



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

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

**“STUDIO DI FATTIBILITÀ SUL REIMPIEGO DI MATERIALI DI SCARTO
INDUSTRIALE IN MATERIALI COMPOSITI A MATRICE CEMENTIZIA”**

**“FEASIBILITY STUDY ON THE REUSE OF INDUSTRIAL
BY-PRODUCTS FOR CEMENT-BASED COMPOSITES”**

Relatore:

Prof.ssa Valeria Corinaldesi

Correlatrice:

Dott.ssa Francesca Luzi

Tesi di Laurea di:

Nicola Giustozzi

INDICE

1. INTRODUZIONE	3
1.1 Generalità ed obiettivi	3
1.2 AZIENDE PARTECIPANTI	8
1.2.1 DELTA	8
1.2.2 HP COMPOSITES.....	8
2. CARATTERIZZAZIONE FISICA.....	10
2.1 DELTA	10
2.2 HP COMPOSITES.....	15
3. CARATTERIZZAZIONE CHIMICA	20
3.1 Analisi termica.....	20
3.1.1 Analisi termogravimetrica.....	20
3.1.2 Calorimetro a scansione differenziale.....	22
3.2 Analisi spettroscopica	24
3.3 Analisi Morfologica	26
4. PROVE MECCANICHE.....	30
4.1 Introduzione.....	30
4.2 Materiali Utilizzati	31
4.3 Mix Design.....	33
4.4 Fasi operative	34
4.5 Prove eseguite.....	36
4.5.1 Prova di flessione	36
4.5.2 Prova di compressione	37
4.6 Risultati delle prove	38
4.7 Diagrammi riepilogativi delle prove di flessione e di compressione sui getti	42
5. Prove chimico-fisiche	46
5.1 Materiali Utilizzati	46
5.2 Mix Design.....	48
5.3 Prove eseguite.....	49
5.3.1 Massa volumica.....	49
5.4 Risultati della prova	51
APPENDICE 1 - ANALISI GRANULOMETRICA POLVERE DI CARBONIO.....	52

APPENDICE 2 - ANALISI GRANULOMETRICA SCHIUMA PIÙ CARBONIO	58
APPENDICE 3 - RISULTATI PROVA A FLESSIONE ED A COMPRESSIONE A 3,7,28 GIORNI	64
Risultati della prova di flessione	64
Risultati della prova di compressione	67
Confronto dei risultati delle due prove.....	70
3 Giorni.....	70
7 Giorni.....	71
28 Giorni.....	73
6. Conclusione.....	75
7. BIBLIOGRAFIA.....	78
8. RINGRAZIAMENTI.....	81

1. INTRODUZIONE

Le preoccupazioni per i problemi ambientali, come il cambiamento climatico e l'esaurimento delle risorse, negli ultimi anni sono cresciute in tutto il mondo [1]. A tal riguardo, si sta cercando di orientare e promuovere una produzione sostenibile in termini di emissioni di anidride carbonica (CO₂), tale da limitare i notevoli impatti ambientali di una società sviluppata. Il settore dell'edilizia contribuisce alla crisi ambientale, in quanto è uno dei settori maggiormente responsabili del consumo di suolo, di energia e di risorse. La costruzione degli edifici e delle relative infrastrutture, le attività di estrazione, gli stabilimenti per la trasformazione e la lavorazione dei materiali e lo smaltimento dei materiali dopo il fine vita hanno consumato notevoli e sempre maggiori quantità di territorio e di energia [17,19].

In questa ottica, l'edilizia dei nostri giorni deve affrontare una sfida nuova: il recupero ed il riciclo dei propri rifiuti. È una battaglia contro consumi e sprechi, fondamentale nella riduzione dei costi economici e ambientali del settore, che fa germogliare un'edilizia finalmente sostenibile e rispettosa dell'ambiente.

1.1 Generalità ed obiettivi

La società odierna è gravata da molteplici problemi, tra cui il consumo eccessivo di risorse e materie prime. Ciò comporta l'aumento esponenziale dei rifiuti e la loro successiva difficoltà nello smaltimento.

Inoltre, nel territorio italiano vi sono pochi impianti specializzati per il trattamento dei materiali dopo il loro fine vita e per questo viene privilegiato l'abbandono in discarica, in alcuni casi abusive, creando gravi danni all'ambiente ed all'economia per il risanamento [9,5] e tra i settori maggiormente coinvolti troviamo quello edile.

