



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile
Tecnologia Delle Strutture Edili

Titolo della tesi:

Riuso di scarti di caffè come aggiunta per la produzione di
biocompositi ecosostenibili a matrice inorganica

Reuse of coffee waste as an addition for the production of
biocomposites with an inorganic matrix

Relatore:

Prof. Ing. Corinaldesi Valeria

Tesi di Laurea di:

Belardinelli Michael

Correlatore:

Ing. Generosi Nicola

Abstract

Questa tesi si propone di esplorare le potenzialità e i vantaggi derivanti dall'integrazione dello scarto della produzione di caffè, nominato “pula”, e dei fondi di caffè, nell'intonaco edilizio. Attraverso una valutazione delle proprietà fisiche e chimiche della pula e dei fondi di caffè, analizzando le loro implicazioni sull'intonaco, la ricerca mira a fornire una visione chiara sulle possibilità di miglioramento delle prestazioni del prodotto e dell'impatto positivo sulla sostenibilità ambientale del settore edilizio.

Sommario

1. Introduzione	1
1.1 Emissioni nel settore delle costruzioni	2
1.2 Impatti ambientali: industria del caffè	3
1.3 Obiettivi della Ricerca	4
1.4 Riferimenti normativi	4
2. Caffè: produzione e scarti	6
2.1 Processo di Produzione	6
2.2 Implicazioni dell'Utilizzo degli scarti della produzione del caffè negli Intonaci	7
3. Materiali utilizzati	9
3.1 Acqua	9
3.2 Leganti	9
3.2.1 Cemento	10
3.2.2 Calce	12
3.3 Slag	12
3.4 Sabbia	13
3.5 Superfluidificante	13
3.6 Pula	14
3.7 Fondi di caffè	14
3.8 Trattamenti dei materiali organici	15
3.8.1 Mineralizzazione della pula	15
3.8.2 Essiccamento fondi di caffè	16
3.8.3 Preparazione del biochar	17
3.9 Caratteristiche e Composizione Chimica dei materiali organici	19
3.9.1 Analisi SEM	19
3.9.1.1 Risultati analisi SEM	21
3.9.1.1.1 Fondi di caffè essiccati	21
3.9.1.1.2 Biochar 350°C	22
3.9.1.1.3 Biochar 300°C	23
3.9.2 Determinazione dell'area superficiale specifica dei solidi (BET)	25
3.9.2.1 Risultati prova BET	26
3.9.3 Prova VOC (Volatile organic compound)	28
4. Applicazioni Pratiche e Sperimentazioni	32
4.1 Preparazione dei provini	32
4.2 Stagionatura	34

4.3	Pula: miscele preliminari	34
4.3.1	Pula: perfezionamento delle miscele	35
4.4	Fondi di caffè.....	36
4.4.1	Fondi di caffè: miscele preliminari	36
4.4.2	Fondi di caffè: miscele definitive.....	39
4.5	Fondi di caffè e pula: miscela dell'intonaco	40
5.	Prove sperimentali	41
5.1	Prove allo stato fresco	41
5.1.1	Prova di spandimento.....	41
5.1.2	Densità allo stato fresco	42
5.2	Prove allo stato indurito.....	43
5.2.1	Caratteristiche meccaniche	43
5.2.1.1	Densità allo stato indurito.....	43
5.2.1.2	Prova a compressione e a flessione	44
5.2.2	Porosimetria ad intrusione di mercurio	46
6.	Risultati Sperimentali	49
6.1	Determinazione della consistenza della malta allo stato fresco	49
6.1.1	Consistenza provino di riferimento	49
6.1.2	Consistenza provini con pula	50
6.1.3	Consistenza provini con fondi di caffè essiccati	51
6.1.4	Consistenza provini con biochar 350°C	53
6.1.5	Consistenza provini con biochar 300°C	54
6.1.6	Consistenza provini con entrambi i composti organici.....	56
6.2	Determinazione della densità allo stato fresco	59
6.2.1	Densità stato fresco provini con pula.....	59
6.2.2	Densità stato fresco provini con fondi di caffè essiccati.....	59
6.2.3	Densità allo stato fresco provini con biochar 350°C.....	59
6.2.4	Densità allo stato fresco provini con biochar 300°C.....	60
6.3	Determinazione della densità allo stato indurito	61
6.3.1	Densità provini con pula.....	61
6.3.2	Densità provini con fondi di caffè essiccati.....	61
6.3.3	Densità provini con biochar 350°C.....	62
6.3.4	Densità provini con biochar 300°C.....	63
6.4	Prove a compressione.....	66
6.4.1	Prove a compressione provino riferimento	66
6.4.2	Prove a compressione provini con pula	67
6.4.3	Prove a compressione provino con fondi	69

6.4.4	Prove a compressione provini con biochar 350°C	74
6.4.5	Prove a compressione provini con biochar 300°C	77
6.5	Prove a flessione	85
6.5.1	Prove a flessione provino di riferimento.....	85
6.5.2	Prove a flessione provino con pula.....	85
6.5.3	Prove a flessione provini con fondi di caffè.....	86
6.5.4	Prove a flessione provini con biochar 350°C.....	87
6.5.5	Prove a flessione provini con biochar 300°C.....	88
6.6	Porosimetrie ad intrusione di mercurio	91
6.6.1	Provini con fondi di caffè essiccati.....	91
6.6.2	Provini con biochar prodotto in stufa.....	93
6.6.3	Provini con biochar prodotto in muffola	95
8.	Conclusioni	98
9.	Prospettive Future e Sfide	100

1. Introduzione

La decomposizione dei rifiuti organici destinati alle discariche produce gas metano, il quale risulta essere 21 volte peggiore della CO₂ in termini di potenziale di riscaldamento globale, diventa quindi imperativo cercare una soluzione di riciclo per trasformare questi rifiuti in una risorsa preziosa. Parallelamente, la continua estrazione di materie prime per soddisfare la domanda in rapida crescita del settore delle costruzioni e l'utilizzo di materiali caratterizzati da un'elevata carbon footprint, ha considerevoli implicazioni per l'ambiente e la sostenibilità a lungo termine. In questo contesto, il settore edile ha il potenziale per contribuire in modo significativo ad aumentare il tasso di riciclaggio di materiali di scarto, infatti l'applicazione dei fondi di caffè nel calcestruzzo ha recentemente attirato molta attenzione da parte della ricerca, per il sequestro del carbonio dei rifiuti organici e il miglioramento delle proprietà meccaniche del calcestruzzo. Questa ricerca da un lato analizza le conseguenze dell'inserimento del biochar prodotto da fondi di caffè, nell'intonaco, dall'altro propone un approccio innovativo, suggerendo il riuso dello scarto organico della produzione di caffè, comunemente chiamato pula, "as it is" sostituendolo a parte dell'aggregato presente all'interno degli intonaci edili. Per quanto riguarda i fondi di caffè, uno studio nello stesso contesto è stato portato da *Manfredi Saeli*¹ et al; nella ricerca, l'additivazione delle malte è stata fatta inserendo fondi di caffè essiccati, in percentuali differenti. I risultati mostrano che attraverso la sostituzione della sabbia per una percentuale del 5% e del 10%, si determina un miglioramento delle proprietà d'isolamento termico e valori accettabili nelle resistenze meccaniche del materiale. Un altro studio interessante è stato condotto da *Rajeev Roychand*² et al, in cui i fondi di caffè sono stati sottoposti a una pirolizzazione condotta a 350° e 500° e inseriti all'interno di una miscela destinata al confezionamento di calcestruzzi. Secondo la sperimentazione la sostituzione per il 15% dell'aggregato fine con fondi di caffè pirolizzati a 350°, determinerebbe un aumento per il 29.3 % della resistenza meccanica del calcestruzzo. La seguente ricerca ha l'obiettivo di valutare se il confezionamento degli intonaci con la pula e il biochar da fondi di caffè, possa rappresentare un'opportunità promettente per migliorare le prestazioni dei materiali da costruzione, contribuire alla sostenibilità ambientale e infine avvicinare il settore edile ad un contesto di economia circolare.

1.1 Emissioni nel settore delle costruzioni

Il settore delle costruzioni gioca un ruolo cruciale nello sviluppo economico di qualsiasi paese, contribuendo alla creazione di infrastrutture fondamentali e all'edificazione di abitazioni. Tuttavia, con il suo crescere costante, emerge una problematica ambientale di notevole importanza: le emissioni generate durante il ciclo di vita delle costruzioni. Quest'ultime non solo influenzano la qualità dell'aria e del suolo, ma contribuiscono in modo significativo al cambiamento climatico globale; infatti, le emissioni di gas serra derivanti dalle attività del settore, rappresentano una delle principali preoccupazioni ambientali. Queste dispersioni possono provenire da diverse fonti, tra cui: il trasporto dei materiali da costruzione, l'energia utilizzata durante la fase di costruzione e l'uso dei materiali stessi. Inoltre, l'utilizzo di combustibili fossili nei veicoli e nelle macchine da costruzione contribuisce ulteriormente alle emissioni complessive del settore; pertanto, si rende necessario adottare pratiche costruttive più sostenibili, l'uso di materiali a basse emissioni e l'implementazione di tecnologie più pulite ed efficienti. Le emissioni dirette nel settore delle costruzioni sono principalmente attribuibili ai processi di produzione dei materiali da costruzione, al trasporto dei materiali sul sito e alle operazioni di costruzione stesse. Ad esempio, la produzione di cemento, un componente chiave nel settore delle costruzioni, è notoriamente associata a emissioni significative di biossido di carbonio (CO₂) durante il processo di cottura del clinker; infatti, come riportato dalla ricerca condotta dall'ENEA³, la sola produzione del cemento è responsabile di circa il 7 % dell'anidride carbonica emessa annualmente a livello globale.

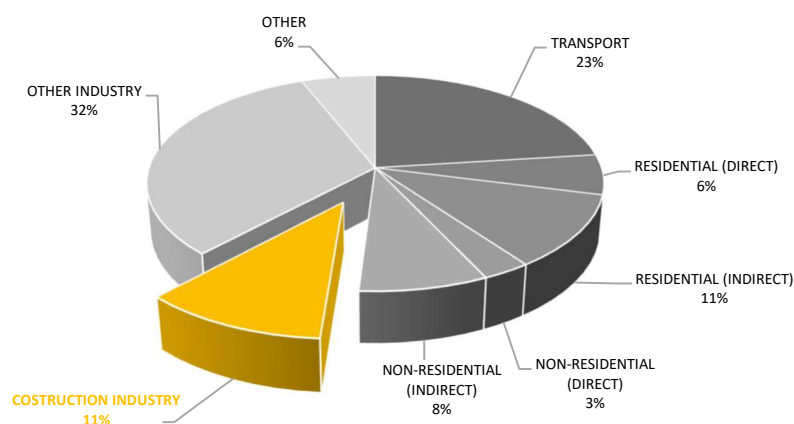


Figura 1: ENEA - Quaderni dell'efficienza energetica – CEMENTO
Emissioni CO₂

Oltre alle emissioni dirette, il settore delle costruzioni contribuisce alle emissioni indirette, il ciclo di vita degli edifici, dalla costruzione alla demolizione, comporta impatti ambientali significativi, con le attività di smaltimento dei rifiuti che contribuiscono ulteriormente all'emissione di gas serra. In aggiunta, la realizzazione dei vari materiali da costruzione, richiede l'utilizzo di enormi quantità di energia, l'ENEA stima che per la produzione del cemento sia necessario circa il 6% dell'energia prodotta annualmente nel mondo.

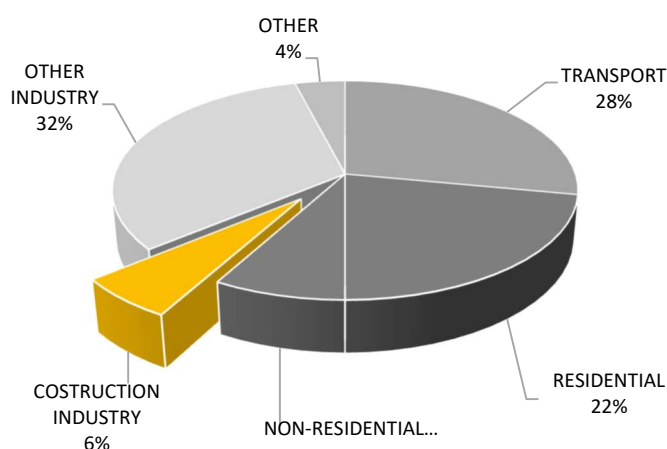


Figura 2: Quaderni dell'efficienza energetica – CEMENTO
Energia richiesta

1.2 Impatti ambientali: industria del caffè

Come ogni processo industriale l'industria del caffè genera un certo impatto sull'ambiente, sia durante il processo di coltivazione che nella fase di produzione e consumo. L'impatto ambientale delle torrefazioni non è comparabile a quello causato dal settore delle costruzioni, tuttavia l'industria del caffè, soprattutto in Italia, riveste un ruolo non indifferente nel mercato Europeo. In particolare, in Italia vengono prodotte annualmente circa 800.000 tonnellate di caffè, è conseguenziale che il settore sia responsabile di una vasta gamma di rifiuti, che contribuiscono alla degradazione ambientale su scala locale e globale. Principalmente è durante la fase di lavorazione del caffè che vengono generati enormi quantitativi di scarti organici, tra cui le bucce dei

chicchi di caffè indicate con il termine “pula”, che possono rappresentare fino al 50% del peso del chicco di caffè grezzo.

1.3 Obiettivi della Ricerca

Lo scopo principale di questa ricerca è esaminare nel dettaglio le implicazioni dell'utilizzo della pula e dei fondi di caffè nell'intonaco edilizio, analizzandone le possibili conseguenze. I principali obiettivi includono:

- Valutare le proprietà fisiche e chimiche della pula e del biochar da fondi di caffè
- Analizzare come l'aggiunta della pula e del biochar possa influenzare le prestazioni meccaniche dell'intonaco
- Esplorare il ruolo della pula e del biochar nel controllo dell'umidità e nella regolazione termica dell'intonaco
- Valutare l'impatto ambientale positivo derivante dalla realizzazione di un prodotto in linea con i principi della bio-edilizia
- Confrontare i materiali realizzati utilizzando la pula, il biochar da fondi di caffè ed entrambi gli scarti contemporaneamente
- Confrontare il prodotto oggetto di studio, con quelli dei maggiori produttori presenti nel mercato

Questi obiettivi guidano la struttura e lo sviluppo della ricerca, offrendo una prospettiva chiara sulle potenzialità di questa innovazione nel settore edilizio.

1.4 Riferimenti normativi

Il corpo normativo rappresenta la linea guida della sperimentazione, in quanto descrive le prove per la caratterizzazione del materiale e fornisce i requisiti minimi per l'accettazione. La norma UNI EN 13914-1:2016 ⁴ specifica le disposizioni per la progettazione, la preparazione e l'applicazione di intonaci interni ed esterni, in particolare, definisce i criteri da rispettare nella composizione dell'intonaco, ammettendo la possibilità di utilizzare fibre naturali e sintetiche, a patto che non determinino cambiamenti alla stabilità chimica e fisica dell'intonaco. Per la caratterizzazione del

materiale si fa riferimento alla UNI EN 15824:2017⁵, in cui vengono descritti i metodi per la valutazione e l'accettazione del prodotto. Nello specifico le prove necessarie alla certificazione e approvazione del materiale sono:

-PERMEABILITÀ AL VAPORE ACQUEO: deve essere determinata misurando la velocità di trasmissione del vapore acqueo in conformità alla EN ISO 7783.

-ASSORBIMENTO DI ACQUA: misurando la permeabilità all'acqua in accordo alla EN 1062-3 e classificando l'intonaco in relazione ai valori riportati nella normativa.

-ADESIONE: deve essere dichiarata l'adesione del sistema e deve essere determinata con i metodi riportati nella EN 1542 dopo essiccazione, indurimento e condizionamento per 28 d a $(23 \pm 2)^\circ \text{C}$ con umidità relativa del $(50 \pm 10) \%$. Tutti i valori devono essere almeno pari a 0,3 Mpa.

-DURABILITÀ: se la permeabilità all'acqua dell'intonaco è $w > 0,5 \text{ kg} / (\text{m}^2 \times \text{h}0,5)$, la durabilità al gelo e disgelo deve essere sottoposta a prova secondo la EN 13687-3 e deve essere dichiarata l'adesione dopo cicli di gelo-disgelo. Tutti i valori devono essere superiori a 0.3 Mpa.

-CONDUTTIVITÀ: per elementi esterni e interni da utilizzarsi in elementi soggetti a requisiti termici, il prodotto deve indicare il valore medio di conduttività termica facendo riferimento alla EN 1745:2012.

-REAZIONE AL FUOCO: gli intonaci esterni e interni contenenti una massa o frazione volumica $< 1,0 \%$ di materiali organici omogeneamente distribuiti, sono classificati come appartenenti alla classe A1 di reazione al fuoco senza necessità di prove. Gli intonaci esterni e interni contenente una frazione in massa $> 1,0 \%$ di materiali organici omogeneamente distribuiti devono essere sottoposti a prova utilizzando i metodi di prova pertinenti alla corrispondente classe di reazione al fuoco al fine di essere classificati secondo la EN13501-1.

-SOSTANZE PERICOLOSE: i regolamenti nazionali sulle sostanze pericolose possono richiedere la verifica e la dichiarazione del prodotto quando immesso sul mercato; pertanto, in assenza di metodi di prova armonizzati a livello europeo, la verifica dovrebbe essere effettuata tenendo conto delle disposizioni nazionali nel luogo di utilizzo.

2. Caffè: produzione e scarti

Questo capitolo esplora il processo di produzione del caffè, fino all'ottenimento degli scarti organici oggetto della ricerca, in seguito analizza e presenta le possibili implicazioni conseguenti dall'inserimento di questi materiali di scarto nell'intonaco edilizio.

2.1 Processo di Produzione

Lo studio del processo di produzione del caffè è un elemento che ci aiuta a comprendere le caratteristiche fondamentali della pula e del biochar prodotto da fondi di caffè. Il metodo produttivo è stato studiato e analizzato all'interno di una delle torrefazioni site nella provincia di Ancona, che ha offerto la propria disponibilità alla spiegazione e illustrazione dei vari processi. Nel seguito si presenta il ciclo produttivo del caffè, sottolineando i processi in cui vengono prodotti gli scarti.

-Selezione dei chicchi di caffè: la torrefazione inizia con la selezione dei chicchi di caffè di alta qualità. I chicchi possono provenire da varie regioni del mondo e possono essere di diverse varietà, ognuna con caratteristiche di gusto e aroma uniche. Non essendo presenti coltivazioni di caffè nel territorio italiano, l'industria si vede costretta a importare la materia prima da diverse parti del mondo.

-Tostatura: i chicchi di caffè vengono tostati per sviluppare i loro aromi e sapori distintivi. La tostatura è un processo controllato che coinvolge il riscaldamento dei chicchi a temperature elevate per un determinato periodo di tempo. Durante la tostatura, i chicchi subiscono cambiamenti chimici che influenzano il loro sapore, aroma e colore. Il procedimento avviene all'interno di un macchinario apposito ed è in questa fase che vengono prodotte le quantità maggiori di scarti organici, tra cui la pula.



Figura 3: Tostatura dei chicchi

-Raffreddamento: in seguito, i chicchi di caffè vengono raffreddati rapidamente per interrompere il processo di tostatura e preservare il loro sapore appena sviluppato. Il processo sfrutta delle ventole meccaniche poste al di sotto dei chicchi macinati.

-Stagionatura: i chicchi di caffè vengono lasciati stagionare per circa dieci giorni all'interno di appositi silos.



Figura 4: Raffreddamento dei chicchi



Figura 5: Stagionatura dei chicchi

Macinatura e confezionamento: I chicchi di caffè tostati vengono macinati in una polvere fine. La macinatura può essere fatta in diversi modi, a seconda del tipo di caffè desiderato e dell'attrezzatura disponibile. Una volta macinato, il caffè viene confezionato in sacchetti o contenitori ermetici per preservare la freschezza e prevenire l'esposizione all'aria, alla luce e all'umidità, che possono influenzare negativamente il sapore del caffè.

Distribuzione e utilizzo: è in fase di utilizzo che i fondi di caffè vengono prodotti giungendo al loro fine vita.

2.2 Implicazioni dell'Utilizzo degli scarti della produzione del caffè negli Intonaci

Nel capitolo presente vengono introdotti i vantaggi principali che l'aggiunta della pula e del biochar nell'intonaco edilizio è capace di offrirci. Nei capitoli successivi le

caratteristiche verranno ampiamente motivate attraverso le diverse prove a cui è stato sottoposto il materiale oggetto di studio.

È possibile riassumere i potenziali benefici in:

-Isolamento termico: La pula può contribuire a migliorare le proprietà isolanti dell'intonaco. Grazie alla sua struttura porosa, la pula intrappola aria all'interno delle pareti, riducendo la trasmissione del calore attraverso l'intonaco e contribuendo a mantenere una temperatura più costante all'interno dell'edificio.

-Isolamento acustico: La struttura porosa della pula può anche assorbire le onde sonore, contribuendo a ridurre il rumore e a migliorare l'isolamento acustico degli ambienti interni.

-Regolazione dell'umidità: La pula e il biochar hanno la capacità di assorbire e rilasciare umidità in risposta alle variazioni dell'ambiente circostante. Questa capacità può contribuire a regolare l'umidità relativa all'interno degli ambienti, creando un ambiente più confortevole e salubre.

-Caratteristiche meccaniche: l'aggiunta dei fondi di caffè e del biochar potrebbe contribuire a migliorare le prestazioni meccaniche dell'intonaco, grazie alla loro capacità di assorbire acqua e rilasciarla nel tempo. Questo potrebbe generare un effetto di internal curing, ovvero una stagionatura interna che, aumentando le reazioni interne del cemento, contribuisce al miglioramento delle prestazioni meccaniche dell'intonaco.

-Sostenibilità ambientale: Utilizzare la pula e i fondi di caffè come componenti dell'intonaco può essere considerato un approccio ecologico e sostenibile alla costruzione. Gli scarti organici sono materiali naturali e rinnovabili, che possono essere ottenuti come sottoprodotto durante la lavorazione e il consumo del caffè.

-Economicità: La pula è generalmente un materiale economico e disponibile, specialmente in regioni dove la coltivazione dei cereali è diffusa. Utilizzare la pula come componente dell'intonaco può contribuire a ridurre i costi di costruzione.

3. Materiali utilizzati

Il presente capitolo elenca tutti i materiali che sono stati utilizzati durante la sperimentazione:

- Acqua
- Cemento
- Calce
- Slag
- Sabbia
- Super fluidificante
- Pula
- Fondi di caffè

3.1 Acqua

L'acqua d'impasto è uno degli elementi fondamentali nella produzione di una malta, in quanto determina significativamente le proprietà fresche e tecniche del materiale. Essa è utilizzata per idratare il cemento, permettendo le reazioni chimiche necessarie alla presa e l'indurimento del prodotto. Inoltre, la quantità d'acqua determina la fluidità della miscela, influenzando la facilità di posa, compattazione e finitura. Il corretto dosaggio d'acqua viene valutato attraverso il rapporto acqua su cemento, una delle variabili più importanti nel mix-design di una malta, in quanto un rapporto basso migliora la resistenza e la durabilità del materiale. L'acqua che è stata utilizzata è quella di rubinetto, così da rendere più semplice una proiezione su larga scala del procedimento, che l'utilizzo di acqua distillata avrebbe reso meno facile e meno economico.

3.2 Leganti

I leganti sono materiali fondamentali per il confezionamento di una malta, in quanto conferiscono coesione alla miscela e la trasformano in un materiale solido e resistente una volta indurito. La scelta del legante dipende dalle specifiche esigenze

dell'applicazione e dalle condizioni ambientali, un corretto dosaggio e una selezione appropriata dei leganti sono essenziali per garantire la qualità e la durabilità di una malta.

Per il confezionamento dell'intonaco sono stati utilizzati due leganti:

- Cemento
- Calce

3.2.1 Cemento

Il cemento è uno dei leganti più comuni utilizzati nella produzione di malte e calcestruzzi, si tratta di un materiale fondamentale nella costruzione civile e industriale. Il cemento Portland, il tipo più diffuso di cemento utilizzato oggi, è composto principalmente da calcare, argilla e altri materiali aggiuntivi come ferro, alluminio e silice. Questi materiali vengono estratti dalle cave e dalle miniere e successivamente frantumati e miscelati in proporzioni specifiche. La miscela viene quindi cotta in un forno rotante a temperature estremamente elevate (circa 1450°C), trasformandosi in una polvere fine nota come clinker. All'interno del mercato edilizio le varie tipologie di cemento sono suddivise in 3 classi di resistenza standard in riferimento alla rottura per compressione misurata al 28° giorno di stagionatura:

- 32,5 MPa,
- 42,5 MPa,
- 52,5 MPa,

e per ognuna di esse, sono individuate 2 classi di resistenza iniziale (a 2 o 7 giorni):

- la prima ordinaria contrassegnata con la lettera N,
- la seconda elevata contrassegnata con la lettera R.

La norma UNI EN 197-1 suddivide le possibili tipologie secondo la tabella seguente:

Tipi di cemento	Denominazione	Sigla	Clinker K	Loppa d'altoforno granulata S	Micro-silice D	Pozzolana		Cenere Volante		Scisto Calcinato T	Calcare Calcare L	Costituenti secondari
						Naturale P	Industriale Q	Silicica V	Calce W			
I	Cem. Portland	I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
II	Cem. Portland alla loppa	II/A-S II/B-S	80-94 65-79	6-20 21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5 0-5
	Cem. Portland alla microsilice	II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alla pozzolana	II/A-P II/B-P II/A-Q II/B-Q	80-94 65-79 80-94 65-79	- - - -	- - - -	6-20 21-35 6-20 21-35	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	0-5 0-5 0-5 0-5
	Cemento Portland alle ceneri volanti	II/A-V II/B-V II/A-W II/B-W	80-94 65-79 80-94 65-79	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	6-20 21-35 6-20 21-35	- - - -	- - - -	- - - -	0-5 0-5 0-5 0-5
	Cem. Port. allo scisto calcinato	II/A-T II/B-T	80-94 65-79	- -	- -	- -	- -	- -	- -	6-20 21-35	- -	0-5 0-5
	Cem. Portland al calcare	II/A-L II/B-L	80-94 65-79	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	6-20 21-35	0-5 0-5
	Cem. Portland composito	II/A-M II/B-M	80-94 65-79	6-20 21-35								
	Cemento d'altoforno	IIIA IIIB IIIC	35-64 20-34 5-19	36-65 66-80 81-95	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	0-5 0-5 0-5
	Cemento pozzolanico	IV/A IV/B	65-89 45-64	-	11-35 36-55				- -	- -	- -	0-5 0-5
	Cemento composito	V/A V/B	40-64 20-39	18-30 31-50	- -	18-30 31-50				- -	- -	0-5 0-5

Figura 6: Classificazione cementi



Figura 7: Cemento

Nella presente ricerca è stato deciso di utilizzare il cemento bianco 32.5R della Calme Cementi, che secondo la denominazione legislativa rientra tra i CEMII/B. È un cemento Portland al calcare con classe di resistenza 32.5R, contiene nel suo nucleo una percentuale di massa di clinker compresa tra l'65% ed il 79% e un tenore complessivo di calcare compreso tra il 21% ed il 35%, oltre ad una percentuale inferiore al 5% di costituenti secondari opportunamente selezionati.

3.2.2 Calce

Nel confezionamento dei provini è stata usata una calce idratata bianca prodotta da Unicalce Spa. La calce idratata è ottenuta per idratazione della calce viva ed è costituita prevalentemente da idrossido di calcio (Ca(OH)).



Figura 8: Calce

3.3 Slag

La slag è una loppa d'altoforno, un sottoprodotto del processo di produzione della ghisa, durante il quale si formano grandi quantità di scorie. Il materiale di scarto si presta ad essere utilizzato all'interno di miscele edilizie in quanto ha una composizione non lontana da quella del cemento Portland. Grazie alla sua attività idraulica latente è utilizzata come aggiunta per generare cementi d'altoforno.

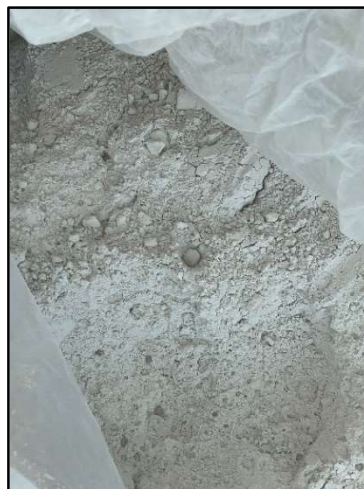


Figura 9: Slag

3.4 Sabbia

Come aggregato è stata usata una sabbia fine, prodotta da Esincalce. È una sabbia calcarea, esclusivamente macinata, di granulometria fino a 3 millimetri ideale per la preparazione di malte da muratura o da intonaco.



Figura 10: Sabbia

3.5 Superfluidificante

La norma UNI EN 934–2 definisce gli additivi come “un materiale da aggiungere durante il confezionamento del calcestruzzo in quantità non superiore al 5% in massa sul contenuto di cemento”. Nello specifico gli additivi fluidificanti contengono sostanze polimeriche idrosolubili con proprietà disperdenti. Queste sostanze, che contengono gruppi funzionali carichi in genere negativamente, si assorbono sulla superficie dei granuli parzialmente idratati di cemento dotando i granuli stessi della carica elettrica; in questo modo le particelle di cemento, che solitamente tendono ad aggregarsi e flocculare, si respingono tra loro e si disperdono nell’acqua. Grazie a questo meccanismo gli additivi fluidificanti permettono, senza influenzare la lavorabilità del materiale di ridurre il contenuto di acqua nella miscela, oppure a parità d’acqua di aumentarne la lavorabilità. In questo caso, come additivo superfluidificante è stato utilizzato il Mapefluid N200, a base di naftalensolfonato, per calcestruzzi. L’ utilizzo ci permette di ridurre la quantità di acqua all’interno dell’impasto, allo scopo di abbassare il rapporto acqua-cemento,

parametro che influenza notevolmente la resistenza meccanica del materiale. In particolare, rapporti bassi determinano resistenze più elevate del materiale.



Figura 11: Superfluidificante

3.6 Pula

La pula, derivante da una pellicola gialla chiamata pergamino, è un sottoprodotto della lavorazione del caffè. Il materiale è stato prelevato direttamente dalla stessa torrefazione in seguito alla tostatura dei chicchi di caffè.



Figura 12: Pula

3.7 Fondi di caffè

I fondi esausti di caffè, prodotto di scarto della produzione della famosa bevanda, sono stati prelevati dal medesimo ristorante sito nella zona di ancona.



Figura 13: Fondi di caffè

3.8 Trattamenti dei materiali organici

L'esecuzione di trattamenti su composti organici rappresenta una pratica fondamentale in numerosi ambiti della chimica e dell'ingegneria. Questi trattamenti, che possono includere diversi processi, sono impiegati per modificare le proprietà fisiche e chimiche delle sostanze organiche al fine di migliorarne le prestazioni, purificarle, o convertirle in materiali con caratteristiche desiderate.

Gli scopi principali dei trattamenti sui composti organici sono molteplici:

1. **Miglioramento delle Proprietà:** Attraverso alcuni trattamenti, è possibile migliorare le proprietà meccaniche, chimiche e biologiche dei materiali organici.
2. **Purificazione:** possono essere utilizzati processi per rimuovere impurezze o componenti indesiderati dai composti organici, ottenendo così un prodotto finale più puro.
3. **Sintesi di Nuovi Materiali:** mediante processi chimici o fisici a temperatura ambiente, è possibile facilitare la sintesi di materiali innovativi.

3.8.1 Mineralizzazione della pula

La pula, prima di essere utilizzata, è stata sottoposta ad un processo di mineralizzazione, un trattamento eseguito in laboratorio per la disgregazione della parte organica di un materiale. Il processo è stato eseguito mescolando la pula con acqua e calce e in seguito il composto è stato stagionato per 24 ore all'interno di un contenitore accuratamente sigillato. L'efficacia del trattamento è stata descritta da Eboziegbe Patrick Aigbomian, Mizi Fan⁶ et al: i materiali vegetali contengono una serie di sostanze, tra cui emicellulose, amidi, zuccheri e acidi carbossilici idrossilati che potrebbero sciogliersi e influenzare la cristallizzazione della calce. I ricercatori hanno proposto alcune soluzioni a questo problema, sottolineando la necessità di modificare la superficie delle fibre di cellulosa, migliorando così l'adesione tra la parte organica e la matrice. La ricerca ha dimostrato che, a seguito dell'ottimizzazione attraverso diverse modifiche superficiali dell'interfaccia della segatura, si ottiene un significativo aumento della resistenza dei compositi.



Figura 14: Pula mineralizzata

3.8.2 Essiccamento fondi di caffè

Con essiccamento o essiccazione si intende l'operazione che, data una certa miscela, permette di separare la fase solida da quella liquida. Il processo consiste nel riscaldare la miscela solido-liquido ad una temperatura tale da fornire al liquido il calore latente di evaporazione necessario per effettuare il passaggio di stato. In questo studio I fondi di caffè sono stati essiccati all'interno di un forno ad una temperatura costante di 60° C; il procedimento è stato condotto fino a che non è stata registrata una differenza in peso minore dello 0.01 %, tra due pesate consecutive a distanza di 24h. Il processo ha causato una diminuzione in peso del campione di circa il 50%.

Tabella 1: Essiccamento fondi di caffè

PESO UMIDO (g)	PESO SECCO (g)			VARIAZIONE (%)
29/02/2024	01/03/2024	04/03/2024	05/03/2024	
587.15	234.66	233.43	232.45	0.004
588.25	255.72	231.92	230.58	0.005



Figura 15: Essiccamento dei fondi di caffè

3.8.3 Preparazione del biochar

Col termine biochar si intende un materiale carbonioso ottenuto per degradazione termica di biomassa, sia di origine animale che vegetale. La produzione di biochar avviene attraverso un trattamento termico chiamato pirolisi, che consiste nella decomposizione chimica di un composto o di una miscela di composti in una o più sostanze diverse, mediante l'applicazione di energia termica. Il processo avviene in totale assenza di un agente ossidante, solitamente ossigeno, portando alla rottura dei legami chimici originari, producendo nuove sostanze che provengono unicamente dal riassetto di atomi presenti nel materiale di partenza. Il tipo di biomassa utilizzata (es. residui agricoli, legno, rifiuti organici) e le condizioni operative (temperatura, tempo di residenza, atmosfera) influenzano le proprietà finali del biochar.

