipologia, sono state quindi effettuate prove in due direzioni:

- **N:** perpendicolare al piano di estrusione;
- **P:** parallela al piano di estrusione.

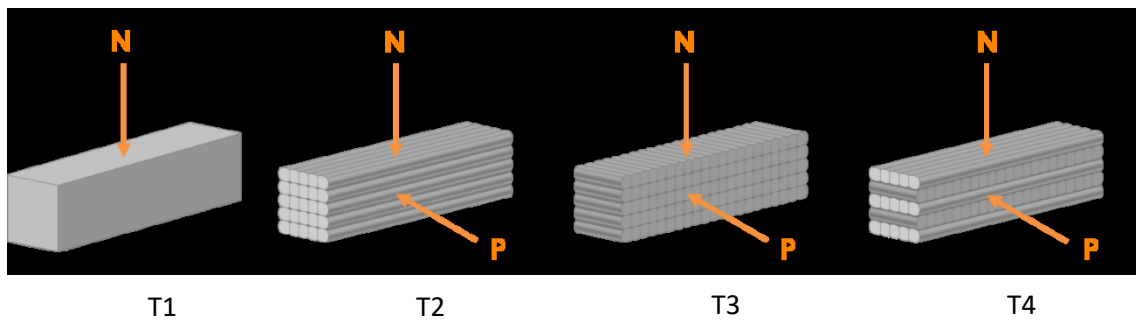


Figura 7.8 – Direzione di applicazione della forza

Sono stati testati 4 campioni per ogni tecnica di estrusione e direzione di applicazione della forza a scadenze temporali di 1, 3, 7, 28 giorni di maturazione.

## 7.2 Ottimizzazione del mix design

Nel capitolo 2 sono state descritte le caratteristiche dei principali materiali utilizzati nella preparazione delle miscele oggetto di studio. Di seguito sono descritte le miscele oggetto di studio. Sono state analizzate diverse miscele al fine di arrivare alla definizione della “miscela ottimale” ovvero quella che presenta le caratteristiche fondamentali per una miscela per l’additive manufacturing. Una caratteristica fondamentale è la viscosità non eccessiva della miscela affinché non sia impedita l’estrusione del materiale ed abbia coesione sufficiente a consentire la realizzazione di elementi per sovrapposizione di layers. Si è tentato inoltre di ridurre il più possibile

il quantitativo di acqua all'interno della matrice per ottenere un basso rapporto acqua/cemento e un conseguente incremento della resistenza a compressione.

Il mix design adottato in questa sperimentazione è quello presentato nella tabella 7.2 seguente.

Tabella 7.2 – Mix design della miscela oggetto della sperimentazione

<b>Materiale</b>	<b>Dosaggio (Kg/m3)</b>
Cemento 42,5 R	800
Sabbia silicea 0-1 mm	1100
Additivo superfluidificante	4
Additivo espansivo	20
Additivo antiritiro	8
Acqua	300
Fumo Silice	120

### **7.3 Confronto del comportamento meccanico al variare del percorso di estrusione e della direzione di applicazione della forza**

#### **7.3.1 Densità**

Per ogni tecnica e modalità di rottura è stata valutata la densità al fine di poter effettuare un confronto. La densità è stata definita dopo aver misurato e pesato il provino ed i dati ottenuti sono riportati nel grafico e nella tabella seguenti.

Tabella 7.3 – Densità dei provini

<b>MATURAZIONE [gg]</b>	<b>Densità [kg/m<sup>3</sup>]</b>					
	<b>T2-N</b>	<b>T2-P</b>	<b>T3-N</b>	<b>T3-P</b>	<b>T4-N</b>	<b>T4-P</b>
1	2099,08	1991,97	2078,03	2056,09	1986,18	2011,04
3	2019,57	1938,85	2002,54	1998,42	1990,73	2002,52
7	2034,16	1948,32	2064,15	2042,28	2058,38	2108,32
28	1990,80	2032,24	2028,41	2038,48	2003,18	2016,51

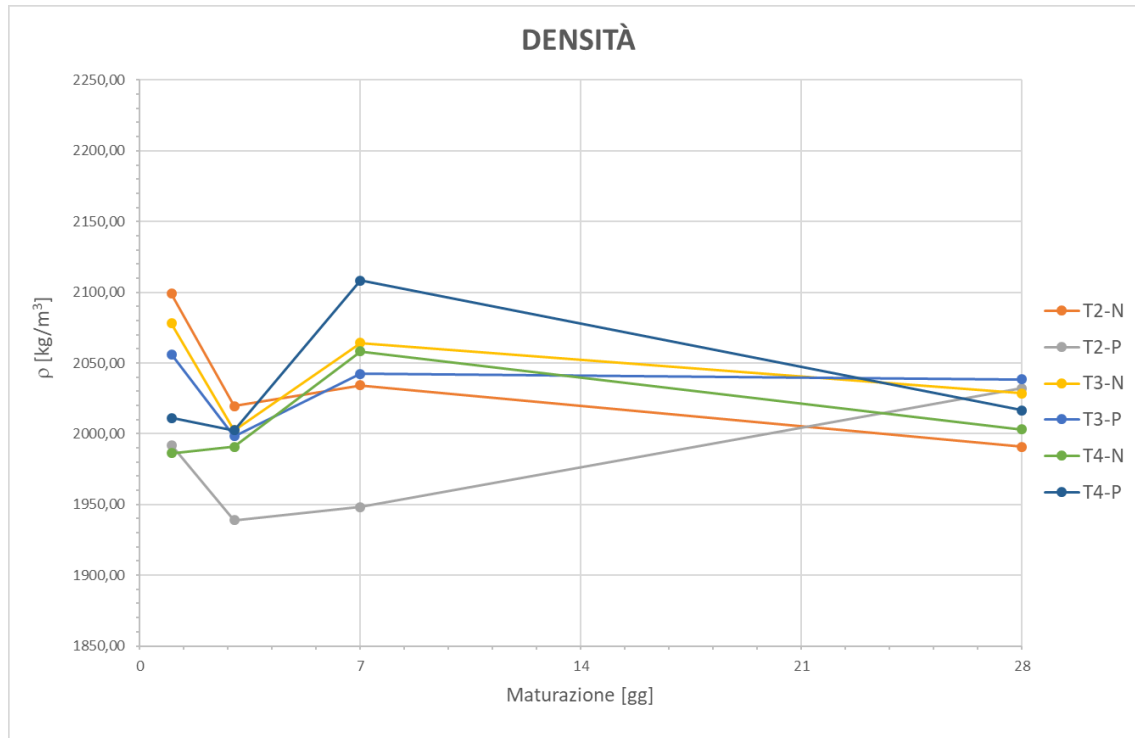


Grafico 7.1 – Valori di densità delle diverse tecniche di stampa 3D (1, 3, 7, 28 giorni di maturazione)

Dal grafico 7.1 si può notare che i provini (T2, T3 e T4) evidenziano valori di densità paragonabili. Questo risultato suggerisce un grado di compattazione simile per tutte le miscele a prescindere dal percorso di deposizione adottato.

### 7.3.2 Prove di caratterizzazione meccanica

Sui campioni ottenuti con le tecniche descritte al paragrafo 7.1.3 del presente capitolo sono state condotte prove di caratterizzazione meccanica con lo scopo di valutare l'influenza del percorso di estrusione sulle prestazioni dell'elemento estruso. Le prove sono state condotte con le modalità descritte al paragrafo 3.3. I risultati della prova sono riportati nei paragrafi seguenti.

#### 7.3.2.1 Prove di flessione a tre punti

La tabella 7.4 e il grafico 7.2 seguenti mostrano i risultati del confronto tra i risultati delle prove di resistenza meccanica a flessione per le varie tipologie di percorso (T2, T3, T4) testate nelle direzioni perpendicolare e parallela al piano di estrusione (N, T) secondo lo schema in figura 7.8.



Tabella 7.4 – Valori di resistenza a flessione media dei provini

MATURAZIONE [gg]	$\sigma_{F\text{ MEDIA}}$ [MPa]					
	T2-N	T2-P	T3-N	T3-P	T4-N	T4-P
1	6,67	6,11	5,68	5,83	5,99	5,42
3	7,17	6,63	5,94	7,29	8,14	8,36
7	8,39	8,25	7,39	7,93	9,33	9,33
28	9,60	10,11	8,45	9,77	9,68	9,88

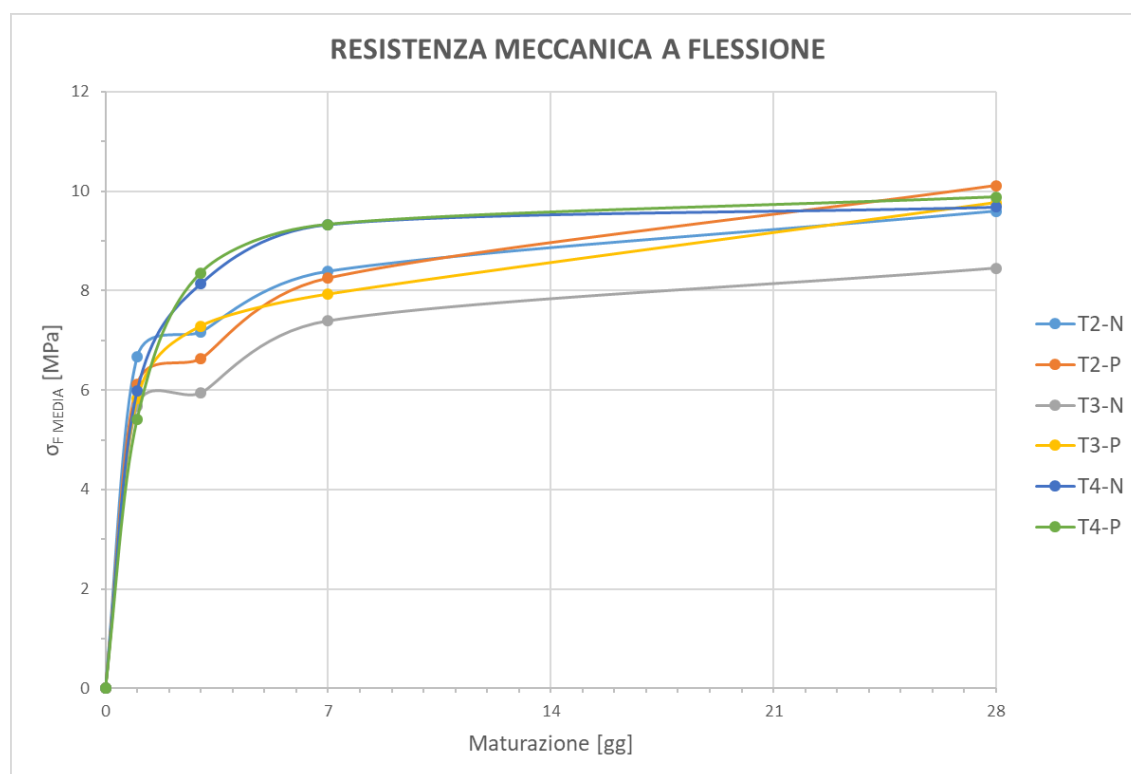


Grafico 7.2 – Resistenza meccanica a flessione (1, 3, 7, 28 giorni di maturazione)

Dal confronto non si evidenziano particolari differenze. I valori di resistenza a flessione ottenuti variano in un range del 10% della media a brevissima stagionatura (1 giorno) e a 28 giorni di maturazione, questo range è leggermente più ampio a 3 e 7 giorni.

Queste differenze di prestazioni sono meno evidenti a 28 giorni dove i valori di resistenza tendono ai 10 Mpa, ad eccezione di quelli relativi ai campioni prodotti con tecnica T3 testati in direzione N perpendicolare al piano di estrusione.

Questo risultato potrebbe essere dovuto proprio alla geometria del campione ottenuta dal percorso di estrusione e direzione del taglio della lastra. Il provino di quella geometria testato nella direzione N sottopone a stress tutta la zona di adesione tra filamenti adiacenti (figura 7.9) che costituisce una discontinuità che va ad indirizzare la rottura.

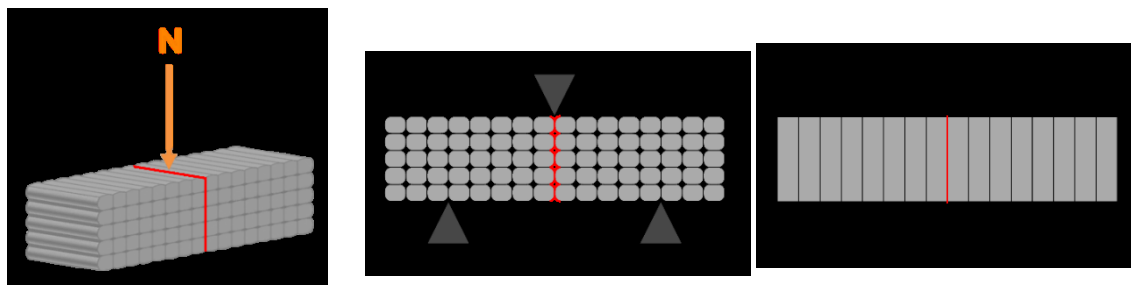


Figura 7.9 – Meccanismo di rottura del provino T3-N testato a flessione in direzione N

Questo non accade per il medesimo percorso (T3) ma testato in direzione P nonostante anche in quel caso sia sottoposta a stress tutta la zona di adesione, in questo caso tra filamenti di layers successivi.

Si può ipotizzare quindi che la forza di adesione superiore ed inferiore tra filamenti di layers differenti sia superiore a quella tra due filamenti adiacenti appartenenti allo stesso layers. Ciò è dovuto al peso dei layers successivi che aumentano la superficie di adesione causando un leggero spanciamento dei filamenti.

### 7.3.2.2 Prove di compressione

I risultati delle prove di resistenza a compressione sono presentati nella tabella 7.5 e nel grafico 7.3 seguenti.

Tabella 7.5 – Valori di resistenza a compressione media dei provini

MATURAZIONE [gg]	$\sigma_{C\text{ MEDIA}}$ [MPa]					
	T2-N	T2-P	T3-N	T3-P	T4-N	T4-P
1	15,44	14,71	13,23	13,00	15,42	11,56
3	26,41	23,15	28,74	28,67	27,17	24,86
7	31,47	24,11	25,70	29,37	30,95	30,12
28	31,21	24,92	36,07	35,00	36,26	31,44

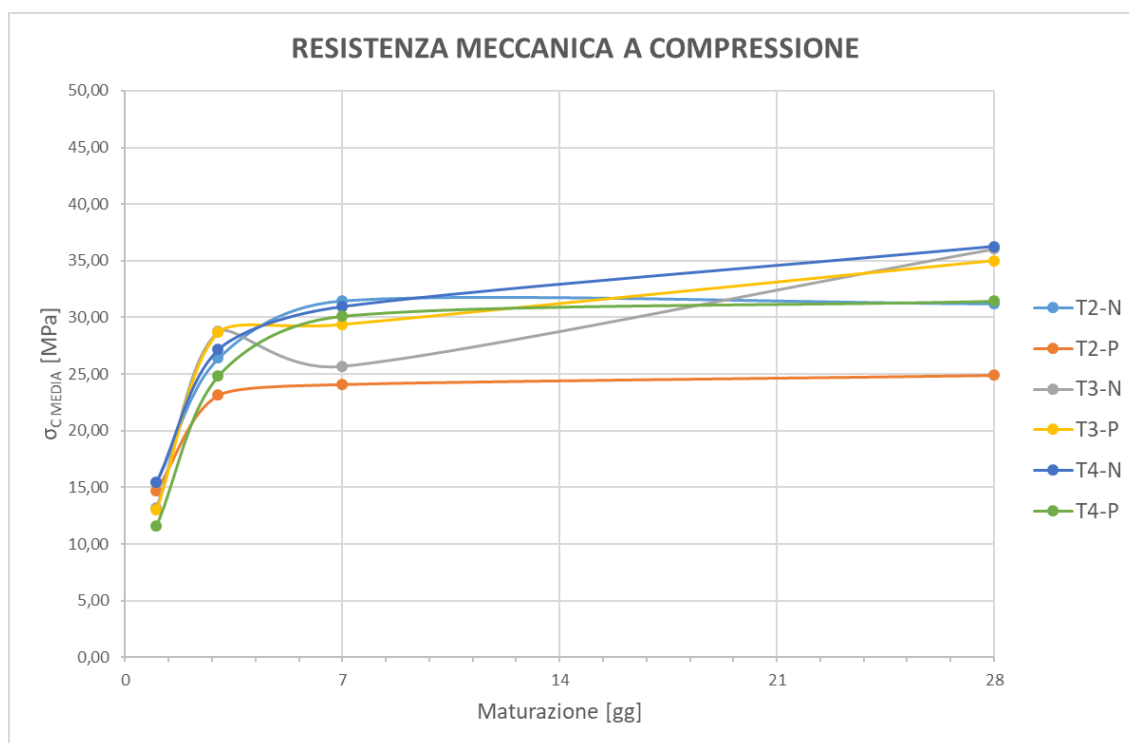


Grafico 7.3 - Resistenza meccanica a compressione (1, 3, 7, 28 giorni di maturazione)

Dai risultati ottenuti si può osservare come i valori siano molto vicini tra loro, in particolare variano in un range tra gli 11,56 e i 15,44 MPa (-17% e +6% di scostamento rispetto alla media) ad 1 giorno di maturazione, tra i 23,15 e i 28,74 MPa (-13% e +8% rispetto alla media) a tre giorni, tra i 24,11 e 31,47 MPa a 7 giorni (tra -16% e +8% rispetto alla media) e tra i 36,26 e i 24,92 MPa a 28 giorni (tra -23% e +12% rispetto alla media a 28 giorni).

Complessivamente è quindi possibile affermare che le maggiori differenze sono rilevabili sulle prove a 28 giorni di maturazione, se si escludono i valori di resistenza relativi ai campioni prodotti con modalità T2 testati in direzione P, le resistenze a 28 giorni tendono ai 35 MPa. Alle brevi scadenze invece, il divario si mostra più contenuto.