Dai materiali residuali al termine del ciclo costruttivo è molto difficile e complesso ricavare degli scarti puri, che possono essere riutilizzabili. Classificati come rifiuti "speciali", i residui del ciclo costruttivo sono inevitabilmente destinati allo smaltimento [9,16,27].

Per questo motivo, le attività di costruzione e demolizione sono la causa di oltre un terzo della produzione di rifiuti in tutta Europa, arrivando a raggiungere in un solo anno, un volume pari a

500 milioni di tonnellate [10], con un impatto significativo dal punto di vista ambientale e degli alti costi per la collettività in termini di salute e spese per smaltimenti e bonifiche [27].

Prendendo in considerazione il ciclo di vita degli edifici, il settore edile è responsabile per:



Figura 1.1 – Impronta ecologica del settore edile (Eurostat 2016) [10].

I materiali di scarto provenienti dal settore delle costruzioni ed i materiali provenienti dalla demolizione di quest'ultimi sono principalmente costituiti da laterizi, murature, frammenti di conglomerati cementizi anche armati, rivestimenti e prodotti ceramici, scarti dell'industria di prefabbricazione di manufatti in calcestruzzo anche armato, frammenti di sovrastrutture stradali o ferroviarie, conglomerati bituminosi fresati a freddo, intonaci ed allettamenti [16,27,28].

Data la lunga durata di vita degli edifici, è importante incentivare una progettazione, che nel rispetto delle leggi di tutela del territorio (*T.U. Ambiente - D.Lgs. 152/2006*) [31], sia anche attenta all'ecosistema, così da ridurre l'impatto ambientale e migliorare la durabilità e la riciclabilità dei loro componenti [10,15].

Proprio per questo nasce il concetto di edilizia circolare, che deriva dall'applicazione dell'idea di economia circolare al mondo dell'edilizia, cioè un ciclo produttivo in cui i rifiuti tornano ad essere risorse e dove gli scarti sono ridotti al minimo, per poter così arrivare ad ottenere uno sviluppo economico sostenibile, sociale ed ambientale [7,10,18,20].

Avvicinarsi a un modello di edilizia circolare, però, significa innovare i processi, dalla produzione alla trasformazione dello scarto e cambiare il modo in cui si concepiscono i prodotti stessi. In definitiva, è necessario passare dal concetto "crei-consumi-demolisci" a quello delle "3R": ridurre, riutilizzare e riciclare. Secondo questa nuova configurazione produttiva, l'utilizzo delle materie prime è ridotto al minimo, mentre quello di prodotti o delle loro componenti è massimizzato. [7,18,20,24]

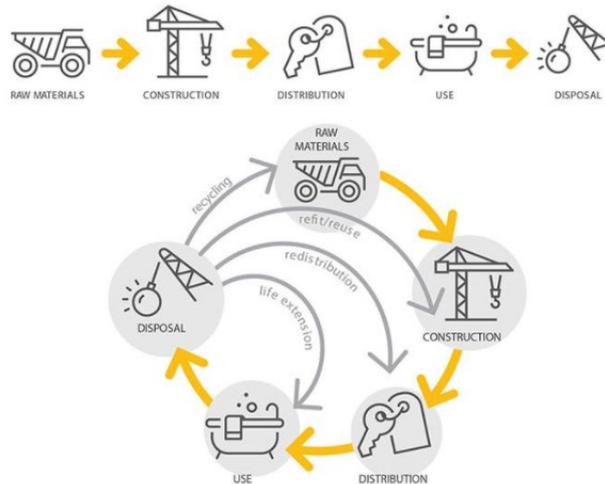


Figura 1.2 - Confronto tra edilizia lineare e circolare (Agenzia europea dell'ambiente [10]).

Aumentare la percentuale di riciclo dei rifiuti edili è dunque un passo fondamentale per ridurre le elevate quantità di scarto prodotte nel campo delle costruzioni e raggiungere il traguardo di una edilizia circolare [10].

Ad oggi, purtroppo, la soluzione più diffusa in Italia per la gestione dei rifiuti edili rimane quella dello smaltimento in discarica, l'opzione meno sostenibile e più costosa. I costi elevati di questo approccio dipendono dai volumi da smaltire, dalla distanza dal cantiere e dall'area di stoccaggio [25,26].