In questo caso per la produzione del biochar, a partire dai fondi di caffè, è stato seguito il procedimento descritto all'interno della pubblicazione *Transforming spent coffee grounds into a valuable resource for the enhancement of concrete strength*². I fondi, dopo essere stati essiccati, sono stati posti all'interno di contenitori in alluminio, chiudendoli accuratamente per ottenere una combustione il più possibile anaerobica. Nella seguente ricerca la produzione di biochar è stata effettuata in due modi:

1) All'interno di una stufa, Il riscaldamento è avvenuto in due step, il primo partendo da una temperatura di 20°C fino a circa 300°C con una rampa di 10°C/min, della durata di circa 28 min; il secondo con una temperatura costante di 300°C per circa 2h;

2) All'interno di una muffola, il riscaldamento è avvenuto anch'esso in due step, il primo partendo da una temperatura di 20°C fino a raggiungere 350°C con una rampa di 10°C/min, della durata di circa 33 min; il secondo con una temperatura costante di 350°C per circa 2h;



Figura 16: Preparazione pirolisi



Figura 18: Biochar Muffola 350°C



Figura 17: Biocahr Stufa 300°C

3.9 Caratteristiche e Composizione Chimica dei materiali organici

Le proprietà fisiche e chimiche della pula di caffè, dei fondi di caffè e del biochar vengono studiate attraverso tecniche di laboratorio. Queste analisi forniscono dati dettagliati sulla struttura e sulla composizione del materiale, informazioni essenziali per comprendere come il materiale possa influenzare le caratteristiche dell'intonaco edilizio.

3.9.1 Analisi SEM

Il SEM, ovvero il microscopio elettronico a scansione, è uno strumento attraverso il quale è possibile condurre un'indagine di tipo non distruttivo grazie all'interazione tra un fascio di elettroni e il campione, oggetto d'esame. L'analisi permette di ottenere informazioni di tipo morfologico e strutturale, e anche importanti informazioni relative alla natura chimica del campione analizzato. La tecnica sfrutta l'interazione tra un fascio di elettroni e gli atomi che compongono il campione in esame: il fascio primario di elettroni viene focalizzato sul campione e spostato lateralmente fino a percorrere una linea, in modo da poter eseguire la scansione di tutta la superficie del campione. Gli elettroni interagiscono fortemente con la nuvola elettronica e con il nucleo degli atomi del campione. Nell'interazione tra il fascio primario e gli atomi costituenti il campione sono emesse numerose particelle, tra le quali gli elettroni secondari; questi sono catturati da uno specchio rivelatore, convertiti in impulsi elettrici e inviati ad uno schermo. Il risultato è un'immagine in bianco e nero ad elevata risoluzione e grande profondità di campo. Gli elettroni primari interagiscono con la superficie del campione, in particolare con gli elettroni delle orbite esterne debolmente legati e generano, per collisione anelastica con gli atomi del materiale, gli elettroni secondari di energia più bassa, dei quali riescono ad allontanarsi solo quelli che si generano in prossimità della superficie. L'intensità degli elettroni è ampiamente governata dalla topografia superficiale del campione. L'immagine della superficie del campione può essere ricostruita misurando l'intensità (I) degli elettroni secondari in funzione del fascio primario nel suo movimento di scansione.

In generale un SEM è costituito da alcuni elementi essenziali:

- 1 sorgente di elettroni, dalla quale viene generato il fascio di elettroni

- Una colonna costituita da diverse lenti, elettrostatiche o elettromagnetiche, che permettono di gestire il fascio
- Una serie di detector che raccolgono il segnale generato a seguito dell'interazione tra fascio e campione e permettono di ricostruire l'immagine o ottenere le informazioni composizionali
- Uno stage sul quale è posizionato il campione
- Un sistema di vuoto, costituito in genere da una pompa pre-vuoto, che deve garantire un livello di vuoto più alto possibile per evitare che il fascio, o gli stessi segnali generati, incontrino ostacoli (molecole di gas) coi quali andrebbero ad interagire ottenendo di conseguenza un'immagine più rumorosa ed un'analisi meno accurata.



Figura 19: Microscopio SEM

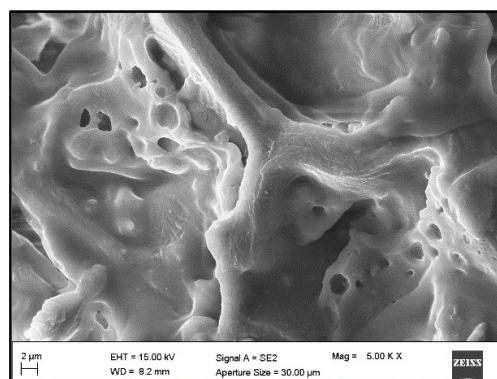
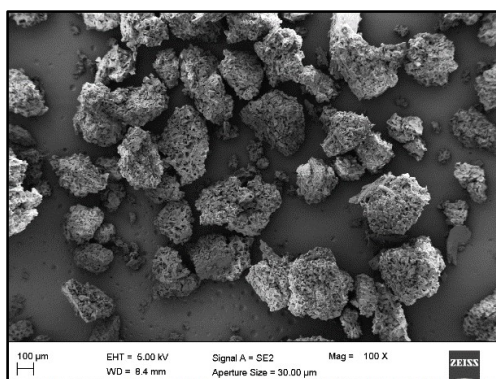
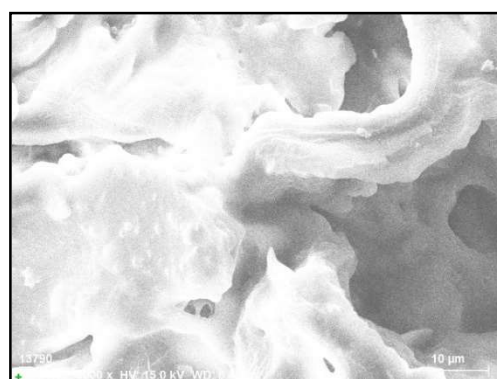
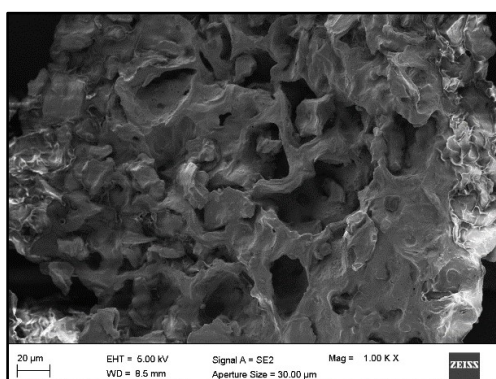
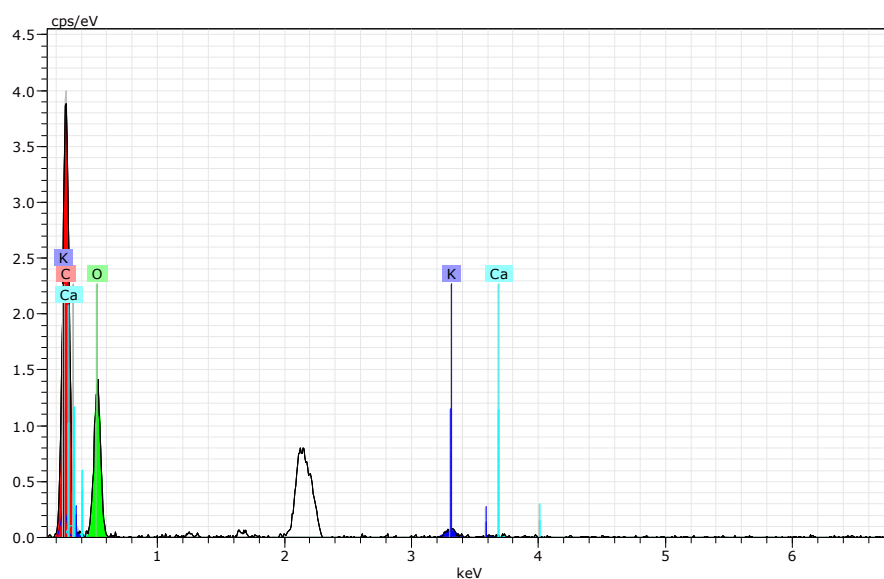
Attraverso l'analisi SEM è stato possibile effettuare un'analisi atomica dei materiali organici, in particolare è stata determinata la dimensione dei pori intermolecolari grazie agli ingrandimenti fino ad una scala di $2\ \mu\text{m}$, ed è stato possibile individuare la percentuale di carbonio presente nei materiali, evidenziando una quantità molto più elevata nel biochar, confermando l'efficacia del trattamento eseguito.

3.9.1.1 Risultati analisi SEM

3.9.1.1.1 Fondi di caffè essiccati

Spectrum: Acquisition

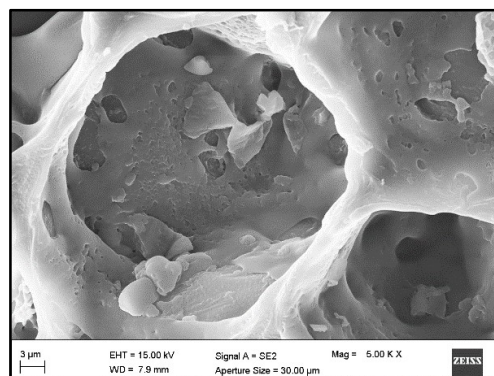
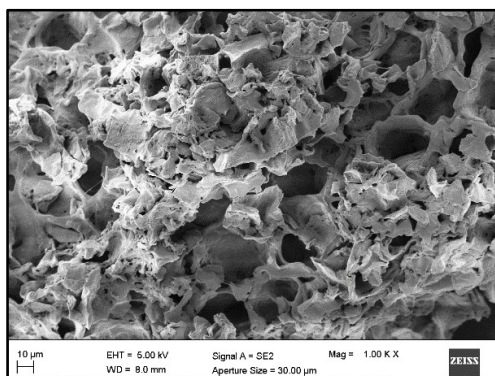
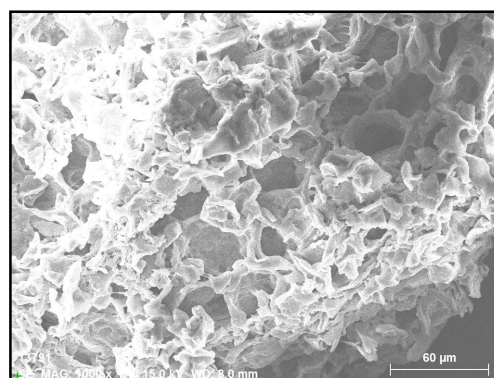
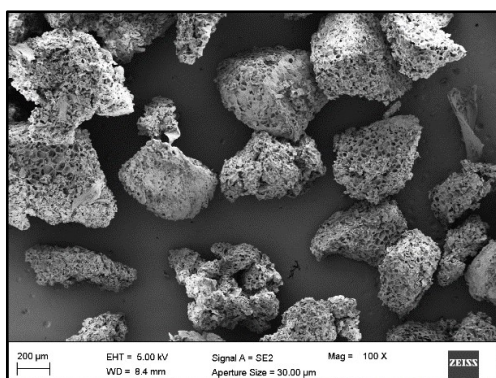
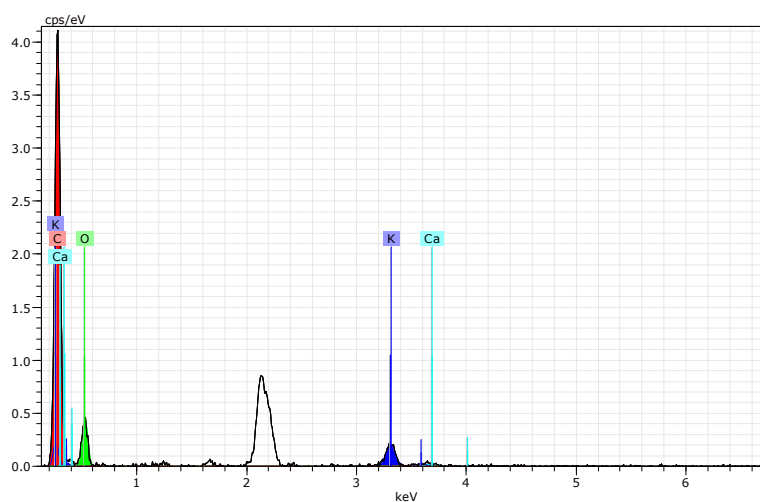
Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Carbon	K-series	56.92	56.92	64.16	7.71
Oxygen	K-series	41.84	41.84	35.41	6.53
Potassium	K-series	1.05	1.05	0.36	0.09
Calcium	K-series	0.20	0.20	0.07	0.05
Total:		100.00	100.00	100.00	



3.9.1.1.2 Biochar 350°C

Spectrum: Acquisition

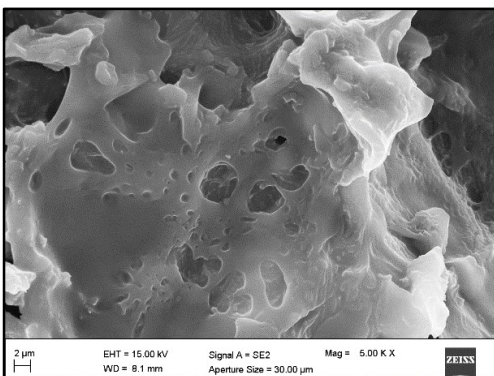
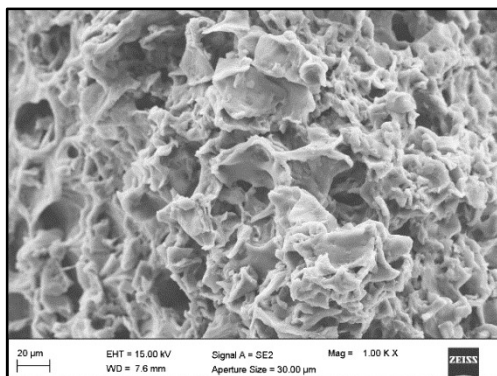
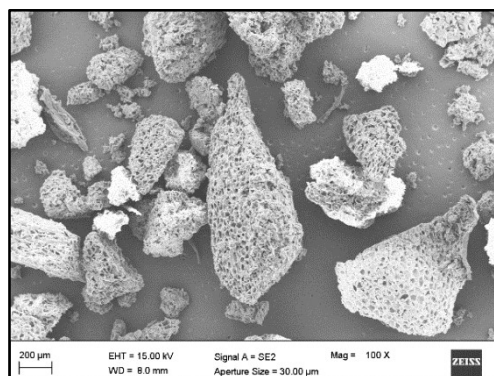
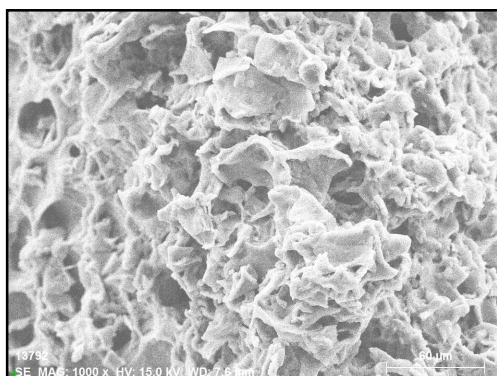
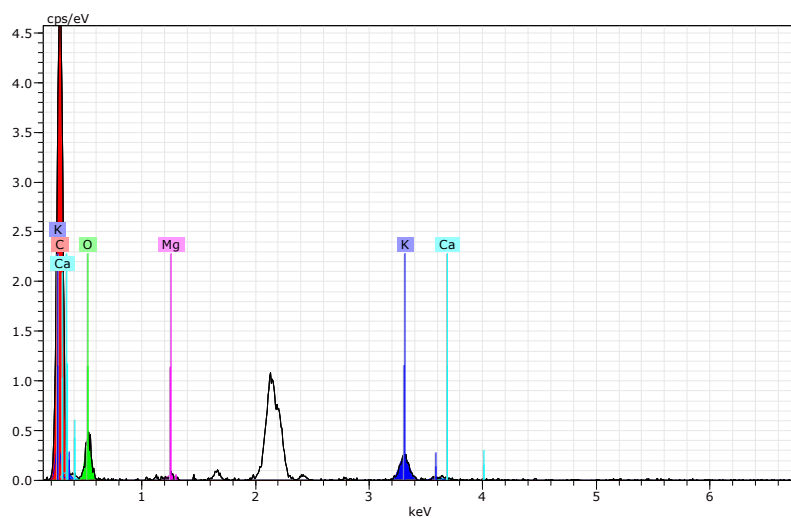
Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Carbon	K-series	71.45	71.45	78.67	9.58
Oxygen	K-series	23.92	23.92	19.77	4.71
Potassium	K-series	3.99	3.99	1.35	0.20
Calcium	K-series	0.64	0.64	0.21	0.08
Total:		100.00	100.00	100.00	



3.9.1.1.3 Biochar 300°C

Spectrum: Acquisition

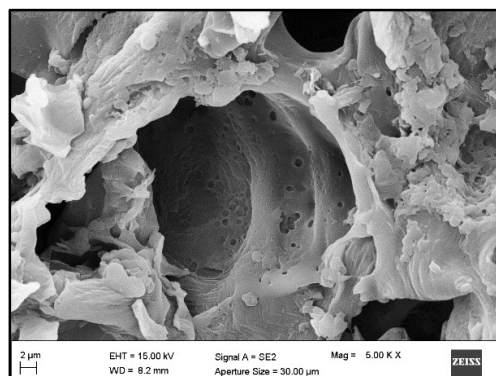
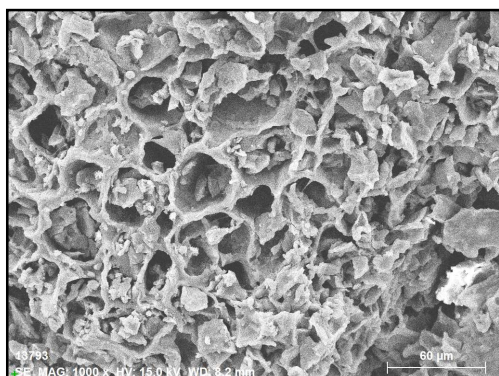
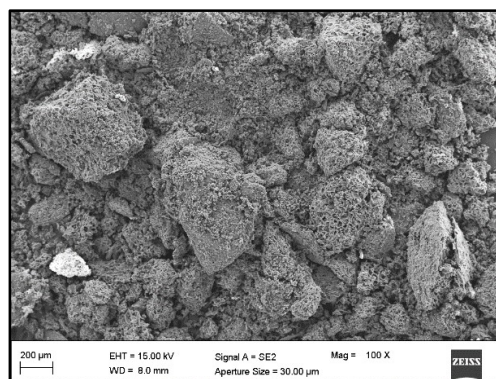
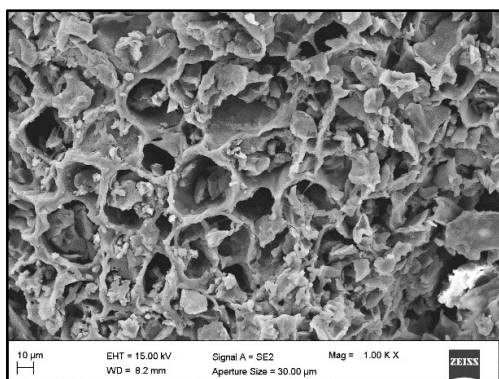
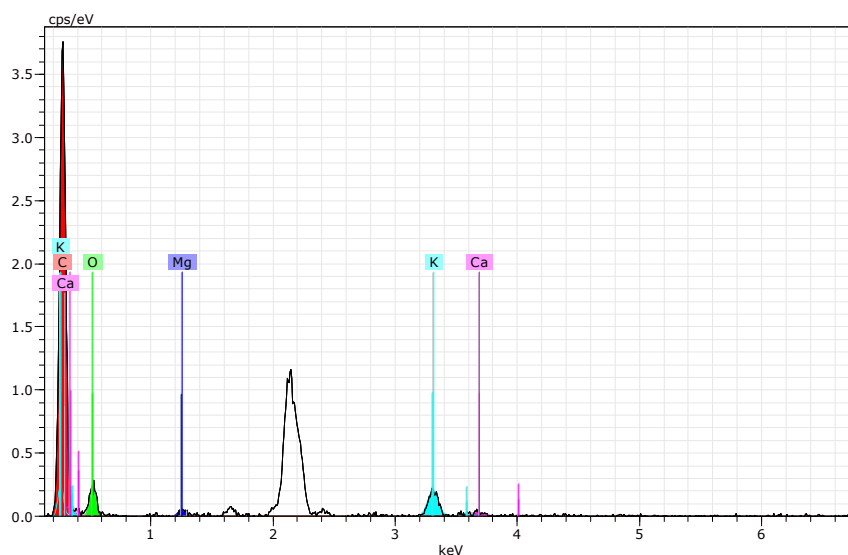
Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Carbon	K-series	73.94	73.94	80.86	9.70
Oxygen	K-series	21.22	21.22	17.42	4.19
Potassium	K-series	3.89	3.89	1.31	0.19
Calcium	K-series	0.47	0.47	0.16	0.07
Magnesium	K-series	0.46	0.46	0.25	0.07
Total:		100.00	100.00	100.00	



Spectrum: Acquisition

Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Carbon	K-series	75.85	75.85	83.03	10.35
Oxygen	K-series	17.97	17.97	14.77	4.12
Magnesium	K-series	0.64	0.64	0.35	0.09
Potassium	K-series	4.68	4.68	1.57	0.23
Calcium	K-series	0.86	0.86	0.28	0.09

Total: 100.00 100.00 100.00



3.9.2 Determinazione dell'area superficiale specifica dei solidi (BET)

La metodologia è regolata dalla norma ISO 9277 e rappresenta il metodo principale di misura della superficie specifica di un materiale microporoso tramite la teoria di Brunauer, Emmett e Teller (BET). È una tecnica di adsorbimento fisico realizzata generalmente a basse temperature (77°K) e tende a valutare la quantità di un gas, solitamente azoto (o elio), adsorbito sulla superficie del solido a diverse pressioni dopo essere stato opportunamente degassato. Si determina, così, l'area esterna e il diametro dei pori per poter caratterizzare l'area superficiale specifica totale in m^2/g , acquisendo informazioni fondamentali per lo studio degli effetti della porosità e delle dimensioni delle particelle in diverse applicazioni. La fase di degassamento è fondamentale nell'analisi, in quanto permette la rimozione dei gas e dei vapori che possono essere stati fisicamente adsorbiti sulla superficie del campione, durante il trattamento, la manipolazione e lo stoccaggio. Se il degassamento non fosse eseguito, la misura dell'area superficiale specifica potrebbe essere compromessa, in quanto si potrebbe ottenere un valore minore rispetto a quello reale. Per effettuare la prova sono stati preparati dei campioni di 50 mg circa e inseriti all'interno di burette in vetro dalla forma allungata, precedentemente lavate con acqua deionizzata e sottoposti ad un riscaldamento in stufa per circa un'ora a 100°C, per eliminare qualsiasi impurità. Successivamente i materiali sono stati sottoposti al processo di degassificazione ad una temperatura di 200°C per due ore,

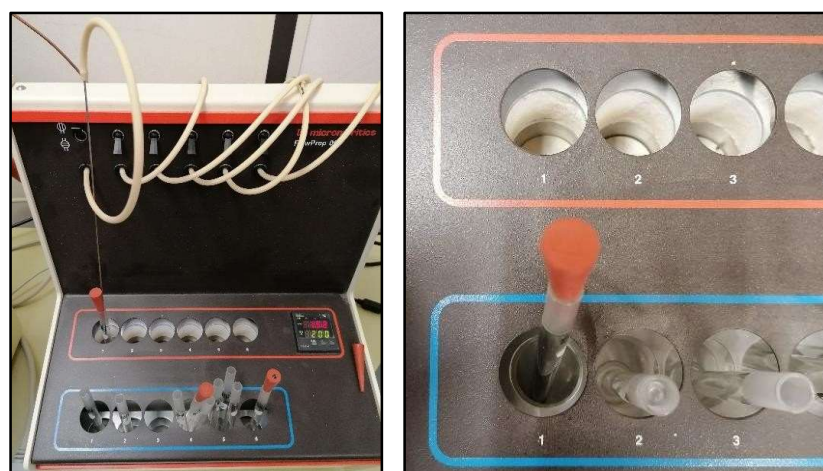


Figura 20: Degassificazione

Terminata la preparazione dei campioni è stato possibile iniziare la prova attraverso l'apposito macchinario dedicato. I campioni vengono analizzati misurando il volume di gas adsorbito a specifiche pressioni e a basse temperature, mantenute grazie alla presenza di azoto liquido.

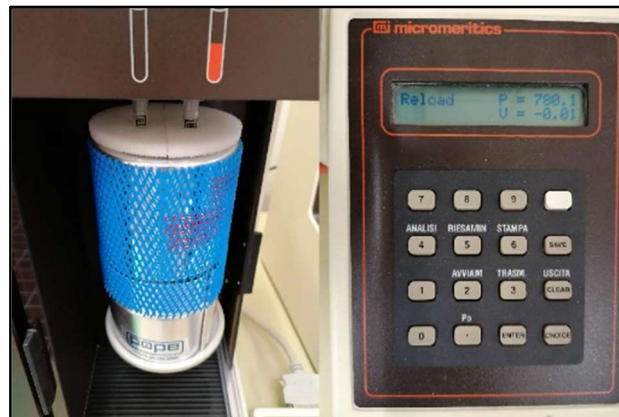
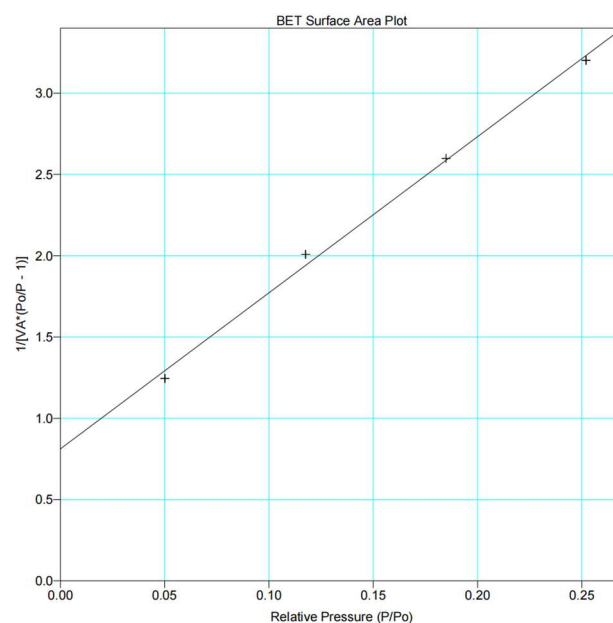


Figura 21: Prova BET

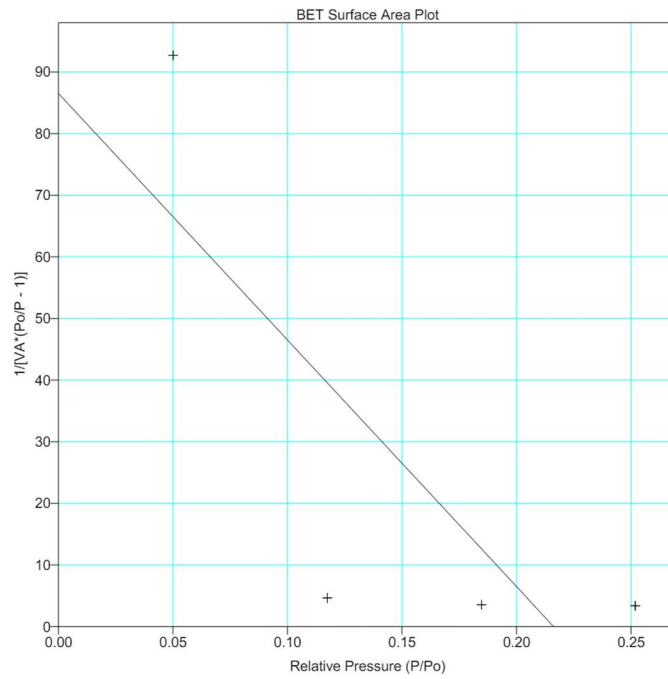
3.9.2.1 Risultati prova BET

Nel seguito si riportano i risultati ottenuti dall'analisi di diversi campioni:

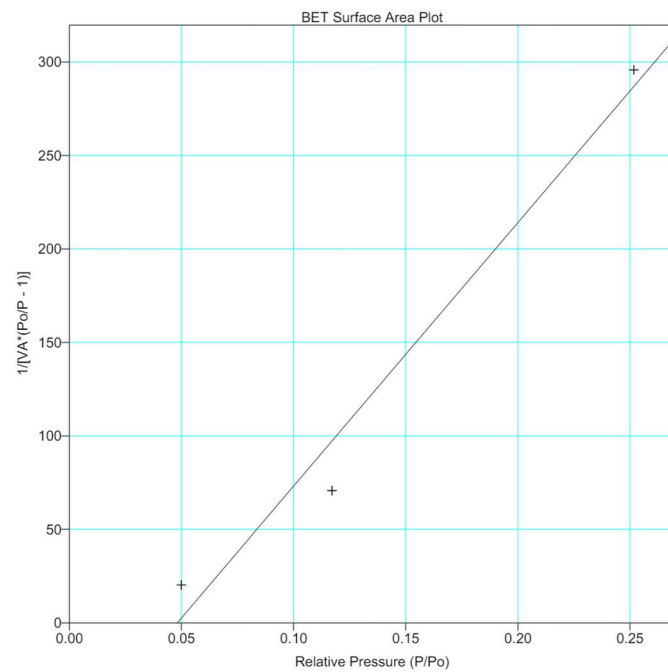
- Biochar prodotto nella stufa
BET Surface Area: $0.4179 \text{ m}^2/\text{g}$



- Biochar prodotto nella stufa
BET Surface Area: $-0.0139 \text{ m}^2/\text{g}$



- Biochar prodotto nella muffola
BET Surface Area: $0.0032 \text{ m}^2/\text{g}$



I risultati delle prove individuano una superficie specifica estremamente bassa, d'altra parte l'analisi SEM ha evidenziato che il materiale è estremamente poroso. Tali risultati confermano la correttezza delle prove in quanto i due parametri sono legati da un rapporto di proporzionalità inversa come riportato dalla ricerca *Specific surface area versus porosity from digital images: High-porosity granular sample*. Lo studio ha analizzato la porosità e l'area superficiale specifica di una sabbia naturale di dune, evidenziando che quanto più le particelle hanno dimensioni uniformi, all'aumentare della porosità diminuisce l'area superficiale specifica.

3.9.3 Prova VOC (Volatile organic compound)

La prova VOC permette di stimare la quantità dei microinquinanti che vengono assorbiti dai vari materiali. La prova è stata effettuata sui materiali organici oggetto di studio, tramite vaporizzazione di un microinquinante. Tale prova è stata allestita in un box definito "camera odori", al cui interno è stato inserito come microinquinante, un composto organico volatile, il metiletilchetone (butanone, MEK) ed un sistema di monitoraggio, sia per il MEK, sia per la temperatura e l'umidità relativa. Il MEK è un chetone, composto da un gruppo carbonile a cui risultano legati un gruppo etilico e un gruppo metilico, a temperatura ambiente si presenta come un liquido incolore dall'odore di solvente, è un composto molto infiammabile, irritante. Inoltre, all'interno della camera odori è stato inserito un sistema di ventilazione.