Per quanto riguarda i campioni T2 testati in direzione P, si è verificata una propagazione delle fessure lungo la zona di adesione tra layers che hanno poi innescato un meccanismo di distacco dei layers come evidenziato in figura 7.10.

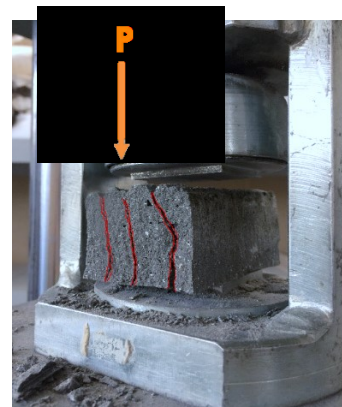
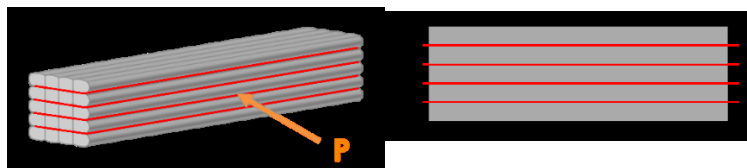


Figura 7.10 - Meccanismo di rottura del provino T2 testato a compressione in direzione P

## 7.4 Confronto con tecniche tradizionali

I risultati ottenuti, relativi alle prove di caratterizzazione condotte sui provini estrusi con le tipologie descritte al precedente paragrafo, sono confrontati con i risultati delle prove sui campioni T1 realizzati con la tecnica tradizionale di getto nelle casseforme descritta al paragrafo 7.1.2.

### 7.4.1 Densità

La densità valutata nel precedente paragrafo è stata confrontata con quella relativa ai campioni T1 ottenuti mediante getto del calcestruzzo allo stato fluido nelle casseforme, sottoposte poi a vibrazione. I risultati del confronto sono riportati nella tabella 7.6 e nel grafico 7.4 seguenti.

Tabella 7.6 – Densità dei provini

MATURAZIONE [gg]	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]						
	T1	T2-N	T2-P	T3-N	T3-P	T4-N	T4-P
1	2205,86	2099,08	1991,97	2078,03	2056,09	1986,18	2011,04
3	2196,73	2019,57	1938,85	2002,54	1998,42	1990,73	2002,52
7	2207,28	2034,16	1948,32	2064,15	2042,28	2058,38	2108,32
28	2229,42	1990,80	2032,24	2028,41	2038,48	2003,18	2016,51

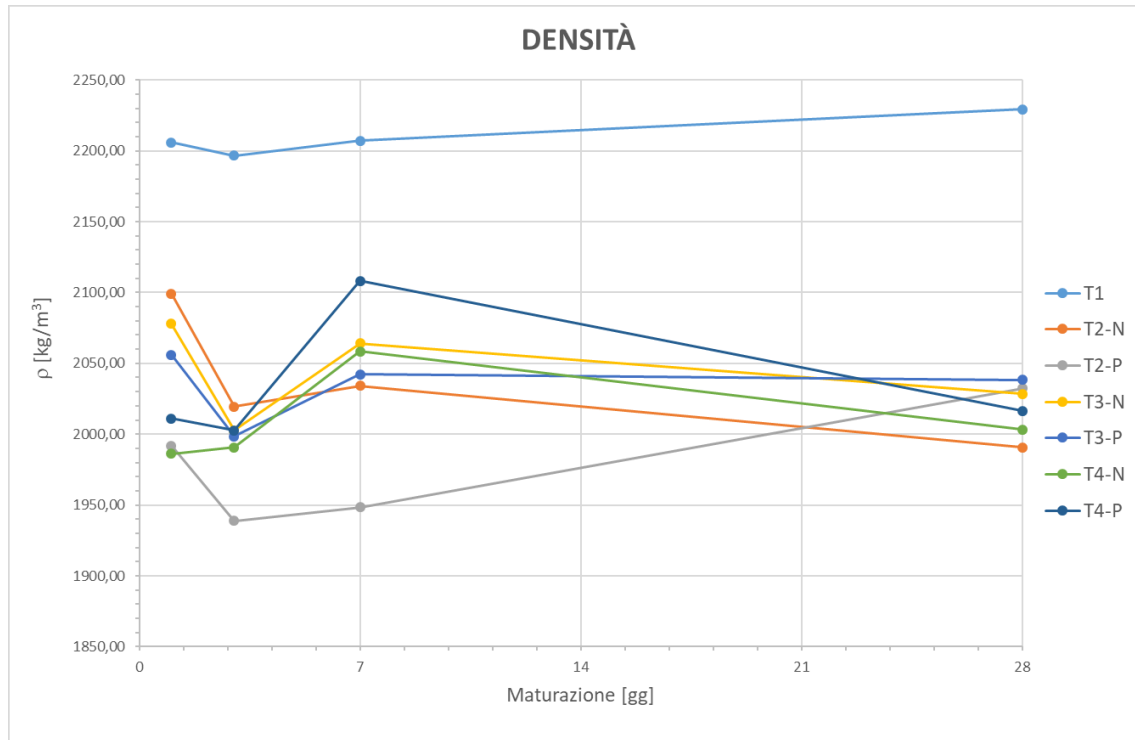


Grafico 7.4 – Confronto tra i valori di densità (1, 3, 7, 28 giorni di maturazione)

Dal Grafico 7.4 è evidente come i provini T2, T3, T4 presentino dei valori paragonabili. Se si analizzano i dati ottenuti a 28 giorni di maturazione, la densità dei campioni estrusi varia in un range compreso tra  $1990,80 \text{ kg/m}^3$  (T2-N) e  $2038,48 \text{ kg/m}^3$  (T3-P), valori che si discostano dell'1% dalla densità media dei campioni estrusi che è pari a  $2018,27 \text{ kg/m}^3$ .

I campioni T1, invece, ottenuti con la tecnica tradizionale di getto e sottoposti a vibrazione (T1) presentano una densità maggiore rispetto a quelli estrusi, in particolare a 28 giorni di maturazione la densità media di T1 è di  $2229,42 \text{ kg/m}^3$ , pari a +10% del valore della media a 28 giorni dei campioni estrusi.

Questo incremento, seppur lieve, è dovuto ad un più alto grado di compattazione dovuto alla vibrazione a cui i campioni T1 sono stati sottoposti.

#### 7.4.2 Prove di caratterizzazione meccanica

Nei paragrafi che seguono saranno operati dei confronti tra i risultati ottenuti al paragrafo 7.3.2 precedente, relativi alle resistenze meccaniche dei provini estrusi, con i valori di resistenza ottenuti sui test condotti sui campioni T1.

### 7.4.2.1 Prove di flessione su tre punti

I risultati dei test meccanici di resistenza a flessione su tre punti condotti sui provini T1 in direzione N e T2, T3, T4 in direzione N e P, secondo le modalità indicate nei capitoli precedenti, sono mostrati nella tabella 7.7 e nel grafico 7.5 seguenti.

Tabella 7.7 – Valori di resistenza a flessione media dei provini

MATURAZIONE [gg]	$\sigma_{F\text{ MEDIA}}$ [MPa]						
	T1	T2-N	T2-P	T3-N	T3-P	T4-N	T4-P
1	5,33	6,67	6,11	5,68	5,83	5,99	5,42
3	8,32	7,17	6,63	5,94	7,29	8,14	8,36
7	9,19	8,39	8,25	7,39	7,93	9,33	9,33
28	10,34	9,60	10,11	8,45	9,77	9,68	9,88

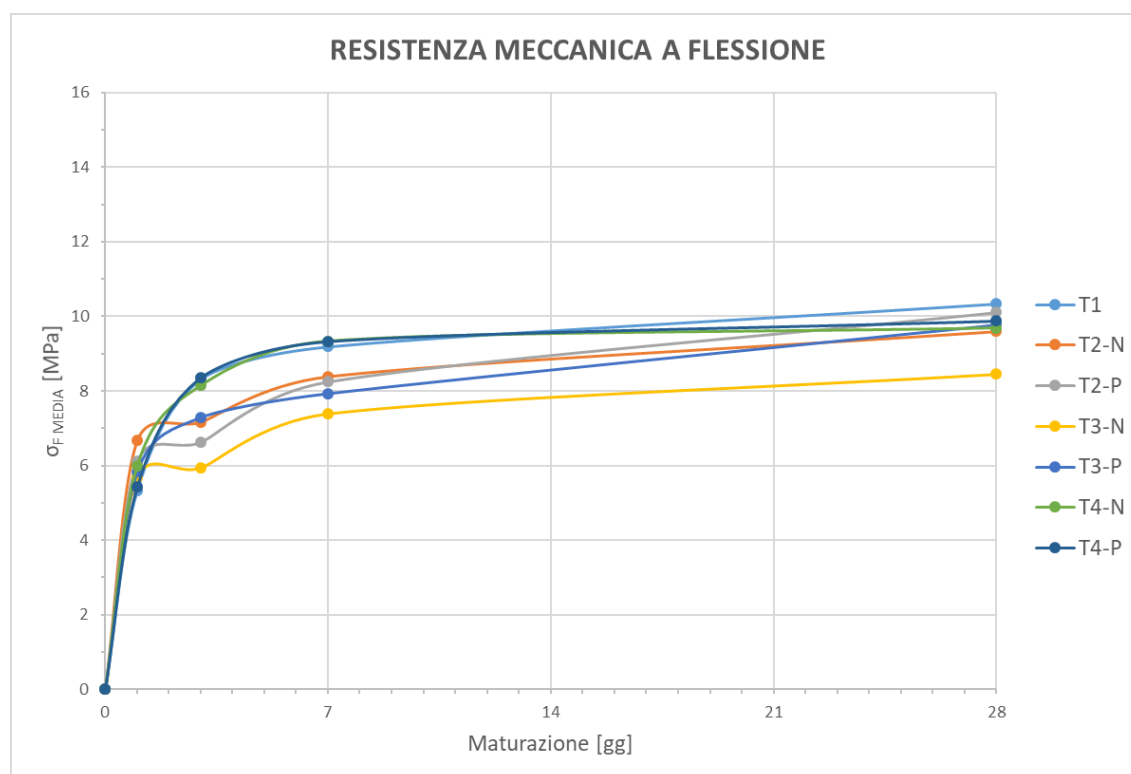


Grafico 7.5 - Resistenza meccanica a flessione (1, 3, 7, 28 giorni di maturazione)

Come è possibile notare dai valori in tabella 7.8, tutte le tipologie stampate evidenziano resistenze a flessione maggiori rispetto alla T1 ad 1 giorno di maturazione; la media dei valori dei campioni estrusi registra un incremento del 11,6% rispetto a T1, con un picco del 25% per T2-N1.

Tabella 7.8 - Confronto tra i valori di resistenza a flessione

MATURAZIONE [gg]	$\sigma_F$ MEDIA [MPa]						
	T1-N	T2-N	T2-P	T3-N	T3-P	T4-N	T4-P
1	5,33	6,67	6,11	5,68	5,83	5,99	5,42
		25%	15%	7%	9%	12%	2%
3	8,32	7,17	6,63	5,94	7,29	8,14	8,36
		-14%	-20%	-29%	-12%	-2%	0%
7	9,19	8,39	8,25	7,39	7,93	9,33	9,33
		-9%	-10%	-20%	-14%	2%	2%
28	10,34	9,60	10,11	8,45	9,77	9,68	9,88
		-7%	-2%	-18%	-6%	-6%	-4%

I valori delle resistenze relativi alla tipologia T1 sono maggiori rispetto alle altre a 3 giorni di maturazione, anche se non si nota un gap evidente tra i valori.

Questo trend è confermato anche a 7 giorni dove, tuttavia, si registrano due valori relativi alle tipologie estruse superiori al valore di T1; i risultati di T4-N e T4-P evidenziano un incremento del 2%.

Trascorsi 28 giorni di maturazione i valori risultano in linea ad esclusione di T3-N1, -18% rispetto a T1. In generale si nota che nonostante ad 1 giorno la resistenza generale a flessione risulti migliore per le tipologie estruse, tale gap si riduce alle lunghe stagionature fino ad ottenere valori paragonabili tra le varie tecniche.

In conclusione, si può affermare che l'estrusione non compromette la resistenza a flessione, in media si registra un decremento delle resistenze del 7% rispetto alle tecniche tradizionali.

### 7.4.3 Prove di compressione

Nei grafici e nelle tabelle seguenti sono mostrati i risultati del confronto tra i valori di resistenza a compressione relative ai campioni ottenuti mediante getto (T1) e quelli estrusi (T2, T3, T4).

Tabella 7.9 - Valori di resistenza a compressione media dei provini

MATURAZIONE [gg]	$\sigma_{C\text{ MEDIA}}$ [MPa]						
	T1	T2-N	T2-P	T3-N	T3-P	T4-N	T4-P
1	25,57	15,44	14,71	13,23	13,00	15,42	11,56
3	48,03	26,41	23,15	28,74	28,67	27,17	24,86
7	56,32	31,47	24,11	25,70	29,37	30,95	30,12
28	65,33	31,21	24,92	36,07	35,00	36,26	31,44

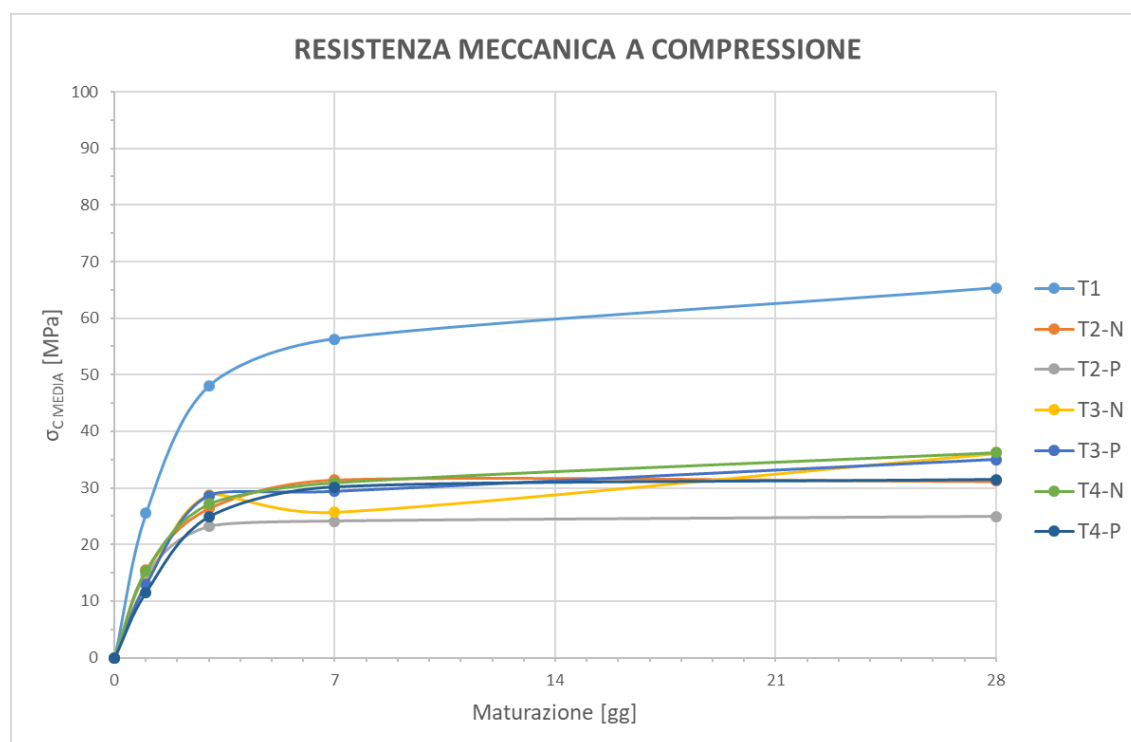


Grafico 7.6 - Resistenza meccanica a compressione (1, 3, 7, 28 giorni di maturazione)

I risultati delle prove (tabella 7.9) evidenziano valori superiori per la tecnica tradizionale T1 rispetto alle tipologie estruse T2, T3, T4 sia alle brevi che alle lunghe stagionature.

Come mostrato in tabella 7.10, trascorse 24 ore dal confezionamento dei campioni, i valori di resistenza a compressione delle tipologie estruse sono inferiori rispetto alla T1, in media del 46%. Questo trend è confermato a 3 giorni dove la riduzione dei valori è in media del 45%. Il gap aumenta fino al 49% a 7 giorni e si mantiene sul 50% a 28 giorni.



Tabella 7.10 - Confronto tra i valori di resistenza a compressione

MATURAZIONE [gg]	$\sigma_{C\text{ MEDIA}}$ [MPa]						
	T1-N	T2-N	T2-P	T3-N	T3-P	T4-N	T4-P
1	25,57	15,44	14,71	13,23	13,00	15,42	11,56
		-40%	-42%	-48%	-49%	-40%	-55%
3	48,03	26,41	23,15	28,74	28,67	27,17	24,86
		-45%	-52%	-40%	-40%	-43%	-48%
7	56,32	31,47	24,11	25,70	29,37	30,95	30,12
		-44%	-57%	-54%	-48%	-45%	-47%
28	65,33	31,21	24,92	36,07	35,00	36,26	31,44
		-52%	-62%	-45%	-46%	-44%	-52%

Si può concludere che l'estrusione, qualunque sia il percorso di stampa utilizzato, comporta un sensibile decremento dei valori di resistenza a compressione rispetto a quelli ottenuti per la tecnica tradizionale di getto nella cassaforma. Le cause di questa diminuzione sono l'assenza di vibrazione, da cui consegue un minor grado di compattazione e una porosità maggiore dei campioni estrusi (si veda a riguardo il paragrafo 7.4.1 relativo alla densità), e l'innescarsi di meccanismi di rottura lungo piani di discontinuità costituiti dalle zone di adesione interlayers.