Sempre più attenzione viene riservata anche alla seconda vita dei detriti e delle macerie da cantiere, inerti utilizzati per la produzione di nuovi prodotti.

Il riciclo dei materiali edili sarebbe un'alternativa più che sostenibile e valida dello smaltimento. Tuttavia, non è ancora una strategia diffusa [19].

Questo è dovuto al fatto che al momento sul nostro territorio nazionale non c'è un servizio specializzato e ben diffuso e per questo l'ANCE (Associazione Nazionale dei Costruttori Edili) sta diffondendo l'informazione su queste tematiche ed ha ideato delle proposte per incentivare il recupero e l'acquisto di materiali recuperati [9,12].

Recuperare gli scarti richiede comunque di sostenere dei costi, come ad esempio quelli per la demolizione selettiva, che è il primo passo per poter avviare un processo di edilizia circolare. Per demolizione selettiva si intende proprio lo smantellamento, la separazione e lo smaltimento nelle

diverse componenti dei vari elementi. Per far questo spesso si fa ricorso a dei macchinari altamente specializzati, che sicuramente hanno un costo di acquisto o noleggio particolarmente elevato [11,15].

Tuttavia, con l'introduzione e l'utilizzo dell'edilizia circolare, è possibile avere subito vantaggi economici nell'acquisto dei materiali inerti riciclati, rispetto al costo degli inerti che hanno dei prezzi in continuo aumento, oltre naturalmente al vantaggio per l'ambiente che beneficia della riduzione di emissioni di CO₂ [7,8].

Oggi in campo edile, sta prendendo piede l'utilizzo di materie prime e prodotti realizzati e riciccati, oltre che dallo smaltimento dei rifiuti edili, anche dagli scarti provenienti da altre filiere industriali. Tra le materie riciclate più utilizzate ci sono ad esempio la gomma, la plastica, gli inerti e il legno, la lana di roccia, utilizzati per realizzare nuovi prodotti, come isolanti o gli stessi prodotti, ma da riciclo [7,8].

Su questo filone di ricerca è nata una collaborazione tra diverse grandi imprese e l'Università Politecnica delle Marche. L'obiettivo di questo lavoro di tesi è quello di caratterizzare e rivalorizzare i diversi scarti forniti dalle differenti aziende. La rivalorizzazione prevede un nuovo rimpiego delle materie seconde, recuperate tramite le attività di riciclaggio/rivalorizzazione e reimmesse in un altro ciclo di produzione come materie prime seconde.

La prima fase è quella di scelta dei campioni di rifiuti da utilizzare. Tra i vari campioni arrivati all'università sono stati esaminati in un primo momento gli scarti di due imprese da poter valorizzare nella filiera edilizia:

1. **Scatolificio SIOS** - recupero di cellulosa e cartone macerato per produzione di malte coibenti e materiali da costruzione a base biologica;
2. **Fileni** - recupero di scarti quali gusci delle uova e piumaggio con la finalità di produrre intonaci e materiali da costruzione a base biologica con proprietà termo-acustiche migliorate.

Gli scarti prodotti da queste due aziende però sono sembrati più adatti ad essere valorizzati invece, nella filiera packaging e per questo si è deciso di prendere in considerazione altre tre imprese partecipanti alla collaborazione, con scarti più affini alla filiera 'edilizia':

1. **Save As** (produzione di mattoni bio realizzati a partire da sigarette di scarto termocompattate);
2. **Delta** (produzione di scarti di lavandini in materiale composito);
3. **HP Composites** (produzione di scarti di materiale composito preimpregnato, scarti di frammenti di fibra di carbonio e scarti di schiume).

In questo elaborato verranno quindi descritte le procedure e tutte le prove eseguite sui campioni di scarto inviati all'Università da parte delle aziende **Delta** e **HP Composites**. Lo scopo di questo elaborato è quindi, quello di descrivere il processo seguito dalla scelta dei campioni fino al loro reimpiego.

1.2 AZIENDE PARTECIPANTI

1.2.1 DELTA

La **Delta S.R.L.**, nata nel 1997, con sede a Montecassiano, è un'azienda adibita alla vendita all'ingrosso di materiale igienico-sanitario ed alla produzione di lavelli da cucina in materiale composito.

I prodotti realizzati vengono collocati sul mercato internazionale con i marchi Telma e Plados e vengono esportati in oltre 45 paesi e nei 5 continenti.