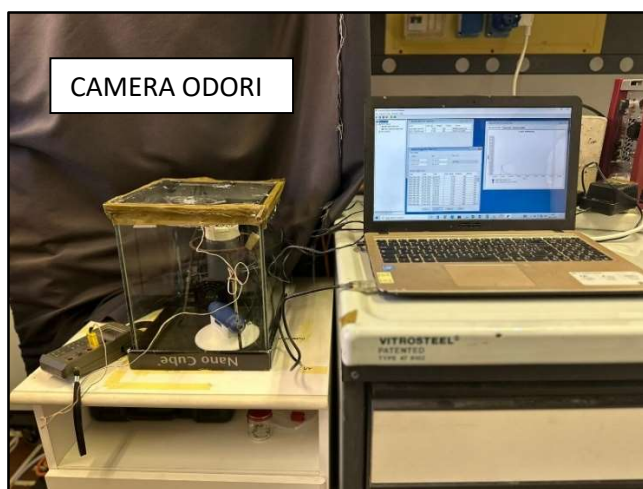


Figura 22: Allestimento prova VOC

La prova è stata eseguita inserendo all'interno della camera odori 1 µl di MEK con una micro-siringa e monitorando l'andamento del microinquinante per 20 minuti, effettuando una misurazione della concentrazione nell'aria ogni minuto. Prima di inserire i campioni all'interno della camera odori è stato eseguito un processo di prova "Blank", per valutare l'andamento del MEK in assenza di materiali organici e per verificare l'assenza di dispersioni verso l'esterno del microinquinante. Successivamente i dati sono stati elaborati normalizzandoli rispetto alla concentrazione massima di MEK registrata e valutando l'efficienza dell'assorbimento dei vari materiali organici attraverso la seguente formula:

$$Efficienza (\%) = \frac{(C_{in} - C_{fin})}{C_{in}}$$

Dove:

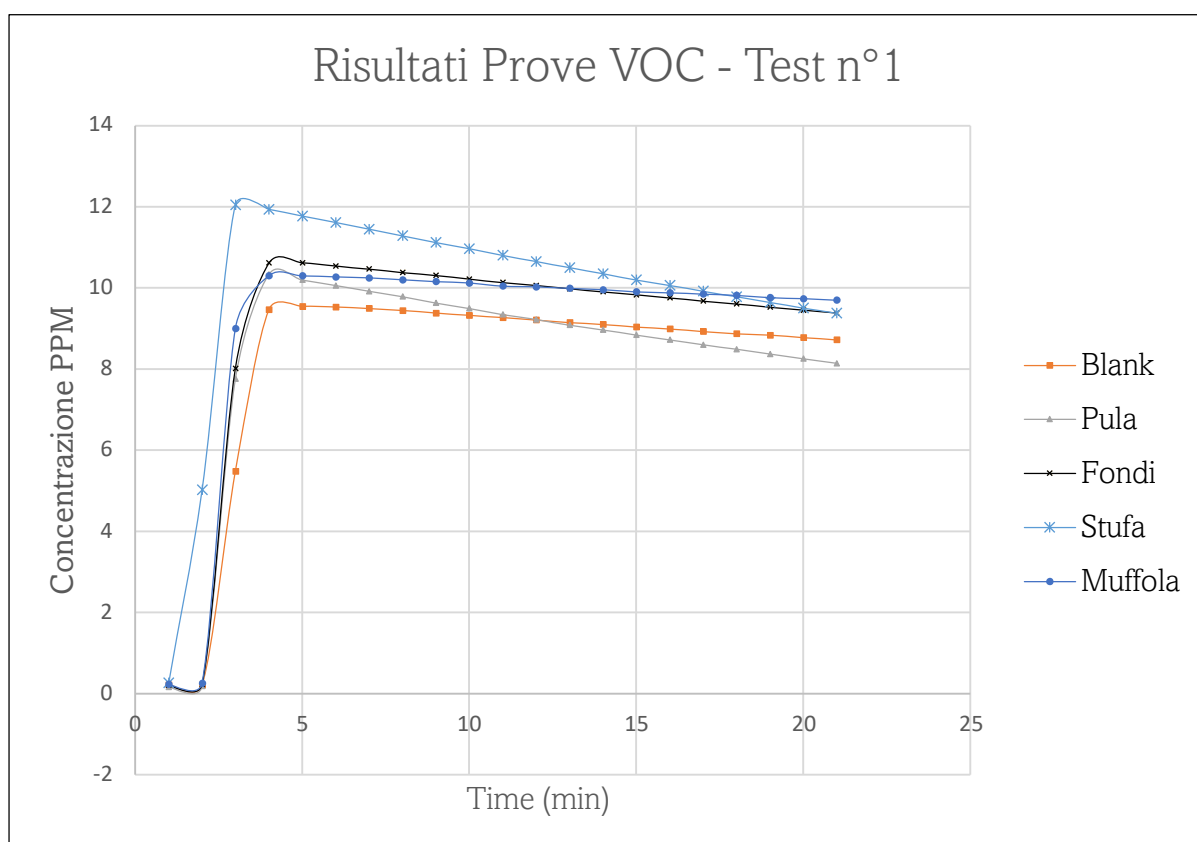
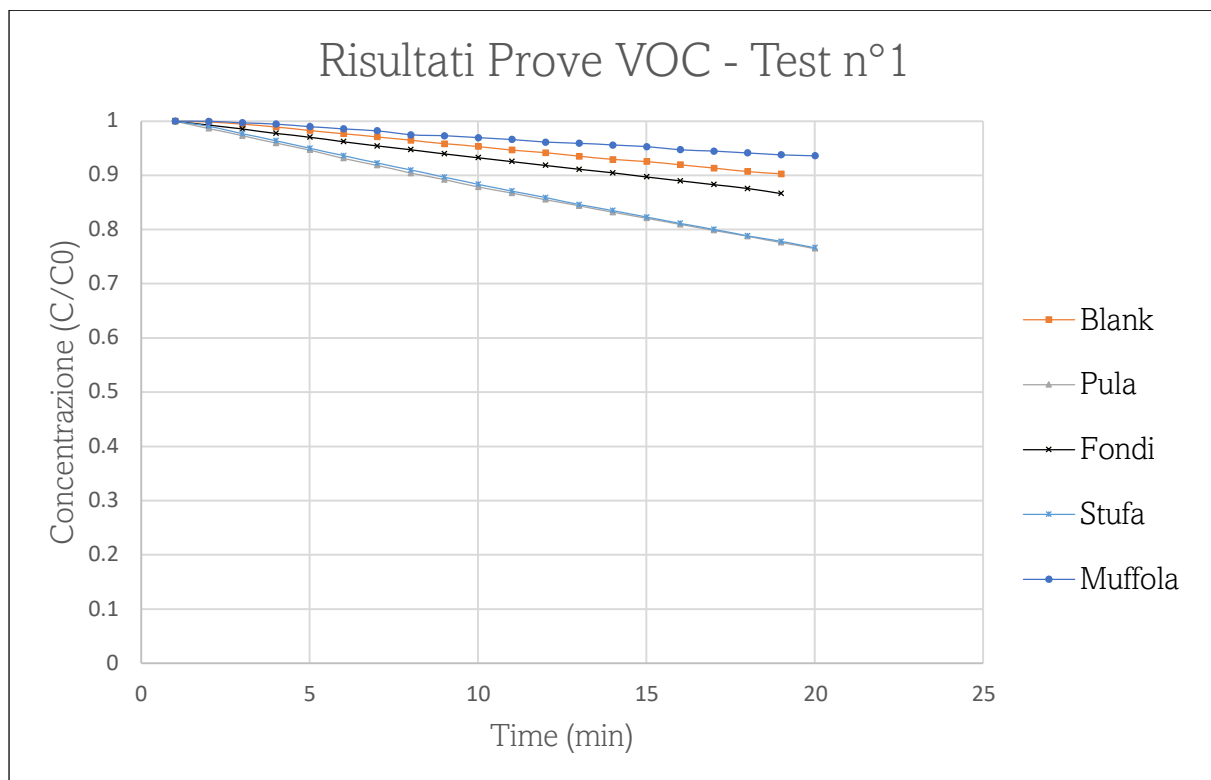
- C_{in} è la concentrazione al tempo zero del MEK all'interno della camera odori
- C_{fin} è la concentrazione finale del Mek all'interno della camera odori

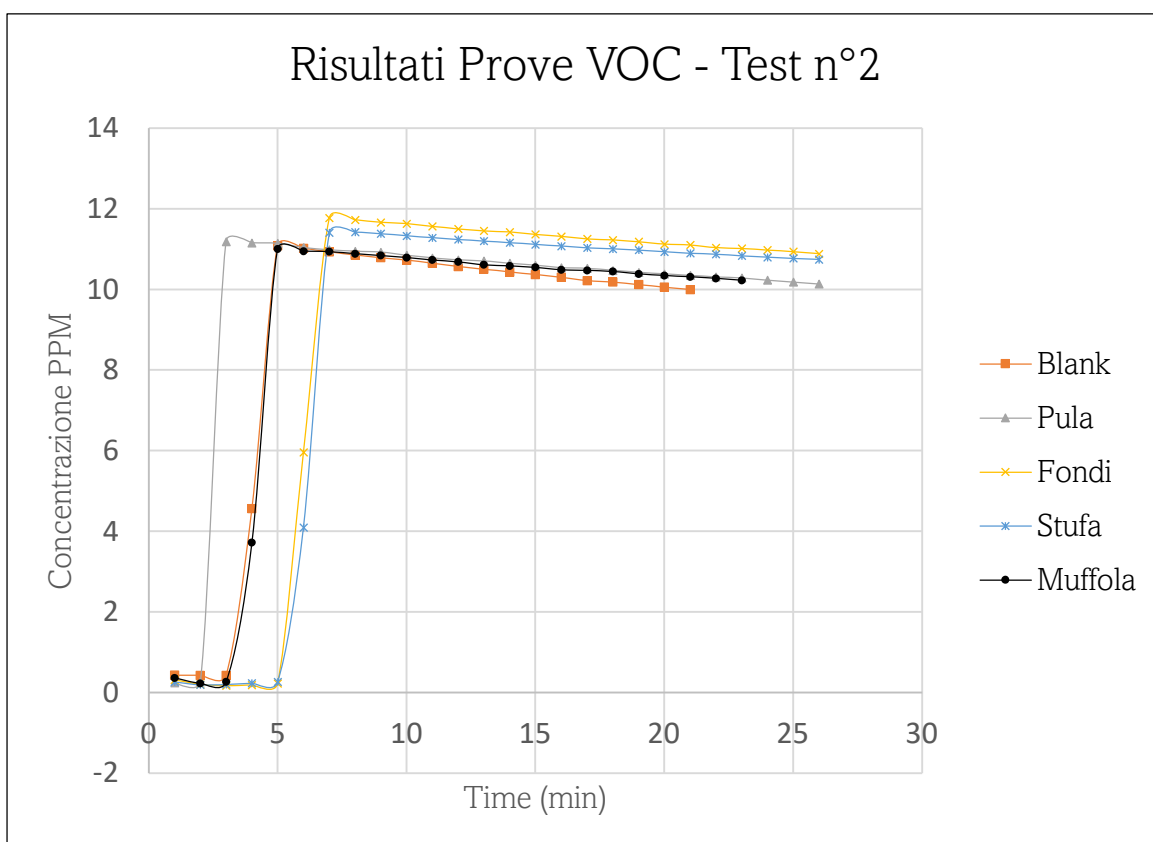
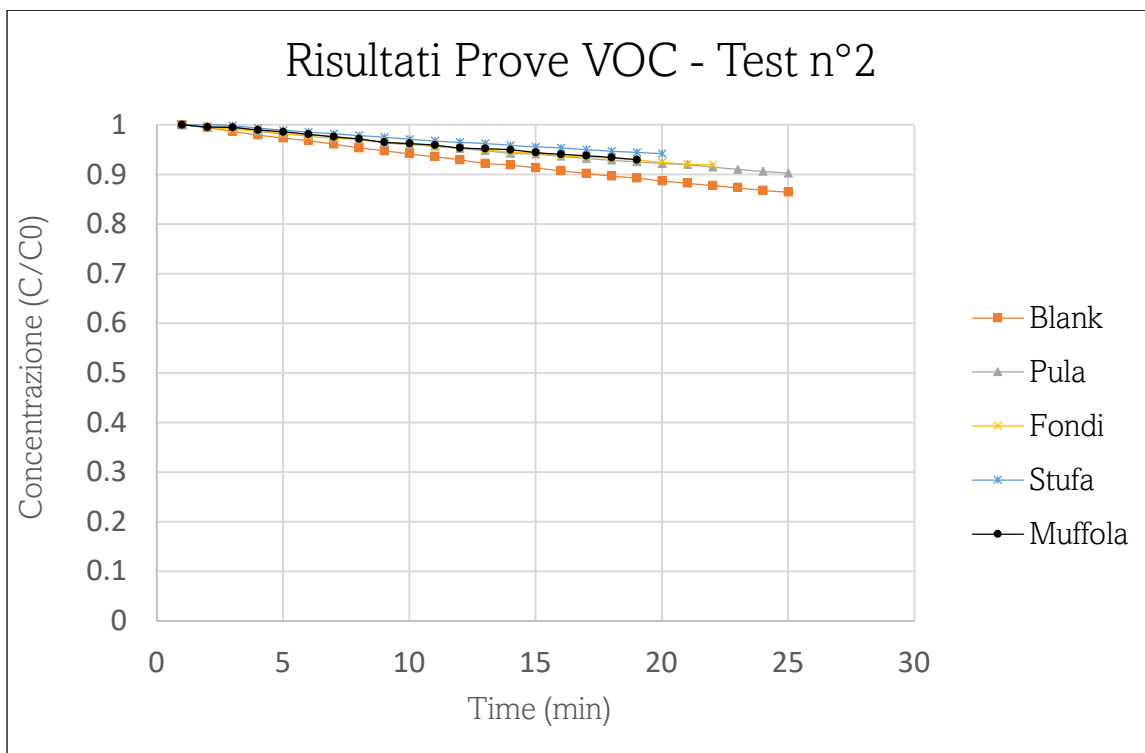
Tabella 2: Risultati efficienza VOC - Test n°1

	Conc in (ppm)	Conc fin(ppm)	Efficienza (%)	Efficienza Netta (%)
Blank	9.54	8.61	0.10	
Pula	10.33	7.9	0.24	0.14
Fondi	10.61	9.2	0.13	0.04
Stufa	12.04	9.23	0.23	0.14
Muffola	10.3	9.64	0.06	-0.03

Tabella 3: Risultati efficienza VOC - Test n°2

	Conc in (ppm)	Conc fin(ppm)	Efficienza (%)	Efficienza netta (%)
Blank	11.08	9.1	0.18	
Pula	11.18	10.09	0.10	-0.08
Fondi	11.77	10.82	0.08	-0.10
Stufa	11.4	10.74	0.06	-0.12
Muffola	11	10.22	0.07	-0.11





4. Applicazioni Pratiche e Sperimentazioni

Nel capitolo seguente sono descritti i procedimenti seguiti per il confezionamento dei provini e vengono presentate le diverse composizioni, illustrando le scelte fatte durante la ricerca. La prima parte della sperimentazione si è concentrata sulla definizione delle conseguenze che l'introduzione individuale dei vari scarti organici avrebbe comportato all'intonaco. In questa fase le analisi sono state condotte singolarmente, sottolineando le differenze che ogni aggiunta di materiale ha determinato alle caratteristiche meccaniche e tecnologiche dell'intonaco. Nella sezione successiva la ricerca si è concentrata sulla realizzazione della miscela composta da più materiali organici, cercando di condensare i diversi vantaggi apportati da una parte dalla pula e dall'altra dai fondi di caffè essiccati e dal biochar prodotto da fondi di caffè.

4.1 Preparazione dei provini

Per valutare le caratteristiche del materiale sono stati realizzati dei provini di dimensioni standard (4 x 4 x 16 cm), utilizzando degli stampi metallici costituiti da un telaio aperto di pareti rimovibili che, quando assemblate, formano tre scomparti; il procedimento per la realizzazione di quest'ultimi è comune e segue le medesime operazioni, le differenze sono da ricercare nelle quantità e nella tipologia dei vari materiali utilizzati. In ordine vengono presentati i provini realizzati con la pula, quelli con i fondi di caffè essiccati e infine quelli additivati con il biochar.

Il processo di realizzazione dei provini è riassunto dai seguenti passaggi:

- Unione dei vari materiali, ad eccezione dell'acqua, all'interno di un contenitore
- Miscelazione meccanica con l'utilizzo di un mortar mixer a velocità bassa, per circa 60 s
- Aggiunta dell'acqua ed eventualmente del superfluidificante all'impasto
- Ulteriore miscelazione meccanica per circa cinque minuti a velocità alta
- Getto dei provini all'interno di un cassero standard (4 cm x 4 cm x 16 cm)

- Avvolgimento dei provini con pellicola trasparente, per evitare l'evaporazione dell'acqua d'impasto
- Stagionatura dei provini a temperatura e umidità controllate (18°C-50%)
- Scasseratura, effettuata al settimo giorno di stagionatura



Figura 24: Mortar mixer



Figura 23: Cassero standard

Allo scopo di ottenere diversi campioni idonei alle diverse fasi di sperimentazione sono stati realizzati differenti provini. Nel seguito se ne riporta l'elenco, indicando il nominativo che è stato attribuito ad ogni provino, successivamente sarà descritto il procedimento condotto per la definizione delle composizioni.

Tabella 4: Elenco provini realizzati

Materiale organico	Provini con un materiale organico			
	Caffè essiccato	Biochar 300°C	Biochar 350°C	Pula
Nome	5% - Ess	5% - Stufa	5% - Muffola	2%-Pula
	10% - Ess	10% - Stufa	10% - Muffola	3%-Pula
	15% - Ess	15% - Stufa	15% - Muffola	4%-Pula
	20% - Ess	20% - Stufa		5%-Pula
	25% - Ess	25% - Stufa		10%-Pula
	Provini con più materiali organici			
	15% - Ess + 3% Pula			
	15% Stufa + 3% Pula			

4.2 Stagionatura

La stagionatura dei provini è un processo critico che influenza significativamente le proprietà meccaniche del materiale. Questo processo consiste nel mantenere i provini in condizioni controllate di temperatura e umidità per un periodo di tempo specifico, al fine di garantire una corretta idratazione del cemento e conseguentemente lo sviluppo delle proprietà meccaniche desiderate. Per le modalità di conservazione e di stagionatura sono state seguite le indicazioni riportate nelle normative. In riferimento alla determinazione delle resistenze meccaniche la conservazione dei provini deve essere condotta a umidità relativa del $95 \pm 5\%$ e alla temperatura di $20 \pm 2^\circ\text{C}$ all'interno dei casseri utilizzati per la formatura, per un tempo di 1 giorni e la conservazione per ulteriori 6 giorni alle stesse condizioni. In questo caso si è scelto di stagionare i provini, all'interno del cassero, per un periodo di 7 giorni, il procedimento si è prolungato per ulteriori 7 giorni dopo aver prelevato i provini dai casseri. La stagionatura è stata condotta per l'intera durata all'interno di un'apposita cella climatica necessaria a mantenere le condizioni esterne richieste costanti. Al quattordicesimo giorno di stagionatura sono state eseguite le prove per la caratterizzazione meccanica del materiale.

4.3 Pula: miscele preliminari

Le prime miscele sono state realizzate sulla base dei risultati sperimentali riportati nella pubblicazione *Characterization of lightweight mortars containing wood processing by-products waste*⁷. Lo studio caratterizza malte alleggerite realizzate attraverso l'utilizzo di scarti della lavorazione del legno; pertanto, vista la tematica molto affine, la ricerca è stata presa come punto di riferimento. Le prime composizioni sono state realizzate sottraendo il 5% e il 10% del peso totale della sabbia, rispetto al riferimento, e sostituendolo con il corrispettivo in peso di pula. Il primo getto realizzato è stato fatto per produrre il provino di riferimento, necessario per confrontare le caratteristiche di una miscela tradizionale con quelle del materiale oggetto di studio. Successivamente sono stati effettuati i due getti per la produzione della miscela 10 %-Pula e 5%-Pula. Durante la sperimentazione è stato necessario aumentare le quantità d'acqua all'interno della miscela, considerato che la pula, vista la densità molto bassa, si presentava in volume

elevato, causando un maggiore assorbimento d'acqua e variazioni alla lavorabilità del materiale. L'aggiunta dell'acqua è stata fatta step by step, unendo alla miscela 25 g d'acqua alla volta, fino a che non sono stati raggiunti i valori sulla lavorabilità prefissati.



Figura 25: Provino 5% - Pula

4.3.1 Pula: perfezionamento delle miscele

Dopo aver effettuato i primi getti dell'intonaco additivato con la pula ed aver eseguito le prove meccaniche, che saranno ampiamente spiegate nel seguito, è stato possibile definire una composizione target del materiale. La miscela 5%-Pula ha evidenziato le caratteristiche migliori. L'obiettivo di questa prima fase è stato definire la composizione che potesse rispettare i limiti inferiori delle caratteristiche meccaniche e tecniche necessari alla realizzazione di un intonaco. Ottenuti i primi risultati, la ricerca ha proseguito migliorando ulteriormente la composizione. In particolare, con riferimento alla miscela 5%-Pula sono stati realizzati ulteriori provini per determinare il quantitativo ottimale di materiale organico introducibile all'interno del prodotto. Le composizioni sono state ulteriormente modificate, apportando una sostituzione della sabbia pari al 2%, 3% e 4% del peso totale. Le prove meccaniche effettuate sui provini hanno permesso di definire la quantità ottimale di pula da introdurre all'interno dell'intonaco. Dopo aver effettuato tali valutazioni, la miscela con il 3% di pula è risultata essere la composizione obiettivo.

4.4 Fondi di caffè

Nel capitolo 4.2 vengono presentati i provini realizzati utilizzando biochar prodotto dai fondi di caffè e fondi di caffè semplicemente essiccati.

4.4.1 Fondi di caffè: miscele preliminari

La definizione delle miscele contenenti il biochar prodotto nella stufa, quello prodotto nella muffola e i fondi di caffè essiccati è stata fatta allo stesso modo: in riferimento al provino 0% è stato sottratto il 5%, 10% e 15% in peso della sabbia ed è stata sostituita, rispettivamente, con i 3 materiali organici. La sostituzione è stata fatta in termini di volume, dopo aver pesato 55g, 110g e 165g di sabbia (5%-10%-15% del totale), sono stati determinati i volumi dei materiali organici equivalenti a quelli della sabbia sottratta. Successivamente è stato possibile determinare i pesi dei fondi di caffè e del biochar che sarebbero stati aggiunti al posto della sabbia, in riferimento alle diverse percentuali. Lo scopo di questa prima fase è stato di analizzare le differenze ottenute utilizzando materiali derivanti da trattamenti a temperature differenti e in quantità diverse, cercando di individuare la soluzione migliore. In ordine verranno presentati i provini realizzati con fondi di caffè essiccati, quelli con biochar prodotto nella muffola e quelli con biochar proveniente dal trattamento in stufa.



Figura 26: Getto 7- Stufa5%



Figura 27: Getto 8- Stufa 10%



Figura 28: Getto 9 15%-Stufa



Figura 29: getto 6-15% Muffola



Figura 30: Getto 5-10%-Muffola

Al settimo giorno di stagionatura, condotta a umidità e temperatura controllate, all'interno di una pellicola per evitare l'evaporazione dell'acqua d'impasto, i provini sono stati prelevati dalle casseforme.



Figura 31: 5% Fondi Essiccati



Figura 32: 10% Fondi Essiccati

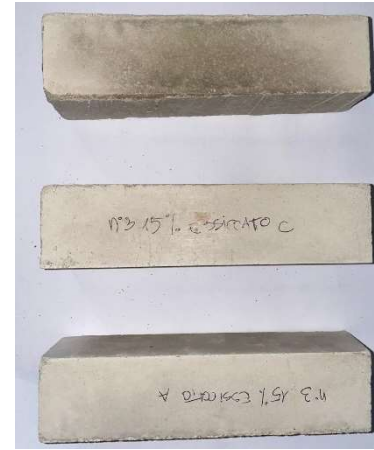


Figura 33: 15% Fondi essiccati



Figura 34: Muffola 5%



Figura 35: Muffola 10%



Figura 36: Muffola 15%



Figura 37: Stufa 5%



Figura 38: Stufa 10%



Figura 39: Stufa 15%

4.4.2 Fondi di caffè: miscele definitive

In seguito alle prove condotte sui provini precedentemente presentati, si è evidenziato un notevole aumento della resistenza a flessione conseguente all'introduzione dei materiali organici. L'aumento della resistenza è stato direttamente proporzionale all'aggiunta dei materiali organici, non evidenziando una tendenza a diminuire; pertanto, si è deciso di aumentare le quantità di quest'ultimi, realizzando ulteriori composizioni, per individuare il massimo miglioramento che i fondi di caffè e il biochar possano apportare alle caratteristiche meccaniche dell'intonaco. Nello specifico è stata fatta una sostituzione in volume pari al 20 % e il 25 %, utilizzando fondi di caffè essiccati e biochar prodotto all'interno della stufa. I provini sono stati confezionati secondo le composizioni seguenti:



Figura 40: 20%-25% Fondi caffè ESS.

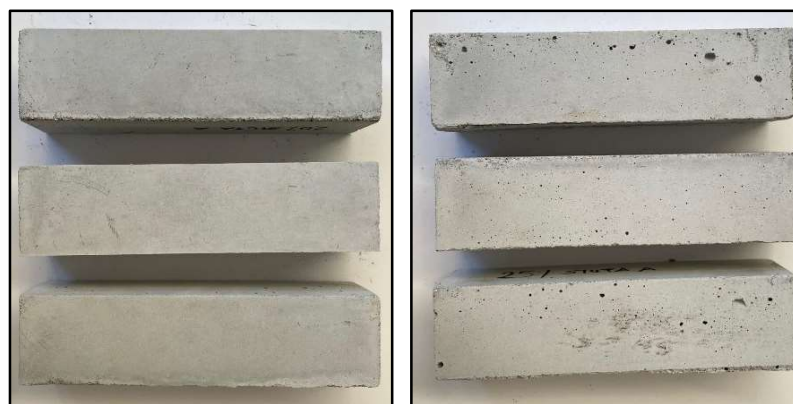


Figura 41: 20%-25% Pirolizzato stufa

Effettuate le prove le miscele migliori sono risultate essere la 15% - Ess e la 15% - Stufa, in quanto rappresentano la quantità massima di materiali organico che garantisce il maggior miglioramento alla resistenza meccanica del materiale.

4.5 Fondi di caffè e pula: miscela dell'intonaco

Attraverso la valutazione delle caratteristiche meccaniche e della lavorabilità del materiale è stato possibile individuare le quantità dei singoli composti organici obiettivo. In particolare, per il caffè essiccato e per quello pirolizzato è stata individuata come miscela target quella corrispondente ad una sostituzione di sabbia pari al 15%, mentre per la pula si è scelto la miscela contenente il 3% di materiale organico. Di conseguenza sono state riscritte le composizioni della miscela introducendo entrambi gli scarti della produzione di caffè nella matrice inorganica. Tra i materiali tradizionali è stata sottratta la sabbia, seguendo gli stessi procedimenti descritti in precedenza.



Figura 42: 15% PIR + 30g PULA



Figura 43: 15% ESS. + 30g PULA

5. Prove sperimentali

Questo capitolo dettaglia la metodologia utilizzata per condurre le sperimentazioni in laboratorio. Vengono descritti i parametri di prova, le condizioni sperimentali e gli strumenti utilizzati per valutare le prestazioni dell'intonaco. La sezione include anche informazioni sulle variabili misurate durante le prove, fornendo una base metodologica solida per interpretare i risultati.

5.1 Prove allo stato fresco

Le prove sullo stato fresco delle malte sono fondamentali per valutare le proprietà lavorabili e la qualità del materiale prima che si indurisca. Queste prove aiutano a garantire che la malta soddisfi le specifiche tecniche richieste per l'applicazione prevista e possieda le caratteristiche necessarie per una lavorazione e una prestazione ottimali.

5.1.1 Prova di spandimento

DESCRIZIONE

La prova di spandimento è stata effettuata in accordo alla *UNI EN 1015-3:2007*⁶, la norma specifica un metodo atto a determinare la consistenza di malte appena impastate. Il valore di fluidità viene misurato tramite il diametro medio di un campione di prova della malta fresca che è stato posizionato su un disco di una tavola a scosse, per mezzo di uno stampo definito e che viene quindi sottoposto ad un certo numero di impatti verticali, alzando la tavola a scosse e lasciandola poi cadere liberamente da una data altezza. Lo stampo troncoconico, di acciaio inossidabile o bronzo, ha un'altezza di 60 ± 0.5 mm e diametro interno di 100 ± 0.5 mm alla base e 70 ± 0.5 mm alla sommità.

PROCEDIMENTO

Dopo aver introdotto la malta, costipandola accuratamente, lo stampo viene sollevato lentamente e fatto vibrare per 15 volte alla frequenza costante di circa un colpo al secondo. Il valore di fluidità viene determinato dalla media del valore di due diametri misurati.



Figura 44: Tavola a scosse

5.1.2 Densità allo stato fresco

La prova è stata effettuata seguendo i passaggi descritti nella norma **UNI EN 12350-6⁹**, che specifica un metodo per determinare la massa volumica del provino fresco compattato.

PROCEDIMENTO

L' esecuzione della prova si articola nei passaggi descritti in seguito:

- Taratura del contenitore vuoto, nel nostro caso i casseri utilizzati per il getto, e registrazione del suo peso (m_1)
- Riempimento del contenitore con il materiale fresco
- Peso del cassero contenente la miscela fresca e registrazione del suo peso (m_2)
- Individuazione del volume del singolo provino (V)
- Determinazione della densità allo stato fresco attraverso la relazione dedicata

ELABORAZIONE

La massa volumica si determina applicando la formula:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

[1]

Dove:

D è la massa volumica del materiale fresco, in kg/m³;

m₁ è la massa del contenitore vuoto;

m₂ è la massa del contenitore completamente riempito;

V è il volume dello stampo, che è 256 x 10⁻⁶m³.

5.2 Prove allo stato indurito

Le prove sullo stato indurito delle malte sono fondamentali per valutare le proprietà meccaniche, fisiche e durabili del materiale una volta che ha raggiunto il suo stato definitivo. Queste prove sono essenziali per garantire che la malta soddisfi le specifiche tecniche e le esigenze prestazionali per cui è stata progettata, assicurando così la qualità e la longevità delle strutture in cui viene utilizzata.

5.2.1 Caratteristiche meccaniche

Le prime prove effettuate sui provini, si sono concentrate nella caratterizzazione meccanica del materiale, allo scopo di definire la composizione migliore, sfruttando al meglio le qualità della pula e dei fondi di caffè.

5.2.1.1 Densità allo stato indurito

Per determinare la massa volumica apparente delle malte indurite, si è fatto riferimento alla **UNI EN 1015-10**¹⁰. La prova è stata effettuata al settimo e al quattordicesimo giorno di stagionatura. Per ottenere i risultati, i provini sono stati pesati dopo essere stati

scasserati, in seguito i valori sono stati ottenuti attraverso la seguente relazione:

$$D = \frac{m_1}{V}$$

[2]

Dove:

D è la massa volumica del materiale fresco, in kg/m³;

m₁ è la massa del campione;

V è il volume dello stampo, che è 256 x 10⁻⁶m³.

5.2.1.2 Prova a compressione e a flessione

La norma di riferimento per la valutazione della resistenza a compressione e a flessione di provini di malta preparati in stampi è la **UNI EN 1015-11:2019**¹¹.

DESCRIZIONE

La resistenza a flessione della malta indurita è determinata mediante l'applicazione di un carico su tre punti di provini preparati in stampi, fino a rottura, mentre la resistenza a compressione della malta è determinata sulle due parti ottenute dalla prova di resistenza a flessione. I provini, di dimensioni pari a 160 mm x 40 mm x 40 mm, sono stati realizzati attraverso degli stampi metallici costituiti da un telaio aperto di pareti rimovibili che, quando assemblate, formano tre scomparti. Le prove sono state condotte al quattordicesimo giorno di stagionatura.

CALCOLO ED ESPRESSIONE DEI RISULTATI

La procedura consiste nell'applicare un carico, a velocità uniforme, attraverso un macchinario conforme alle prescrizioni della normativa, fino alla rottura dei provini. La

prova ci restituisce il carico massimo applicato al provino in newton, per riportare i risultati in Mpa sono state applicate le seguenti relazioni:

Resistenza a flessione

$$f = 1.5 \frac{F \times l}{b \times d^2}$$

[3]

Dove:

- F è il carico massimo applicato al provino, in newton;
- l è la distanza compresa tra i rulli di appoggio, in millimetri;
- b è la larghezza del provino, in millimetri;
- d è la profondità del provino, in millimetri.

Resistenza a compressione

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

[4]

Dove:

- F è il carico massimo applicato al provino, in newton;
- A è l'area della sezione del provino.



Figura 45: Pressa

5.2.2 Porosimetria ad intrusione di mercurio

La tecnica della porosimetria a intrusione di mercurio prevede l'infiltrazione del mercurio liquido che non bagna il materiale soggetto a rilevazione, attraverso l'uso del porosimetro.



Figura 46: Porosimetro a mercurio

La teoria alla base degli strumenti porosimetrici si basa sul principio secondo il quale un liquido non reattivo e non bagnante non penetra nei pori di un determinato materiale fino a che non viene applicata una pressione sufficiente. In tal modo, la dimensione dei pori presenti nel materiale può essere determinata in base alla pressione esterna necessaria per forzare il liquido in un poro, contro la forza opposta della tensione superficiale del liquido stesso.

DESCRIZIONE

La tecnica permette di analizzare la specifica porosità di un materiale, quantificandola in base a dati relativi al diametro dei pori, al volume totale dei pori, alla loro area superficiale, alla densità di Bulk (rapporto tra massa del solido e volume totale occupato) e alla densità assoluta. La porosità è una grandezza scalare di particolare importanza per quanto riguarda la chimica dei cementi. Essa viene empiricamente misurata tramite un valore detto Porosità percentuale Φ individuato dal rapporto tra il volume dei vuoti dei pori contenuti all'interno della matrice cementizia e il volume totale della stessa, come segue:

$$\Phi = V_v / V_{\text{tot}}$$

La presenza di pori all'interno della malta cementizia definisce l'ambito di utilizzo all'interno del settore edilizio. Un'elevata porosità è considerata favorevole per un ambito in cui sono richieste alte caratteristiche traspiranti ma penalizzante per la resistenza meccanica e durabilità, mentre una bassa porosità determina una matrice più duratura nel tempo e con caratteristiche meccaniche più elevate.

CALCOLO ED ESPRESSIONE DEI RISULTATI

Conoscendo il valore della pressione del liquido le informazioni sulla porosità caratteristica del materiale si ottengono dall'equazione di Washburn che descrive il bilanciamento delle forze di nei materiali aventi pori cilindrici:

$$P_L - P_G = \frac{4 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{D_p}$$

Dove

- P_L è la pressione del liquido rilevata in Mpa;
- P_G è la pressione del gas presente all'interno dei pori, pari a 0 atm, in quanto la prova viene svolta sottovuoto;
- σ è la tensione superficiale del liquido, pari a 480 Nm/m, (per il mercurio sottovuoto);

- θ è l'angolo di contatto di intrusione del liquido, approssimato a 140° per il mercurio;
- DP é il diametro dei pori, espresso in μm ;

Facendo sostituzioni e approssimazioni, l'equazione di calcolo del Diametro dei pori DP è data dalla seguente formula:

$$D_p = \frac{1470[kPa \cdot \mu m]}{P_L}$$

Per ogni incremento di pressione del liquido intrusivo si rileva il Volume incrementale dei pori, in mm^3/g , e la Dimensione dei pori in base al loro diametro, in μm .

Viene redatto un grafico che rappresenta la Distribuzione porosimetrica caratteristica del materiale, così da stimare la quantità di pori di determinate dimensioni presenti nel composto in base alla presenza di punti di flesso nella curva ottenuta nel grafico.

6. Risultati Sperimentali

Gli esiti delle sperimentazioni vengono presentati in dettaglio, evidenziando le variazioni nelle prestazioni dell'intonaco con l'aggiunta di biochar da fondi di caffè, di pula e di fondi di caffè essiccati. Vengono fornite analisi quantitative e qualitative, inclusi dati sulla resistenza, durabilità, controllo dell'umidità e regolazione termica. Questi risultati sono essenziali per valutare l'efficacia pratica dell'intonaco arricchito con biochar e pula e comprendere come il materiale si comporti in situazioni controllate e reali.

6.1 Determinazione della consistenza della malta allo stato fresco

La prima prova effettuata è stata fatta sul provino di riferimento per valutare la lavorabilità della miscela contenete 270 g d'acqua. Nella prima prova lo spandimento registrato è stato di 11,5 cm, media tra due diametri misurati, pertanto è stato necessario aggiungere acqua (20 g) alle composizioni iniziali per poter ottenere uno spandimento di almeno 12 cm.

6.1.1 Consistenza provino di riferimento

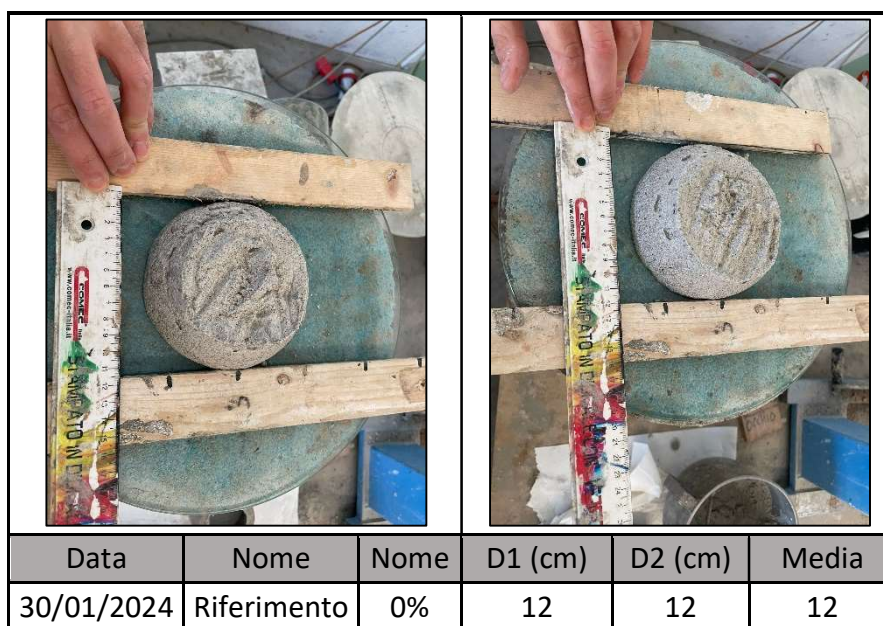


Figura 47: Prova spandimento (270 g acqua)

6.1.2 Consistenza provini con pula

			
Nome	D1 (cm)	D2 (cm)	Media
5%-Pula	11.4	11.4	11.4

Figura 48: Lavorabilità 5%-Pula

			
Nome	D1 (cm)	D2 (cm)	Media
10% Pula	11	11,3	11.15

Figura 49: Lavorabilità 10%-Pula

			
Nome	D1 (cm)	D2 (cm)	Media
3% Pula	11.5	11.4	11.45

Figura 50: Lavorabilità 3% Pula

6.1.3 Consistenza provini con fondi di caffè essiccati

Nome	D1 (cm)	D2 (cm)	Media
5%-Ess	13.2	12.5	12.85

Figura 51: Lavorabilità 5% Ess.