Come mostrato nell'immagine 7.11, i provini realizzati con tecnica tradizionale T1 evidenziano un tipo di rottura a compressione bipiramidale; questo non accade per i provini prodotti mediante estrusione dove la disposizione dei layers crea piani preferenziali di rottura.



Figura 7.11 – Meccanismo di rottura a compressione: (a) tecnica tradizionale T1; (b) estrusione con tecnica T2-N

Questo fenomeno è più accentuato per i campioni T2 e T3 in quanto le trame di orditura dei layers sono parallele mentre si riduce per i campioni T4 in quanto l'orditura dei layers è ortogonale.

## 7.5 Conclusioni

Nella presente sperimentazione è stata sviluppata una miscela per processi di additive manufacturing che consente la costruzione di componenti architettoniche e strutturali senza cassaforma; è stata studiata la risposta a sollecitazioni meccaniche di campioni estrusi al variare del percorso di deposizione e della direzione di carico; sono state confrontate tali risultati con le prestazioni di campioni ottenuti con tecniche tradizionali di getto nella cassaforma.

Il mix design utilizzato ha fornito ottimi risultati in termini di estrudibilità, shape-stability, assenza di fenomeni di segregazione, come descritto in precedenza.

In confronto alle tecniche tradizionali, l'estrusione, qualunque percorso si adotti, non compromette la resistenza a flessione, infatti, in media si registra un decremento delle resistenze del 7%, un valore che può essere considerato in linea con gli altri risultati. Al contrario il processo di fabbricazione layer by layer, non potendo contare sull'ausilio della vibrazione e per la natura del processo che avviene per deposizioni successive, comporta una diminuzione delle resistenze a compressione fino al 50% a 28 giorni.

## 8 Studio di una miscela cementizia estrudibile refrattaria per processi di manifattura additiva

---

La campagna sperimentale descritta nel presente capitolo ha previsto l'esecuzione di prove ad alte temperature (circa 500°C) per valutare l'impiego dei manufatti ottenuti con miscele cementizie per deposizione additiva in condizioni di temperature elevate.

Al fine di estendere il campo di impiego di miscele cementizie estrudibili anche in condizioni di elevate temperature di esercizio sono state condotti dei test appositi impiegando un forno da laboratorio e mantenendo i provini per 48 ore alla temperatura di 500°C. A valle delle 48 ore i provini sono stati sottoposti a prove di caratterizzazione meccaniche per verificarne l'integrità e valutarne l'eventuale perdita prestazionale conseguente a microfessurazioni indotte dallo stress termico subito.

A confronto con la miscela ottimizzata in termini di estrudibilità, sono state studiate alcune formulazioni modificate e basate anche sull'impiego di una malta refrattaria opportunamente combinata con altri ingredienti per conseguire i requisiti di estrudibilità. La malta impiegata è una malta cementizia refrattaria premiscelata a base di argilla, chamotte e alluminato di calcio.

L'idea alla base della sperimentazione sta nel riuscire a produrre elementi aventi la proprietà di refrattarietà combinata alle caratteristiche dei manufatti realizzati con la tecnologia dell'*additive manufacturing*. Abbinando i vantaggi di entrambe le tecnologie si riuscirebbero a produrre, in poco tempo e a prezzi ridotti, elementi con caratteristiche termiche migliorate direttamente in situ o realizzando pannelli murari in laboratorio e trasportati in cantiere.

Un'altra applicazione dei manufatti così ottenuti potrebbe essere rappresentata dal loro utilizzo per la sicurezza antincendio andando, ad esempio, a stampare elementi modulari in laboratorio o direttamente in cantiere.

Nella ricerca è stato affrontato dapprima il mix design del materiale, che doveva essere orientato al conseguimento delle tre principali caratteristiche di estrudibilità e successivamente sono state valutate le prestazioni meccaniche della miscela cementizia realizzata. Gli obiettivi posti si sostanziano nella valutazione delle proprietà meccaniche residue del materiale in seguito all'esposizione alle alte temperature.

Al fine di tali obiettivi, per mezzo di un forno di cottura, è stata prodotta la simulazione fisica dell'esposizione ad alte temperature; quindi, prove di caratterizzazione meccanica sono state compiute sui materiali esposti e non esposti, ed infine i dati sperimentali sono stati utilizzati per il confronto tra le due diverse tipologie di maturazione.

## 8.1 Studio del mix design

In Tabella 8.1 sono riportate a confronto le composizioni di alcune miscele messe a punto per le prove ad alta temperatura (sono state selezionate queste tre in quanto reputate le più significative). Nella terza composizione il fumo di silice è stato sostituito con un agente modificatore di viscosità che ha permesso di garantire lo stesso comportamento reologico dell'impasto rendendolo estrudibile e soddisfacendo i criteri di stabilità di forma, finestra di lavorabilità e qualità superficiale.

Tabella 8.1 - Mix design delle miscele

Ingredienti	Rif	Refr+FS	Refr-Mod
Cemento 52.5R	800	-	-
Sabbia (0-0,4 mm)	1100	-	-
Malta refrattaria	-	1900	2020
Fumo di silice	120	120	-
Additivo superfluidificante	4	4	4
Additivo antiritiro	8	8	8
Acqua	280	430	415
Agente espansivo	20	20	20

## 8.2 Prove di estrudibilità

Le variabili di cui è stato tenuto conto per l'individuazione del mix design per la miscela con malta refrattaria sono la *printability window*, la *print quality* e la *shape stability*, è stata accertata, quindi, la perfetta estrudibilità e la corrispondenza della qualità di stampa ai canoni che sono alla base dell'*additive manufacturing*.

La qualità di stampa si riferisce alla proprietà dello strato stampato di avere la stessa consistenza dimensionale e la stessa qualità per tutta la realizzazione della stampa. Sulla base di queste considerazioni è stato possibile estrudere e valutare la qualità della miscela Refr+FS e Refr-Mod.

Nella figura 8.1 è riportata la prova di estrusione manuale che è stata realizzata in laboratorio.

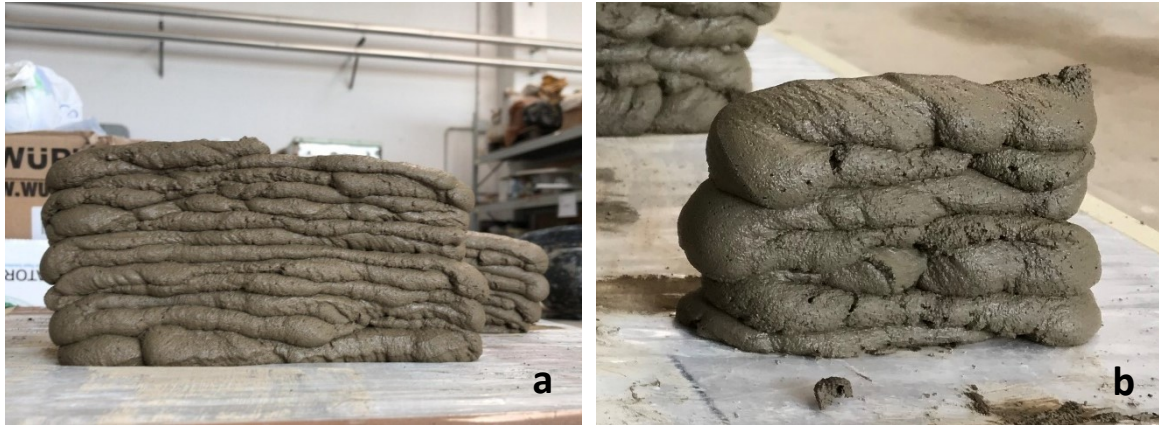


Figura 8.1 - Prove di estrusione delle miscele: (a) Refr+FS; (b) Refr-Mod

Dalle immagini risulta che:

- la stabilità degli strati sovrapposti risulta soddisfacente poiché non avviene uno sfalsamento degli strati stessi man mano che si posano l'uno sull'altro. Inoltre, ogni strato rimane delineato nel suo contorno;
- la superficie del contorno esterno risulta liscia e priva di difetti superficiali;
- durante la fase di stampa è stata ottenuta una coerenza dimensionale.

### 8.3 Prove di caratterizzazione meccanica

Per ciascuna composizione state realizzate 4 serie da 3 provini di dimensioni 4 x 4 x 16 cm all'interno di casseri metallici previa stesura di uno strato di disarmante, dopo circa 24 ore i 24 provini ottenuti sono stati scasserati e mantenuti in condizioni di UR del  $95\% \pm 2\%$  e temperatura di  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  per 25 giorni. La metà dei provini (12) è stata mantenuta nelle stesse condizioni per ulteriori due giorni fino al raggiungimento dei 28 giorni di stagionatura e quindi sottoposti a test di compressione e flessione secondo le modalità previste dalla norma UNI EN 1015-11 "Methods of test for mortar for masonry. Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar" (anno 1999). L'altra metà dei provini (12) è stata invece mantenuta per 4 ore in forno ad una temperatura di  $500^{\circ}\text{C}$ . La fase di riscaldamento del forno è stata monitorata e la rampa di incremento delle temperature è riportata nel grafico 8.1. Dopo un'ora la temperatura del forno raggiungeva i  $450^{\circ}\text{C}$  e dopo un'ora e venti minuti la temperatura raggiungeva il valore a regime di  $500^{\circ}\text{C}$ .

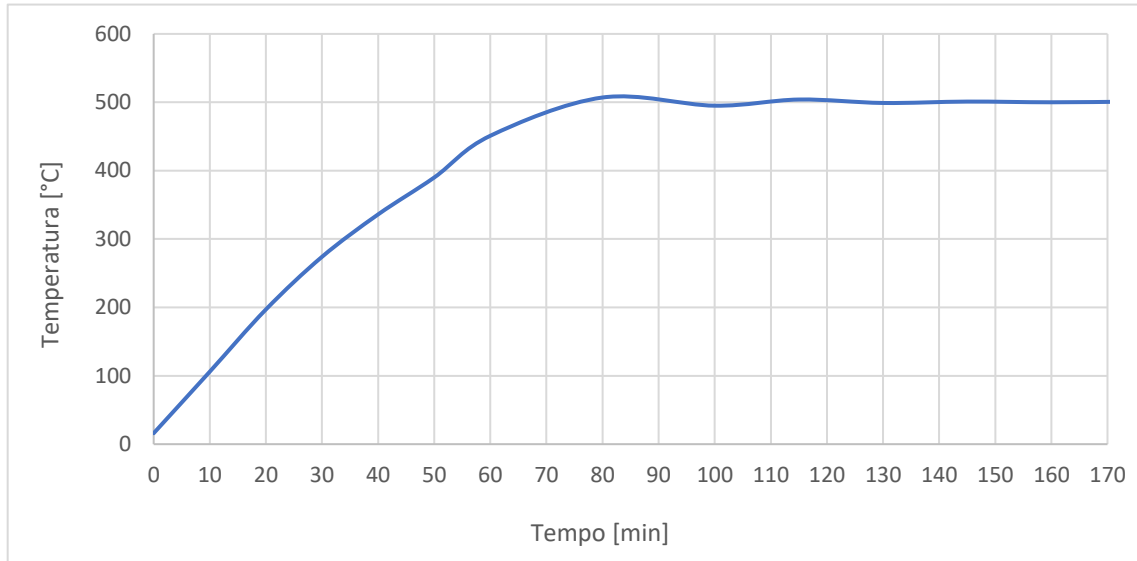


Grafico 8.1 - Incremento della temperatura del forno durante la fase iniziale della prova termica

Nel caso della miscela “Rif” tutti e 12 i provini sottoposti a prova hanno perso la loro integrità per via del forte shock termico subito; nel caso della miscela “Refr+FS” 3 provini su 12 hanno conservato la loro integrità mentre nel caso della miscela “Refr-Mod” tutti e 12 i provini si sono mantenuti integri a fine ciclo termico (figura 8.2)



Figura 8.2 - Provini “Refr+FS” (a) e “Refr-Mod”(b) a fine ciclo termico

In Tabella 8.2 sono riportati i valori medi di resistenza a flessione e misurati dopo 28 giorni di stagionatura mettendo a confronto le varie miscele.

Tabella 8.2 - Risultati delle prove di resistenza meccanica (28 giorni di maturazione)

	Rif	Rif +500°C	Refr+FS	Refr+FS +500°C	Refr-Mod	Refr-Mod +500°C
N° provini integri	12	0	12	3	12	12
Resistenza a compressione (MPa)	63,23	-	36,89	36,07	34,09	36,93
Resistenza a flessione (MPa)	10,12	-	4,89	5,40	5,15	5,33

Tabella 8.3 - Densità media delle miscele precedente e successiva al ciclo termico

	Rif	Rif +500°C	Refr+FS	Refr+FS +500°C	Refr-Mod	Refr-Mod +500°C
Densità media (kg/m <sup>3</sup> )	2124,11	0	1908,24	1564,96	1975,42	1694,72
Diminuzione %	//	-	//	-18%	//	-14%

## 8.4 Conclusioni

Per concludere, l'attenzione è stata rivolta ad un materiale stampabile con caratteristiche di refrattarietà capace di resistere alle alte temperature.

Partendo da un *mix-design* iniziale, è stata realizzata la miscela "Refr+FS" e "Refr-Mod" sottoposte preventivamente a prove di estrusione e, in seguito, a caratterizzazione tramite test meccanici di flessione e compressione.

Nelle fasi di maturazione alle alte temperature è avvenuta la rottura di alcuni campioni all'interno del forno per il fenomeno di *spalling* a cui il calcestruzzo è sottoposto alle alte temperature. Per questo motivo è stata confezionata una malta senza la presenza del fumo di silice, sostituito con un modificatore di viscosità, in modo da creare una matrice cementizia meno compatta rispetto alla

precedente e consentire, quindi, la dispersione delle sovrappressioni che si creano durante la maturazione alle alte temperature.

Dal confronto dei risultati ottenuti dalle prove meccaniche, si può notare che l'esposizione alle alte temperature non ha influenzato negativamente la resistenza meccanica a flessione, si può osservare addirittura un incremento minimo nelle prestazioni dei campioni che hanno subito il trattamento termico rispetto a quelli mantenuti alle condizioni iniziali.

I risultati dei test meccanici a compressione relativi alle miscele esposte alle alte temperature sono pressoché in linea con quelli relativi ai campioni delle medesime miscele che non hanno subito trattamento termico.



## **9 Studio di una miscela alleggerita ed estraribile con aggregato di riciclo**

---

Il lavoro presentato in questo capitolo è volto allo studio di miscele a base cementizia estraribili, alleggerite, contenenti aggregato di riciclo proveniente da pneumatici in disuso, denominato PFU. In questa sperimentazione sono state utilizzate due frazioni granulometriche di questo aggregato: il polverino di gomma, con diametri delle particelle compresi tra 0.5 e 1.1 mm e una densità di circa 1209 kg/m<sup>3</sup>, e un granulato di gomma, composto da particelle di diametro compreso tra 2.5 e 3.7 mm e una densità di circa 1190 kg/m<sup>3</sup>. Ulteriori caratteristiche di questo aggregato sono state descritte al precedente capitolo 2.

Lo scopo principale della sperimentazione è quello di ottenere una miscela estraribile e quindi utilizzabile in ambito di produzione additiva che presenti una minore densità rispetto alle formulazioni tradizionali, che includa proprietà di isolamento termo-acustico e che risulti maggiormente deformabile con una maggiore capacità di assorbire vibrazione meccaniche.

Il raggiungimento di tale obiettivo comporta, di conseguenza, degli effetti secondari di beneficio all'ambiente: si ottiene una strategia efficace ed economica per il riciclaggio di un materiale di scarto come il PFU, e un minore impiego di risorse naturali, dal momento che l'aggregato riciclato sostituisce la frazione di aggregato naturale.

### **9.1 Procedura sperimentale**

La procedura sperimentale ha previsto lo studio delle varie formulazioni a partire da un mix design di riferimento, a questo sono seguite prove di estrusione preliminari che hanno preceduto l'utilizzo delle miscele al sistema di estrusione robotizzato. Appena verificata la compatibilità delle miscele con un sistema di estrusione di prova, sono state stampate delle lastre da cui sono stati ricavati i campioni da cui ricavare la densità, da testare meccanicamente con prove di flessione a quattro punti e prove di compressione.

## 9.2 Mix design

Le formulazioni presentate in questo paragrafo sono state ottenute a partire da un mix design di riferimento, presentato al paragrafo 4.1 con la sigla SRA+CaO-FS, e denominato d'ora in avanti riferimento o RIF.

Tabella 9.1 - Mix design delle miscele oggetto della sperimentazione

MIX DESIGN	RIF [kg/m <sup>3</sup> ]	SAND50- PWD50 [kg/m <sup>3</sup> ]	PWD100 [kg/m <sup>3</sup> ]	PWD50- GRAN50 [kg/m <sup>3</sup> ]	PWD25- GRAN75 [kg/m <sup>3</sup> ]
Cemento	800	800	800	800	800
Fumo di silice	120	120	120	120	120
Sabbia calcarea 0-0,4 mm	1100	550	0	0	0
Polverino di gomma 0,5-1,1 mm	0	150	300	150	75
Granulato di gomma 2,5-3,7 mm	0	0	0	160	240
Acqua	300	280	260	250	230
Superfluidificante	4	4	4	4	4
SRA	8	8	8	8	8
Agente espansivo	20	20	20	20	20

Come mostrato in tabella 9.1, sono state ottimizzate diverse miscele con crescenti quantitativi di polverino e granulato di gomma a sostituzione parziale o totale della sabbia presente nella miscela di riferimento. Nello specifico, a partire dal riferimento in cui il volume di inerte è composto al 100% da un aggregato calcareo ( $d_{max}= 0.4mm$ ) sono state eseguite le seguenti operazioni:

- nel mix SAND50-PWD50, il 50% del volume di aggregato calcareo è stato sostituito con lo stesso volume di polverino di gomma pari a 150 kg/m<sup>3</sup>;
- nel mix PWD100, il volume di aggregato è stato totalmente sostituito da polverino di gomma per un quantitativo pari a 300 kg/m<sup>3</sup>;
- nel mix PWD50-GRAN50, il volume di sabbia è stato sostituito per il 50% da polverino (150 kg/m<sup>3</sup>) e per il 50% da granulato (160 kg/m<sup>3</sup>);
- nel mix PWD25-GRAN75, per il 25% polverino (75 kg/m<sup>3</sup>) e 75% granulato (240 kg/m<sup>3</sup>).