Nome	D1 (cm)	D2 (cm)	Media
10%- Ess	12.2	12.2	12.2

Figura 52: Lavorabilità 10% Ess.

Nome	D1 (cm)	D2 (cm)	Media
15% - Ess	11.3	11.3	11.3

Figura 53: Lavorabilità 15% - Ess.

			
Nome	D1 (cm)	D2 (cm)	Media
20%-Ess.	11	10.5	10.75

Figura 54: Lavorabilità 20% Ess.

			
Nome	D1 (cm)	D2 (cm)	Media
25%-Ess.	10.4	10.2	10.3

Figura 55: Lavorabilità 25% Ess.

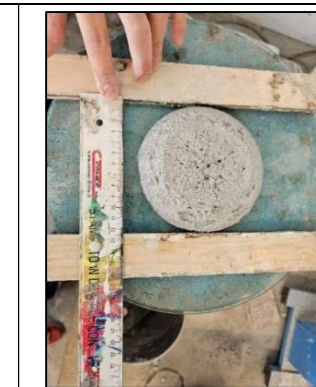
6.1.4 Consistenza provini con biochar 350°C

			
Nome	D1 (cm)	D2 (cm)	Media
5% Muffola	12.5	12.8	12.65

Figura 56: Lavorabilità 5% Muffola

			
Nome	D1 (cm)	D2 (cm)	Media
10% Muffola	13.5	13.7	13.6

Figura 57: Lavorabilità 10% Muffola

			
Nome	D1 (cm)	D2 (cm)	Media
15% Muffola	12.6	12.4	12.5

6.1.5 Consistenza provini con biochar 300°C

			
Nome	D1 (cm)	D2 (cm)	Media
5% Stufa	12.4	12.4	12.4

Figura 58: Lavorabilità 5% Stufa

			
Nome	D1 (cm)	D2 (cm)	Media
10% Stufa	13.2	13.3	13.25

Figura 59: Lavorabilità 10% Stufa

			
Nome	D1 (cm)	D2 (cm)	Media
15% Stufa	12.4	12.4	12.4

Figura 60: Lavorabilità 15% Stufa

			
Nome	D1 (cm)	D2 (cm)	Media
20% Stufa	12	11.9	11.95

Figura 61: Lavorabilità 20% Stufa

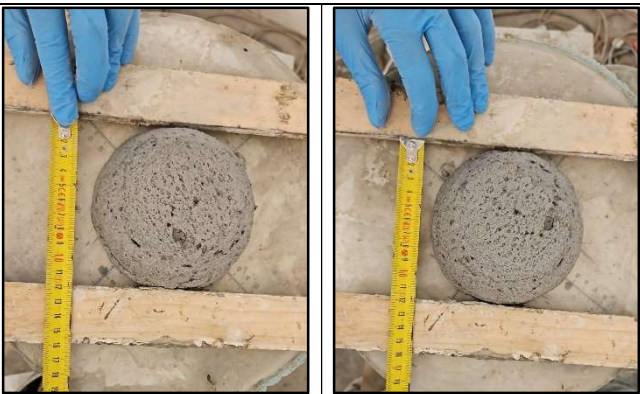
			
Nome	D1 (cm)	D2 (cm)	Media
25% Stufa	11.9	11.9	11.9

Figura 62: Lavorabilità 25% Stufa

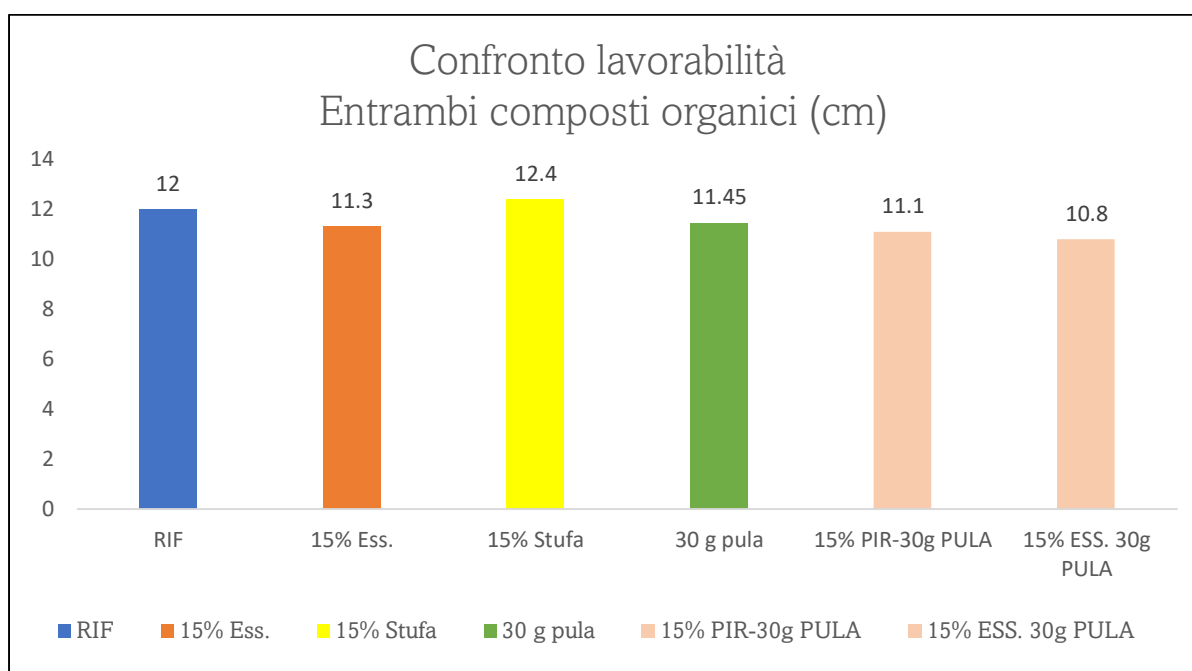
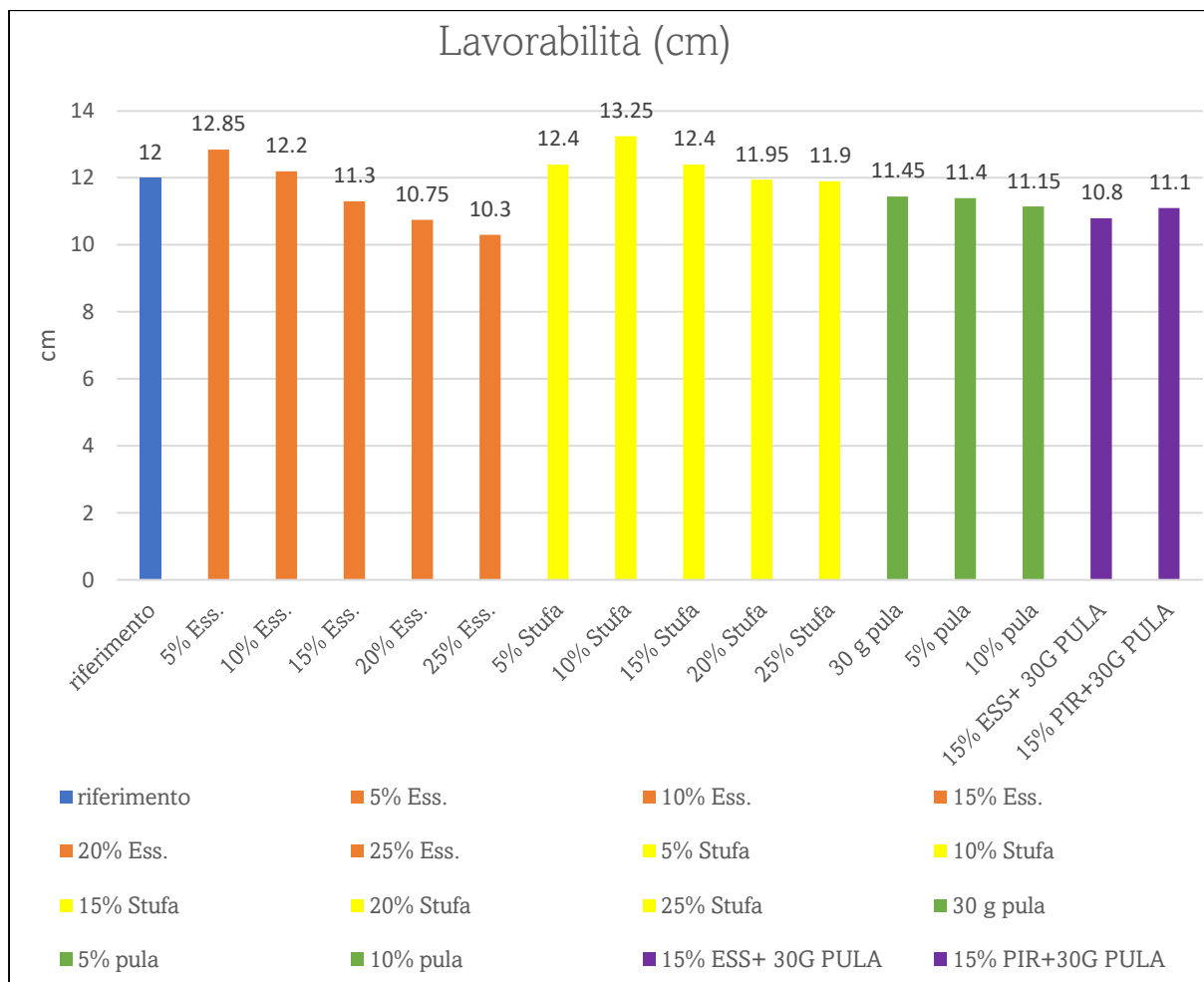
6.1.6 Consistenza provini con entrambi i composti organici

			
Nome	D1 (cm)	D2 (cm)	Media
15% Ess-3% Pula	10.8	10.8	10.8

Figura 63: Lavorabilità 15% Ess-3 % Pula

			
Nome	D1 (cm)	D2 (cm)	Media
15% Pir-3% Pula	11.00	11.20	11.10

Figura 64: Lavorabilità 15% Pir-3% Pula



CONSIDERAZIONI

Attraverso un attento studio della miscela è stato possibile ottenere delle malte la cui prova di spandimento abbia risultati compresi tra gli 11.00 cm e 14.00 cm. La valutazione è stata fondamentale, in quanto risultati differenti avrebbero compromesso le caratteristiche pratiche e tecnologiche del prodotto; la messa in opera dell'intonaco richiede l'utilizzo di malte con una precisa lavorabilità, per garantire l'aderenza al supporto e la possibilità di condurre le operazioni tipiche e necessarie per l'esecuzione a regola d'arte dell'intonaco civile. In particolare, un intonaco fatto a regola d'arte consiste in almeno tre strati: lo strato inferiore (rinzaffo sottile) ha lo scopo di fornire l'indispensabile aderenza alla muratura degli strati successivi di intonaco; il secondo strato, l'intonaco vero e proprio, dello spessore di 15/ 18 mm (intonaco grezzo) svolge i compiti propri all'intonaco (potere traspirante, igroscopico, idrorepellente, resistenza etc) infine lo strato ultimo, dallo spessore di qualche millimetro (intonaco fine) viene lisciato con frattazzo o pennello e diventa la base per l'ultimo trattamento di pittura. Pertanto, è indispensabile ottenere una consistenza adatta al tipo di materiale e, in seguito alle valutazioni condotte, si può affermare che l'introduzione di pula e biochar nell'intonaco non causa variazioni alla lavorabilità del materiale tali da comprometterne le possibilità applicative del prodotto.

6.2 Determinazione della densità allo stato fresco

6.2.1 Densità stato fresco provini con pula

Tabella 5: Densità stato fresco provini con pula

Nome	Volume Provino (m3)	Lordo(kg)	Tara (kg)	Netto totale (kg)	Netto singolo (kg)	Densità (kg/m3)
0%	0.000256	8.988	7.263	1.725	0.575	2246.094
10%	0.000256	8.343	7.216	1.127	0.376	1467.448
5%	0.000256	8.592	7.245	1.347	0.449	1753.906
3%	0.000256	8.553	7.221	1.332	0.444	1734.375

6.2.2 Densità stato fresco provini con fondi di caffè essiccati

Tabella 6: Densità allo stato fresco provini con fondi di caffè essiccati

Nome	Volume Provino (m3)	Lordo(kg)	Tara (kg)	Netto totale (kg)	Netto singolo (kg)	Densità (kg/m3)
5%	0.000256	8.78	7.246	1.534	0.511	1997.396
10%	0.000256	8.863	7.245	1.618	0.539	2106.771
15%	0.000256	8.803	7.229	1.574	0.525	2049.479
20%	0.000256	8.769	7.231	1.538	0.513	2002.604
25%	0.000256	8.792	7.248	1.544	0.515	2010.417

6.2.3 Densità allo stato fresco provini con biochar 350°C

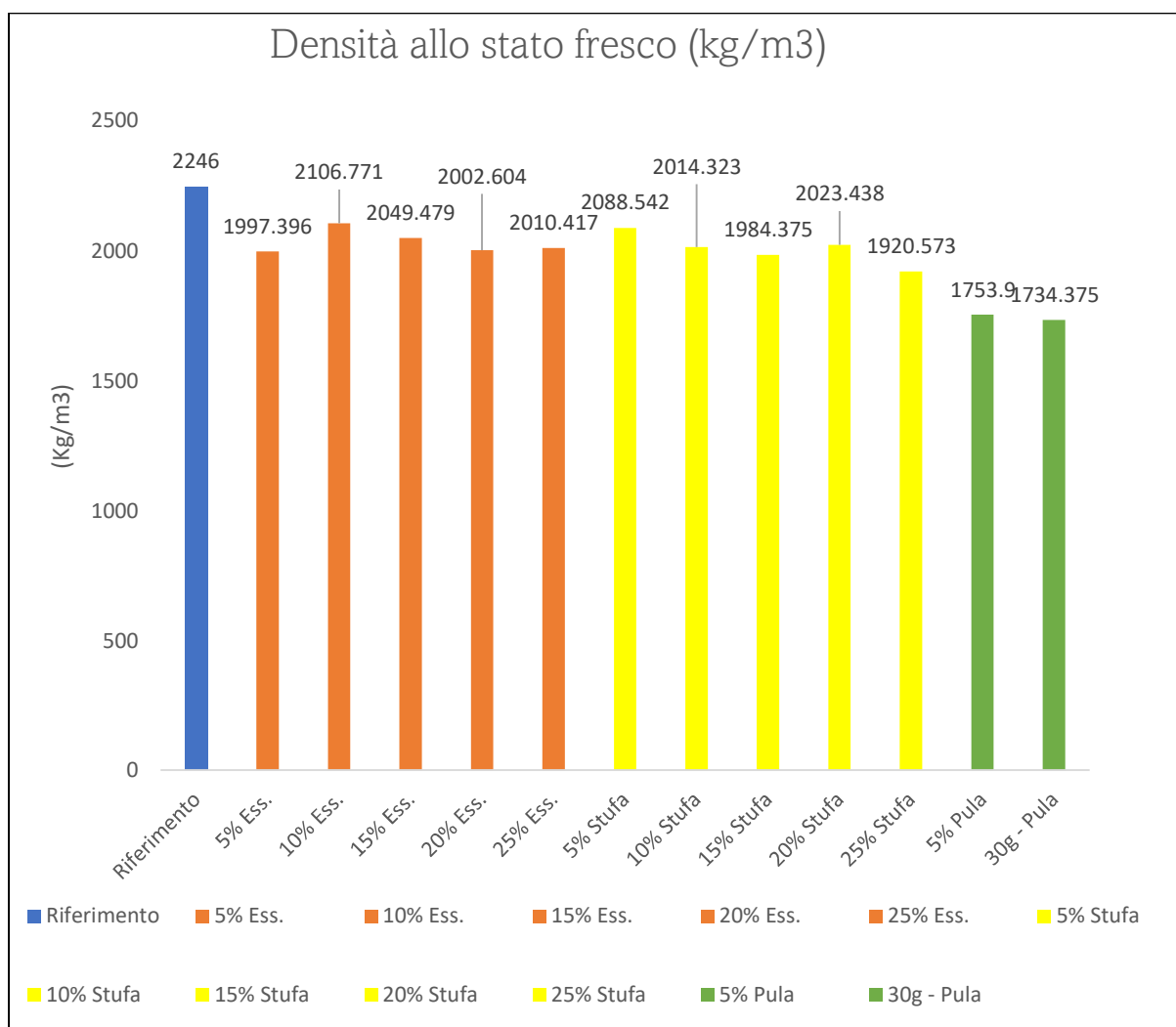
Tabella 7: Densità allo stato fresco provini con biochar 350°C

Nome	Volume Provino (m3)	Lordo(kg)	Tara (kg)	Netto totale (kg)	Netto singolo (kg)	Densità (kg/m3)
5%	0.000256	8.854	7.218	1.636	0.545	2130.208
10%	0.000256	8.777	7.204	1.573	0.524	2048.177
15%	0.000256	8.803	7.233	1.57	0.523	2044.271

6.2.4 Densità allo stato fresco provini con biochar 300°C

Tabella 8: Densità allo stato fresco provini con biochar 300°C

Nome	Volume Provino (m3)	Lordo(kg)	Tara (kg)	Netto totale (kg)	Netto singolo (kg)	Densità (kg/m3)
5%	0.000256	8.829	7.225	1.604	0.535	2088.542
10%	0.000256	8.746	7.199	1.547	0.516	2014.323
15%	0.000256	8.742	7.218	1.524	0.508	1984.375
20%	0.000256	8.78	7.226	1.544	0.518	2023.438
25%	0.000256	8.68	7.205	1.475	0.492	1920.573



6.3 Determinazione della densità allo stato indurito

6.3.1 Densità provini con pula

Tabella 9: Densità Secca Pula - 14° Giorno stagionatura

Data		Nome	Volume Provino (m3)	Netto singolo (kg)	Densità (kg/m3)	Densità media (kg/m3)
14/01/2024	A	0%	0.000256	0.53470	2088.67	2077.63
14/01/2024	B	0%	0.000256	0.52946	2068.20	
14/01/2024	C	0%	0.000256	0.53146	2076.02	
14/01/2024	A	10%	0.000256	0.31674	1237.27	1230.18
14/01/2024	B	10%	0.000256	0.30743	1200.90	
14/01/2024	C	10%	0.000256	0.32061	1252.38	
14/01/2024	A	5%	0.000256	0.38224	1493.13	1458.49
14/01/2024	B	5%	0.000256	0.37144	1450.94	
14/01/2024	C	5%	0.000256	0.36644	1431.41	
02/05/2024	A	3%	0.000256	0.41300	1613.28	1562.50
02/05/2024	B	3%	0.000256	0.381	1488.28	
02/05/2024	C	3%	0.000256	0.40600	1585.94	

6.3.2 Densità provini con fondi di caffè essiccati

Tabella 10: Densità secca-Fondi-7° Giorno stagionatura

	Data		Nome	Volume Provino (m3)	Netto singolo (kg)	Densità (kg/m3)	Densità media (kg/m3)
FONDI	14/03/2024	A	5%	0.000256	0.492	1921.88	1963.54
	14/03/2024	B	5%	0.000256	0.511	1996.09	
	14/03/2024	C	5%	0.000256	0.505	1972.66	
	14/03/2024	A	10%	0.000256	0.528	2061.33	2063.93
	14/03/2024	B	10%	0.000256	0.532	2079.69	
	14/03/2024	C	10%	0.000256	0.525	2050.78	
	14/03/2024	A	15%	0.000256	0.506	1976.56	2011.72
	14/03/2024	B	15%	0.000256	0.521	2035.16	
	14/03/2024	C	15%	0.000256	0.518	2023.44	
	18/04/2024	A	20%	0.000256	0.516	2015.63	1993.49
	18/04/2024	B	20%	0.000256	0.506	1976.56	
	18/04/2024	C	20%	0.000256	0.509	1988.28	
	18/04/2024	A	25%	0.000256	0.493	1925.78	1894.53
	18/04/2024	B	25%	0.000256	0.483	1886.72	
	18/04/2024	C	25%	0.000256	0.479	1871.09	

Tabella 11: Densità secca - Fondi- 14° Giorno stagionatura

	Data		Nome	Volume Provino (m3)	Netto singolo (kg)	Densità (kg/m3)	Densità media (kg/m3)
FONDI	21/03/2024	A	5%	0.000256	0.478	1867.19	1893.23
	21/03/2024	B	5%	0.000256	0.490	1914.06	
	21/03/2024	C	5%	0.000256	0.486	1898.44	
	21/03/2024	A	10%	0.000256	0.509	1988.28	1986.98
	21/03/2024	B	10%	0.000256	0.513	2003.91	
	21/03/2024	C	10%	0.000256	0.504	1968.75	
	21/03/2024	A	15%	0.000256	0.480	1875.00	1908.85
	21/03/2024	B	15%	0.000256	0.493	1925.78	
	21/03/2024	C	15%	0.000256	0.493	1925.78	
	29/04/2024	A	20%	0.000256	0.440	1718.75	1701.82
	29/04/2024	B	20%	0.000256	0.434	1695.31	
	29/04/2024	C	20%	0.000256	0.433	1691.41	
	29/04/2024	A	25%	0.000256	0.433	1691.41	1695.31
	29/04/2024	B	25%	0.000256	0.434	1695.31	
	29/04/2024	C	25%	0.000256	0.435	1699.22	

6.3.3 Densità provini con biochar 350°C

Tabella 12: Densità secca-Biochar 350°C-7° giorno stagionatura

	Data		Nome	Volume Provino (m3)	Netto singolo (kg)	Densità (kg/m3)	Densità media (kg/m3)
MUFFOLA	14/03/2024	A	5%	0.000256	0.535	2089.84	2101.56
	14/03/2024	B	5%	0.000256	0.539	2105.47	
	14/03/2024	C	5%	0.000256	0.540	2109.38	
	14/03/2024	A	10%	0.000256	0.514	2007.81	2015.63
	14/03/2024	B	10%	0.000256	0.517	2019.53	
	14/03/2024	C	10%	0.000256	0.517	2019.53	
	14/03/2024	A	15%	0.000256	0.516	2015.63	2018.23
	14/03/2024	B	15%	0.000256	0.513	2003.91	
	14/03/2024	C	15%	0.000256	0.521	2035.16	

Tabella 13: Densità secca-Biochar 350°C-14° Giorno stagionatura

	Data		Nome	Volume Provino (m3)	Netto singolo (kg)	Densità (kg/m3)	Densità media (kg/m3)
MUFFOLA	21/03/2024	A	5%	0.000256	0.516	2015.63	2029.95
	21/03/2024	B	5%	0.000256	0.521	2035.16	
	21/03/2024	C	5%	0.000256	0.522	2039.06	
	21/03/2024	A	10%	0.000256	0.499	1949.22	1955.73
	21/03/2024	B	10%	0.000256	0.502	1960.94	
	21/03/2024	C	10%	0.000256	0.501	1957.03	
	21/03/2024	A	15%	0.000256	0.501	1957.03	1964.84
	21/03/2024	B	15%	0.000256	0.500	1953.13	
	21/03/2024	C	15%	0.000256	0.508	1984.38	

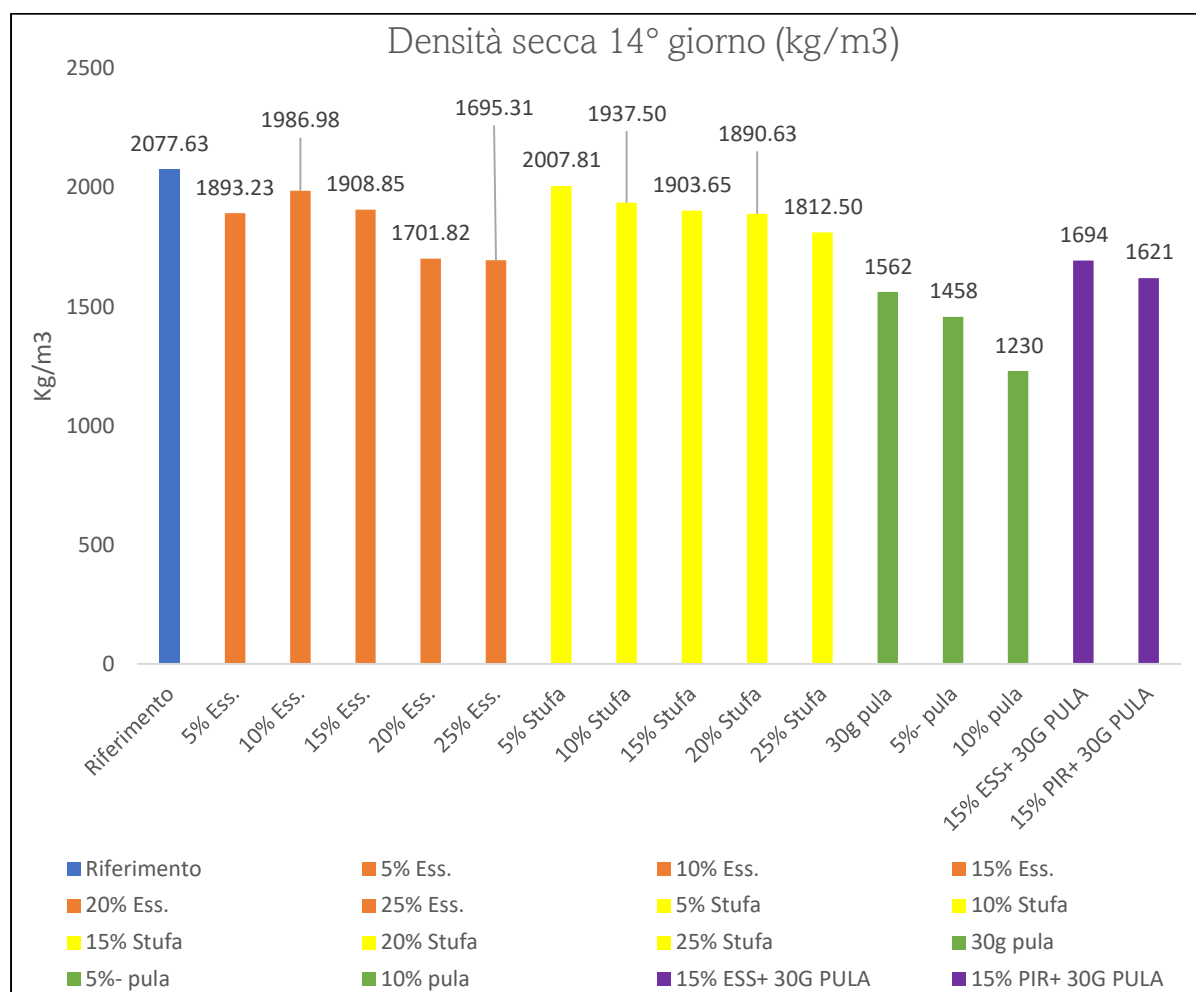
6.3.4 Densità provini con biochar 300°C

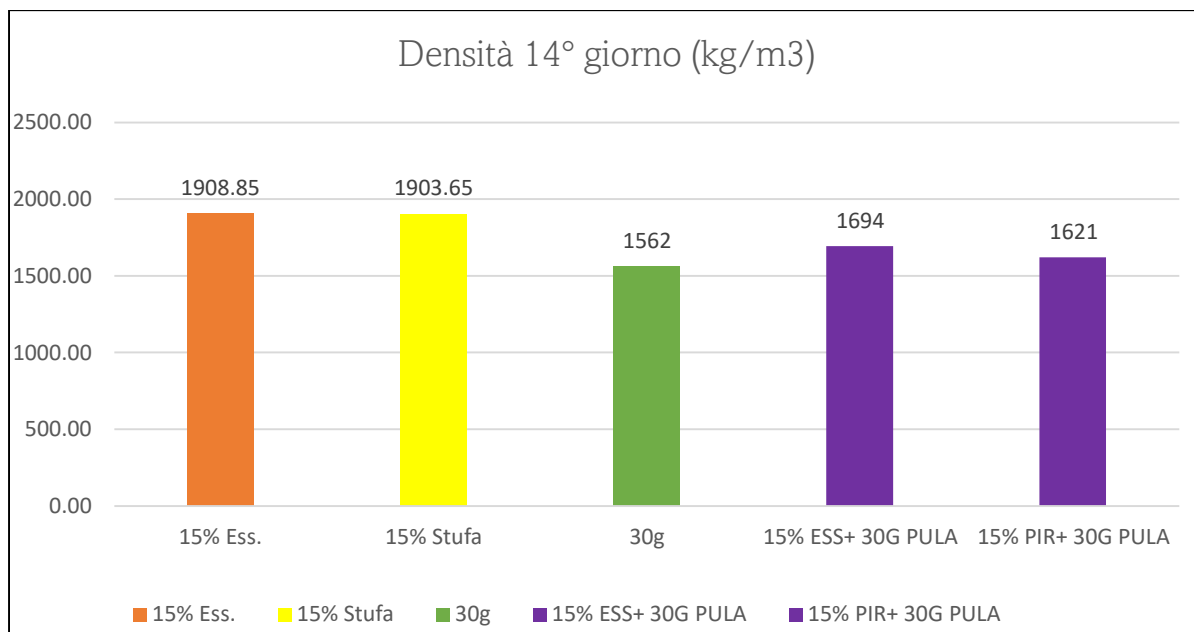
Tabella 14: Risultati densità provini con biochar 300°C

	Data		Nome	Volume Provino (m3)	Netto singolo (kg)	Densità (kg/m3)	Densità media (kg/m3)
STUFA	14/03/2024	A	5%	0.000256	0.516	2015.63	2057.29
	14/03/2024	B	5%	0.000256	0.533	2082.03	
	14/03/2024	C	5%	0.000256	0.531	2074.22	
	14/03/2024	A	10%	0.000256	0.517	2019.53	1989.58
	14/03/2024	B	10%	0.000256	0.506	1976.56	
	14/03/2024	C	10%	0.000256	0.505	1972.66	
	14/03/2024	A	15%	0.000256	0.510	1992.19	1958.33
	14/03/2024	B	15%	0.000256	0.499	1949.22	
	14/03/2024	C	15%	0.000256	0.495	1933.59	
STUFA	18/04/2024	A	20%	0.000256	0.507	1980.47	1962.24
	18/04/2024	B	20%	0.000256	0.500	1953.13	
	18/04/2024	C	20%	0.000256	0.500	1953.13	
	18/04/2024	A	25%	0.000256	0.443	1730.47	1742.19
	18/04/2024	B	25%	0.000256	0.445	1738.28	
	18/04/2024	C	25%	0.000256	0.450	1757.81	

Tabella 15: Densità secca biochar 300°C 14° giorno di stagionatura

	Data		Nome	Volume Provino (m3)	Netto singolo (kg)	Densità (kg/m3)	Densità media (kg/m3)
STUFA	21/03/2024	A	5%	0.000256	0.505	1972.66	2007.81
	21/03/2024	B	5%	0.000256	0.520	2031.25	
	21/03/2024	C	5%	0.000256	0.517	2019.53	
	21/03/2024	A	10%	0.000256	0.503	1964.84	1937.50
	21/03/2024	B	10%	0.000256	0.493	1925.78	
	21/03/2024	C	10%	0.000256	0.492	1921.88	
	21/03/2024	A	15%	0.000256	0.498	1945.31	1903.65
	21/03/2024	B	15%	0.000256	0.486	1898.44	
	21/03/2024	C	15%	0.000256	0.478	1867.19	
	29/04/2024	A	20%	0.000256	0.483	1886.72	1890.63
	29/04/2024	B	20%	0.000256	0.484	1890.63	
	29/04/2024	C	20%	0.000256	0.485	1894.53	
	29/04/2024	A	25%	0.000256	0.472	1843.75	1812.50
	29/04/2024	B	25%	0.000256	0.461	1800.78	
	29/04/2024	C	25%	0.000256	0.459	1792.97	





CONSIDERAZIONI

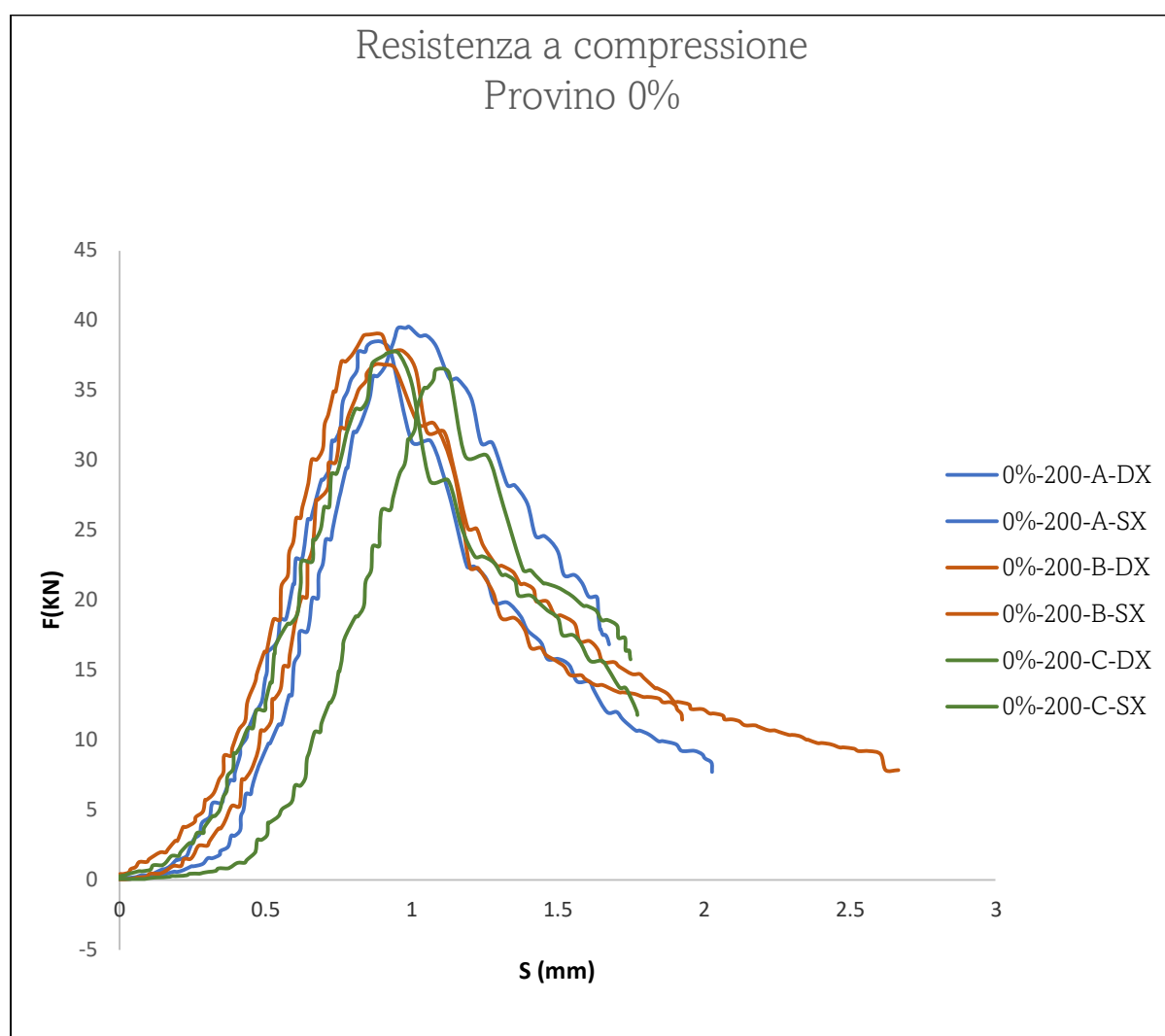
L'aggiunta dei composti organici all'intonaco determina un evidente abbassamento della massa volumica del prodotto; in riferimento al 14° giorno di stagionatura, il provino 3% Pula e quello 5% - Pula risultano avere una massa volumica inferiore al riferimento, rispettivamente del 25 % e del 30%. D'altra parte, anche l'introduzione dei fondi di caffè essiccati e del biochar determinano lo stesso effetto, in particolare i provini 10% e 15% hanno una diminuzione percentuale dell'4% e 8% per i fondi di caffè e del 7% e 9 % per il biochar prodotto a 300°C. L'obiettivo ottimale sarebbe di arrivare ad una massa volumica minore di 1300 kg/m³ per ottenere un prodotto con le caratteristiche di una malata alleggerita, tuttavia anche se non raggiunto l'introduzione dei materiali organici determina un alleggerimento non indifferente, migliorando le caratteristiche del prodotto.