Tutte le altre componenti sono rimaste invariate ad eccezione dell'acqua il cui contenuto è stato fatto variare con lo scopo di ottenere, per tutti mix, caratteristiche reologiche allo stato fluido e di estrudibilità più simili possibili. Dalla tabella è possibile notare come, passando dalla miscela di riferimento fino al mix PWD25-GRAN75, il quantitativo di acqua diminuisca. Questo è dovuto al fatto che aggiungendo quantitativi crescenti di aggregati con diametro maggiore e superficie irregolare, a parità di lavorabilità, il contenuto d'acqua diminuisce.

### 9.3 Prove di estrudibilità

Le prove preliminari di estrusione sono state effettuate con l'ausilio del sistema di prova descritto al paragrafo 3.2.2. Tale sistema, non coadiuvato da guida robotica, ha consentito la deposizione delle miscele con lo scopo di verificarne le caratteristiche di print quality, shape stability e printability window.



Figura 9.1 - Prova di estrusione delle miscele: (a) SAND50-PWD50; (b) PWD100; (c) PWD50-GRAN50; (d) PWD25-GRAN75

Come mostrato in figura 9.1, i vari mix design sono stati ottimizzati mediante prove di estrudibilità che hanno consentito di calibrare i giusti quantitativi di acqua da impiegare per ciascuna miscela con il fine di ottenere le stesse caratteristiche allo stato fresco e valutare le caratteristiche del materiale estruso.

Tutte le estrusioni hanno presentato una buona finitura superficiale, conformità e coerenza dimensionale; una buona qualità e consistenza durante tutta la prova, considerando la perdita di lavorabilità che avviene nel tempo ed infine un'ottima capacità di autosostenersi e resistere alle deformazioni durante la costruzione dei layers senza collassare.

## 9.4 Preparazione dei campioni

In seguito alle fasi di ottimizzazione delle miscele, si è passati alla produzione dei campioni da testare. Come anticipato nei precedenti paragrafi, i provini da sottoporre ai test di caratterizzazione meccanica e termica ed acustica sono stati ricavati dalle lastre estruse con un sistema di stampa 3D coadiuvato da un braccio robotico a tre assi, come descritto al paragrafo 3.2.3.

Per ciascuna delle miscele riportate in tabella 10.1 sono state estruse due lastre di dimensioni 220x160x54 mm da cui sono stati ricavati 3 provini su cui condurre test meccanici (figura 9.2).

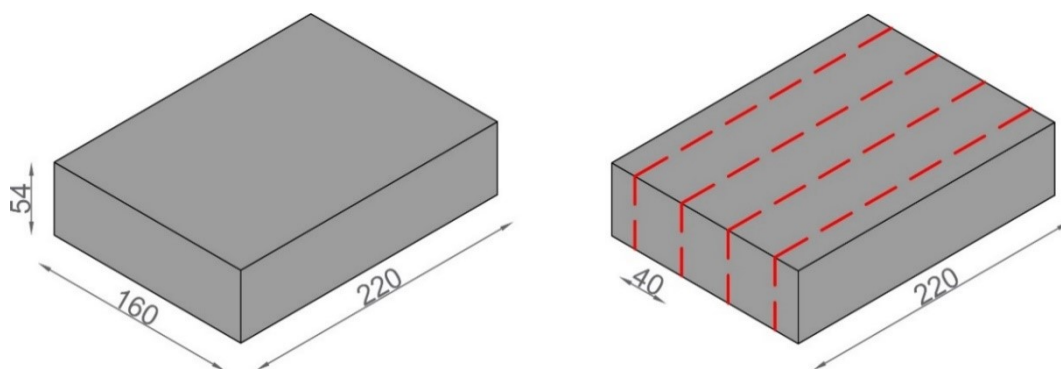


Figura 9.2 – Modello tridimensionale della lastra e taglio dei provini

Ogni lastra di spessore pari a 54 mm è stata ottenuta con la sovrapposizione di 5 layers dello spessore di circa 9 mm utilizzando un ugello di estrusione di diametro pari ad 1 cm, considerando un abbassamento del layer, dovuto alla consistenza del materiale, del 10%.

L'estrusione delle lastre ha seguito il percorso di stampa schematizzato in figura 9.3.

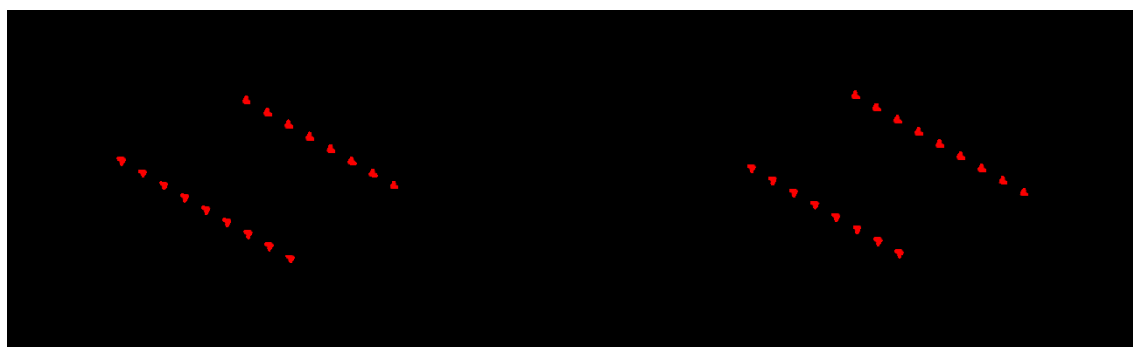


Figura 9.3 - Figura 9.4 – Percorso di stampa dei layers 1 e 2 della lastra

Il primo layer è stato estruso a partire dal punto A di coordinate (0, 0, 0), espresse in millimetri, fino al punto B (220, 160, 0) seguendo un percorso lineare, con un infill del 100%. L'estrusione del secondo layer è partita dal punto B+ $\Delta z$  di coordinate (220, 160, 9), dove  $\Delta z$  corrisponde allo

spessore del layer, fino ad arrivare al punto  $A+\Delta z$  (0, 0, 9). L'iterazione è stata ripetuta per 6 volte, tante quante il numero di layer che compongono la lastra, come riportato nella tabella 9.2.

Tabella 9.2 - Coordinate iniziali e finali di deposizione di ciascun layer

LAYER	P <sub>INIZIO</sub>	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	P <sub>FINE</sub>	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
1	A	0	0	0	B	220	160	0
2	B+ $\Delta z$	220	160	9	A+ $\Delta z$	0	0	9
3	A+2 $\Delta z$	0	0	18	B+2 $\Delta z$	220	160	18
4	B+3 $\Delta z$	220	160	27	A+3 $\Delta z$	0	0	27
5	A+4 $\Delta z$	0	0	36	B+4 $\Delta z$	220	160	36
6	B+5 $\Delta z$	220	160	45	A+3 $\Delta z$	0	0	45

Alla coordinata z relativa all'ultimo layer deposto, pari a 45 mm, dovrà essere aggiunto lo spessore del layer 6, per un totale di 54 mm di spessore totale di ciascuna lastra.



Figura 9.5 – Estrusione delle lastre: (a) RIF; (b) SAND50-PWD50; (c) PWD100; (d) PWD50-GRAN50; (e) PWD25-GRAN75

In figura 9.5 sono mostrate alcune fasi di stampa relative ai cinque mix design. È possibile notare come sia raggiunto lo scopo prefissato: tutte le formulazioni risultano estrudibili e con la giusta fluidità, la viscosità della miscela non ostacola la fuoriuscita dall'ugello e al tempo stesso consente al materiale di autosostenersi e resistere alle deformazioni durante la costruzione dei layers superiori. Si può osservare, inoltre, come per tutti i mix sia stato soddisfatto il requisito di print quality: i prototipi stampati risultano privi di difetti superficiali, i bordi sono definiti, l'estrusione dei filamenti che compongono i layers non presenta interruzione e hanno coerenza dimensionale.

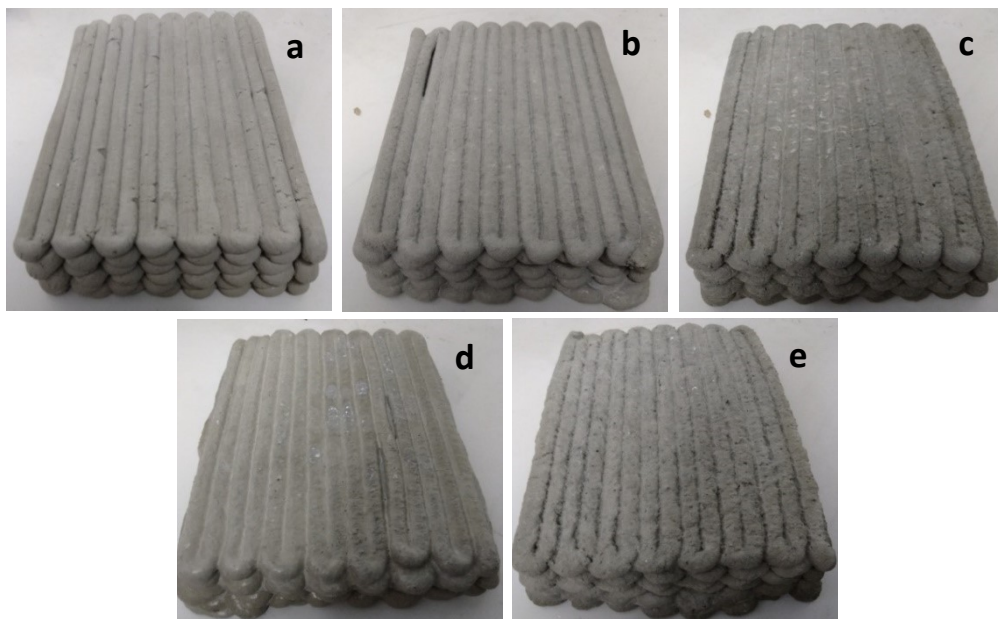


Figura 9.6 – Lastre in seguito all'indurimento: (a) RIF; (b) SAND50-PWD50; (c) PWD100; (d) PWD50-GRAN50; (e) PWD25-GRAN75

La figura 9.6 mostra le lastre a indurimento avvenuto; si può osservare come la qualità della finitura peggiori all'aumentare del contenuto di granulato di gomma, cioè in presenza di un aggregato di granulometria maggiore e con bordi più irregolari.



Figura 9.7 - Taglio dei prototipi tramite sega circolare

Si è quindi proceduto con il taglio della lastra, tramite una sega circolare ad acqua con lama diamantata (figura 9.7), in modo da estrarre 3 campioni per ciascuna miscela da sottoporre a test di flessione a 4 punti.

Ogni campione è stato quindi misurato in tre punti diversi per ottenere le dimensioni medie di spessore e larghezza, utili ai fini dei test meccanici.

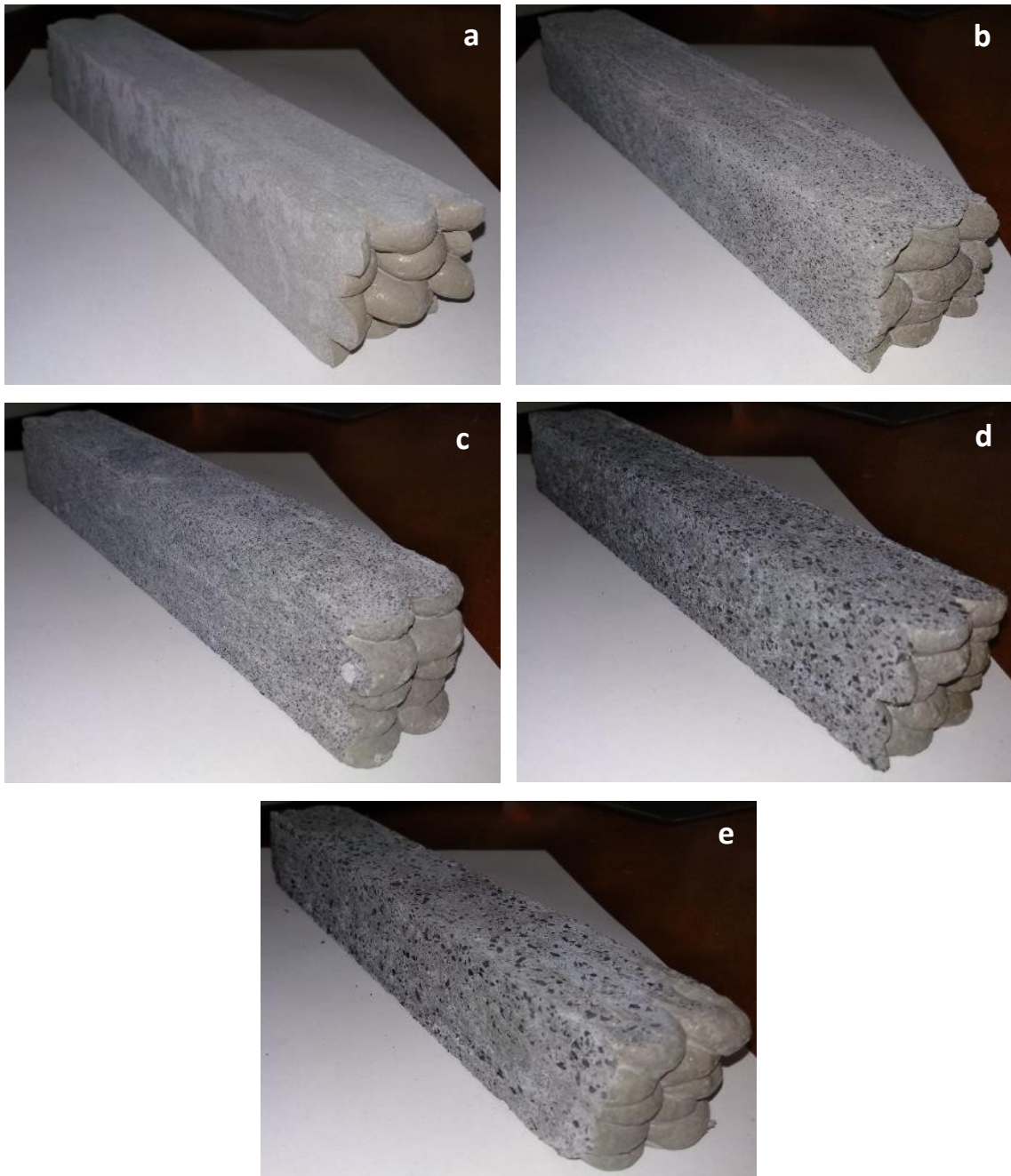


Figura 9.8 -Provini ricavati dal taglio delle lastre: (a) RIF; (b) SAND50-PWD50; (c) PWD100; (d) PWD50-GRAN50; (e) PWD25-GRAN75

Dall'analisi dei campioni estratti (figura 9.8) è possibile verificare un buon risultato anche dal punto di vista della morfologia interna: i campioni, infatti, non presentano fessurazioni, o difetti superficiali evidenti e mantengono un'ottima conformità dimensionale.

## 9.5 Prove di caratterizzazione meccanica

### 9.5.1 Prove di flessione a 4 punti

I test meccanici di flessione a 4 punti sono stati condotti su un campione di tre provini, di dimensioni 200x40x40mm, per ciascuna miscela ad una maturazione superiore ai 28 giorni.

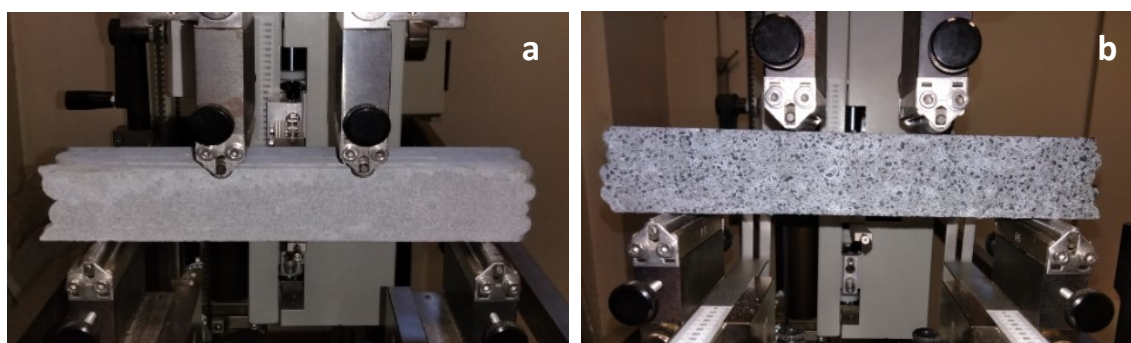


Figura 9.9 – Prove di flessione a 4 punti: (a) RIF; (b) PWD25-GRAN75

Il seguente grafico 9.1 mostra i risultati della prova di flessione.

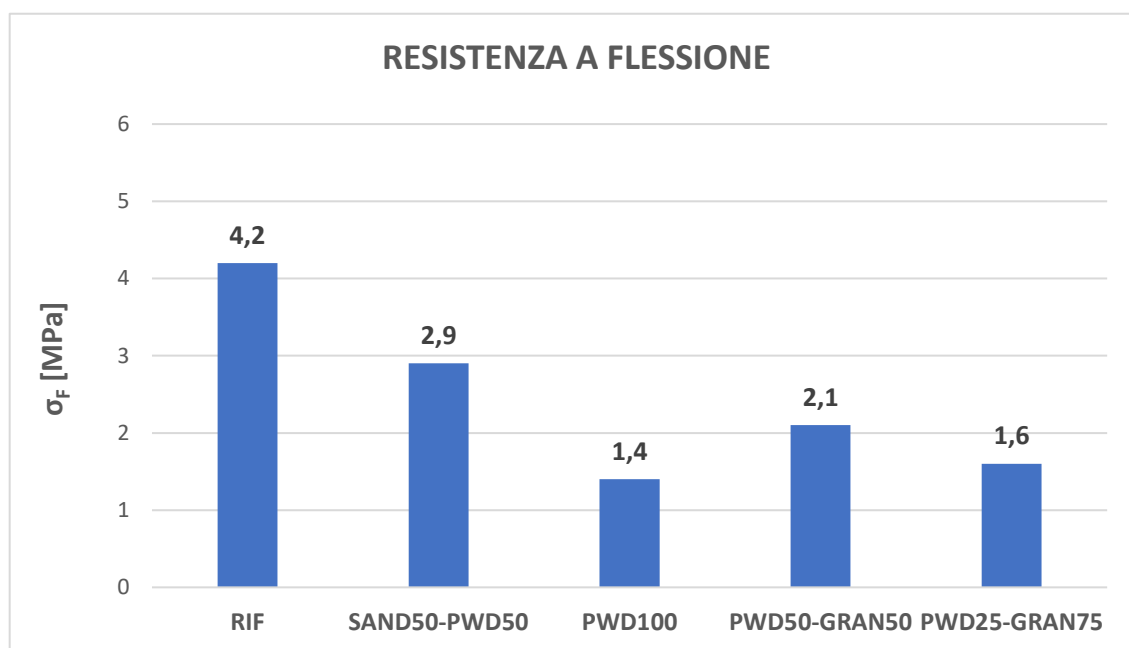


Grafico 9.1 - Istogramma relativo alla resistenza a flessione



Dal grafico è evidente che la resistenza a flessione della miscela di riferimento con il solo aggregato calcareo (RIF) risulta maggiore di quella delle miscele che presentano PFU. Ciò suggerisce che la resistenza a flessione diminuisce all'aumentare della percentuale di gomma presente nella miscela. Dopo la rottura a flessione dei campioni contenenti PFU è stato osservato che la gomma risultava facilmente rimovibile dalla matrice suggerendo un'adesione non efficace tra particelle di gomma e pasta cementizia, fattore principale nella riduzione della resistenza flessione.

Se si pone l'attenzione ai valori di resistenza relativi alle sole miscele contenenti gomma, è evidente come la formulazione SAND50-PWD50 risulti più performante grazie alla presenza di aggregato lapideo che costituisce il 50% del volume di inerte totale.

Le miscele con granulato mostrano una resistenza a flessione maggiore rispetto la miscela con solo polverino, poiché la percentuale di gomma complessivamente presente è inferiore.

La resistenza della miscela PWD50-GRAN50 risulta maggiore di quella PWD25-GRAN75 complice un miglior assortimento granulometrico che aumenta la compattezza del calcestruzzo diminuendo la percentuale di vuoti.

Dall'analisi dei diagrammi sforzo – deformazione (figura 9.10) si desume che le miscele contenenti rispettivamente il solo aggregato calcareo (RIF) e quella contenente sabbia e polverino (SAND50-PWD50) presentano un campo plastico molto più ridotto rispetto alle altre e ciò si traduce in un'elevata resistenza e un comportamento fragile. Le miscele che presentano aggregato di riciclo sono invece caratterizzate da un campo plastico maggiore ed esteso che porta a valori più alti di duttilità.

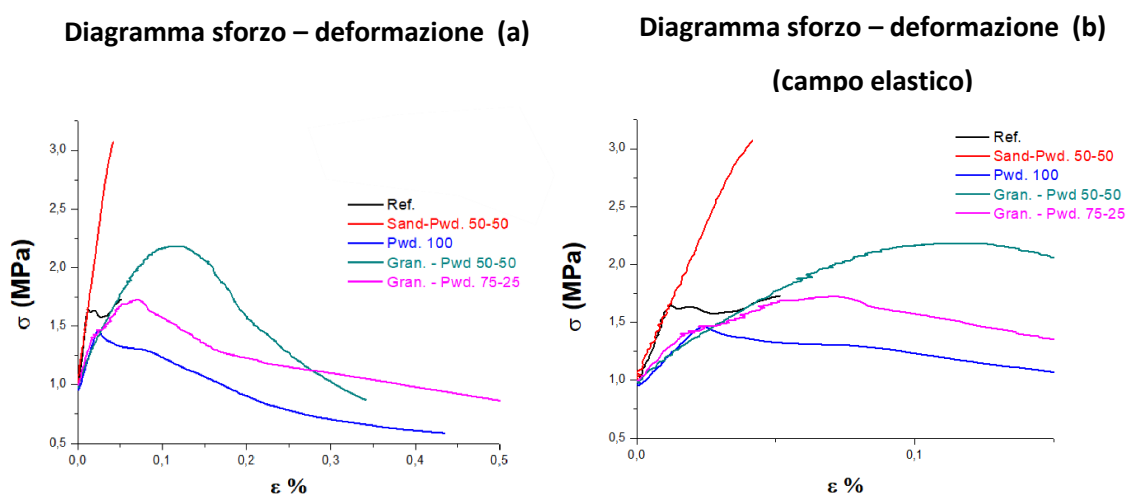


Figura 9.10 - (a) Diagramma sforzo-deformazione completo ; (b) Diagramma sforzo-deformazione in campo elastico

Il modulo elastico esprime la propensione del materiale ad allungarsi o ad accorciarsi a seguito dell'azione di una forza di carico.

Quello del calcestruzzo dipende strettamente da modulo di elasticità e rapporto volumetrico degli aggregati, pertanto, maggiore è il modulo di elasticità degli aggregati, maggiore è quello del calcestruzzo.

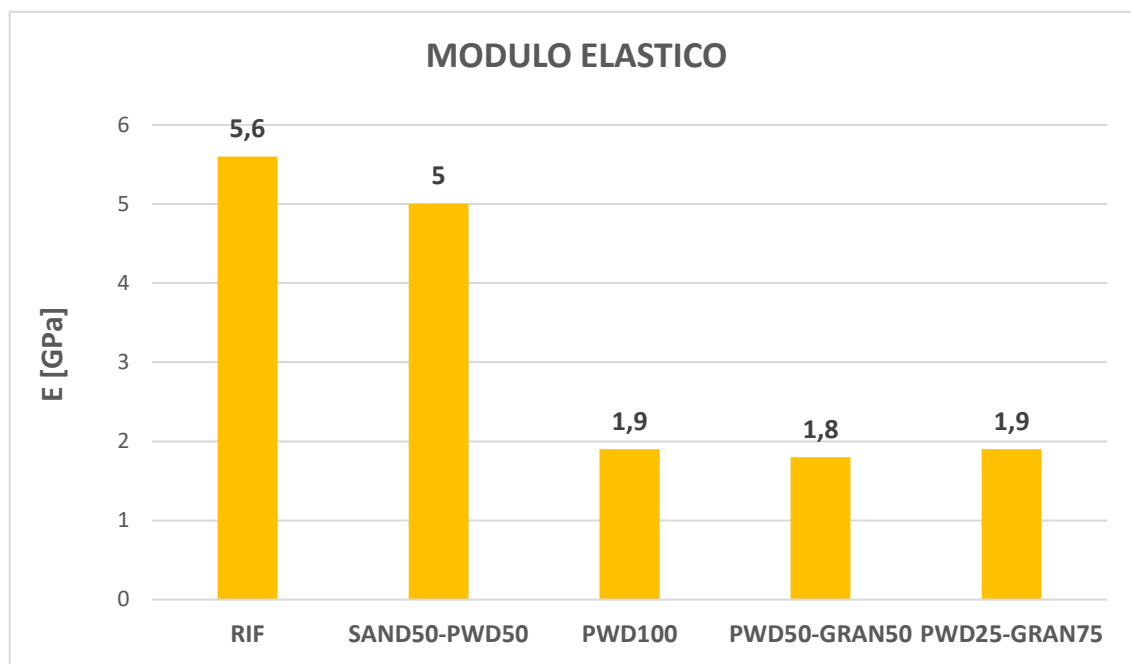


Grafico 9.2 – Modulo elastico delle miscele

Per questo motivo, poiché il modulo elastico della gomma è minore di quello della sabbia, il modulo di elasticità delle miscele sarà inversamente proporzionale al volume di gomma presente.

Come confermato dal grafico 9.2, la miscela di riferimento, il cui volume di inerte è completamente costituito da aggregato lapideo, risulta avere il modulo elastico maggiore. Il valore del mix SAND50-PWD50 risulta avere un modulo elastico molto prossimo a quello della miscela RIF, in quanto caratterizzato anch'esso dalla presenza di aggregato calcareo. Le miscele PWD100, PWD50-GRAN50, PWD25-GRAN75, il cui volume di inerte è costituito dal solo aggregato di gomma risultano avere un minore modulo elastico.

Per quanto affermato precedentemente e confermato dal grafico 9.3, le miscele contenenti il solo aggregato di gomma presentano deformazioni più significative rispetto a quelle con sabbia. La presenza di aggregato calcareo nel mix RIF e mix SAND50-PWD50 rende, infatti, le miscele più rigide e meno deformabili.

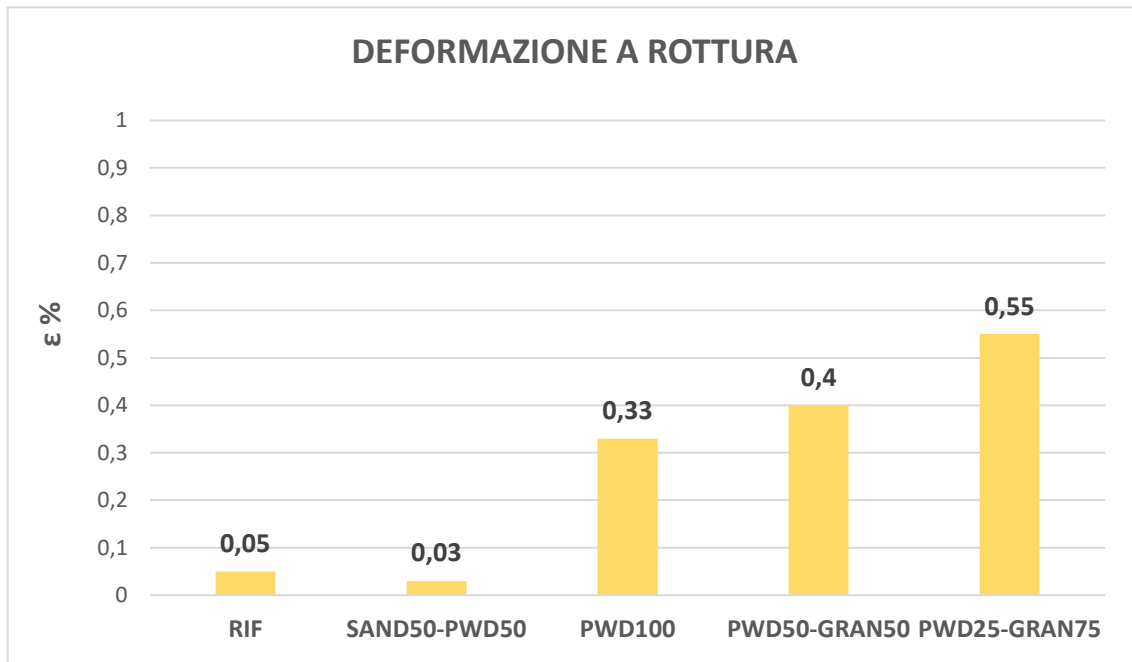


Grafico 9.3 - Istogramma relativo alla deformazione a rottura

Deformazioni maggiori denotano una maggiore duttilità, che aumenta proporzionalmente con l'aggiunta di gomma. Dal confronto tra la miscela contenente il solo polverino e quelle contenenti anche granulato, risulta chiaro come le seconde possiedano la capacità di sopportare deformazioni maggiori, questo è dovuto alle particelle di granulato che rallentano l'avvio e la propagazione delle cricche.

Il comportamento duttile migliora quindi con l'aumentare della dimensione degli aggregati di gomma, cioè con l'aumentare della frazione di granulato presente in miscela.

### 9.5.2 Prove di compressione

I test di resistenza meccanica a compressione sono stati condotti su provini cubici di dimensioni 40x40x40 mm.



Figura 9.11 - Esecuzione della prova meccanica di compressione

I risultati delle prove sono riportati nel seguente grafico 9.4.

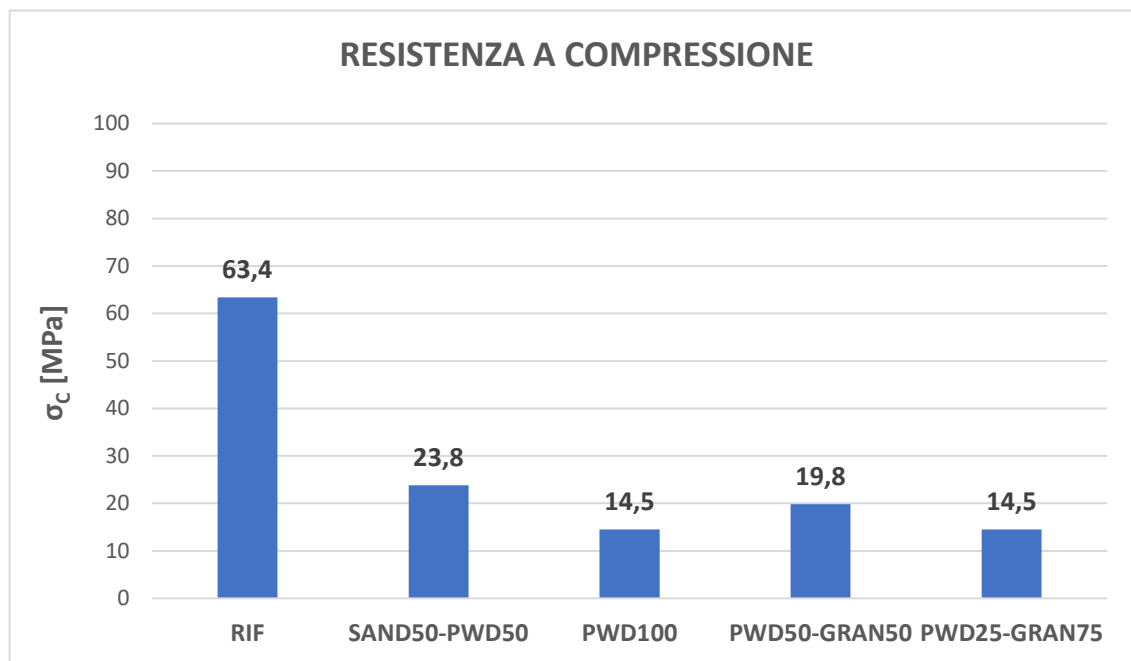


Grafico 9.4 - Istogramma relativo alla resistenza a compressione

Come è possibile notare dal grafico, l'andamento dei valori di resistenza a compressione è in linea con il trend dei risultati a flessione e densità delle miscele. È evidente una riduzione delle resistenze meccaniche direttamente proporzionale alla quantità aggregato di gomma introdotto nella miscela. La riduzione della resistenza a compressione è da attribuire a 3 aspetti:

- maggiore deformabilità delle particelle di gomma rispetto alla matrice cementizia che comporta l'insorgere di fessure attorno alle particelle di gomma determinando una resistenza minore alla sollecitazione di compressione;
- debole legame tra aggregato non lapideo e matrice cementizia;
- minore resistenza a compressione degli aggregati non lapidei.

La miscela PWD100 è caratterizzata da una minore densità rispetto alle altre miscele contenenti gomma, in quanto le particelle di polverino esibiscono una maggiore superficie specifica e, in virtù della loro natura apolare, hanno maggiore tendenza ad espellere acqua e intrappolare aria.

Nelle miscele SAND50-PWD50, PWD50-GRAN50 e PWD25-GRAN75 è presente un minore quantitativo di gomma che implica diminuzioni di densità più contenute rispetto alla miscela di riferimento.

Per questo motivo, i valori di resistenza a compressione di queste miscele sono superiori rispetto al mix PWD100.

Dal grafico è possibile inoltre notare una differenza di performance meccaniche tra i mix PWD50-GRAN50 e PWD25-GRAN75. Tale gap è da ricondurre alle dimensioni delle particelle di gomma presenti: una minore perdita di resistenza è stata ottenuta nella miscela con maggiore percentuale di polverino (PWD50-GRAN50) in quanto, in questa formulazione, si concretizza una migliore sinergia e bilanciamento tra polverino e granulato migliorando la compattezza della matrice cementizia.

Il surplus di granulato nella miscela PWD25-GRAN75 è deleterio ai fini dell'adesione con la matrice cementizia e, di conseguenza, comporta una riduzione di resistenza meccanica. Tuttavia, la presenza di questa tipologia di filler consente di mantenere contenuta la riduzione di densità in quanto la tendenza ad intrappolare aria è inferiore. Inoltre, le particelle di granulato giocano un ruolo fondamentale nella riduzione della porosità e difettosità superficiale, che rappresenta un altro fattore chiave riguardo le proprietà meccaniche del materiale.

Le curve stress-strain delle miscele combinate mostrano che la resistenza a flessione del calcestruzzo dipende principalmente dalla concentrazione aggregata fine, mentre la forma della curva stress-deformazione dipende dall'aggregato grossolano concentrazione. Questi risultati rivelano che, sebbene le proprietà meccaniche delle composizioni contenenti PFU siano principalmente dipendenti dal contenuto totale di gomma, le concentrazioni diverse di particelle grossolane o fini possono essere regolate per ottenere un comportamento diverso.