6.4 Prove a compressione

6.4.1 Prove a compressione provino riferimento

Tabella 16: Prove a compressione riferimento

	Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media A-B-C (KN)	Media A- B-C (MPa)	Media provini (KN)	Media provini (MPa)	Media provini (Mpa)
14/01/2024	A-dx	0%	39.01	24.38	37.935	23.709375	38.02	23.76
	A-sx		36.86	23.03				
14/01/2024	B-dx	0%	39.57	24.73	39.025	24.390625		
	B-sx		38.48	24.05				
14/01/2024	C-dx	0%	37.67	23.54	37.1	23.1875		
	C-sx		36.53	22.83				



6.4.2 Prove a compressione provini con pula

Tabella 17: Risultati prova a compressione 5% Pula

	Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media A- B-C (KN)	Media A-B-C (MPa)	Media provini (KN)	Media provini (MPa)
A-dx	5%	5.74	3.5875	5.655	3.534375	5.2517	3.28
A-sx		5.57	3.48				
B-dx	5%	5.1	3.18	5.275	3.296875		
B-sx		5.45	3.40				
C-dx	5%	5.45	3.40	4.825	3.015625		
C-sx		4.2	2.62				

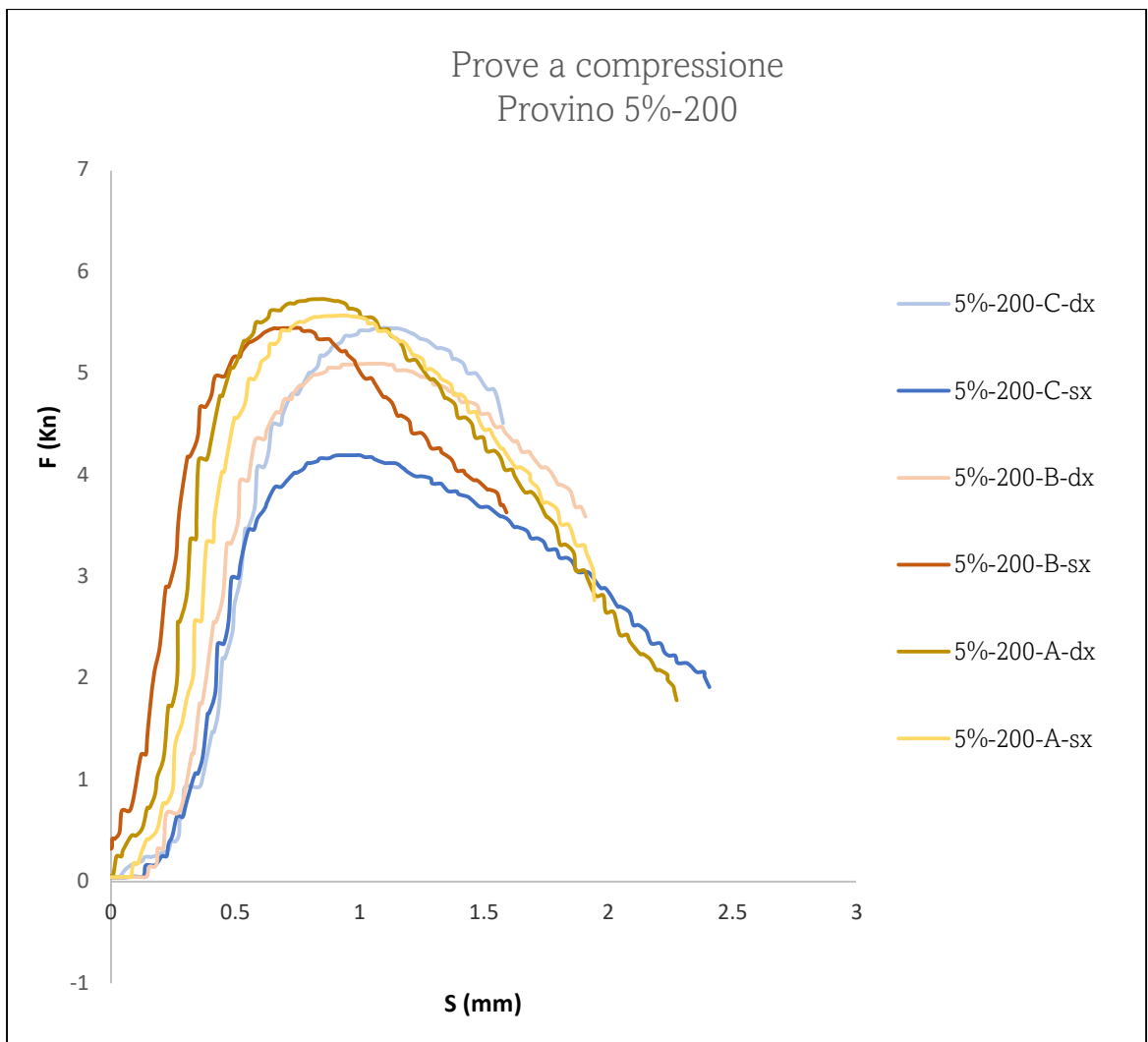
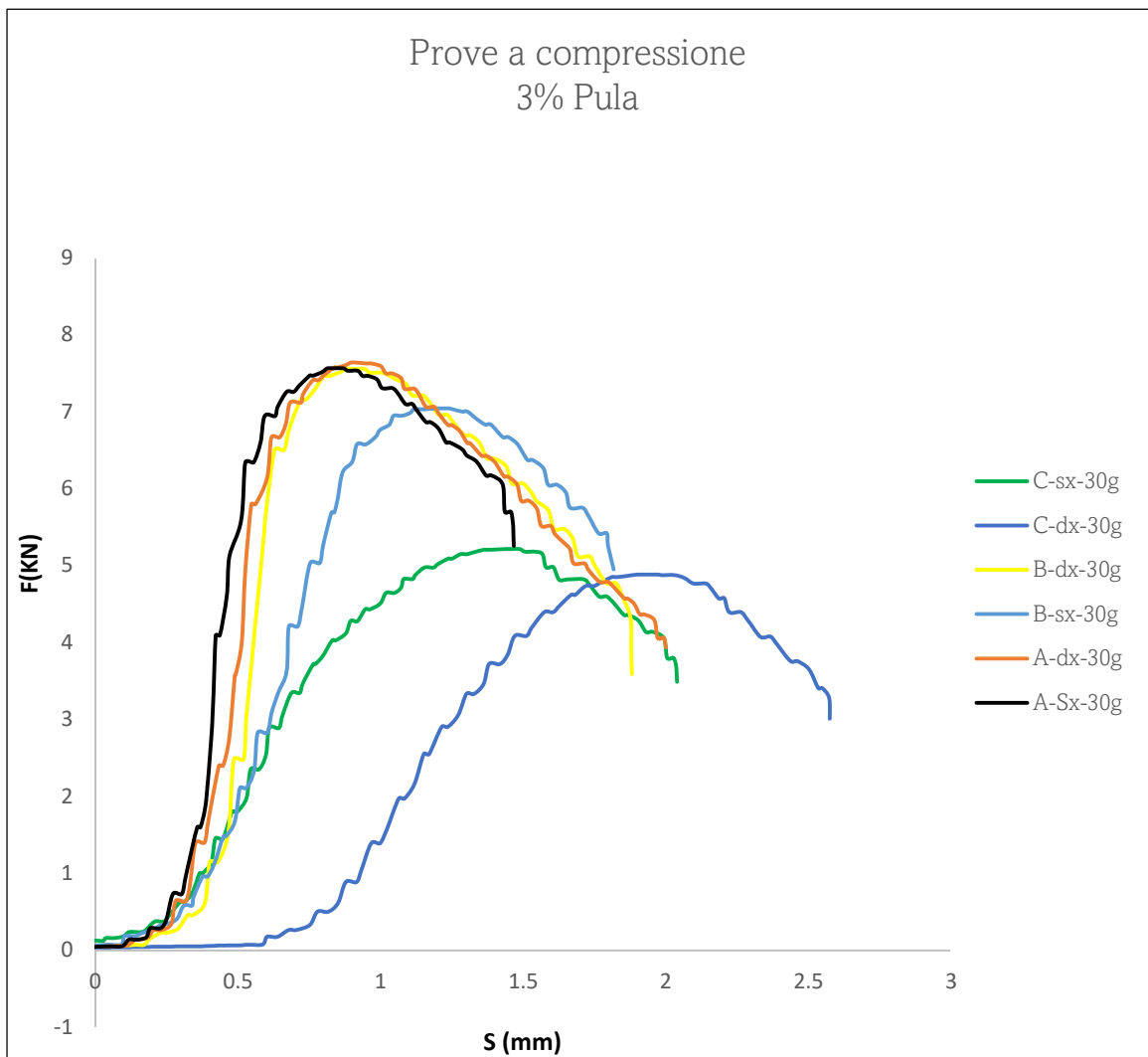


Tabella 18: Prove a compressione 3% Pula

	Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media A-B-C (KN)	Media A-B-C (MPa)	Media provini (KN)	Media provini (MPa)
A-dx	3%	7.57	4.73125	7.605	4.753125	7.4525	4.66
A-sx		7.64	4.775				
B-dx	3%	7.04	4.4	7.3	4.5625		
B-sx		7.56	4.725				
C-dx	3%		0	0	0		
C-sx			0				



6.4.3 Prove a compressione provino con fondi

Tabella 19: Risultati prova a compressione- 5% Ess

	Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media A- B-C (KN)	Media A-B- C (MPa)	Media provini (KN)	Media provini (MPa)
A-dx	5% Ess.	33	20.625	33.75	21.09375	34.775	21.73
A-sx	5% Ess.	34.5	21.5625				
B-dx	5% Ess.	35	21.875	35.8	22.375		
B-sx	5% Ess.	36.6	22.875				
C-dx	5% Ess.	-	-	-	-		
C-sx	5% Ess.	-	-				

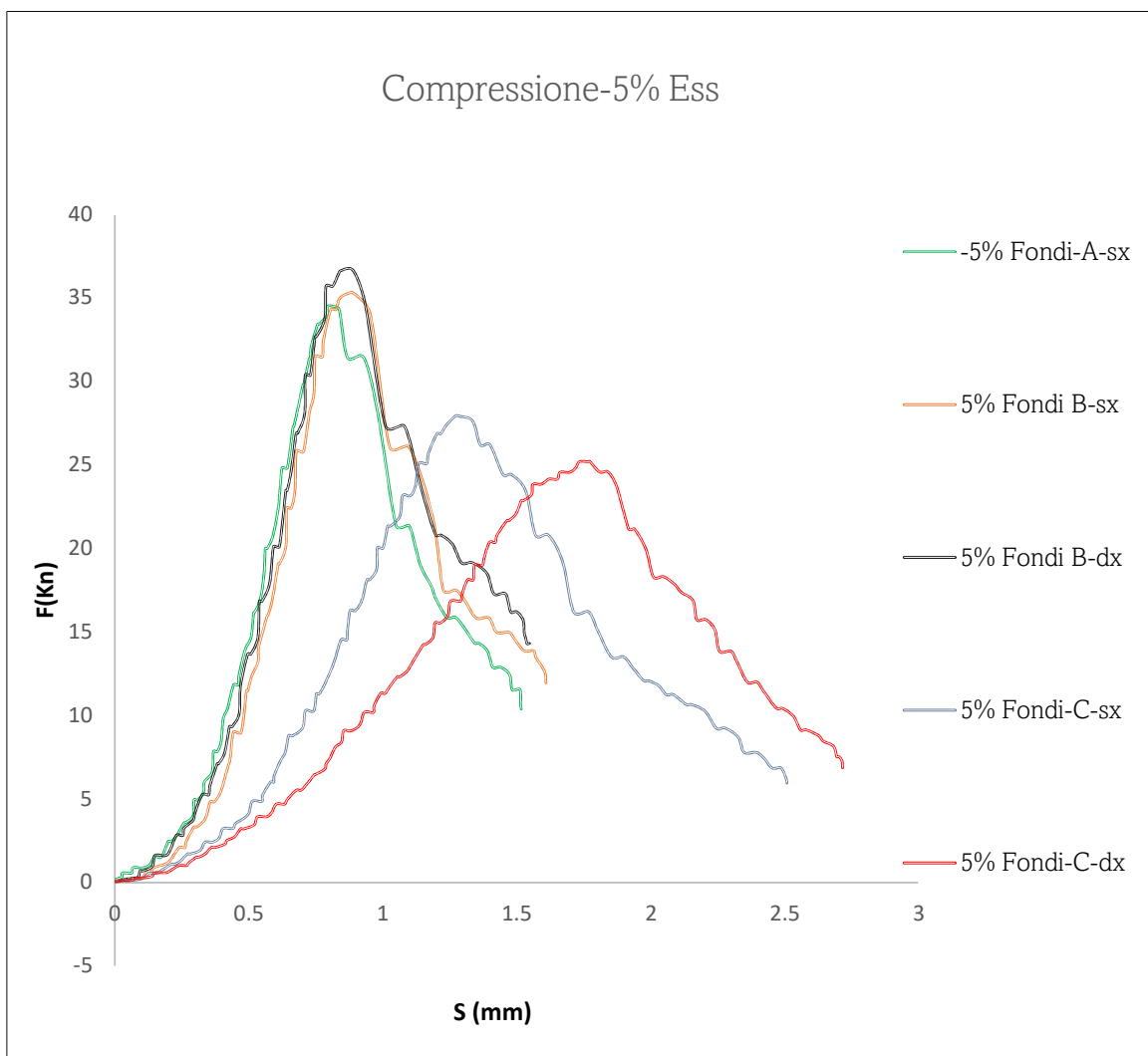


Tabella 20: Risultati prove a compressione - 10% Ess.

	Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media A-B-C (KN)	Media A-B-C (MPa)	Media provini (KN)	Media provini (MPa)
A-dx	10% Ess.	32.75	20.46875	33.2	20.75	33.31	20.82
A-sx	10% Ess.	33.65	21.03125				
B-dx	10% Ess.	-	-	-	-		
B-sx	10% Ess.	-	-				
C-dx	10% Ess.	34.73	21.70625	33.42	20.8875		
C-sx	10% Ess.	32.11	20.06875				

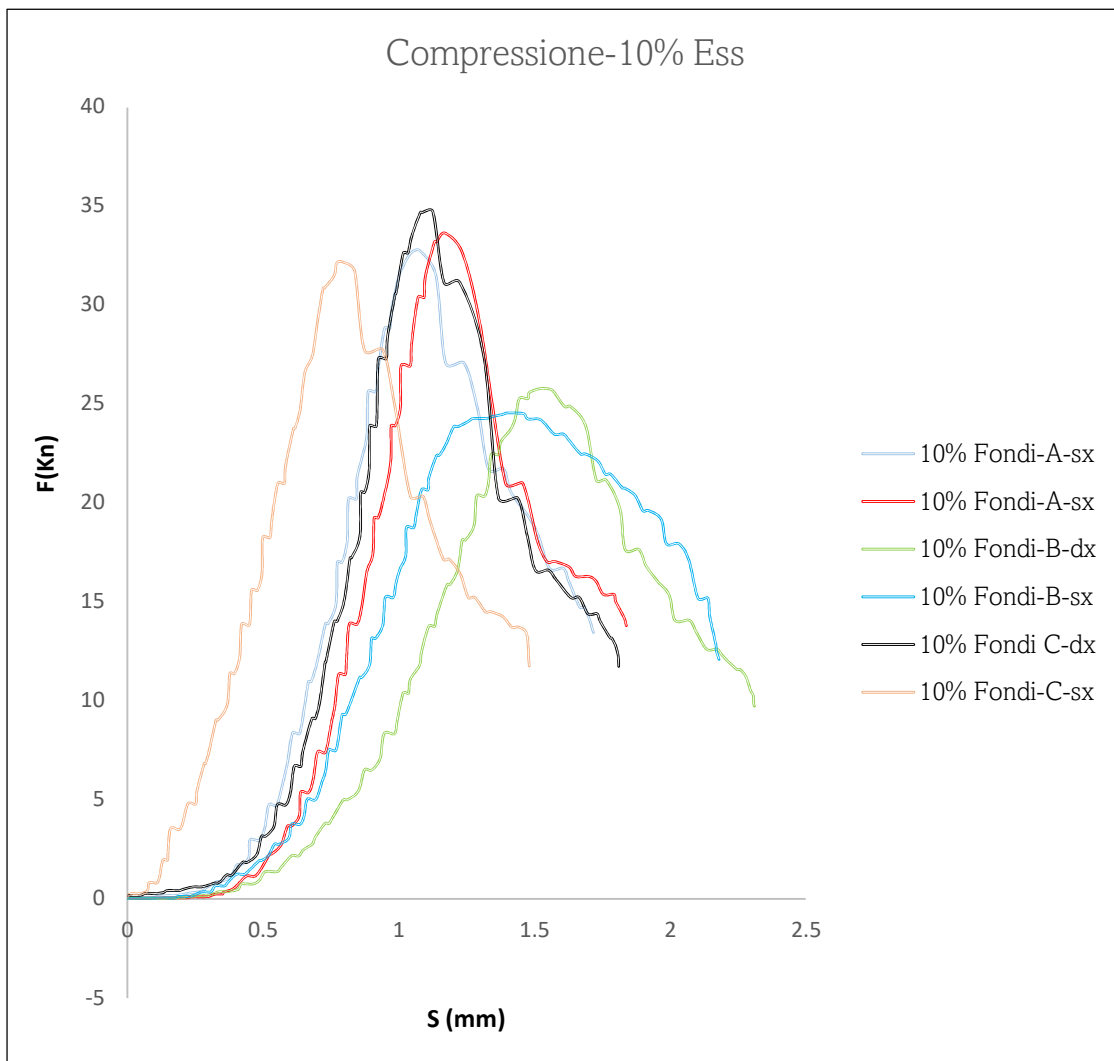


Tabella 21: Risultati prove a compressione 15% Ess.

	Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media A-B-C (KN)	Media A-B-C (MPa)	Media provini (KN)	Media provini (MPa)
A-dx	15% Ess.	31.65	19.78125	31.19	19.49375	31.53667	19.71
A-sx	15% Ess.	30.73	19.20625				
B-dx	15% Ess.	32.19	20.11875	32.09	20.05625		
B-sx	15% Ess.	31.99	19.99375				
C-dx	15% Ess.	31.75	19.84375	31.33	19.58125		
C-sx	15% Ess.	30.91	19.31875				

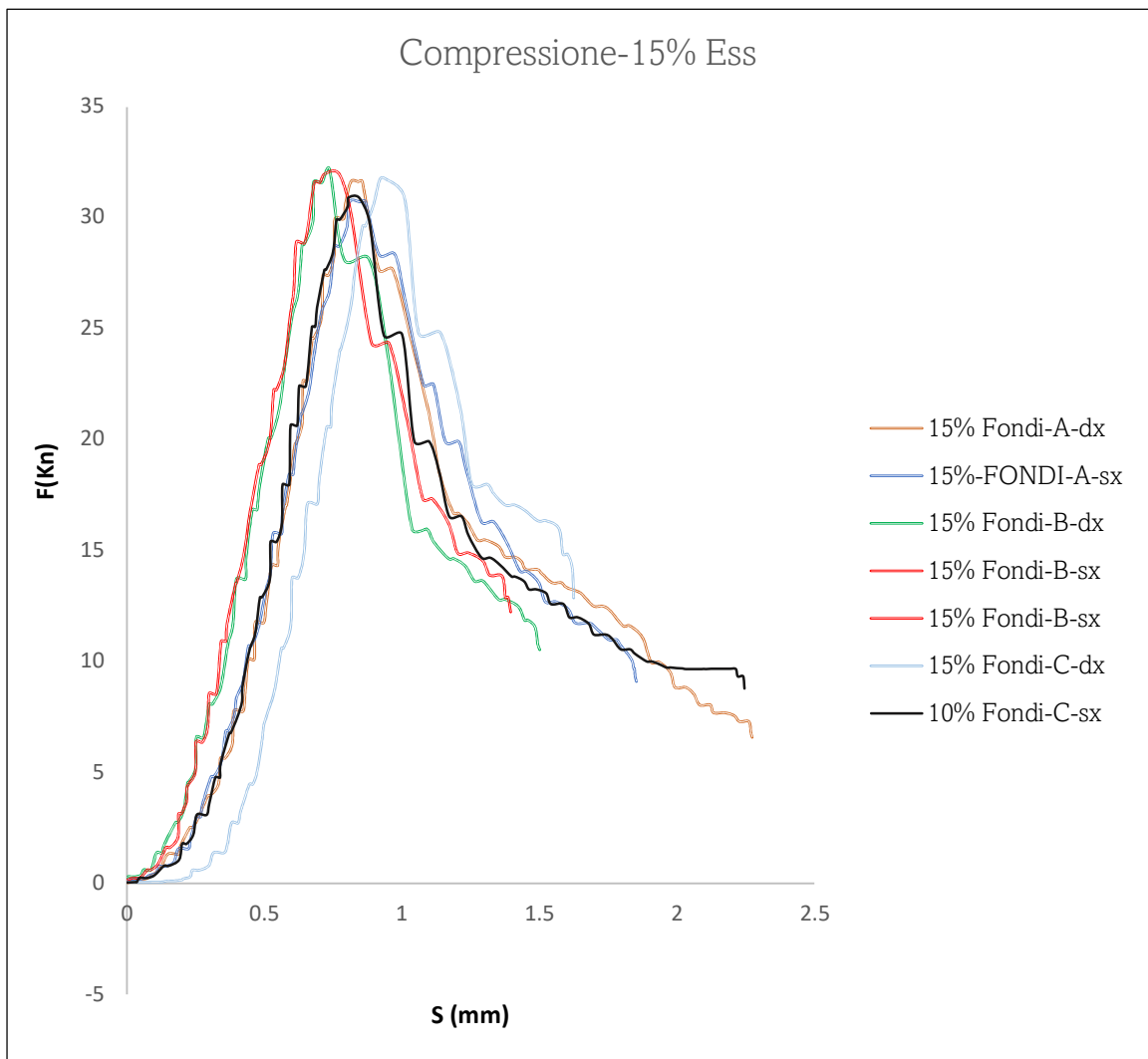


Tabella 22: Prove a compressione 20% Ess.

	Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media A-B-C (KN)	Media A-B-C (MPa)	Media provini (KN)	Media provini (MPa)
A-dx	20 % Ess.	5.54	3.4625	5.64	3.525	5.2925	3.31
A-sx	20 % Ess.	5.74	3.5875				
B-dx	20 % Ess.	5.68	-	-	-		
B-sx	20 % Ess.	5.74	-				
C-dx	20 % Ess.	4.75	2.96875	4.945	3.090625		
C-sx	20 % Ess.	5.14	3.2125				

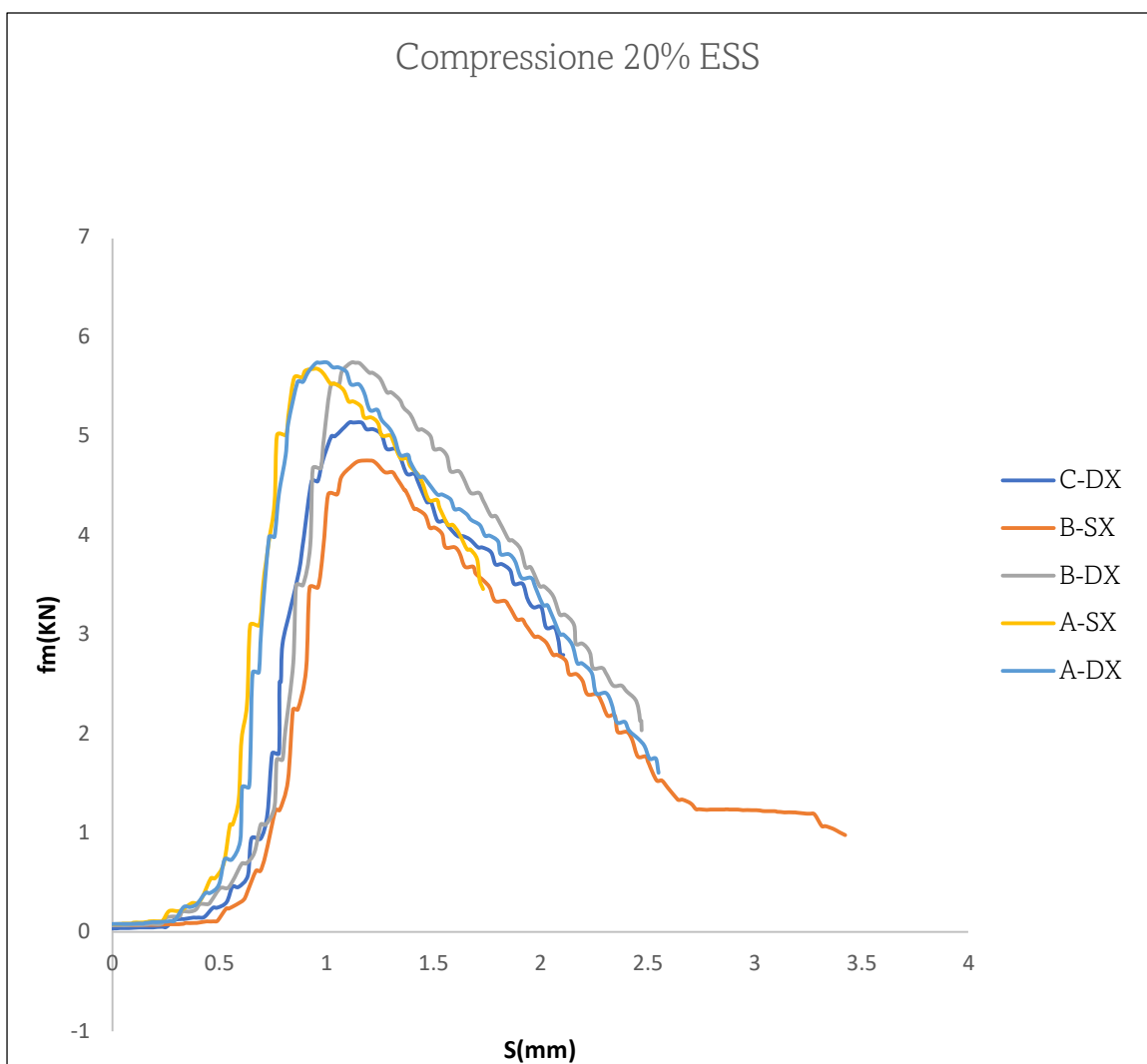
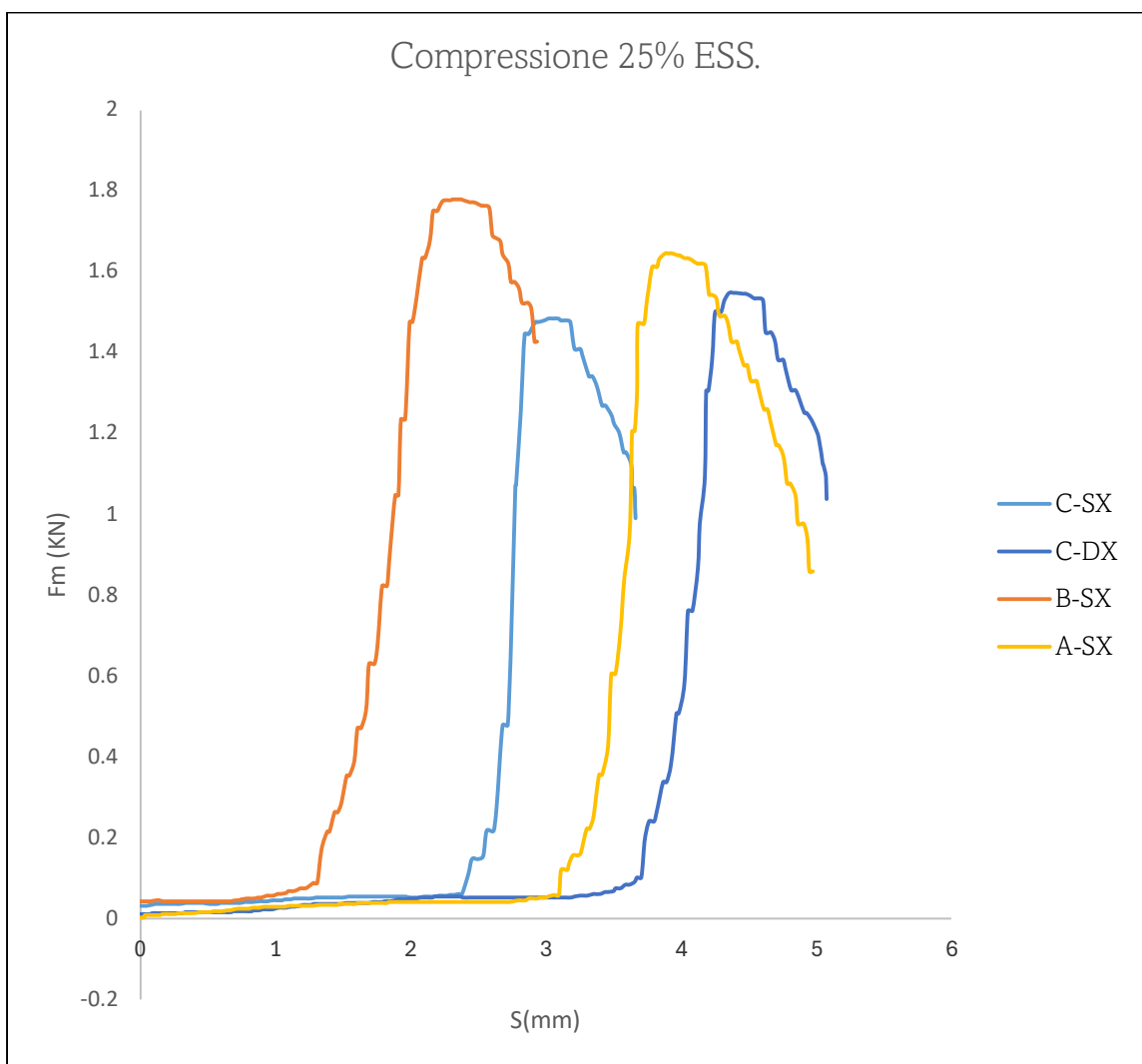


Tabella 23: Prove a compressione 25% Ess

	Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media A-B-C (KN)	Media A-B-C (MPa)	Media provini (KN)	Media provini (MPa)
A-dx	25% Ess.	1.68	1.05	1.66	1.0375	1.608333	1.01
A-sx	25% Ess.	1.64	1.025				
B-dx	25% Ess.	1.53	0.95625	1.655	1.034375		
B-sx	25% Ess.	1.78	1.1125				
C-dx	25% Ess.	1.54	0.9625	1.51	0.94375		
C-sx	25% Ess.	1.48	0.925				



6.4.4 Prove a compressione provini con biochar 350°C

Tabella 24: Risultati prove a compressione- Muffola 5%

	Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media A- B-C (KN)	Media A- B-C (MPa)	Media provini (KN)	Media provini (MPa)
A-dx	5% Muff.	38.75	24.21875	37.46	23.4125	36.19167	22.62
A-sx	5% Muff.	36.17	22.60625				
B-dx	5% Muff.	35.79	22.36875	34.995	21.87188		
B-sx	5% Muff.	34.2	21.375				
C-dx	5% Muff.	36.01	22.50625	36.12	22.575		
C-sx	5% Muff.	36.23	22.64375				

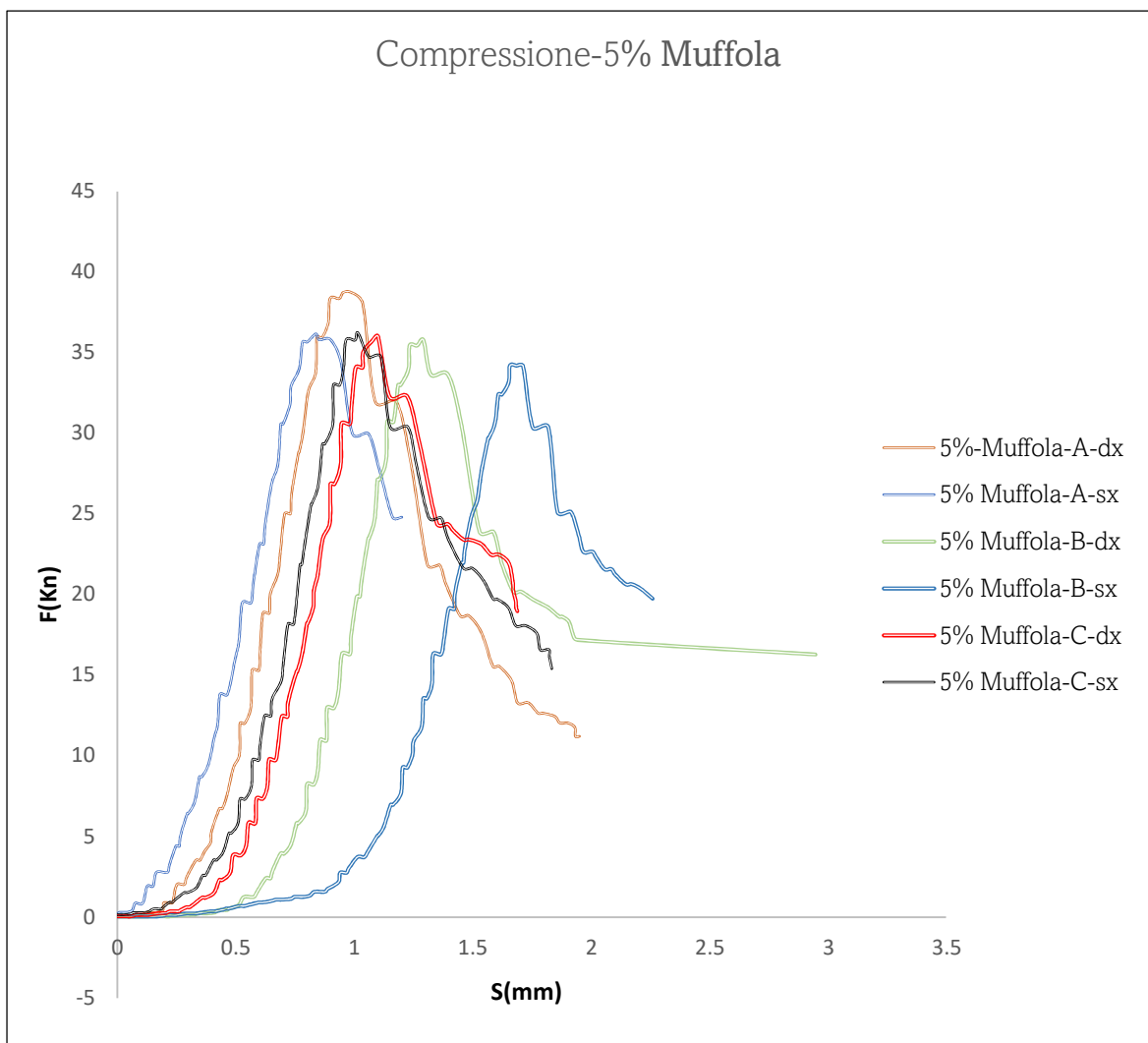


Tabella 25: Risultati prove a compressione- Muffola 10 %

	Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media A- B-C (KN)	Media A- B-C (MPa)	Media provini (KN)	Media provini (MPa)
A-dx	10% Muff.	29.53	18.45625	30.12	18.825	29.55167	18.47
A-sx	10% Muff.	30.71	19.19375				
B-dx	10% Muff.	29.83	18.64375	29.145	18.21563		
B-sx	10% Muff.	28.46	17.7875				
C-dx	10% Muff.	28.92	18.075	29.39	18.36875		
C-sx	10% Muff.	29.86	18.6625				

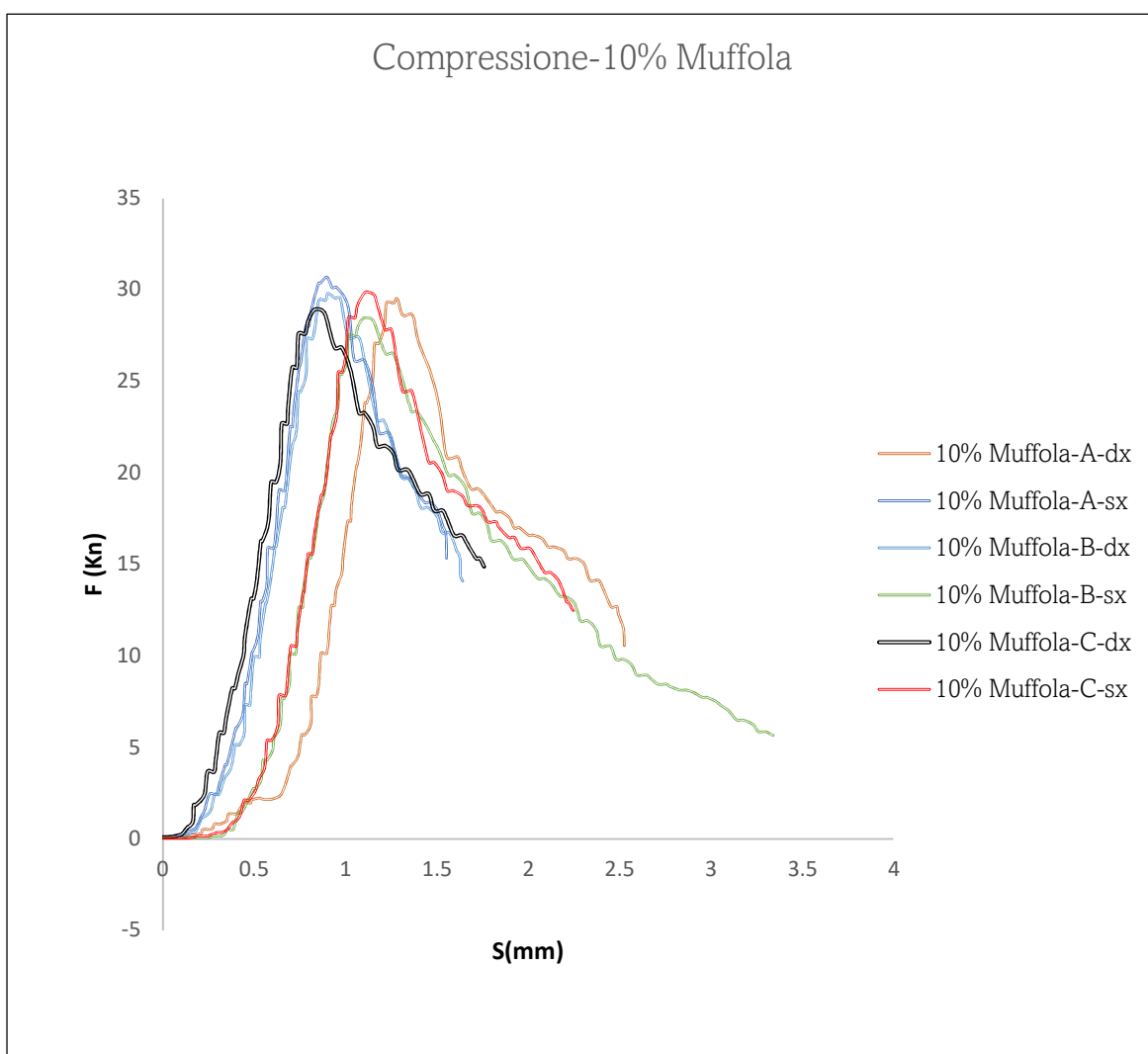
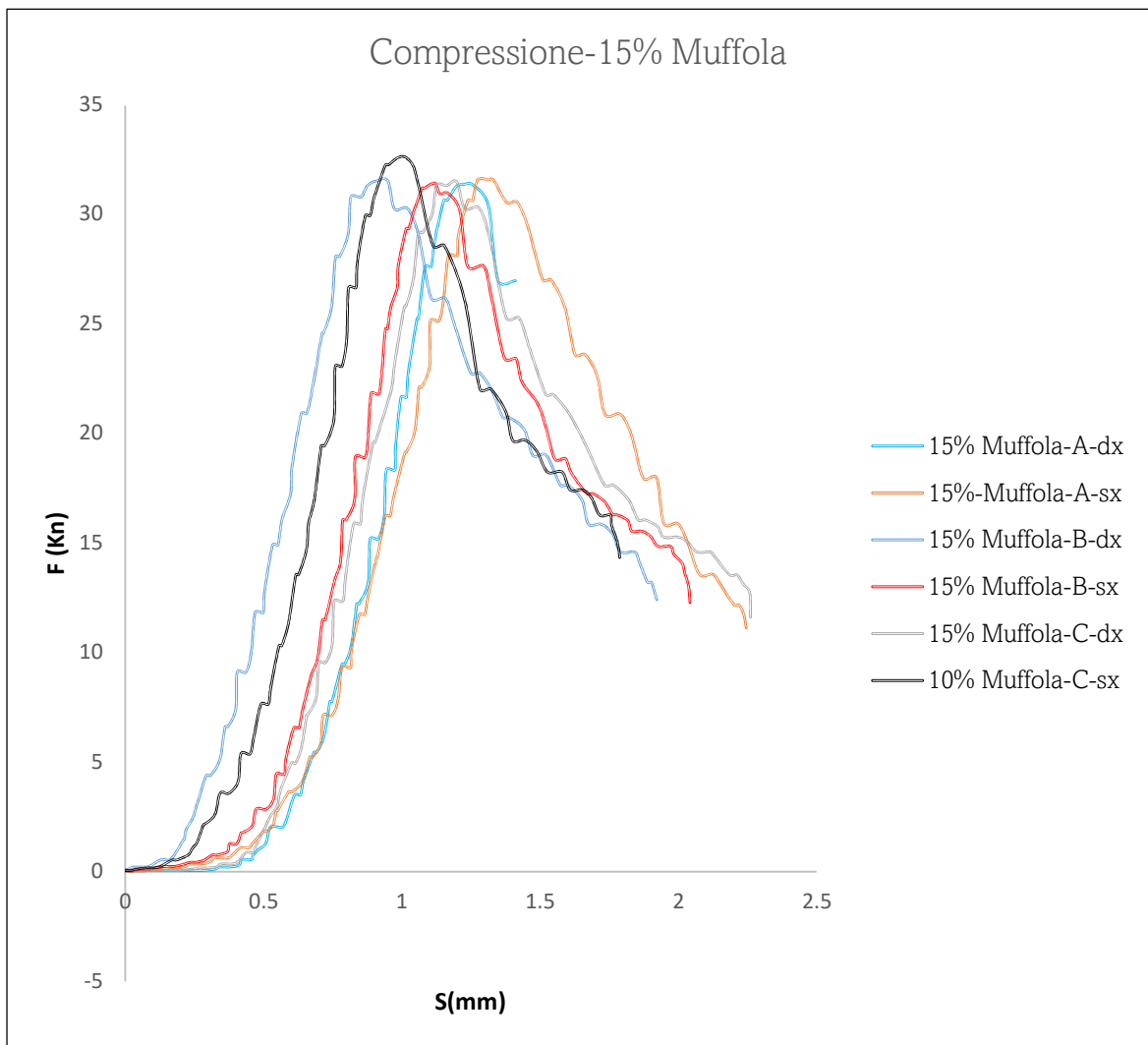


Tabella 26: Risultati prove a compressione- Muffola 15%

	Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media A- B-C (KN)	Media A-B- C (MPa)	Media provini (KN)	Media provini (MPa)
A-dx	15% Muff.	31.4	19.625	31.51	19.69375	31.69833	19.81
A-sx	15% Muff.	31.62	19.7625				
B-dx	15% Muff.	31.56	19.725	31.51	19.69375		
B-sx	15% Muff.	31.46	19.6625				
C-dx	15% Muff.	31.52	19.7	32.075	20.04688		
C-sx	15% Muff.	32.63	20.39375				



6.4.5 Prove a compressione provini con biochar 300°C

Tabella 27: Risultati prove a compressione - Stufa 5%

	Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media A-B-C (KN)	Media A-B-C (MPa)	Media provini (KN)	Media provini (MPa)
A-dx	5% Stufa	31.43	19.64375	32.085	20.05313	32.49167	20.31
A-sx	5% Stufa	32.74	20.4625				
B-dx	5% Stufa	32.45	20.28125	32.825	20.51563		
B-sx	5% Stufa	33.2	20.75				
C-dx	5% Stufa	31.8	19.875	32.565	20.35313		
C-sx	5% Stufa	33.33	20.83125				

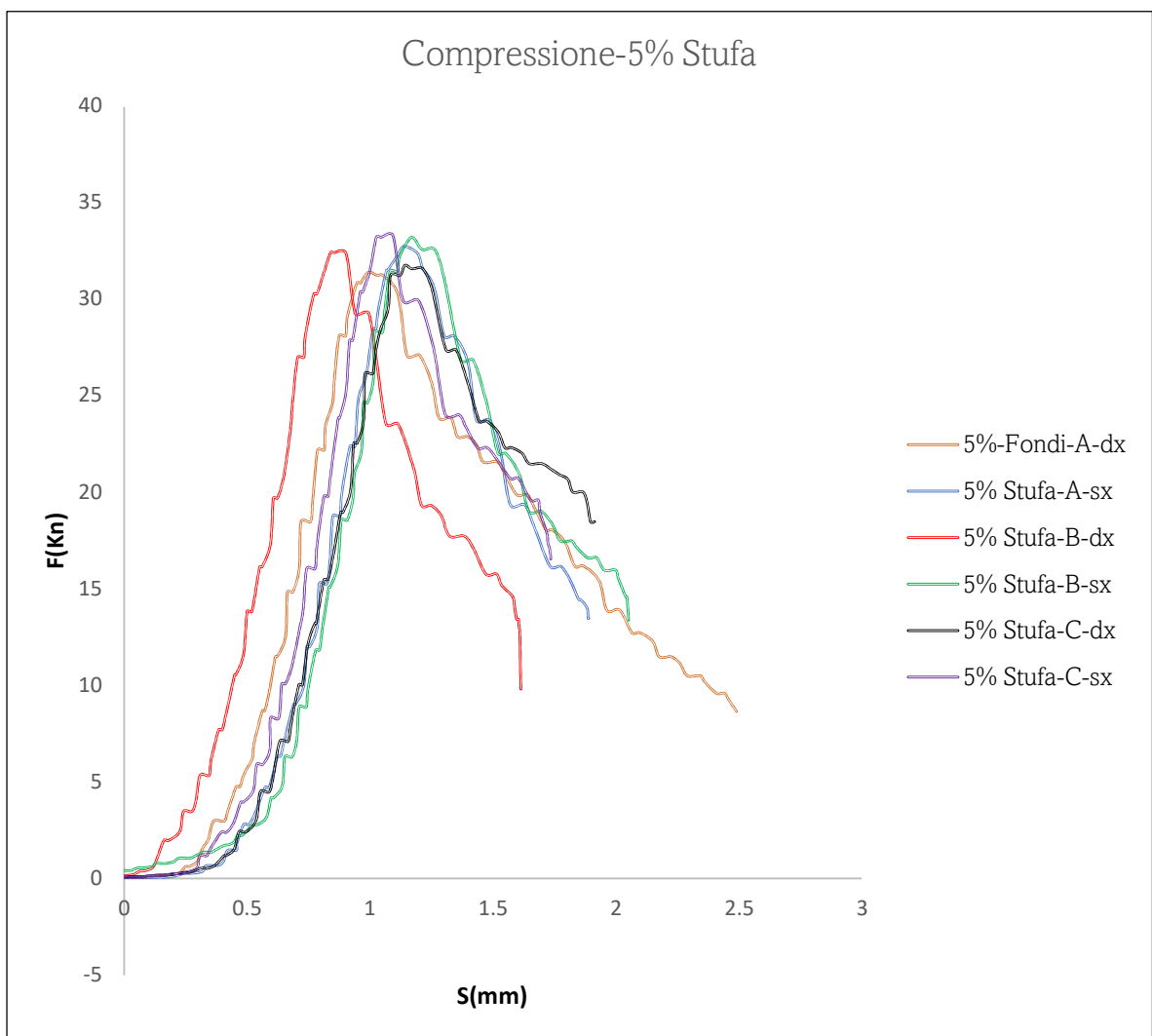


Tabella 28: Risultati prove a compressione Stufa - 10%

	Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media A-B-C (KN)	Media A-B-C (MPa)	Media provini (KN)	Media provini (MPa)
A-dx	10% Stufa	30.66	19.1625	31.065	19.41563	30.60333	19.13
A-sx	10% Stufa	31.47	19.66875				
B-dx	10% Stufa	31.32	19.575	31.03	19.39375		
B-sx	10% Stufa	30.74	19.2125				
C-dx	10% Stufa	28.93	18.08125	29.715	18.57188		
C-sx	10% Stufa	30.5	19.0625				

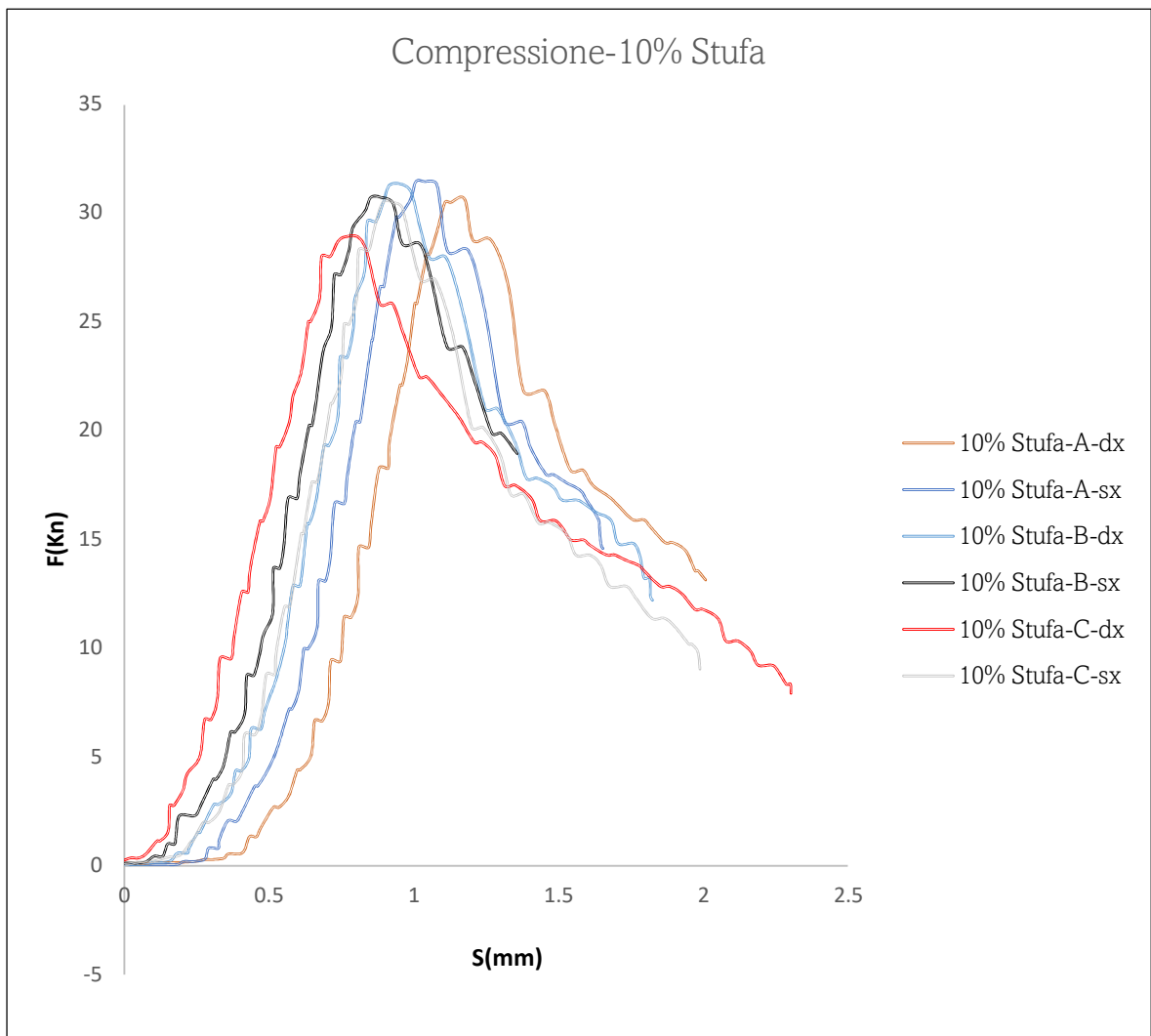


Tabella 29: Risultati prova a compressione - Stufa 15%

	Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media A-B-C (KN)	Media A-B-C (MPa)	Media provini (KN)	Media provini (MPa)
A-dx	15% Stufa	30.78	19.2375	31.25	19.53125	31.49333	19.68
A-sx	15% Stufa	31.72	19.825				
B-dx	15% Stufa	30.04	18.775	31.25	19.53125		
B-sx	15% Stufa	32.46	20.2875				
C-dx	15% Stufa	31.86	19.9125	31.98	19.9875		
C-sx	15% Stufa	32.1	20.0625				

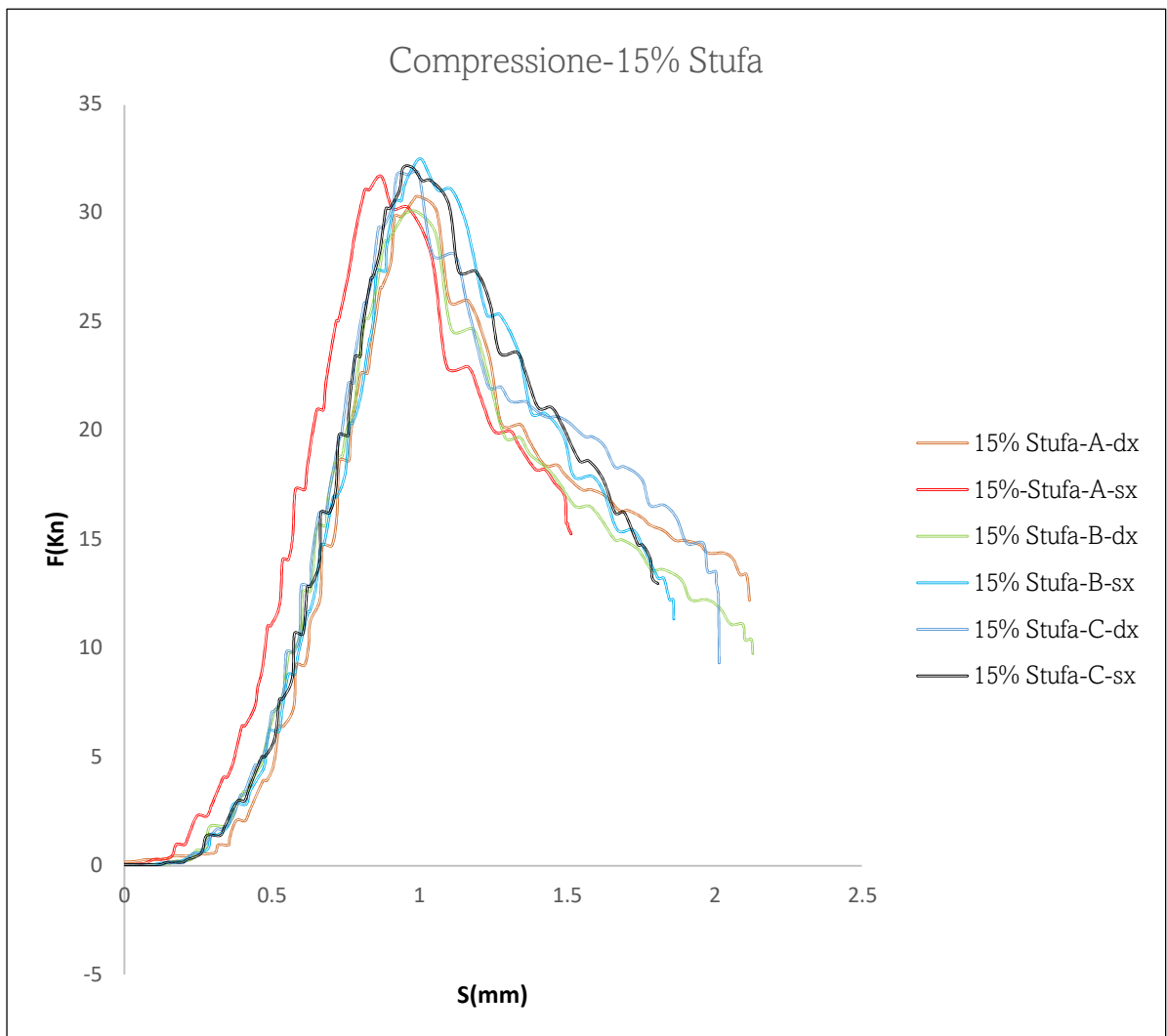


Tabella 30 : Prova a compressione 20% Stufa

	Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media A- B-C (KN)	Media A-B-C (MPa)	Media provini (KN)	Media provini (MPa)
A-dx	20% Stufa	37.1	23.1875	36.87	23.04375	36.44167	22.78
A-sx	20% Stufa	36.64	22.9				
B-dx	20% Stufa	35.49	22.18125	35.49	22.18125		
B-sx	20% Stufa	0	0				
C-dx	20% Stufa	36.38	22.7375	36.965	23.103125		
C-sx	20% Stufa	37.55	23.46875				

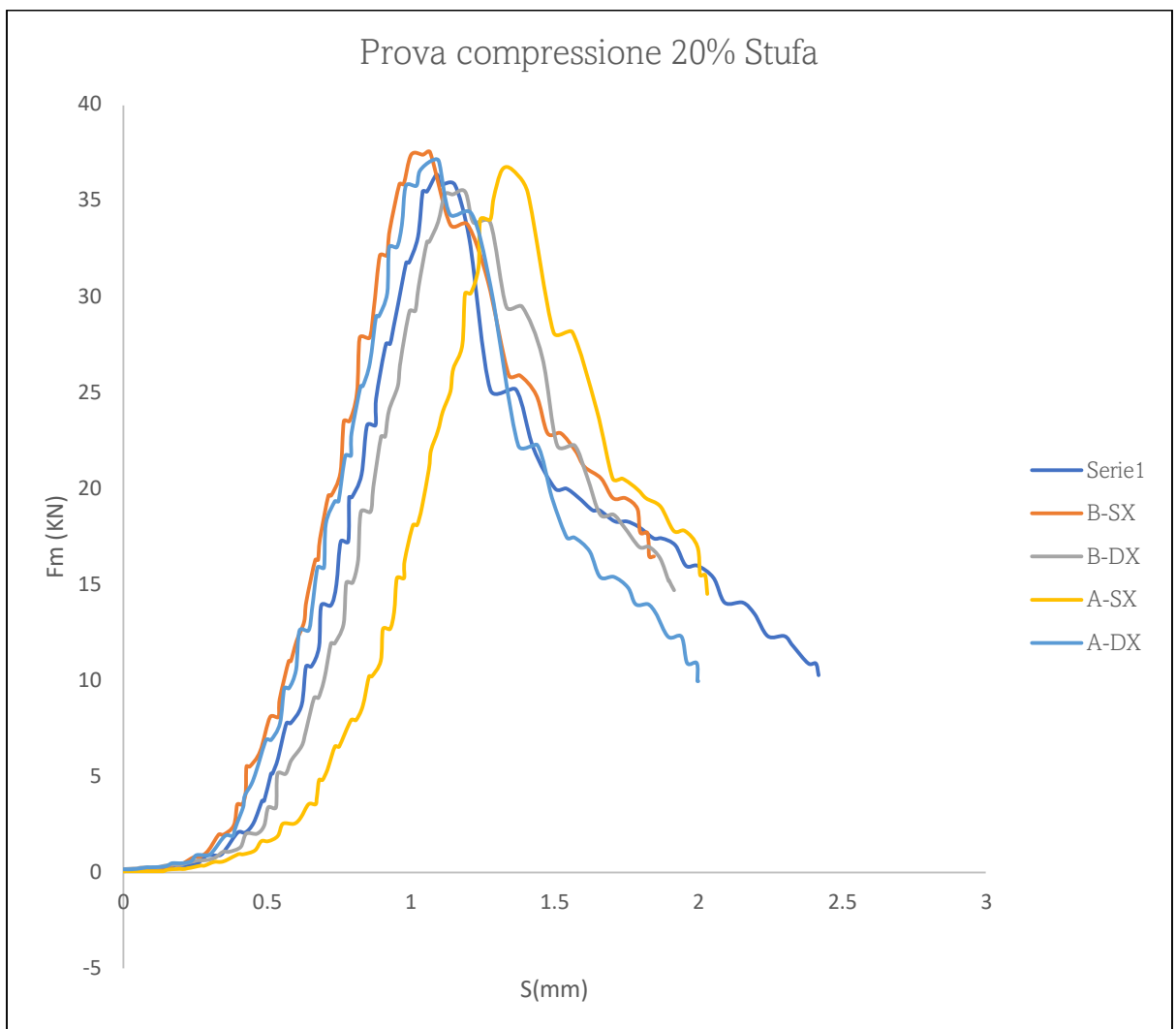


Tabella 31: Prove a compressione 25% Stufa

	Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media A-B-C (KN)	Media A-B-C (MPa)	Media provini (KN)	Media provini (MPa)
A-dx	25% Stufa	31.36	19.6	30.665	19.165625	30.59833	19.12
A-sx	25% Stufa	29.97	18.73125				
B-dx	25% Stufa	29.58	18.4875	30.635	19.146875		
B-sx	25% Stufa	31.69	19.80625				
C-dx	25% Stufa	30.34	18.9625	30.495	19.059375		
C-sx	25% Stufa	30.65	19.15625				

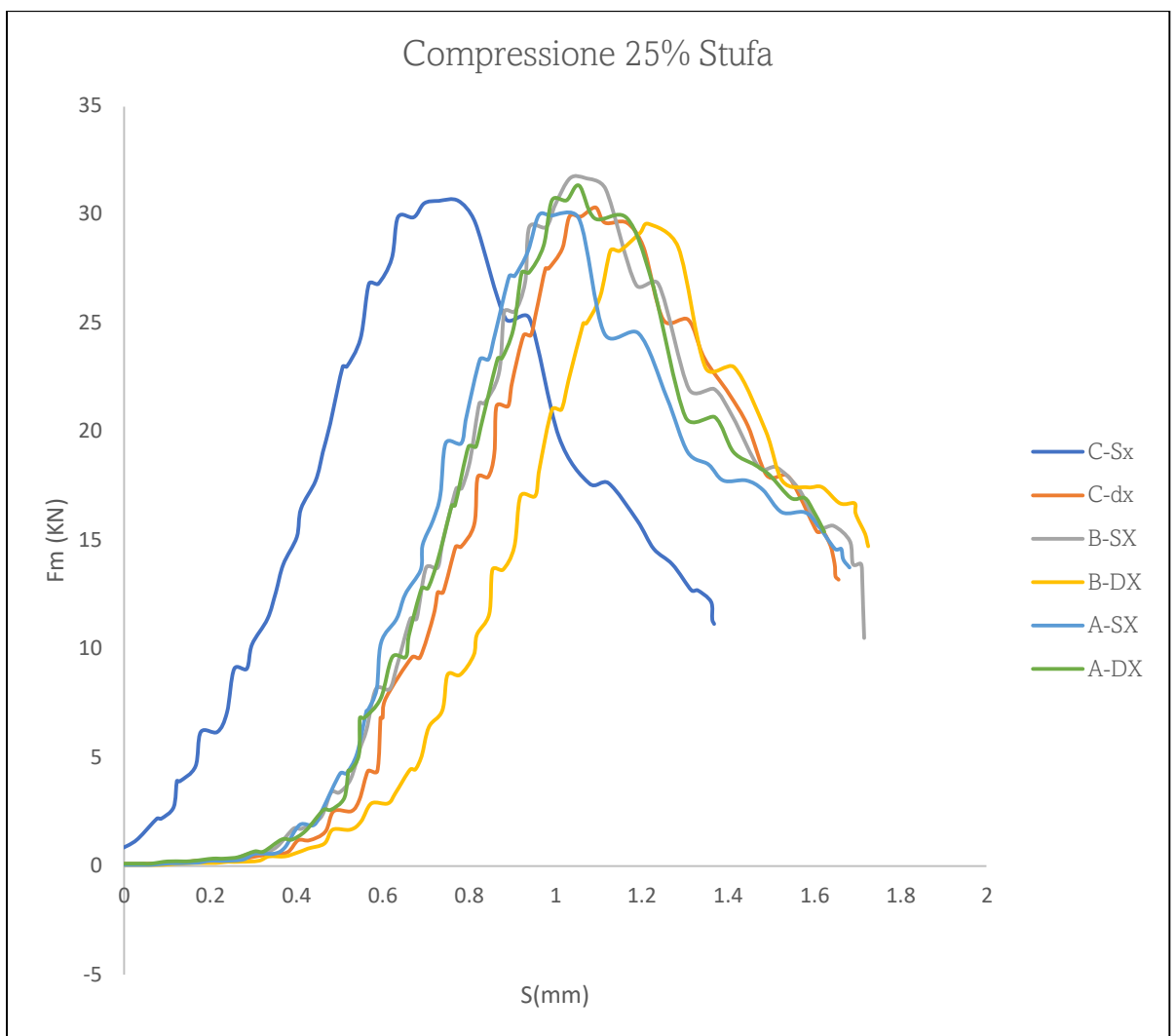
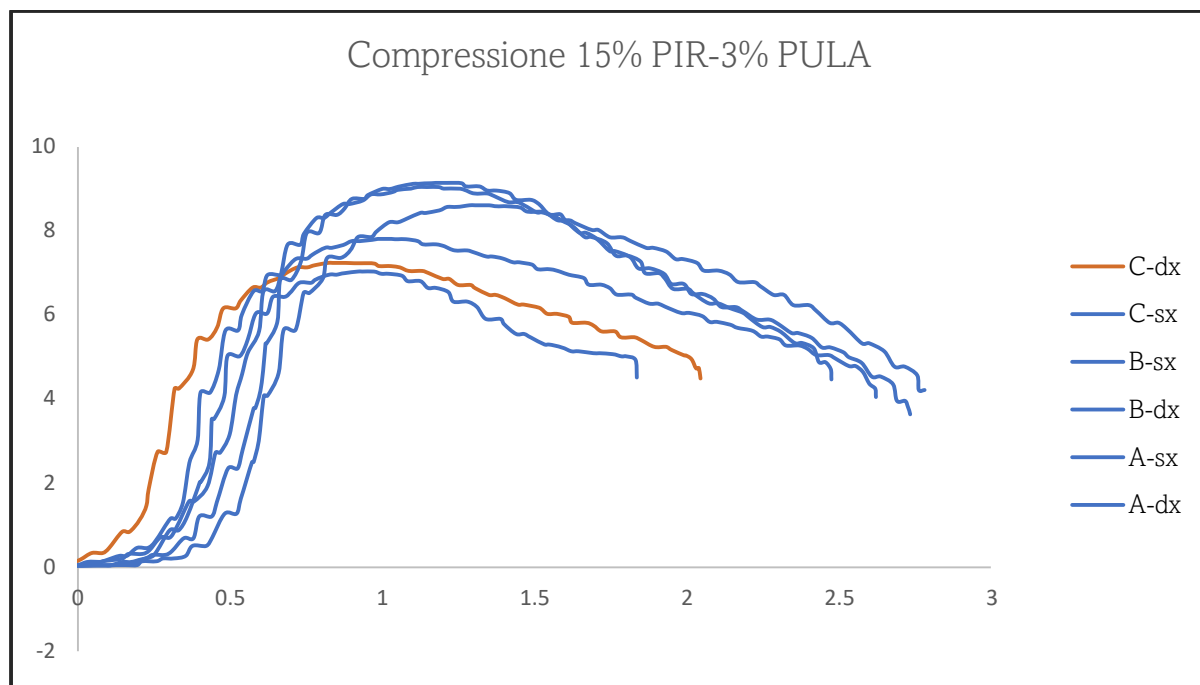