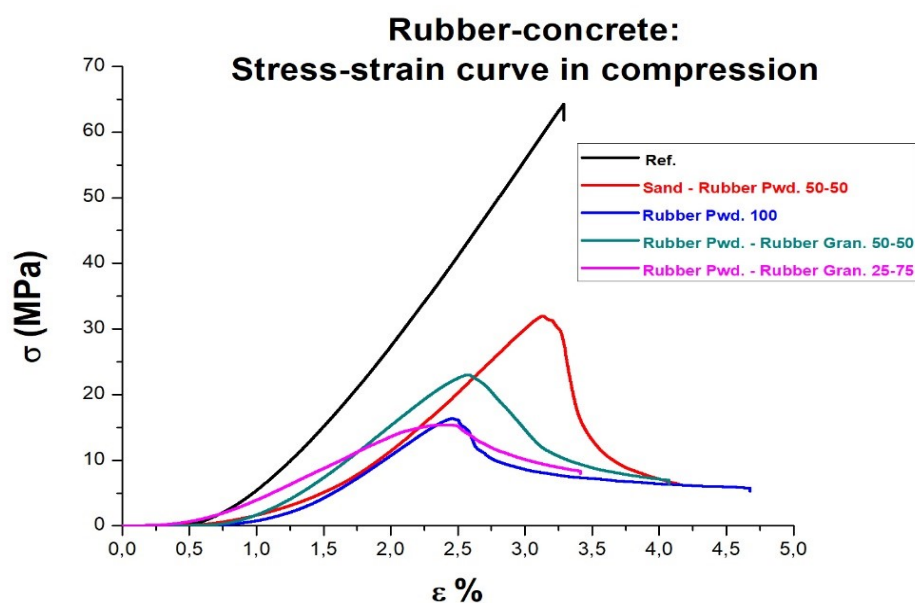


Grafico 9.5 - Curve stress-strain in compressione

Nella tabella seguente si riportano le classi di resistenza (*UNI EN 206 – 2006 e UNI 11104:2004*) associate a ciascuna formulazione:

Tabella 9.3 – Classi di resistenza associate ad ogni formulazione

Miscela	Classe di Resistenza	Classificazione
RIF	C 50/60	Calcestruzzo ad alte prestazioni
SAND50-PWD50	C 20/25	Calcestruzzo ordinario
PWD100	C 12/15	Calcestruzzo non strutturale
PWD50-GRAN50	C 16/20	Calcestruzzo ordinario
PWD25-GRAN75	C 12/15	Calcestruzzo non strutturale

## 9.6 Densità

Sui campioni destinati alla caratterizzazione acustica e termica (figura 9.12) sono state effettuate misure di volume e di massa al fine di quantificare la densità di ogni formulazione sviluppata.

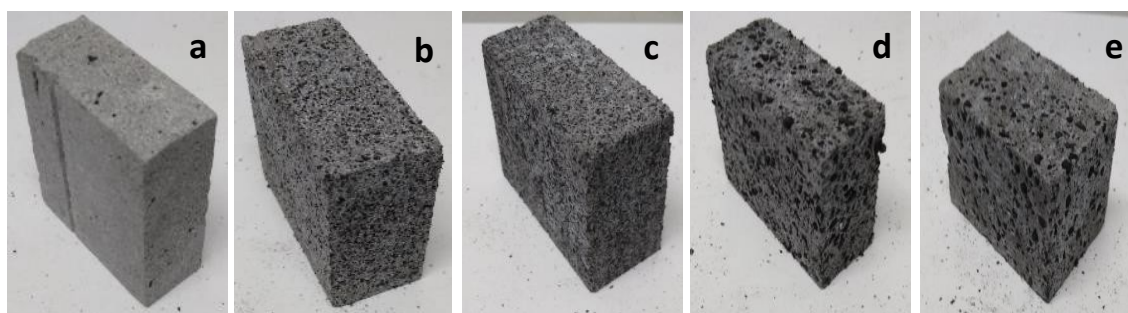


Figura 9.12 - Provini utilizzati per la valutazione della densità: (a) RIF; (b) SAND50-PWD50; (c) PWD100; (d) PWD50-GRAN50; (e) PWD25-GRAN75

I valori di densità delle miscele e le percentuali di riduzione rispetto al mix di riferimento calcolati sono riportati nel seguente grafico 9.6.

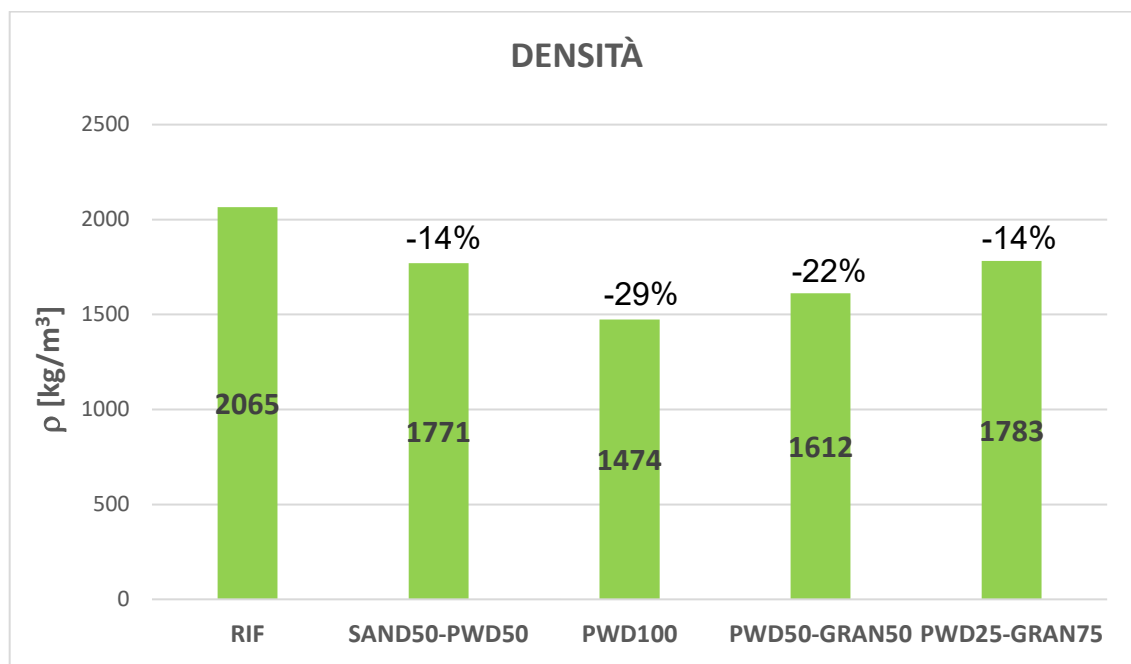


Grafico 9.6 – Istogramma relativo ai valori di densità delle miscele

La presenza della gomma nella miscela comporta un maggiore contenuto d'aria, dovuto alla natura organica apolare delle sue particelle, e quindi una diminuzione del peso unitario.

Se si prendono in considerazione le formulazioni con volume degli inerti costituito unicamente dalla gomma si può osservare che la densità è inversamente proporzionale alla presenza di gomma. Infatti, il mix PWD100, essendo costituito soltanto da polverino, presenta una percentuale di gomma complessivamente maggiore degli altri due e, di conseguenza, una densità minore.

## 9.7 Conclusioni

La sostituzione dell'aggregato naturale con polverino o granuli di gomma ha fornito un materiale con una buona estrudibilità. Il tipo di filler di gomma impiegato influenza la composizione della miscela: nelle formulazioni più ricche di granulato, è risultato necessario aumentare la fluidità della miscela, questo ha causato una peggiore shape stability dei filamenti durante la deposizione.

La campagna sperimentale mostra risultati interessanti: l'uso della gomma per pneumatici come aggregato nelle miscele cementizie suggerisce sviluppi promettenti nella produzione di un materiale da costruzione innovativo con prestazioni migliorate in termini di leggerezza, assorbimento di energia e duttilità.

La scelta del rapporto di sostituzione ottimale di aggregato di gomma è legata al raggiungimento del miglior compromesso tra resistenza meccanica e tenacità in base al campo di applicazione.

## 10 Processi di manifattura additiva del calcestruzzo in ambito industriale

---

La campagna sperimentale, presentata nel seguente capitolo, ha riguardato lo studio di soluzione per realizzare stampi in materiale cementizio mediante stampa 3D.

Questa fase è stata preceduta da un'ottimizzazione sulla reologia dell'impasto e sulla cinetica della reazione delle polveri reattive con acqua, in modo che la miscela risultasse sufficientemente lavorabile ma al tempo stesso fosse in grado di fare presa rapidamente e di autosostenersi.

### 10.1 Ottimizzazione della composizione della miscela

Al fine di ottenere la miscela ideale che rispettasse i requisiti fondamentali che sono alla base dell'additive manufacturing, sono state condotte diverse prove, in particolare il primo obiettivo è stato quello di determinare il quantitativo d'acqua all'interno della miscela prediligendo un rapporto acqua/cemento basso per ottenere una maggiore resistenza a compressione della miscela indurita.

Il secondo obiettivo è stato quello di ridurre il quantitativo di fumo di silice all'interno dell'impasto al fine di contenere i costi di confezionamento della miscela mentre il terzo obiettivo è stato quello di individuare la giusta granulometria e, quindi, il miglior tipo di aggregato da impiegare all'interno della miscela al fine di ottenere un impasto fluido, evitando la formazione di grumi che impedirebbero l'estrusione del materiale con l'occlusione dell'ugello di stampa, e di ottenere la migliore finitura possibile.

Di seguito è riportato il mix design iniziale.

Tabella 10.1 - Mix design di partenza

Materiale	Dosaggio [kg/m <sup>3</sup> ]
Cemento 52,5 R	700
Sabbia 0,6 mm	1100
Fumo di silice	200
Additivo superfluidificante	4
Additivo antiritiro	8
Acqua	210
Agente espansivo	20



I test per verificare la validità del mix studiato sono stati condotti tramite un sistema che inizialmente non prevedeva l'utilizzo del braccio robotico descritto al paragrafo 3.2.2. Tale sistema di estrusione è composto da tre elementi: un compressore, un serbatoio e una tavola vibrante.



Figura 10.1 - Sistema di estrusione di prova

Il compressore mette in pressione un cilindro in alluminio tornito, con funzione di serbatoio, formato al cui interno un pistone cilindrico in nylon spinge il materiale in uscita verso un tubo in pvc con diametro interno massimo pari a 0,6 mm da cui avviene l'estrusione per pressione. Il serbatoio è posto su una tavola vibrante per mantenere la lavorabilità richiesta dal sistema d'estrusione e la pressione può essere modificata tramite un regolatore di pressione.

La miscela presentava limiti durante l'estrusione, questo ha richiesto un aumento del dosaggio di acqua a discapito del rapporto acqua/cemento. La dimensione dell'aggregato, inoltre, rendeva difficoltosa l'estrusione creando degli intoppi durante la fuoriuscita.

Con il fine di superare tali problematiche sono state ridotte le dimensioni dell'inerte utilizzando una sabbia con diametro pari a 0,4 mm anziché 0,6 mm. Inoltre, è stato ridotto il dosaggio di fumo di silice ma questo ha richiesto un aumento del dosaggio di cemento per riequilibrare la coesività dell'impasto. La miscela finale ottenuta è riportata nella tabella seguente.

Tabella 10.2 - Mix design ottimizzato

Materiale	Dosaggio [kg/m <sup>3</sup> ]
Cemento 52,5 R	800
Sabbia 0,4 mm	1100
Fumo di silice	120
Additivo superfluidificante	4
Additivo antiritiro	8
Acqua	280
Agente espansivo	20

Il materiale ottenuto impiegando la ricetta definitiva presentava una ottima print quality (Fig. 9.2):

- Lo strato stampato è privo di difetti di superficie e non sono presenti discontinuità dovute all'eccessiva rigidità e/o all'inadeguata coesione;
- I bordi dello strato sono ben visibili e delineati;
- Per tutta l'estrusione si è avuta una coerenza dimensionale.

La miscela inoltre resiste alle deformazioni indotte dalla sovrapposizione degli strati (ottima shape stability), in particolare è in grado sia di sostenere il peso dello strato stesso che il peso dovuto dallo strato depositato sopra al precedente ed è inoltre in grado di resistere alla pressione necessaria per effettuare l'estrusione. Il materiale inoltre ha mantenuto le caratteristiche di fluidità necessarie all'estrusione per tutta il tempo necessario, ovvero 70 minuti (printability window).



Figura 10.2 – Print quality e shape stability

Sulla base di questi risultati è stata verificata la fattibilità dell'impiego della suddetta composizione di miscela nella deposizione additiva tramite un sistema di stampa dotato di braccio robotico.

## 10.2 Realizzazione di prototipi di stampi per formatura

### 10.2.1 Metodologia e sistema di estrusione

Il materiale sviluppato e messo a punto secondo la procedura descritta al precedente paragrafo 10.1 è stato utilizzato per costruire, tramite estrusione e sovrapposizione di layers, di stampi di prova, composti da matrice e punzone (figura 10.3), per validarne un possibile efficace utilizzo in ambito industriale.

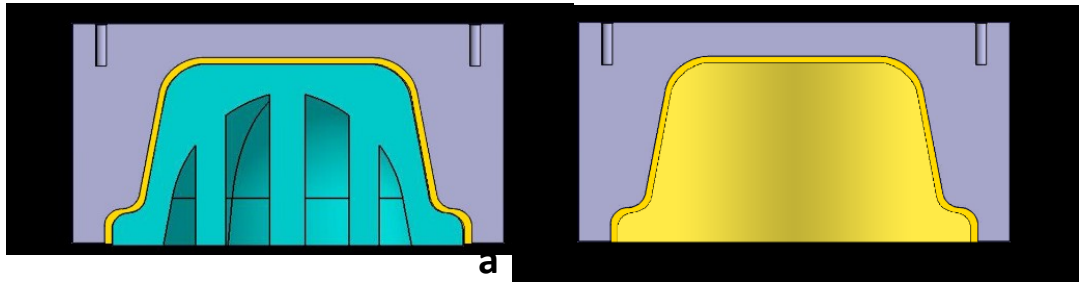


Figura 10.3 – Sezione dello stampo: (a) punzone; (b) matrice

Il sistema di estrusione, come descritto nel paragrafo 3.2.3, prevede l'ausilio di un braccio robotico COMAU a 3 assi (Figura 10.4).

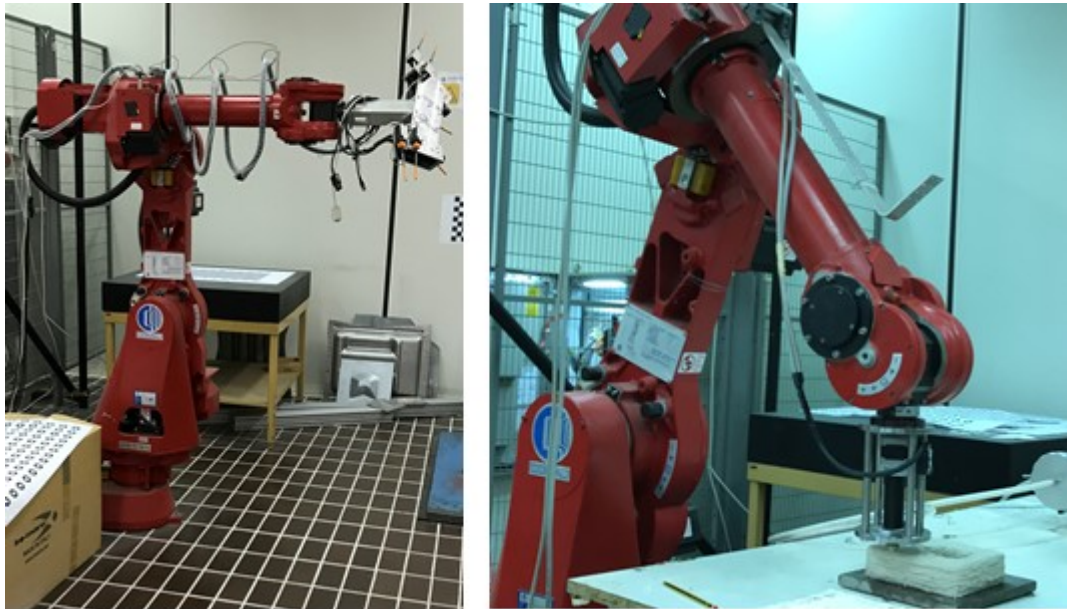


Figura 10.4 - Braccio robotico Comau utilizzato per la sperimentazione

La sequenza per ottenere l'oggetto finale prevede che il materiale venga posto allo stato fluido all'interno del serbatoio in alluminio collegato ad un sistema ad aria compressa con regolatore di pressione. Il pistone in nylon all'interno del serbatoio spinge il materiale verso il tubo di fuoriuscita utilizzato come ugello di estrusione (diametro 10mm o diametro 6mm) collegato alla testa del braccio robotico. I movimenti del braccio sono gestiti da un computer.

Il modello 3D dello stampo viene processato da un software di slicing (Cura<sup>®</sup>) che lo suddivide in layers tenendo conto degli spessori imposti dall'operatore, fornendo istruzioni alla macchina sui percorsi da seguire per la stampa di ciascuno strato.

Gli esperimenti sono stati condotti, per la parte relativa alla programmazione e l'uso del braccio robotico, con l'aiuto del gruppo di ricerca di Costruzione di Macchine dell'Università Politecnica delle Marche.

Vista l'importanza della sinergia tra materiale e sistema di estrusione è stato necessario, inoltre, apportare diverse modifiche al sistema di estrusione collegato al braccio robotico. Il sistema di estrusione è composto da un serbatoio di capienza pari a 3 litri di materiale collegato ad un compressore che eroga una pressione di 4 bar e consente la fuoriuscita del materiale fino a condurlo ad un estrusore che inizialmente era di tipo a vite. Nel corso dei vari tentativi è risultato evidente come il restringimento dovuto alla vite dell'estrusore non consentisse la fluida fuoriuscita del materiale, per questo motivo l'opzione finale è stata quella di adottare come terminale di estrusione il tubo di condotta del materiale dal serbatoio simulando, con tale soluzione, un sistema di estrusione a pressione.

Queste modifiche hanno consentito l'estrusione del materiale da un ugello a sezione circolare (pari a 10 mm per il primo tentativo e pari a 6 mm per il secondo) guidato dal braccio robotico e non hanno compromesso i risultati ottenuti precedentemente in termini di print quality e shape stability (figura 10.5).