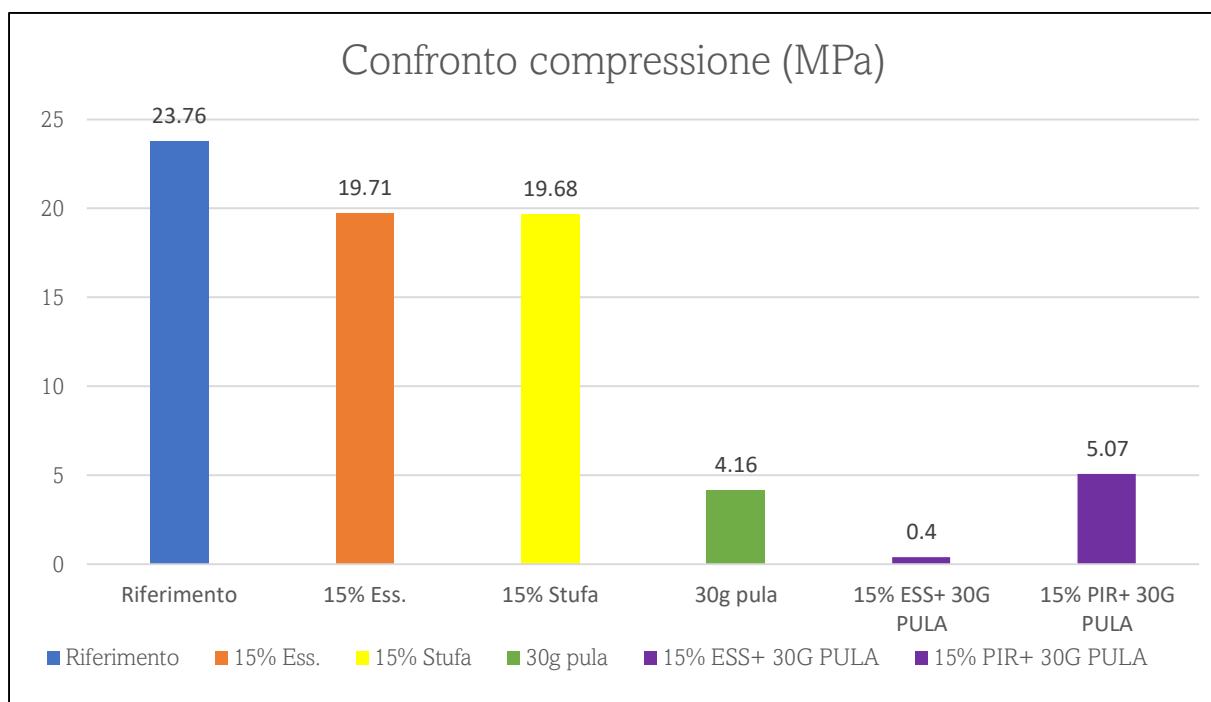
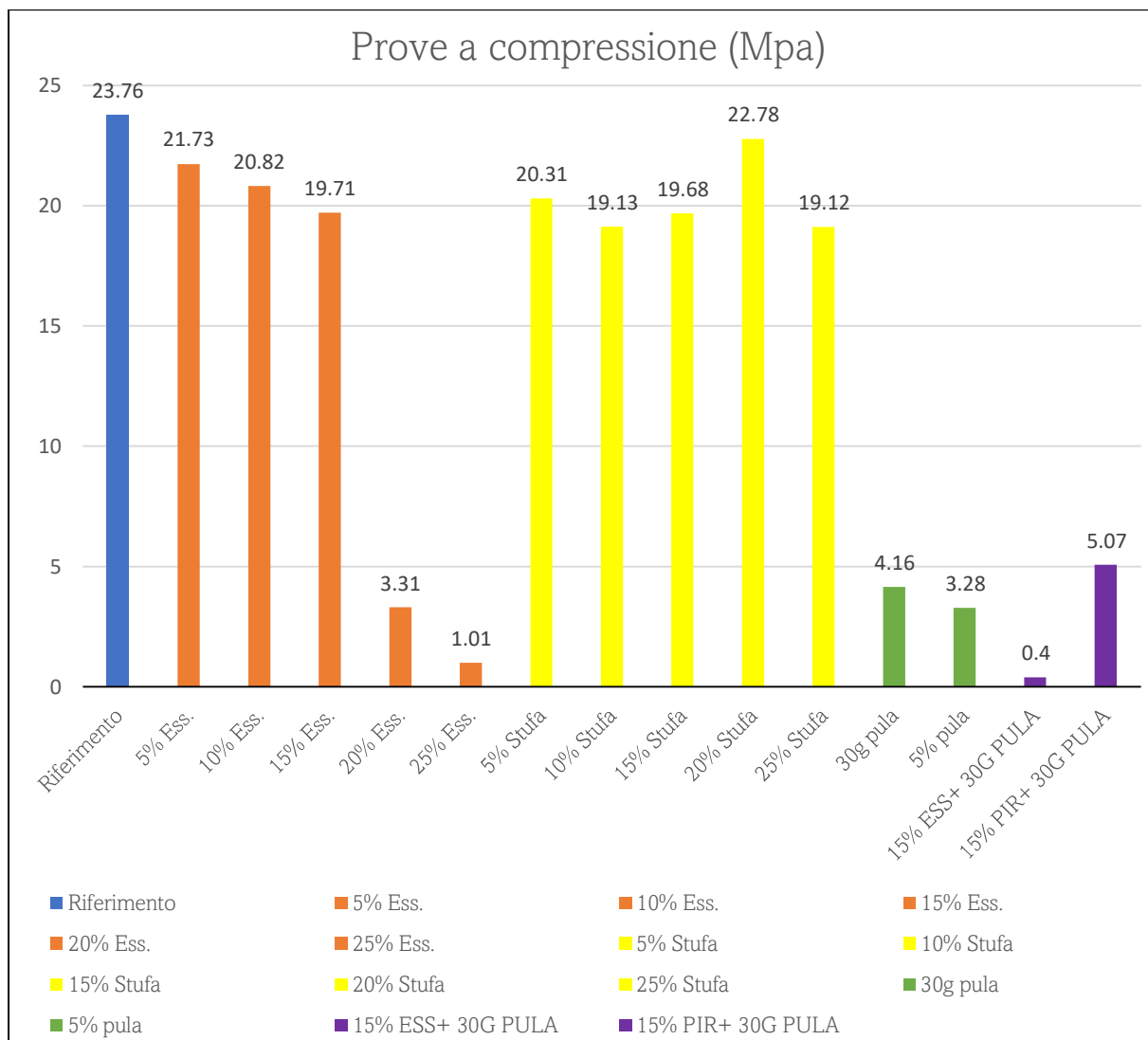
Tabella 32: Prova a compressione 15% Ess+ 3% Pula

	Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media A-B-C (KN)	Media A-B-C (MPa)	Media provini (KN)	Media provini (MPa)
A-dx	15% ESS+ 3% PULA	0.6	0.375	0.61	0.38125	0.6375	0.40
A-sx	15% ESS+ 3% PULA	0.62	0.3875				
B-dx	15% ESS+ 3% PULA	0.65	0.40625	0.665	0.415625		
B-sx	15% ESS+ 3% PULA	0.68	0.425				
C-dx	15% ESS+ 3% PULA	0.72	0.45	0.72	0.45		
C-sx	15% ESS+ 3% PULA	0.72	0.45				

Tabella 33: Prova a compressione 15% Pir+ 30 Pula

	Nome	Fm (KN)	Fm(MPa)	Media A- B-C (KN)	Media A-B- C (MPa)	Media provini (KN)	Media provini (MPa)
A-dx	15% PIR+ 3% PULA	9.14	5.7125	9.09	5.68125	8.1125	5.07
A-sx	15% PIR+ 3% PULA	9.04	5.65				
B-dx	15% PIR+ 3% PULA	7.03	4.39375	7.135	4.459375		
B-sx	15% PIR+ 3% PULA	7.24	4.525				
C-dx	15% PIR+ 3% PULA	7.8	4.875	8.2	5.125		
C-sx	15% PIR+ 3% PULA	8.6	5.375				





CONSIDERAZIONI

L'introduzione della pila comporta un notevole abbassamento delle prestazioni meccaniche a compressione del materiale; tuttavia, il limite inferiore della resistenza meccanica a compressione di un intonaco è abbondantemente superato. Difatti la normativa stabilisce come limite inferiore, per la resistenza meccanica a compressione di un intonaco, 2 Mpa, valore che viene ampiamente raggiunto. La richiesta prestazionale di questo materiale non è minimamente paragonabile a quella di un calcestruzzo, in quanto non essendo un componente strutturale, non nasce con lo scopo di irrigidire e rinforzare la struttura, fatto salvo per particolari casi di interventi di consolidamento con intonaci speciali. Difatti l'intonaco è un prodotto di finitura che svolge la funzione di rivestimento, viene applicato sulle superficie murarie per proteggerle e migliorarne l'estetica. Inoltre, l'utilizzo dell'intonaco permette di migliorare le caratteristiche termiche e igrometriche del pacchetto di chiusura orizzontale di un edificio; pertanto, non è richiesta elevata resistenza a compressione.

6.5 Prove a flessione

6.5.1 Prove a flessione provino di riferimento

Tabella 34: Risultati prova a flessione-Riferimento

Data		Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media Provino Fm (KN)	Media Provino (MPa)
14/01/2024	A	0%	1.12	2.625	1.223	2.87
14/01/2024	B	0%	1.43	3.351563		
14/01/2024	C	0%	1.12	2.625		

6.5.2 Prove a flessione provino con pula

Tabella 35: Risultati prova a flessione 5%-Pula

Data		Nome	Fm(KN)	Fm (MPa)	Media Provino Fm (KN)	Media Provino (MPa)
14/01/2024	A	5% Pula	0.78	1.828125	0.787	1.84
14/01/2024	B	5% Pula	0.79	1.851563		
14/01/2024						

Tabella 36: Risultati prove a flessione 3% Pula

Data		Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media Provino Fm (KN)	Media Provino (MPa)
02/05/2024	A	3% Pula	0.93	2.179688	0.885	2.07
02/05/2024	B	3% Pula	0	0		
02/05/2024	C	3% Pula	0.84	1.96875		

6.5.3 Prove a flessione provini con fondi di caffè

Tabella 37: Risultati prove a flessione 5%-Ess.

Data		Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media Provino Fm (KN)	Media Provino (MPa)
21/03/2024	A	5% Ess.	1.02	2.390625	1.013	2.38
21/03/2024	B	5% Ess.	1.02	2.390625		
21/03/2024	C	5% Ess.	1	2.34375		

Tabella 38: Risultati prove a flessione 10%-Ess

Data		Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media Provino Fm (KN)	Media Provino (MPa)
21/03/2024	A	10% Ess.	1.12	2.625	1.075	2.52
21/03/2024	B	10% Ess.	Rotto	Rotto		
21/03/2024	C	10% Ess.	1.03	2.414063		

Tabella 39: Risultati prove a flessione 15% Ess.

Data		Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media Provino Fm (KN)	Media Provino (MPa)
21/03/2024	A	15% Ess.	1.3	3.046875	1.547	3.63
21/03/2024	B	15% Ess.	1.67	3.914063		
21/03/2024	C	15% Ess.	1.67	3.914063		

Tabella 40: Risultati prova a flessione 20% Ess.

Data		Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media Provino Fm (KN)	Media Provino (MPa)
29/04/2024	A	20%ESS		0	0.455	1.07
29/04/2024	B	20%ESS	0.46	1.078125		
29/04/2024	C	20%ESS	0.45	1.054688		

Tabella 41: Risultati prove a flessione 25% Ess.

Data		Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media Provino Fm (KN)	Media Provino (MPa)
29/04/2024	A	25%ESS.	0.14	0.328125	0.143	0.34
29/04/2024	B	25%ESS.	0.15	0.351563		
29/04/2024	C	25%ESS.	0.14	0.328125		

6.5.4 Prove a flessione provini con biochar 350°C

Tabella 42: Risultati prove a flessione Muffola 5%

Data		Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media Provino Fm (KN)	Media Provino (MPa)
21/03/2024	A	5% Muff.	1.08	2.53125	1.163	2.73
21/03/2024	B	5% Muff.	1.14	2.671875		
21/03/2024	C	5% Muff.	1.27	2.976563		

Tabella 43: Risultati prove a flessione Muffola 10%

Data		Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media Provino Fm (KN)	Media Provino (MPa)
21/03/2024	A	10% Muff.	1.42	3.328125	1.297	3.04
21/03/2024	B	10% Muff.	1.22	2.859375		
21/03/2024	C	10% Muff.	1.25	2.929688		

Tabella 44: Risultati prove a flessione Muffola 15%

Data		Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media Provino Fm (KN)	Media Provino (MPa)
21/03/2024	A	15% Muff.	1.27	2.976563	1.370	3.21
21/03/2024	B	15% Muff.	1.41	3.304688		
21/03/2024	C	15% Muff.	1.43	3.351563		

6.5.5 Prove a flessione provini con biochar 300°C

Tabella 45: Risultati prove a flessione Stufa 5%

Data		Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media Provino Fm (KN)	Media Provino (MPa)
21/03/2024	A	5% Stufa	1.54	3.609375	1.503	3.52
21/03/2024	B	5% Stufa	1.46	3.421875		
21/03/2024	C	5% Stufa	1.51	3.539063		

Tabella 46: Risultati prove a flessione Stufa 10%

Data		Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media Provino Fm (KN)	Media Provino (MPa)
21/03/2024	A	10% Stufa	1.44	3.375	1.497	3.51
21/03/2024	B	10% Stufa	1.56	3.65625		
21/03/2024	C	10% Stufa	1.49	3.492188		

Tabella 47: Risultati prove a flessione Stufa 15%

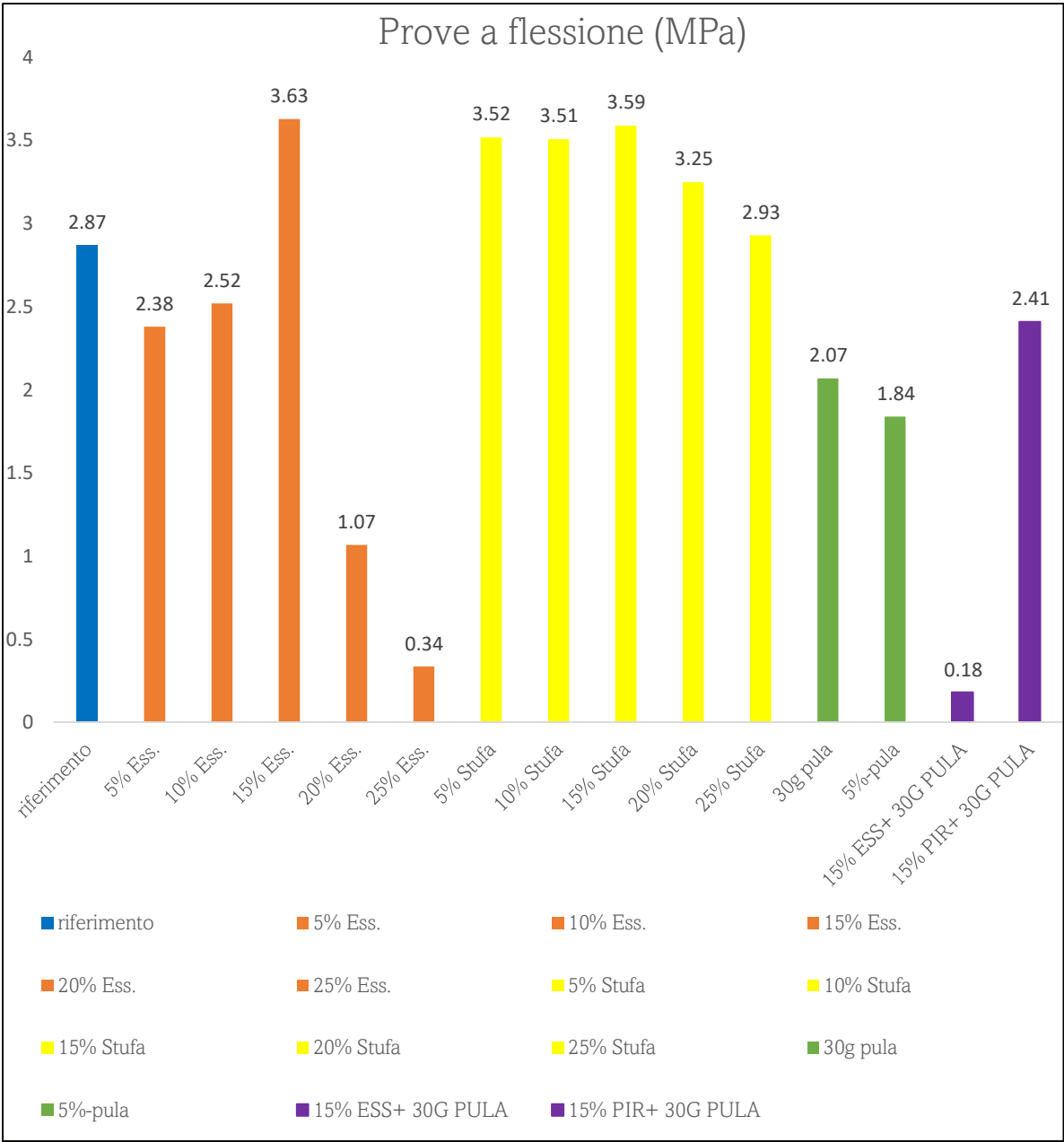
Data		Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media Provino Fm (KN)	Media Provino (MPa)
21/03/2024	A	15% Stufa	1.53	3.585938	1.530	3.59
21/03/2024	B	15% Stufa	1.53	3.585938		
21/03/2024	C	-	-	-		

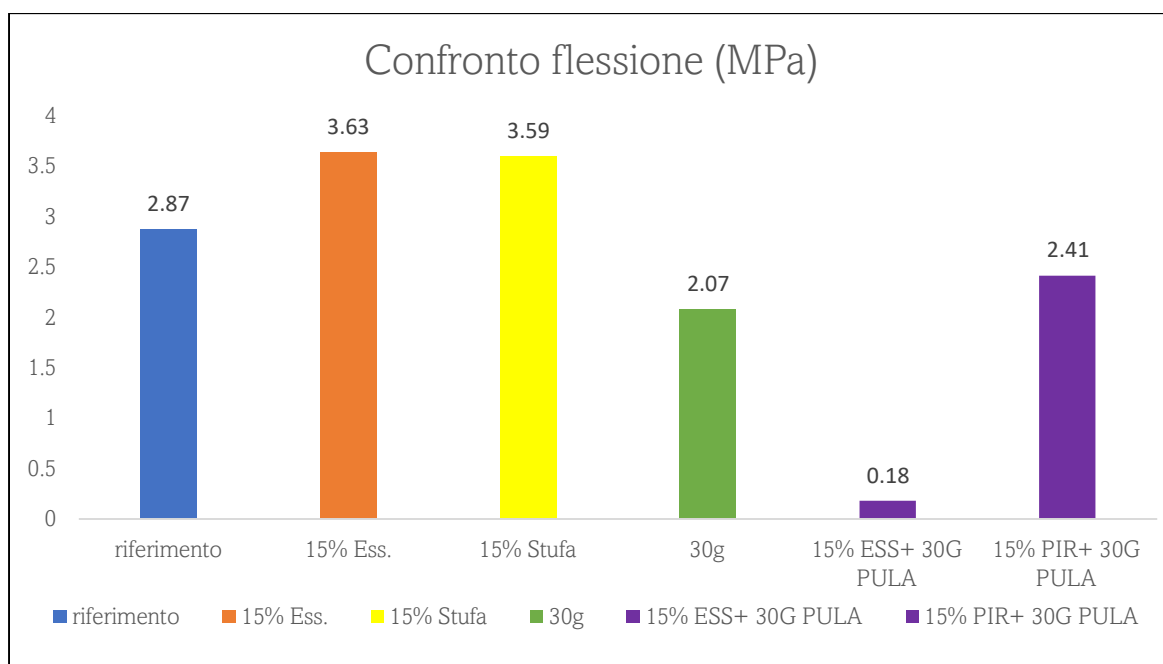
Tabella 48: Risultati prove a flessione Stufa 20%

Data		Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media Provino Fm (KN)	Media Provino (MPa)
29/04/2024	A	20%STUFA	1.57	3.679688	1.387	3.25
29/04/2024	B	20%STUFA	1.37	3.210938		
29/04/2024	C	20%STUFA	1.22	2.859375		

Tabella 49: Risultati prove a flessione Stufa 25%

Data		Nome	Fm (KN)	Fm (MPa)	Media Provino Fm (KN)	Media Provino (MPa)
29/04/2024	A	25%STUFA	1.27	2.976563	1.250	2.93
29/04/2024	B	25%STUFA	1.09	Rotto		
29/04/2024	C	25%STUFA	1.23	2.882813		





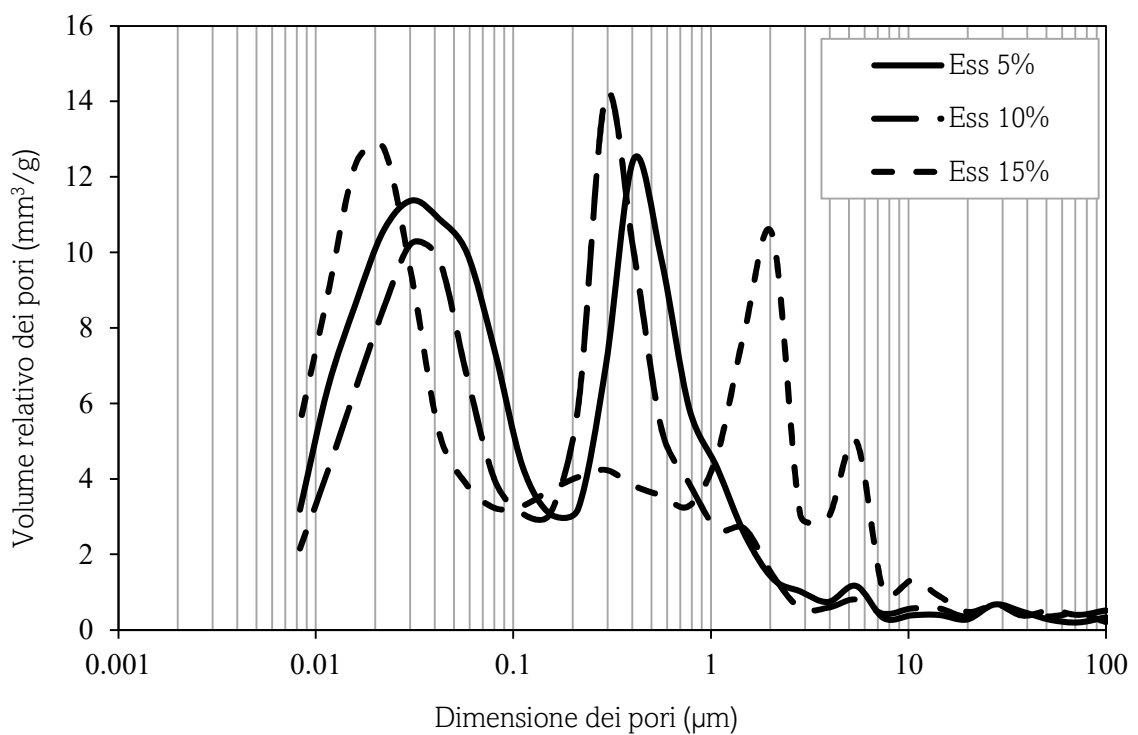
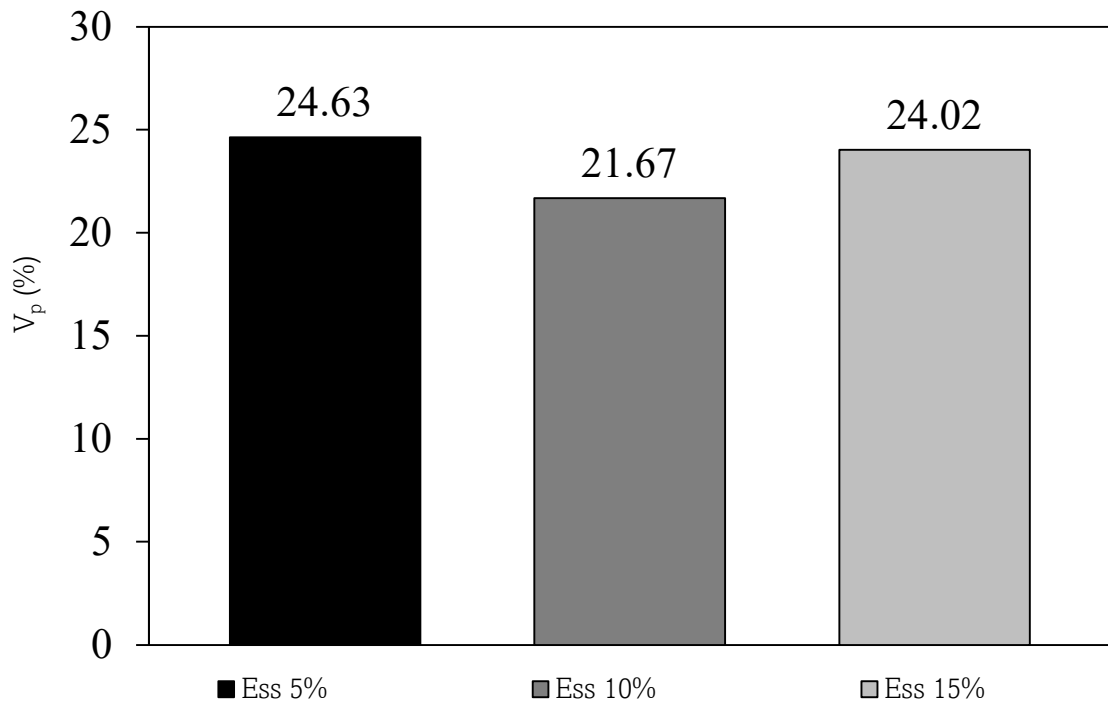
CONSIDERAZIONI

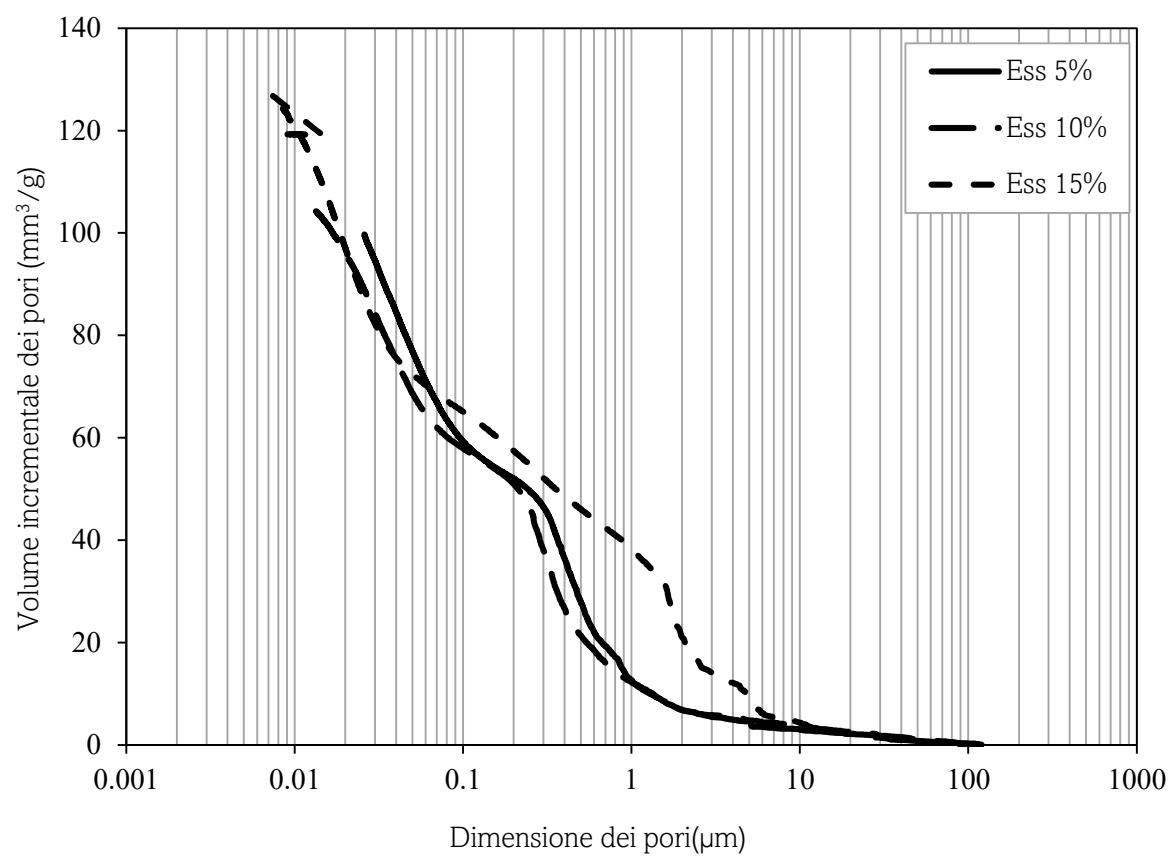
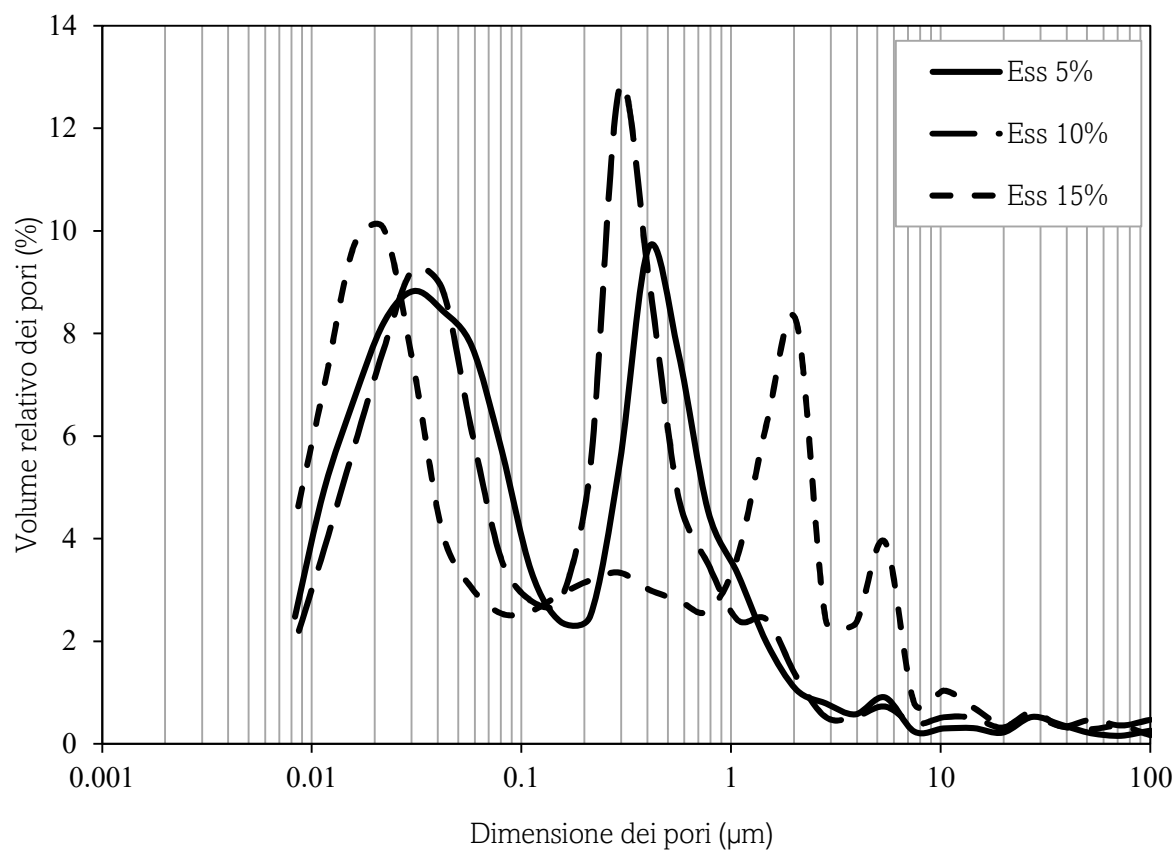
Se la resistenza a compressione non è un dato fondamentale per la caratterizzazione di un intonaco, non è altrettanto vero per la resistenza a flessione. Infatti, ottenere una buona resistenza alle deformazioni flessionali garantisce al prodotto un notevole valore aggiunto. L'integrazione della pula anche in questo caso influisce negativamente sulla prestazione dell'intonaco, d'altra parte invece le analisi condotte sui fondi di caffè e sul biochar hanno dimostrato un notevole aumento delle prestazioni del materiale. Le prove effettuate hanno dimostrato che fino ad una sostituzione del 15% dell'aggregato il materiale ha ottenuto un aumento nella resistenza meccanica a flessione, che ha subito una diminuzione già con una sostituzione percentuale pari al 20%. Nello specifico l'introduzione della pula ha determinato, rispetto al riferimento, un abbassamento del 27% della resistenza meccanica a flessione, mentre l'introduzione dei fondi di caffè essiccati e del biochar hanno evidenziato un aumento, rispettivamente, del 26% e del 25%. Tali risultati suggeriscono che l'integrazione di entrambi i composti organici possa rappresentare una soluzione equilibrata.

6.6 Porosimetrie ad intrusione di mercurio

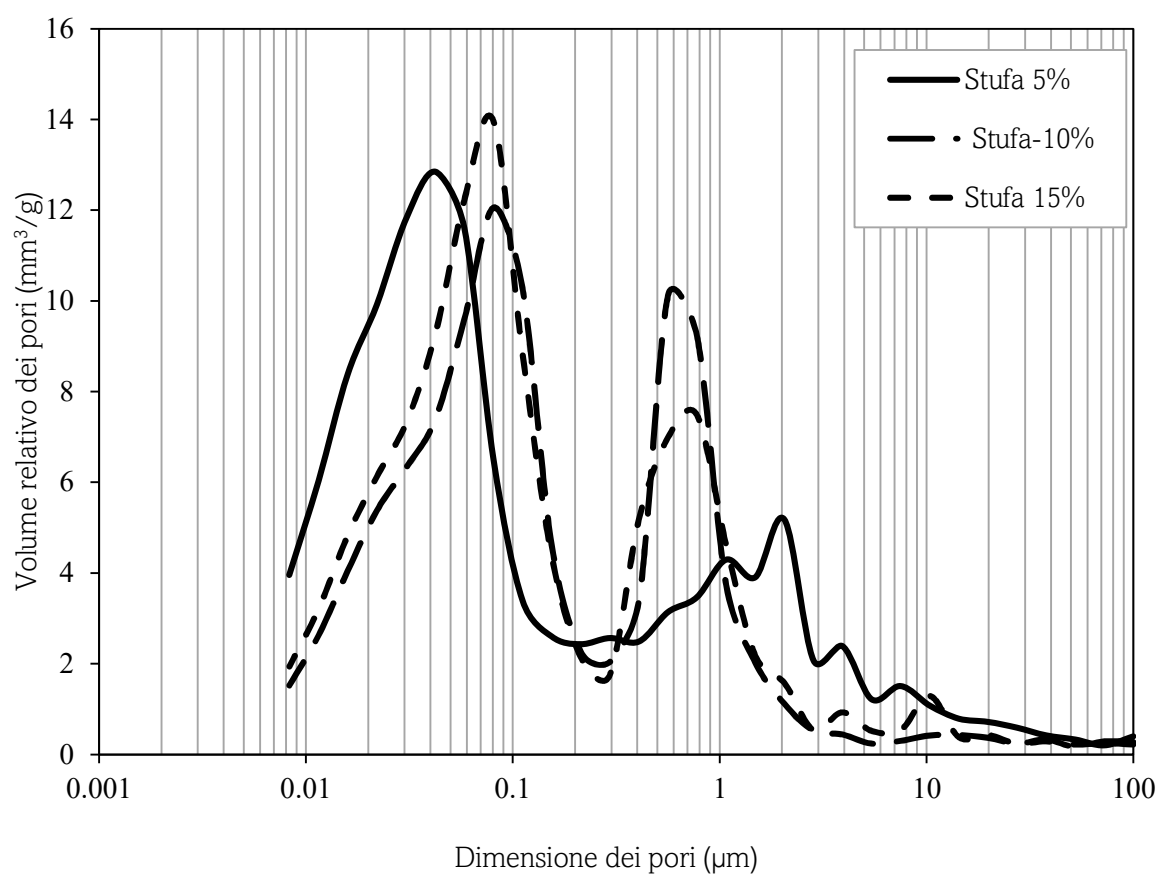
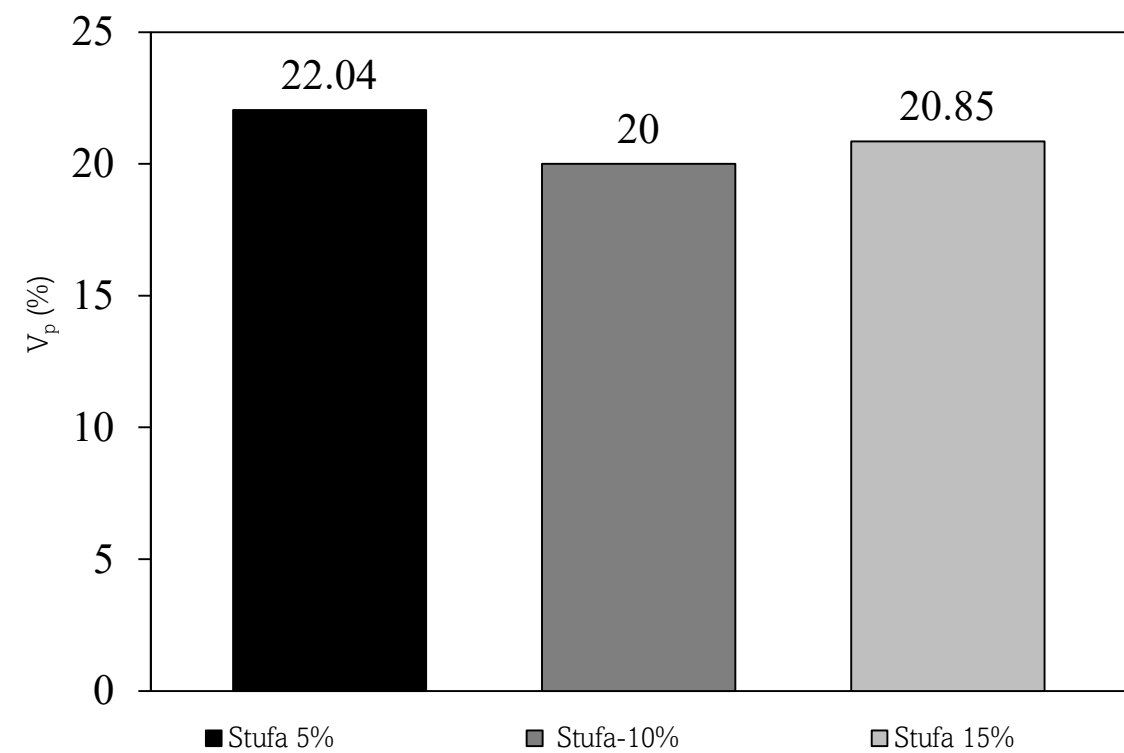
Di seguito si riportano i valori dell'analisi porosimetrica condotta sulle diverse composizioni dell'intonaco.

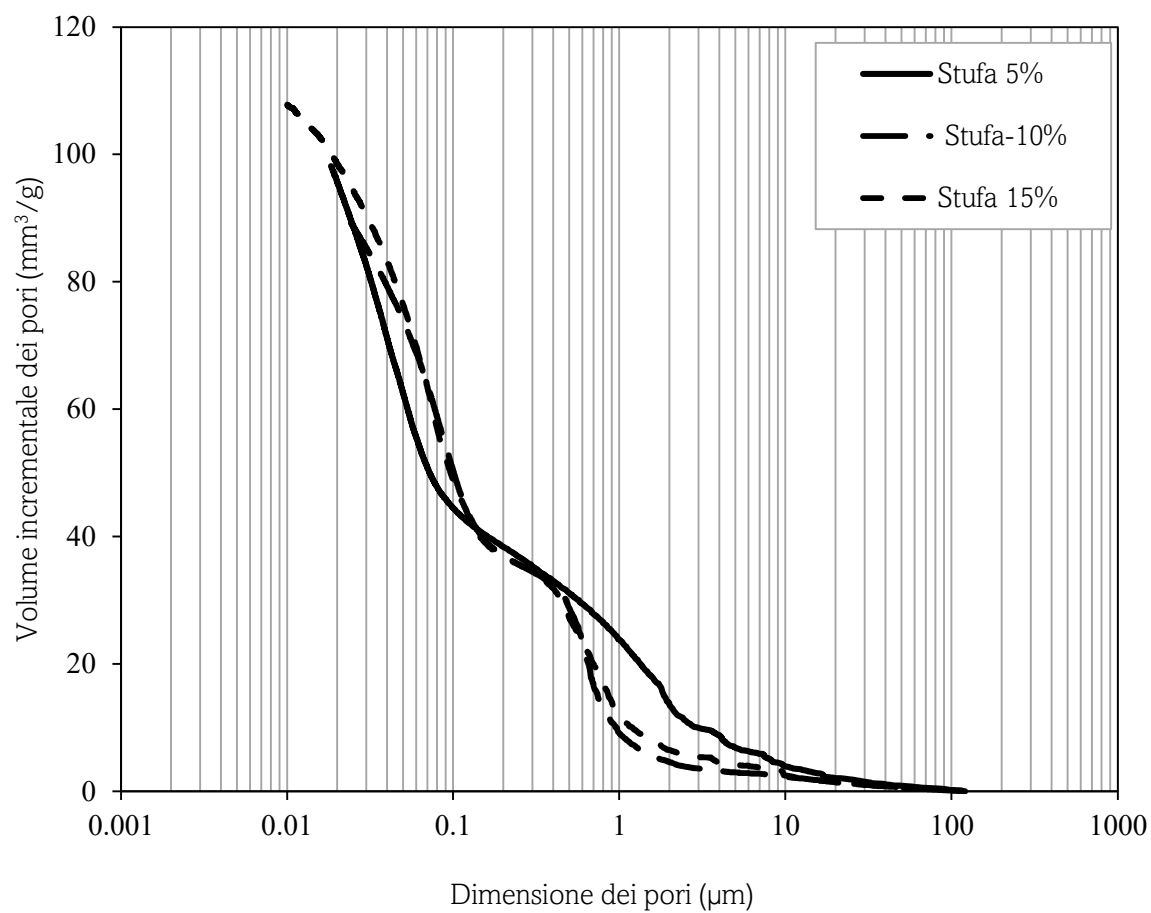
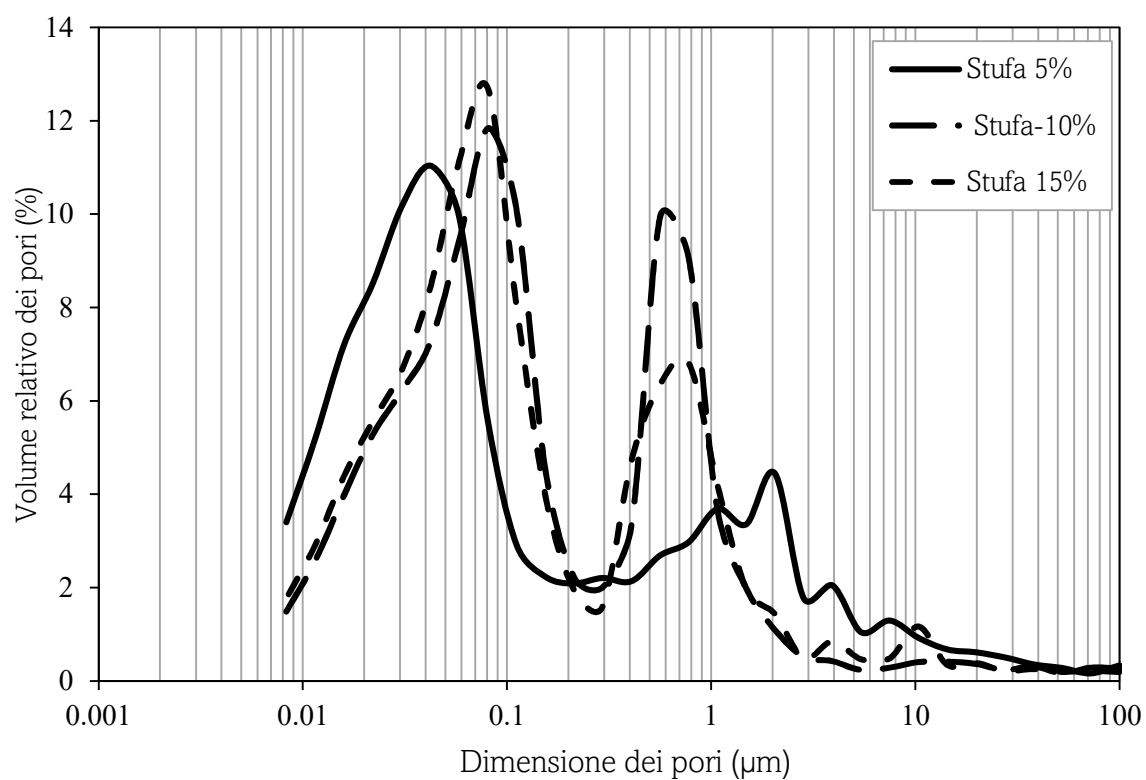
6.6.1 Provini con fondi di caffè essiccati



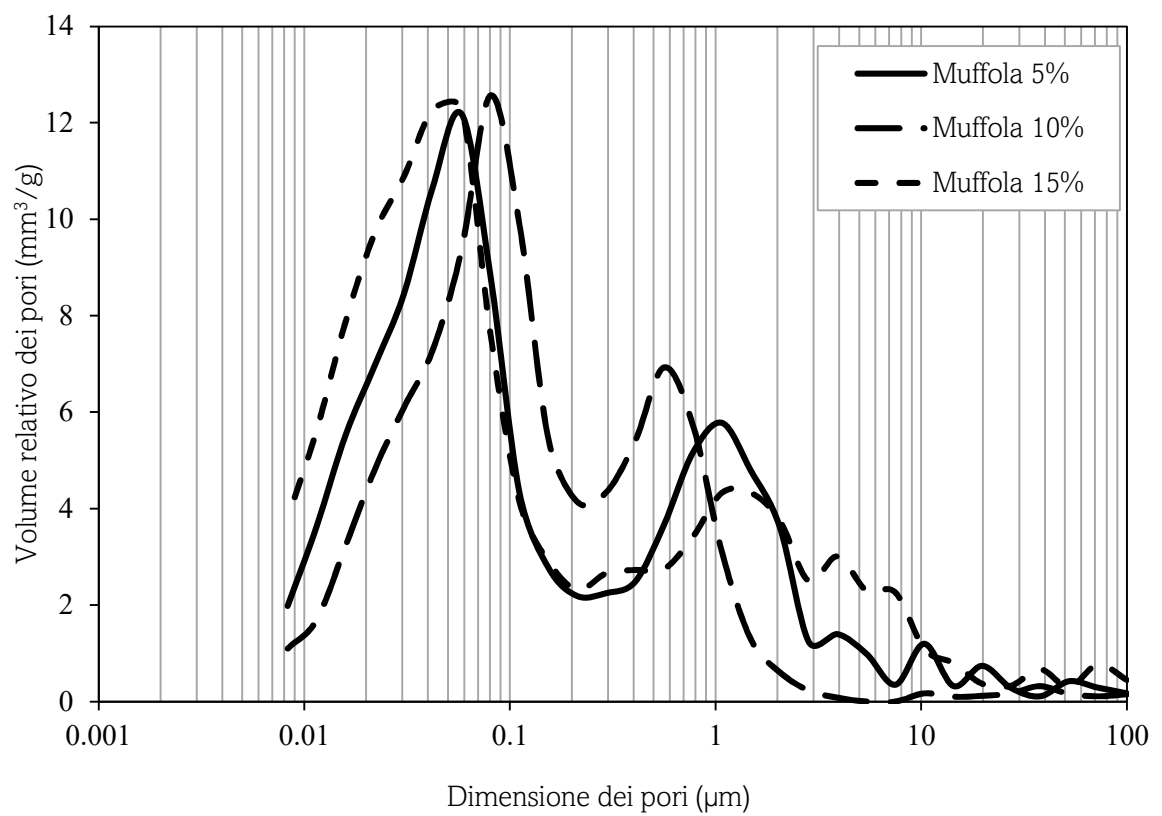
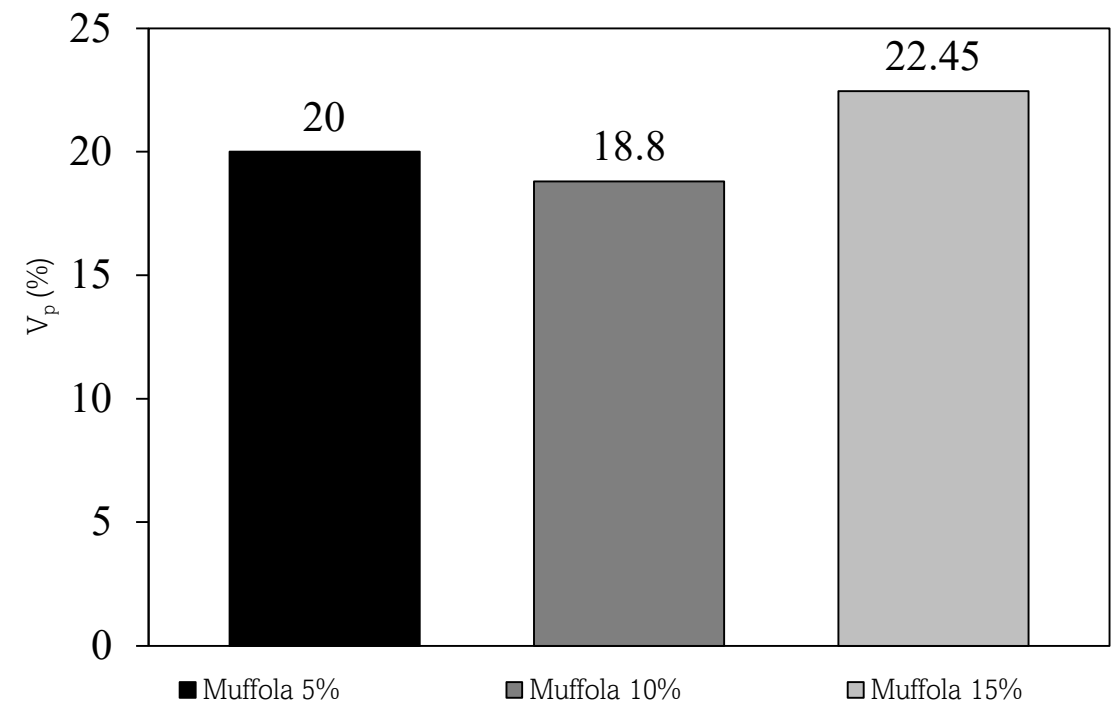


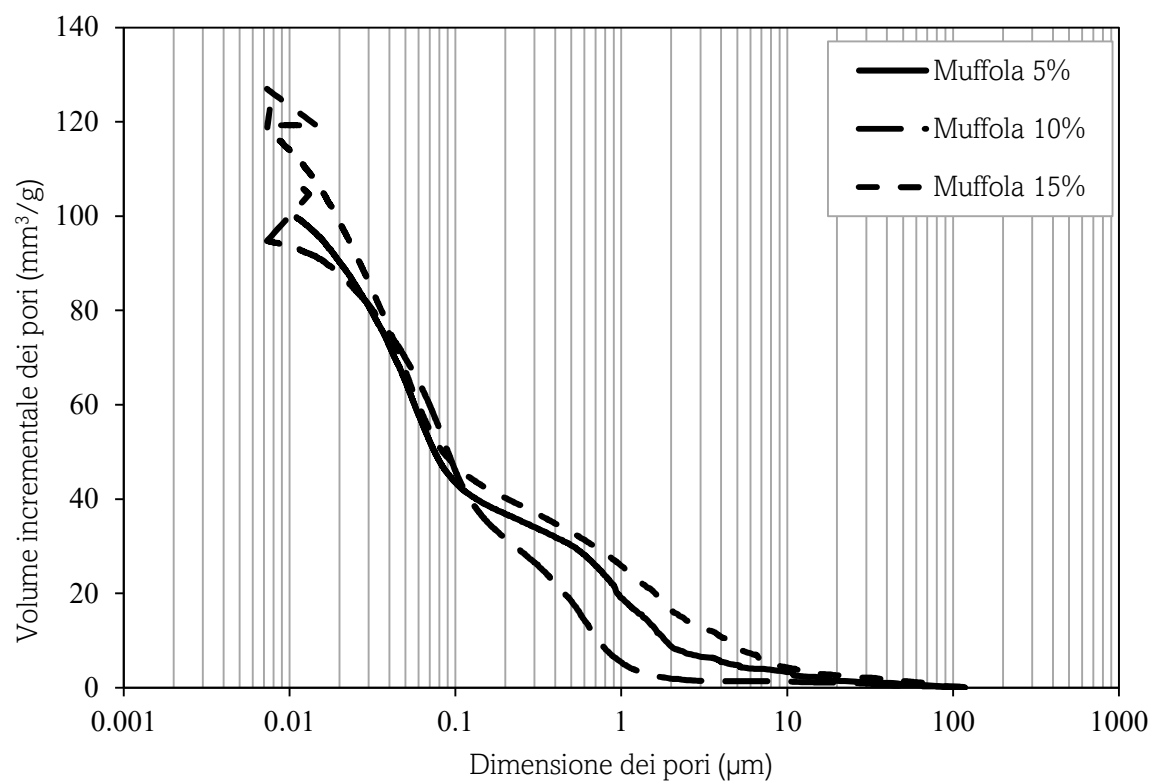
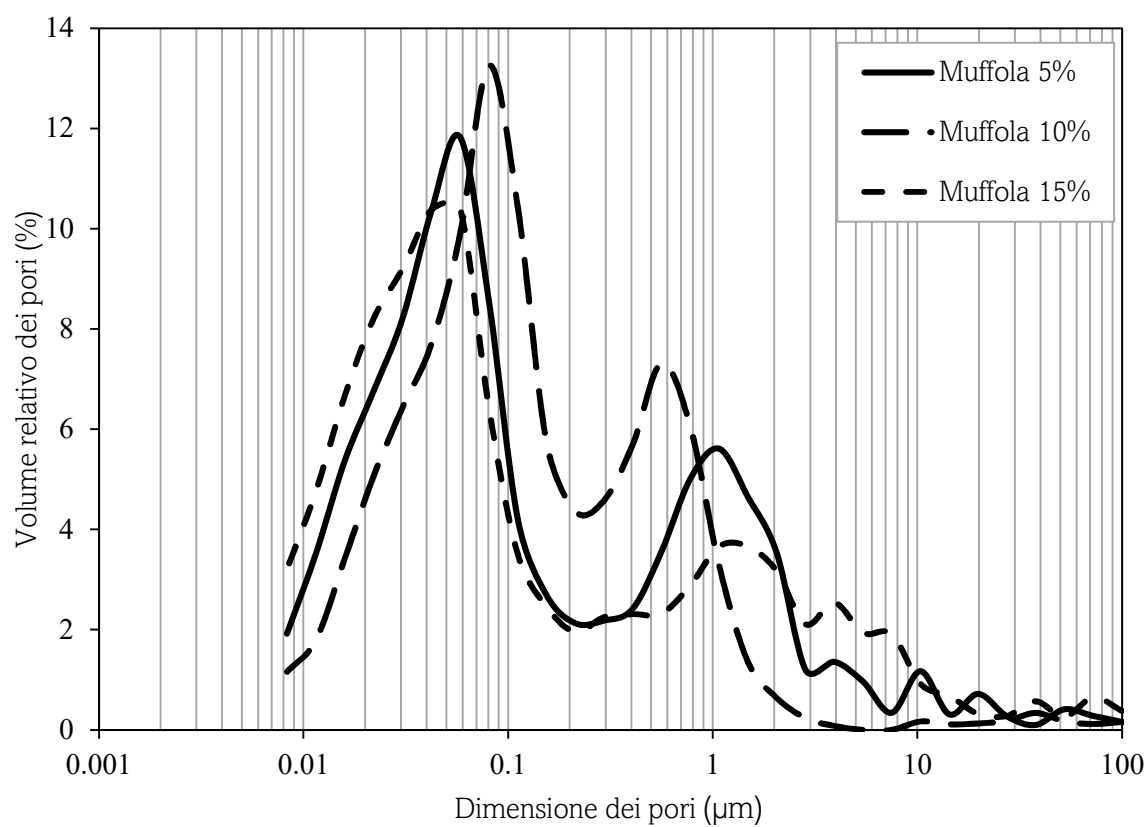
6.6.2 Provini con biochar prodotto in stufa





6.6.3 Provini con biochar prodotto in muffola





CONSIDERAZIONI

Le analisi porosimetriche hanno permesso di individuare la porosità dei diversi materiali, indicando anche le dimensioni specifiche dei pori. Difatti le tipologie di pori all'interno delle malte cementizie indurite possono essere classificate come segue:

- **Porosità da gel** così sono definite le microporosità. I pori di questa categoria hanno dimensioni tra 0,5 nm e i 10 nm e il loro volume è circa un terzo del volume occupato dai prodotti idratati della malta.
- **Porosità capillare** comprende le meso-porosità di dimensione comprese fra i 10 nm e i 1 μm (1000 nm), e di forma irregolare. In questa categoria fanno parte le porosità tra i prodotti idratati del cemento e la loro quantità dipende dal rapporto acqua/cemento.
- **Macro-porosità** ossia la presenza di macro-vuoti è dovuto ad un'incompleta espulsione dell'aria nella miscela durante il getto a causa di un inadeguato costipamento. Le dimensioni dei pori di questa categoria sono molto notevoli, maggiori di 1 μm ; infatti, sono visibili anche ad occhio nudo.
- **Porosità dell'inerte**, di tipologia e dimensioni variabili a seconda della tipologia di inerte utilizzato.

Dai risultati delle analisi possiamo affermare che l'introduzione del biochar aumenta notevolmente la porosità capillare del materiale, difatti all'aumentare della quantità dei materiali organici cresce la percentuale della porosità capillare. D'altra parte, l'introduzione dei fondi di caffè determina un aumento non solo della porosità capillare ma anche della macro-porosità dell'intonaco. In generale possiamo affermare che l'introduzione dei materiali organici comporti un buon incremento alla porosità del materiale contribuendo al miglioramento delle caratteristiche di quest'ultimo.

8. Conclusioni

Il capitolo conclusivo riepiloga i risultati chiave della ricerca, evidenziando i contributi del biochar da fondi di caffè e della pula nell'intonaco edilizio. Vengono sottolineate le implicazioni pratiche e l'importanza di questa innovazione nell'ambito della sostenibilità e dell'efficacia dei materiali da costruzione.

In conclusione, possiamo affermare che:

- L'utilizzo dei materiali organici, oggetto di ricerca, non compromette l'applicazione tecnica del materiale, in quanto si determinano valori di lavorabilità adatti all'utilizzo del prodotto come intonaco.
- L'aggiunta della pula alla matrice inorganica determina notevoli abbassamenti alle prestazioni meccaniche del materiale, ma d'altra parte il composito acquisisce caratteristiche termoigrometriche migliori, grazie alla porosità che caratterizza il materiale.
- L'utilizzo di fondi di caffè essiccati e di biochar prodotto da fondi esausti non determina evidenti variazioni alla resistenza a compressione del materiale, mentre per quanto riguarda la resistenza a flessione del materiale apporta incrementi non indifferenti, pari al 26% per i fondi di caffè e al 25% per il biochar prodotto in stufa, utilizzando una sostituzione dei materiali nella miscela del 15%.
- L'introduzione della pula determina un notevole abbassamento alla densità del materiale, allo stesso modo, anche se in misura minore, i fondi di caffè contribuiscono all'alleggerimento della miscela.
- La combinazione della pula e dei fondi di caffè per produrre un biocomposito a matrice inorganica potrebbe rappresentare una viva possibilità per la realizzazione di un prodotto innovativo che assorbe le caratteristiche migliori dei materiali organici. Difatti l'utilizzo di entrambi i compositi organici, come già anticipato, contribuisce ad un notevole alleggerimento della miscela, l'integrazione della pula introduce una maggiore porosità al materiale, fondamentale per garantire durabilità, isolamento termico, isolamento acustico e la possibilità di assorbire l'umidità presente nell'aria. Infine, l'implementazione dei

fondi di caffè o del biochar, permetterebbe di recuperare una parte della resistenza a flessione persa con l'introduzione della pula.

Infine, l'utilizzo degli scarti della produzione del caffè, materiali giunti al loro fine vita, per la produzione di un nuovo prodotto, offre numerosi vantaggi in termini di sostenibilità ambientale:

- Utilizzare prodotti vegetali di scarto riduce le quantità di rifiuti organici che finiscono nelle discariche, diminuendo così l'impatto ambientale associato allo smaltimento dei rifiuti
- Trasformare gli scarti vegetali in materiali utili promuove una gestione più sostenibile dei rifiuti agricoli e industriali
- L'inclusione di scarti vegetali nelle malte cementizie può ridurre la necessità di materie prime vergini, come sabbia e ghiaia, contribuendo alla conservazione delle risorse naturali
- Questo approccio rientra nei principi dell'economia circolare, dove i materiali vengono riutilizzati e riciclati, riducendo la dipendenza da risorse non rinnovabili
- L'uso di scarti vegetali può ridurre l'utilizzo di materiali edili, associati ad elevate emissioni di CO₂, contribuendo alla riduzione delle emissioni di gas serra, grazie alla produzione di prodotti con carbon footprint minori.

9. Prospettive Future e Sfide

Nel corso degli ultimi decenni, l'interesse per le tecnologie sostenibili e i materiali ecocompatibili ha portato a una crescente attenzione verso l'impiego di risorse rinnovabili e rifiuti organici nei settori edilizi. L'impiego di fondi di caffè pirolizzati e pula come componenti negli intonaci civili è una tendenza relativamente nuova, ma promettente. Attualmente, molte ricerche si concentrano sull'ottimizzazione delle proprietà meccaniche, termiche e ambientali di tali materiali. I principali vantaggi nell'utilizzo di fondi di caffè pirolizzati e della pula negli intonaci civili, risiedono nei benefici ambientali e nel miglioramento delle caratteristiche termoigrometriche del materiale, rispettando i canoni che la ricerca moderna si pone come linea guida. Inoltre, riducendo la dipendenza da materiali tradizionali e utilizzando invece scarti organici, si contribuisce a ridurre l'impatto ambientale complessivo del settore edilizio. In aggiunta, l'utilizzo di materiali riciclati e rinnovabili può portare a una riduzione dei costi di produzione e a una maggiore sostenibilità economica nel lungo periodo. Nonostante le promesse offerte dal riuso di questi materiali di scarto nei materiali edilizi, ci sono diverse sfide da affrontare per garantire una diffusa adozione e un impatto positivo a lungo termine. Tra queste, vi sono:

-Standardizzazione e certificazione: è necessario sviluppare standard di qualità e procedure di certificazione per garantire che i materiali siano conformi ai requisiti di sicurezza e prestazioni.

-Accettazione del mercato: l'adozione di nuovi materiali richiede l'approvazione e l'accettazione da parte del mercato edilizio, che spesso è resistente ai cambiamenti e alle innovazioni.

-Ricerca e sviluppo continuo: è fondamentale investire nella ricerca e nello sviluppo per migliorare le prestazioni e le caratteristiche dei materiali, oltre a ottimizzare i processi di produzione.

Nonostante le sfide, l'implementazione di fondi di caffè pirolizzati e pula negli intonaci civili offre numerose opportunità per l'innovazione e lo sviluppo sostenibile nel settore edilizio. Con ulteriori investimenti in ricerca e sviluppo, insieme a politiche pubbliche

favorevoli e incentivi per l'adozione di materiali sostenibili, il potenziale di questa tecnologia potrebbe essere pienamente realizzato. In conclusione, le prospettive future dell'implementazione di fondi di caffè pirolizzati e pula negli intonaci civili appaiono promettenti, ma richiedono un impegno continuo da parte di ricercatori e industrie per superare le sfide e sfruttare appieno le opportunità offerte da questa innovazione sostenibile.

RIFERIMENTI

¹ -Architectural technologies for life environment: Spent coffee ground reuse in lime- based mortars. A preliminary assessment for innovative green thermo-plasters

Manfredi Saeli a,* , Marin'elia N. Capela b, Tiziana Campisi a, M. Paula Seabra b, David M. Tobaldi c, C. Manuela La Fata d a

² -Transforming spent coffee grounds into a valuable resource for the enhancement of concrete strength

Rajeev Roychand **,1, Shannon Kilmartin-Lynch 2, Mohammad Saberian , Jie Li *, Guomin Zhang , Chun Qing Li

³ -ENEA- Quaderni dell'efficienza energetica

⁴ - UNI EN 13914-1:2016 - *Progettazione, preparazione e applicazione di intonaci esterni e interni - Parte 1: Intonaci esterni – Parte 2: Intonaci interni*

⁵ - UNI EN 15824:2017 - *Specifiche per intonaci esterni e interni a base di leganti organici*

⁶ Development of wood-crete from treated sawdust
Eboziegbe Patrick Aigbomian, Mizi Fan

⁷ Characterization of lightweight mortars containing wood processing by-products waste

Corinaldesi, Valeria - Mazzoli, Alida - Siddique, Rafat

⁸ -UNI EN 1015-3:2007-Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 3:
Determinazione della consistenza della malta fresca (mediante tavola a scosse)

⁹ - UNI EN 12350-6 - *Massa volumica cls fresco*

¹⁰ UNI EN 1510-10 *Massa volumica del cls indurito*

¹¹ - UNI EN 1015-11 - *Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita*

14 -UNI15801:2010 - *Conservazione dei beni culturali - Metodi di prova - Determinazione dell'assorbimento dell'acqua per capillarità*

- MAPEFLUID N200_scheda tecnica https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider2/products-documents/1_00704_mapefluid-n200-it-it_1fb5b8aa0c584d8d94da708da4229883.pdf?sfvrsn=ac3e8e33

Poromap. Intonaco deumidificante monoprodotto<https://www.mapei.com/it/it/prodotti-e-soluzioni/prodotti/dettaglio/poromap-deumidificante>

- Specific surface area versus porosity from digital images: High-porosity granular sample

-Development of activated carbons derived from wastes: coffee grounds and olive stones as potential porous materials for air depollution

Natalia Czerwinska a,* , Chiara Giosu'e a,* , Ines Matos b, Simona Sabbatini a, Maria Letizia Ruello a, Maria Bernardo b

-New use for spent coffee ground as an adsorbent for tetracycline removal in water

Yingjie Dai [a, b](#), Kexin Zhang [a](#), Xianbing Meng [a](#), Jingjing Li [a](#), Xueting Guan [c](#), Qiya Sun [a](#), Yue Sun [a](#), Wensi Wang [a](#), Mu Lin [a](#), Mei Liu [d](#), Shengshu Yang [d](#), Yanjun Chen [a](#), Feng Gao [a](#), Xu Zhang [a](#), Zhihua Liu [a](#),

-Evaluating organic waste sources (spent coffee ground) as metal-free catalyst for hydrogen generation by the methanolysis of sodium borohydride*

Mustafa Kaya

Siirt University, Department of Chemical Engineering, Siirt, Turkey

-Ethanol Dehydrogenation to Acetaldehyde over Activated Carbons-Derived from Coffee Residue

Jeerati Ob-eye, Piyasan Praserttham, Bunjerd Jongsomjit*

Center of Excellence on Catalysis and Catalytic Reaction Engineering, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

-Thermal insulation improvement in construction materials by adding spent coffee grounds: An experimental and simulation study

A. Lachheb [a](#), A. Allouhi [b, *](#), M. El Marhoune [a](#), R. Saadani [a](#), T. Kousksou [c](#), A. Jamil [b](#),

M. Rahmoune [a](#), O. Oussouaddi [a](#)

-Thermophysical characteristics of cement-based mortar incorporating spent coffee grounds

Mouatassim Charai [a,b,†](#), Othmane Horma [a](#), Aboubakr El Hammouti [a,b](#), Ahmed Mezrhab [a](#), Mustapha

-Experiment on Activated Carbon Manufactured from Waste Coffee Grounds on the Compressive Strength of Cement Mortars

Sukjoon Na ¹, Sanghoon Lee ² and Sungmin Youn ^{1,*}