Figura 10.5 - Fasi di stampa e print quality

Il software di slicing Cura® ha fornito il file di tipo GCode contenente le informazioni relative ai percorsi che il braccio ha seguito per la stampa di ciascuno strato. Lo spessore di ogni layer è stato inserito manualmente tenendo conto di un abbassamento dello strato di materiale estruso, dovuto alla consistenza plastica del materiale appena fuoriuscito dall'ugello e influenzato, in parte, anche dalla velocità di stampa. Questo abbassamento è pari a circa il 10-20% del diametro dell'ugello di estrusione ed è influenzato dalla fluidità del materiale. Nei due processi di stampa, avendo utilizzato ugelli di diametro pari a 10 e 6 mm, sono stati ottenuti layer di spessore di circa 0,8 mm e 0,5 mm.

### 10.3 Realizzazione dei prototipi

La prima attività prevista aveva come scopo la stampa di un punzone per formare stampi in lamiera come quello mostrato in figura 10.6.

Per l'estrusione è stato utilizzato un ugello di diametro pari a 10 mm e il mix descritto in Tabella 10.2. Il risultato dell'estrusione è mostrato in figura 10.7.

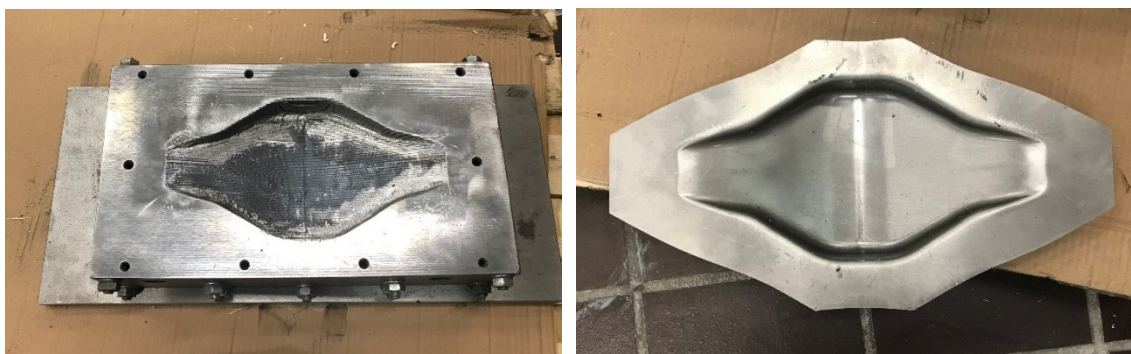


Figura 10.6 - Esempio dello stampo in lamiera



Figura 10.7 - Prototipo di punzone estruso in calcestruzzo

Un secondo tentativo di estrusione è stato invece quello relativo all'estrusione del punzone mostrato in figura 10.8.

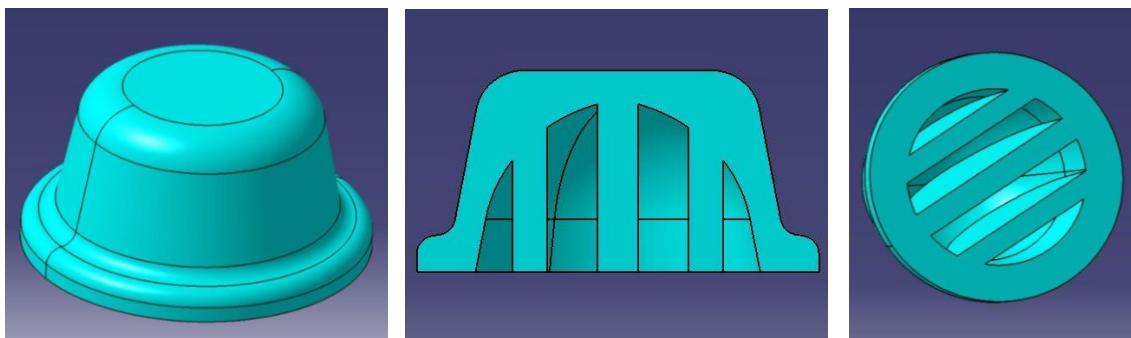


Figura 10.8 - Modello 3D del punzone da estrarre

In questo caso è stato adottato un ugello di dimensione pari a 0,6 mm con un'altezza dei layers pari a 0,5 mm. L'intero pezzo è stato stampato in 4 fasi in quanto la capacità del serbatoio (3 litri) non ha permesso l'intera estrusione in una sola volta; nonostante ciò il risultato finale presenta un'ottima adesione tra layers e tra riprese di stampa. A queste difficoltà si è aggiunta quella relativa alla costruzione delle cavità interne, questo richiede un'ottima shape stability che garantisca che le pareti non collassino nelle fasi finali di estrusione. Di seguito sono mostrate diverse fasi della costruzione del prototipo. Il percorso di stampa prevede la creazione di un contorno e un successivo riempimento interno (filling al 100%) come mostrato in figura 10.9.



Figura 10.9 - Fasi di estrusione del primo strato del prototipo

Tale processo è stato ripetuto per i layers successivi. Dalla fig. 10.10 è possibile notare la costruzione delle pareti che vanno a formare le cavità interne e la capacità del materiale di sostenere gli strati sovrastanti senza spanciare o collassare (ottima shape stability).



Figura 10.10 - Fasi di estrusione del terzo strato del prototipo

Le fasi finali sono esplicative di come il materiale soddisfi tutti i requisiti richiesti; in particolare in figura 10.11 è mostrata la fase in cui viene estruso lo strato di chiusura delle cavità e il prototipo

finito a pochi istanti dalla fine dell'estrusione e che testimonia la bontà della consistenza della miscela, infatti la chiusura della volta non comporta il collasso.

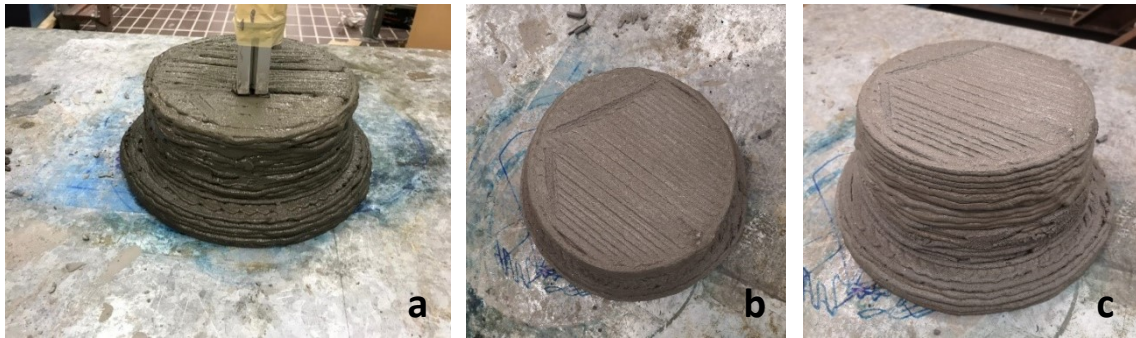


Figura 10.11 - Fasi conclusive: (a) chiusura delle volte; (b, c) estrusione completata

Quanto detto è evidente anche in figura 10.12 in cui sono mostrate le cavità, dopo l'indurimento della miscela, col prototipo capovolto.



Figura 10.12 - Particolare delle cavità interne

Quindi la miscela ottimizzata, impiegata per l'estrusione dello stampo soddisfa a pieno i requisiti descritti in precedenza: si possono notare un'ottima print quality (figura 10.13) e shape stability e una printability window di circa 70 minuti, sufficientemente lunga da consentire l'intera estrusione del pezzo.



Figura 10.13 – Particolare della finitura superficiale (print quality)

Nonostante la bontà del risultato, la finitura esterna tipica dell'estrusione del calcestruzzo non è quella richiesta per lo scopo di stampaggio, per il quale invece si richiede un più alto livello di finitura. Per questo motivo, è stato creato un controstampo in plastica (estruso con stampante 3D) all'interno del quale è stato poi estruso il punzone. Questo ha consentito di ottenere una superficie esterna totalmente liscia, mantenendo tutte le altre caratteristiche precedenti, comprese le cavità di alleggerimento (figura 10.14)



Figura 10.14 - (a) Controstampo; Prototipo di punzone: (b) esterno, (c) interno

In un secondo momento è stato poi prodotto il prototipo della matrice, realizzata con lo stesso materiale e caratteristiche, tramite estrusione avvenuta attorno al punzone (rivestito con uno strato di cera per evitare l'adesione tra le due superfici). I risultati sono mostrati in fig. 10.15.



Figura 10.15 – Prototipo matrice: (a) fasi di stampa; prototipo matrice vista esterna (b) e vista interna (c)



# 11 Bibliografia

---

- B. Nematollahi, M. Xia, J. Sanjayan, Current Progress of 3D Concrete Printing Technologies. *In Proceedings of the 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, Taipei, Taiwan, 28 June–1 July 2017
- M.A. Kreiger, B.A. MacAllister, J.M. Wilhoit, Case, M.P. The Current State of 3D Printing for Use in Construction. *In Proceedings of the Conference on Autonomous and Robotic Construction of Infrastructure*, Ames, IA, USA, 2–3 June 2015
- G. Cesaretti, E. Dini, X. De Kestelier, V. Colla, L. Pambaguian, Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology, *Acta Astronautica* Vol:93, 430-450, 2014
- I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, Binder Jetting, *Additive Manufacturing Technologies*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2015
- T. Wangler, E. Loret, L. Reiter, N. Hack, F. Gramazio, M. Kohler, M. Bernhard, B. Dillenburger, J. Buchli, N. Rousel, R. Flatt, Digital concrete: opportunities and challenges, *RILEM Technical Letters*, Vol:1, 67-75, 2016
- S.C. Paul, Y.W.D. Tay, B. Panda, M.J. Tan, Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18, 311–319, 2018
- D. Hwang, B. Khoshnevis, Concrete Wall Fabrication by Contour Crafting, *In Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Jeju, Korea, 21–25 September 2004
- Y.W.D. Tay, B. Panda, S.C. Paul, N.A. Noor Mohamed, M.J. Tan, K.F. Leong, 3D printing trends in building and construction industry: A review, *Virtual And Physical Prototyping*, 12, 261–276, 2017
- B. Khoshnevis, D. Hwang, K.T. Yao, Z. Yeh, Mega-scale fabrication by Contour Crafting, *International Journal Of Industrial And Systems Engineering*, Vol. 1, No. 3, 2006
- P. Shakor, S. Nejadi, G. Paul, S. Malek, Review of emerging additive manufacturing technologies in 3d printing of cementitious materials in the construction industry, *Frontiers in Built Environment*, 4, 85, 2019

- V. Lojanica, V.M. Colic-Damjanovic, N. Jankovic, Housing of the future: Housing design of the fourth industrial revolution. In *Proceedings of the 2018 5th International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications (EFEA)*, Rome, Italy, 24–26 September 2018.
- B. Panda, M.J. Tan, Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing, *Ceramics International*, 44, 10258–10265, 2018
- T.T. Lee, S.A. Austin, S. Lim, R.A. Buswell, A.G.F. Gibb, T. Thorpe, Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete, *Materials and Structures*, Vol: 45, 1221-1232, 2012
- D. Asprone, F. Auricchio, C. Menna, V. Mercuri, 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach, *Construction and Building Materials*, 165, 218–231, 2018
- Z. Malaeb, H. Hachem, A. Tourbah, T. Maalouf, N. El Zarwi, F. Hamzeh, 3D concrete printing: Machine and mix design, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 6, 14–22, 2015
- M. Hambach, D. Volkmer, Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste, *Cement and Concrete Composites*, 79, 62–70, 2017
- R. Rael, V. San Fratello, Developing Concrete Polymer Building Components for 3D Printing. In Integration Through Computation, *Proceedings of the 31st Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*, ACADIA 2011, San Francisco, CA, USA, 13–16 October 2011
- G. Ma, Z. Li, L. Wang, Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing, *Construction and Building Materials*, 162, 613–627, 2018
- M. Valente, A. Sibai, Rubber/crete: Mechanical properties of scrap to reuse tire-derived rubber in concrete; A review. *Journal Of Applied Biomaterials & Functional Materials*, 17, 1–8, 2019
- V.N. Nerella, M. Näther, A. Iqbal, M. Butler, V. Mechtcherine, Inline quantification of extrudability of cementitious materials for digital construction *Cement and Concrete Composites*, 95, 260–270, 2019
- A. Perrot, D. Rangeard, A. Pierre, Structural built-up of cement based materials for 3D-printing extrusion techniques, *Materials and Structures*, Vol: 49 (4), 1213-1220, 2016.
- Y. Chen, L.J. Struble, G.H. Paulino, Extrudability of cement-based materials, *American Ceramic Society Bulletin*, 85, X1–X5, 2006

- H. Valkenaers, D. Jansen, A. Voet, A. Van Gysel, E. Ferraris, Additive manufacturing for concrete: A 3D printing principle. *In Proceedings of the 14th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology*, EUSPEN 2014, Dubrovnik, Croatia, 2–6 June 2014
- Z. Li, L. Wang, G. Ma, Method for the Enhancement of Buildability and Bending Resistance of 3D Printable Tailing Mortar, *International Journal Concrete Structure Materials*, 12, 37–48, 2018
- C. Gosselin, R. Duballet, P. Roux, N. Gaudillière, J. Dirrenberger, P. Morel, Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders, *Materials & Design* Vol:100, 102-109, 2016
- S. Lim, R. Buswell, T. Le, R. Wackrow, S. Austin, A. Gibb, T. Thorpe, Development of a Viable Concrete Printing Process. *In Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2011)*, Seoul, Korea, 29 June–2 July 2011
- T.A.M. Salet, Z.Y. Ahmed, F.P. Bos, H.L.M. Laagland, Design of a 3D printed concrete bridge by testing, *Virtual And Physical Prototyping*, 13, 222–236, 2018
- F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed, T. Salet, Additive manufacturing in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing, *Virtual and Physical Prototyping*, Vol: 11(3), 209-225, 2016.
- G. Ma, L. Wang, Y. Ju, State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material—An emerging technique for construction, *Science China Technological Sciences*, 61, 475–495, 2018
- M.S. Hameed, A.S.S. Sekar, Properties of green concrete containing quarry rock dust and marble sludge powder as fine aggregate, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4, 83–89, 2009
- M. Valente, A. Sibai, M. Sambucci, Extrusion-Based Additive Manufacturing Of Concrete Products: Revolutionizing And Remodeling The Construction Industry, *Journal Of Composites Science*, 3, 88, 2019
- V. Corinaldesi, A. Nardinocchi, J. Donnini, Reuse of recycled glass in mortar manufacturing, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* Vol. 20, 2016
- V. Corinaldesi, A. Nardinocchi, J. Donnini, Lightweight plasters containing plastic waste for sustainable and energy-efficient building, *Construction and Building Materials*, Vol 94, 337-345, 2015
- V. Corinaldesi, A. Nardinocchi, Influence of recycled glass addition on mortar properties, *International Journal Of Manufacturing & Industrial Engineering*, Vol 2, 2015

- V. Corinaldesi, J. Donnini, G. Merlonetti, Early-Age Behaviour of Fiber Reinforced High Performance Concretes, *International Journal of Advanced Research in Engineering* Vol 4 No 2, 2018
- V. Corinaldesi, A. Nardinocchi, Mechanical characterization of Engineered Cement-based Composites prepared with hybrid fibres and expansive agent, *Composites Part B Engineering* 98, 2016
- V. Corinaldesi, A. Nardinocchi, Influence of type of fibers on the properties of high performance cement-based composites, *Construction and Building Materials*, 107, 321-331, 2016
- V. Corinaldesi, A. Nardinocchi, J. Donnini, The influence of calcium oxide addition on properties of fiber reinforced cement-based composites, *Journal of Building Engineering*, 1(4), 14-20, 2015
- A. Nardinocchi, V. Corinaldesi, Study of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with Expansive and Shrinkage Reducing Agents, *Advanced Materials Research*, 980, 137-141, 2014
- J.C. Mindeguia, P. Pimienta, A. Noumowé, Temperature, Pore Pressure and Mass Variation of Concrete Subjected to High Temperature - Experimental and Numerical Discussion on Spalling Risk, *Cement and Concrete Research* 40, 477–487, 2010
- S. Lim, R.A. Buswell, T.T. Lee, S.A. Austin, A.G.F. Gibb, T. Thorpe, Developments in construction-scale additive manufacturing processes, *Automation in Construction*, Vol 21:262–268, 2012.
- A. Kazemian, X. Yuan, E. Cochran, B. Khoshnevis, Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture, *Construction and Building Materials*, Vol:145, 639-647, 2017.
- B. Zareiyan, B. Khoshnevis, Interlayer adhesion and strength of structures in Contour Crafting - Effects of aggregate size, extrusion rate, and layer thickness, *Automation in Construction* Vol:81, 112-121, 2017.
- T.T. Le, S.A. Austin, S. Lim, R.A. Buswell, R. Law, A.G.F. Gibb, T. Thorpe, Hardened properties of high-performance printing concrete, *Cement and Concrete Research* Vol:43(3), 558-566, 2012
- P. Feng, X. Meng, J.F. Chen, L. Ye, Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders, *Construction and Building Materials* Vol:93, 486-497, 2015
- B. Khoshnevis, M. del Rey, inventor; University of Southern California, assignee; Multi-nozzle assembly for extrusion wall, United States patent US7153454, Dec. 26, 2006

- B. Khoshnevis, M. del Rey, inventor; University of Southern California, assignee; Nozzle for forming an extruded wall with rib-like interior, United States patent US7874825, Jan. 25, 2011

## 12 Sitografia

---

- All3dp. <https://all3dp.com/2/concrete-3d-printing-how-to-do-it-and-application>
- Construction-3d. <https://www.constructions-3d.com/>
- Iconbuild. <https://www.iconbuild.com/updates/introducing-the-vulcan-ii-printer>
- 3dWasp. <https://www.3dwasp.com/>
- Qz. <https://qz.com/924909/apis-cor-can-3d-print-and-entire-house-in-just-one-day/>
- Apis Cor Robotics in Construction. <http://apis-cor.com/en/faq/tecnicheskie-xarakteristiki-3d-printer>
- 3dWasp. <https://www.3dwasp.com/en/giant-3d-printer-bigdelta-wasp-12mt>
- 3dWasp. <https://www.3dwasp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp/>
- Dezeen. <https://www.dezeen.com/2019/02/27/gaia-wasp-3d-printed-house-biodegradablevideo/>
- Blog.fazedores. <https://blog.fazedores.com/vulcon-ii-a-nova-impressora-3d-da-icon-quepromete-revolucionar-o-mercado-da-construcao-civil>
- Lessbydesign. <https://lessbydesign.org/2014/11/07/is-technology-getting-in-the-way-of-good-design>
- ApisCor. <http://apis-cor.comavailable15.04.2018>
- 3DToday. <https://3d-today.blogspot.com/2017/10/3d-printed-bicycle-bridge.html>
- Office of the future. [http://www.o\\_ceofthefuture.ae/#&gid=1&pid=1](http://www.o_ceofthefuture.ae/#&gid=1&pid=1)
- Arup. <https://www.arup.com/news-and-events/new-3d-printed-house-points-the-way-to-a-more-sustainable-construction-industry>
- Totalkustom. <http://www.totalkustom.com/3d-castle-completed.html>
- NewAtlas. <https://newatlas.com/foster-partners-skanska-3d-concrete-printing/34944>
- B. Khoshnevis, Contour Crafting. <http://contourcrafting.com/>
- E. Dini, D\_Shape. <http://www.d-shape.com>

- In concreto, 10 case in un giorno.  
[http://www.inconcreto.net/Notizia/5021/10\\_case\\_in\\_un\\_giorno:\\_possibile\\_con\\_la\\_stampan te\\_3D.html](http://www.inconcreto.net/Notizia/5021/10_case_in_un_giorno:_possibile_con_la_stampan_te_3D.html)
- L'additive manufacturing, tra prototipi e produzione di massa.  
<https://www.ilprogettistainindustriale.it/ladditive-manufacturing-tra-prototipi-e-produzione-di-massa/>
- Italcementi. A Milano la prima casa stampata in 3D. <https://www.italcementi.it/it/casa-stampata-3D>
- Netherlands: Eindhoven University of Technology Embarks on Extended Project in Concrete 3D Printing <https://3dprint.com/102534/tu-e-concrete-3d-printing/>
- 3D housing 05. <https://www.3dhousing05.com/>

## 13 Indice delle figure

---

Figura 1.1 - "Office of the future", Dubai. Posa in opera di elementi modulari.	9
Figura 1.2 - Modulo abitativo realizzato da Apis Cor (2017)	10
Figura 1.3 - Schema del setup per la deposizione con metodo D-shape (a); stampante D-shape (b)	11
Figura 1.4 - Schema del processo di Additive Manufacturing	11
Figura 1.5 - Apis Cor 3D printer	13
Figura 1.6 - Stampanti 3D del SC3DP: (a) portale a 4 assi; (b) sistema robotico autonomo a sei assi	13
Figura 1.7 - Sezione di muro estruso con la tecnica del Contour Crafting	14
Figura 1.8 - "Nozzle for forming an extruded wall with rib like interior", US patent n°US7874825 (2011)	14
Figura 1.9 - "Multi-nozzle assembly for extrusion wall", US patent n°US7153454 (2006)	15
Figura 1.10 - Sistema "3D Concrete Printing", Eindhoven University of Technology	15
Figura 1.11 - (a) Particolare della testa di stampa; (b)ugello	16
Figura 1.12 - Stampante 3D "ICON Vulcan II"	16
Figura 1.13 - Sistemi di estrusione WASP: (a) "Big Delta"; (b) "Crane"	17
Figura 1.14 - "Office of the Future", Dubai - WinSun (2017)	21
Figura 1.15 - (a) "Children's castle", USA (2014); (b) "Hotel suite interior", Filippine (2015) – Total Kustom	22
Figura 1.16 - "3D Housing 05", Milano - Italcementi, Arup, Cybe (2018)	22
Figura 1.17 - Ponte ciclopedonale in calcestruzzo estruso, Gemert (Paesi Bassi) - Eindhoven University of Technology (2017)	23
Figura 1.18 - Elementi realizzati con tecniche AMoC: (a) "Wonder bench"; (b) Elemento di parete con proprietà di isolamento acustico; (c) Pannello a strati curvi - Loughborough University	24
Figura 2.1 - Cemento Portland 52.5 R	30
Figura 2.2 - Sabbia silicea 0-1 mm	35
Figura 2.3 - Curva granulometrica della sabbia silicea (0-1 mm)	36
Figura 2.4 - Carbonato di calcio (0-400µm)	37
Figura 2.5 - Fuso granulometrico del carbonato di calcio (0-400µm)	37
Figura 2.6 - Composizione chimica del polietilentereftalato	38
Figura 2.7 - Pet riciclato utilizzato nella sperimentazione	39
Figura 2.8 - Schiuma di vetro	40
Figura 2.9 - Pneumatici fuori uso (PFU): (a) polverino di gomma; (b) granulato di gomma	42
Figura 2.10 - Fumo di silice	43
Figura 2.11 - Agente espansivo	47
Figura 3.1 - Fasi della miscelazione	50
Figura 3.2 - Esempio di estrusione tramite sac à poche	51
Figura 3.3 - Sistema di estrusione di prova	52
Figura 3.4 - Schema di collegamento dell'impianto	52



Figura 3.5 - Particolari del sistema di estrusione di prova: (a) componenti del serbatoio cilindrico in alluminio; (b) sistema di regolazione di pressione.	53
Figura 3.6 - Braccio robotico Comau a tre assi	54
Figura 3.7 - Schema di collegamento del sistema di estrusione	54
Figura 3.8 - Dettaglio dell'ugello di estrusione	55
Figura 3.9 - Interfaccia grafica del software di slicing Cura®	56
Figura 3.10 - Operazioni di misurazione e peso dei provini	57
Figura 3.11 - Schema di carico della prova di flessione a 3 punti	58
Figura 3.12 - Esecuzione della prova di flessione su 3 punti	58
Figura 3.13 - Schema di carico di una prova di compressione	60
Figura 3.14 - Esecuzione di una prova di resistenza a compressione	60
Figura 3.15 - Modalità di rottura possibili dei provini soggetti sforzi di compressione	61
Figura 3.16 - Print quality test: (a) buona print quality; (b) print quality non accettabile	62
Figura 3.17 - Shape stability test effettuati in laboratorio: esempi di buona shape stability	62
Figura 4.1 – Prove di estrusione: (a) RIF; (b) SRA; (c) SRA+CaO; (d) SRA+CaO-FS	65
Figura 4.2 – Prova di estrudibilità della miscela RIF: (a) fessurazioni; (b) interruzioni di stampa	66
Figura 4.3 – Prova di estrudibilità delle miscele: (a) SRA, (b) SRA+CaO	66
Figura 4.4 – Prove di estrudibilità della miscela SRA+CaO-FS: (a) ottima shape stability; (b) buona conformità dimensionale; (c) ottima print quality.	67
Figura 5.1 - Prove di estrusione delle miscele: (a) PET; (b) PET+VTR	74
Figura 5.2 - Prova di estrusione della miscela PET	74
Figura 5.3 - Prova di estrusione della miscela PET+VTR	75
Figura 5.4 - Prova di estrusione della miscela NO CEM	76
Figura 5.5 - Provini 40x40x160 mm: (a) PET; (b) PET+VTR; (c) NO CEM	76
Figura 6.1 - Fibre d'acciaio impiegate nella miscela FRHPC	82
Figura 6.2 – Prove di estrudibilità: (a) OC; (b) FRHPC	83
Figura 6.3 - Test di compressione uniassiale su provini di 10x10x10 cm composti da uno, due, quattro layers	88
Figura 7.1 - Cassaforma utilizzata per il confezionamento di provini prismatici 40x40x160 mm	91
Figura 7.2 – Lastre della tipologia T2: (a) geometria della lastra e indicazioni di taglio; (b) lastra dopo il taglio	91
Figura 7.3 - Lastre della tipologia T3: (a) geometria della lastra e indicazioni di taglio; (b) lastra dopo il taglio	92
Figura 7.4 - Lastre della tipologia T4: (a) geometria della lastra e indicazioni di taglio; (b) lastra dopo il taglio	92
Figura 7.5 – Percorso di stampa dei layers 1 e 2 relativi alle tipologie T2 e T3	92
Figura 7.6 - Percorso di stampa dei layers 1 e 2 relativi alla tipologia T4	93
Figura 7.7 – Sezione dei provini ricavati dalle lastre per ciascun percorso di estrusione	94

Figura 7.8 – Direzione di applicazione della forza	94
Figura 7.9 – Meccanismo di rottura del provino T3-N testato a flessione in direzione N	98
Figura 7.10 - Meccanismo di rottura del provino T2 testato a compressione in direzione P	100
Figura 7.11 – Meccanismo di rottura a compressione: (a) tecnica tradizionale T1; (b) estrusione con tecnica T2-N	105
Figura 8.1 - Prove di estrusione delle miscele: (a) Refr+FS; (b) Refr-Mod	109
Figura 8.2 - Provini “Refr+FS” (a) e “Refr-Mod”(b) a fine ciclo termico	110
Figura 9.1 - Prova di estrusione delle miscele: (a) SAND50-PWD50; (b) PWD100; (c) PWD50-GRAN50; (d) PWD25-GRAN75	115
Figura 9.2 – Modello tridimensionale della lastra e tagli dei provini	116
Figura 9.3 - Figura 10.4 – Percorso di stampa dei layers 1 e 2 della lastra	116
Figura 9.5 – Estrusione delle lastre: (a) RIF; (b) SAND50-PWD50; (c) PWD100; (d) PWD50-GRAN50; (e) PWD25-GRAN75	117
Figura 9.6 – Lastre in seguito all’indurimento: (a) RIF; (b) SAND50-PWD50; (c) PWD100; (d) PWD50-GRAN50; (e) PWD25-GRAN75	118
Figura 9.7 - Taglio dei prototipi tramite sega circolare	118
Figura 9.8 -Provini ricavati dal taglio delle lastre: (a) RIF; (b) SAND50-PWD50; (c) PWD100; (d) PWD50-GRAN50; (e) PWD25-GRAN75	119
Figura 9.9 – Prove di flessione a 4 punti: (a) RIF; (b) PWD25-GRAN75	120
Figura 9.10 - (a) Diagramma sforzo-deformazione completo ; (b) Diagramma sforzo-deformazione in campo elastico	121
Figura 9.11 - Esecuzione della prova meccanica di compressione	123
Figura 9.12 - Provini utilizzati per la valutazione della densità: (a) RIF; (b) SAND50-PWD50; (c) PWD100; (d)PWD50-GRAN50; (e) PWD25-GRAN75	126
Figura 10.1 - Sistema di estrusione di prova	129
Figura 10.2 – Print quality e shape stability	130
Figura 10.3 – Sezione dello stampo: (a) punzone; (b) matrice	131
Figura 10.4 - Braccio robotico Comau utilizzato per la sperimentazione	131
Figura 10.5 - Fasi di stampa e print quality	132
Figura 10.6 - Esempio dello stampo in lamiera	133
Figura 10.7 - Prototipo di punzone estruso in calcestruzzo	133
Figura 10.8 - Modello 3D del punzone da estrudere	133
Figura 10.9 - Fasi di estrusione del primo strato del prototipo	134
Figura 10.10 - Fasi di estrusione del terzo strato del prototipo	134
Figura 10.11 - Fasi conclusive: (a) chiusura delle volte; (b, c) estrusione completata	135
Figura 10.12 - Particolare delle cavità interne	135
Figura 10.13 – Particolare della finitura superficiale (print quality)	135
Figura 10.14 - (a) Controstampo; Prototipo di punzone: (b) esterno, (c) interno	136
	146

Figura 10.15 – Prototipo matrice: (a) fasi di stampa; prototipo matrice vista esterna (b) e vista interna (c)136

# 14 Indice delle tabelle

---

Tabella 1.1 - Tabella riassuntiva delle emissioni di anidride carbonica	25
Tabella 1.2 - Tabella riassuntiva dell'energia consumata	25
Tabella 1.3 - Tabella riassuntiva dell'impatto ambientale della produzione di calcestruzzo	25
Tabella 1.4 - Rifiuti solidi prodotti nelle fasi realizzative di un manufatto	26
Tabella 2.1 - Caratteristiche chimiche del cemento Portland	30
Tabella 2.2 - Caratteristiche fisico - meccaniche del cemento Portland	30
Tabella 2.3 - Proprietà della malta refrattaria	33
Tabella 2.4 - Composizione chimica della malta refrattaria	34
Tabella 2.5 - Dati tecnici e caratteristiche chimiche della sabbia silicea	35
Tabella 2.6 - Proprietà dell'aggregato calcareo	37
Tabella 2.7 - Caratteristiche del fumo di silice	44
Tabella 2.8 - Proprietà dell'additivo superfluidificante	45
Tabella 2.9 - Proprietà dell'additivo riduttore del ritiro	46
Tabella 2.10 - Proprietà dell'agente espansivo	48
Tabella 3.1 - Durata delle fasi della miscelazione	50
Tabella 3.2 - Caratteristiche tecniche del sistema	53
Tabella 4.1 - Mix design delle miscele oggetto della sperimentazione	64
Tabella 4.2 - Risultati delle prove meccaniche di flessione a tre punti	67
Tabella 4.3 - Risultati delle prove meccaniche di compressione	68
Tabella 4.4 - Densità delle miscele	69
Tabella 5.1 - Mix design delle miscele oggetto della sperimentazione	73
Tabella 5.2 - Risultati delle prove di flessione a tre punti	77
Tabella 5.3 - Risultati delle prove di compressione	78
Tabella 5.4 - Densità delle miscele	79
Tabella 6.1 - Mix design delle miscele OC e FRHPC	81
Tabella 6.2 - Caratteristiche delle fibre	82
Tabella 6.3 - Resistenza a flessione	84
Tabella 6.4 - Resistenza a compressione	85
Tabella 6.5 - Confronto tra i risultati di resistenza meccanica a compressione e flessione ottenuti presso l'Università Politecnica delle Marche (■) e presso la University of Southern California (■)	86
Tabella 6.6 - Resistenza a compressione uniaassiale su provini 10x10x10 cm composti rispettivamente da 1, 2, o 4 layers. Università Politecnica delle Marche (■); University of Southern California (■)	89
Tabella 7.1 - Coordinate iniziali e finali di deposizione di ciascun layer	93
Tabella 7.2 - Mix design della miscela oggetto della sperimentazione	95
Tabella 7.3 - Densità dei provini	95
Tabella 7.4 - Valori di resistenza a flessione media dei provini	97

Tabella 7.5 – Valori di resistenza a compressione media dei provini	98
Tabella 7.6 – Densità dei provini	100
Tabella 7.7 – Valori di resistenza a flessione media dei provini	102
Tabella 7.8 - Confronto tra i valori di resistenza a flessione	103
Tabella 7.9 - Valori di resistenza a compressione media dei provini	104
Tabella 7.10 - Confronto tra i valori di resistenza a compressione	105
Tabella 8.1 - Mix design delle miscele	108
Tabella 8.2 - Risultati delle prove di resistenza meccanica (28 giorni di maturazione)	111
Tabella 8.3 - Densità media delle miscele precedente e successiva al ciclo termico	111
Tabella 9.1 - Mix design delle miscele oggetto della sperimentazione	114
Tabella 9.2 - Coordinate iniziali e finali di deposizione di ciascun layer	117
Tabella 9.3 – Classi di resistenza associate ad ogni formulazione	126
Tabella 10.1 - Mix design di partenza	128
Tabella 10.2 - Mix design ottimizzato	129

## 15 Indice dei grafici

---

Grafico 4.1 – Resistenza meccanica a flessione su tre punti delle miscele	68
Grafico 4.2 - Resistenza meccanica a compressione delle miscele	69
Grafico 4.3 - Densità delle miscele a 1, 7, 28 giorni di maturazione	70
Grafico 5.1 - Resistenza meccanica a flessione su tre punti delle miscele	77
Grafico 5.2 - Resistenza meccanica a compressione delle miscele	78
Grafico 5.3 - Densità delle miscele a 1, 7, 28 giorni di maturazione	79
Grafico 6.1 - Resistenza a flessione (1, 7, 28 giorni di maturazione)	84
Grafico 6.2 - Resistenza a compressione (1, 3, 7, 28 giorni di maturazione)	85
Grafico 6.3 - Risultati dei test di ritiro	87
Grafico 7.1 – Valori di densità delle diverse tecniche di stampa 3D (1, 3, 7, 28 giorni di maturazione)	96
Grafico 7.2 – Resistenza meccanica a flessione (1, 3, 7, 28 giorni di maturazione)	97
Grafico 7.3 - Resistenza meccanica a compressione (1, 3, 7, 28 giorni di maturazione)	99
Grafico 7.4 – Confronto tra i valori di densità (1, 3, 7, 28 giorni di maturazione)	101
Grafico 7.5 - Resistenza meccanica a flessione (1, 3, 7, 28 giorni di maturazione)	102
Grafico 7.6 - Resistenza meccanica a compressione (1, 3, 7, 28 giorni di maturazione)	104
Grafico 8.1 - Incremento della temperatura del forno durante la fase iniziale della prova termica	110
Grafico 9.1 - Istogramma relativo alla resistenza a flessione	120
Grafico 9.2 – Modulo elastico delle miscele	122
Grafico 9.3 - Istogramma relativo alla deformazione a rottura	123
Grafico 9.4 - Istogramma relativo alla resistenza a compressione	124
Grafico 9.5 - Curve stress-strain in compressione	125
Grafico 9.6 – Istogramma relativo ai valori di densità delle miscele	127