Oltre agli stabilimenti produttivi di Montecassiano, la Delta ha stabilimenti nel comune di Montelupone, dove sono localizzati gli impianti per la produzione di materia prima e dove è presente anche il laboratorio tecnologico in cui operano sia personale interno sia personale esterno, coordinato con Università ed enti locali.

Il laboratorio è provvisto di importanti apparecchiature e strumentazioni che ha portato l'azienda insieme ad altre primarie imprese del territorio ad aderire al laboratorio condiviso LabTec, coordinato dall'università di Camerino. L'obiettivo di questa iniziativa è quello di mettere a disposizione delle aziende locali e non solo le apparecchiature delle singole aziende per l'esecuzione di un ampio spettro di test ed analisi di laboratorio [13].

1.2.2 HP COMPOSITES

HP Composites nasce nel 2010 ed ha sede ad Ascoli Piceno ed è un'azienda specializzata nella produzione di componenti in fibra di carbonio, per il settore motorsport ed auto motive, e nella produzione di materiale composito avanzato.

La ricerca continua e l'innovazione costante sono elementi chiave alla base della strategia di questa impresa.

L'obiettivo futuro dell'azienda è quello, tramite collaborazione con enti esterni, di progredire nel settore dei materiali compositi e delle tecnologie, arrivando così alla realizzazione di componenti strutturali sempre più leggere ed efficienti anche per la produzione successiva in serie.

HP Composites è un'azienda che promuove varie collaborazioni con istituti di ricerca e la partecipazione a progetti di innovazione a lungo termine, finanziati dal Governo italiano e dall'Unione Europea, come il lavoro descritto da questo elaborato [14].

DELTA DELTA

- Anno di fondazione: 1997
- Sede: Montecassiano
- Specializzata nella produzione di apparecchi igienico sanitari e di lavelli da cucina in materiale composito.



HP COMPOSITES

- Anno di fondazione: 2010
- Sede: Ascoli Piceno
- Specializzata nella produzione di component in fibra di carbonio per il settore motorsport ed auto motive e nella produzione di materiale composito avanzato.

Figura 1.3 - Aziende partecipanti [13,14].

2. CARATTERIZZAZIONE FISICA

In questo capitolo viene descritto il passaggio successivo alla fase di scelta dei campioni, ovvero la loro caratterizzazione fisica.

Dopo essere stati selezionati, i campioni di rifiuti vengono analizzati sia dal punto di vista fisico sia da quello chimico, per poter comprendere al meglio la loro composizione e così poter avere già una prima idea su un loro possibile impiego. Successivamente verranno fatte delle prove, meccaniche e fisiche, per verificare se sono adatti per quell'impiego.

La prova eseguita, per controllare i campioni dal punto di vista fisico, è quella dell'analisi granulometrica, eseguita con l'ausilio di setacci di diverso diametro e che ha come risultato la curva granulometrica, che descrive come è composto il materiale testato.

I risultati e la procedura eseguita vengono descritti e riportati nei successivi sotto capitoli in base all'azienda di appartenenza.

2.1 DELTA

Per quanto riguarda l'azienda Delta sono stati individuati due possibili impieghi promettenti per lo scarto di polvere da taglio di lavandini in materiale composito (composizione presunta: 80% circa costituito da quarzo ed il restante 20% da resina acrilica).

L'azienda ha inviato una campionatura da 20 kg all'Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica, per effettuare dei test preliminari volti alla valutazione di fattibilità del reimpiego per la produzione di malte, intonaci coibenti e di manufatti per l'arredo urbano con potenziali ricadute positive in termini di coinvolgimento di altre aziende marchigiane, destinatarie dei prodotti innovativi messi a punto (rispettivamente Diasen per gli intonaci e Sirio Group per arredo urbano).

All'interno della campionatura inviata erano presenti due frazioni di scarto di diversa pezzatura (vedi Fig. 2.1a-b).



Fig. 2.1– Scarti di produzione di lavelli: frazione grossolana (a) e frazione fine (b).

La prima fase della caratterizzazione ha riguardato l'analisi granulometrica mediante setacciatura delle due frazioni denominate rispettivamente 'Frazione fine' e 'Frazione grossolana'.

I risultati della prova sono riportati in Fig. 2.2 e 2.3.

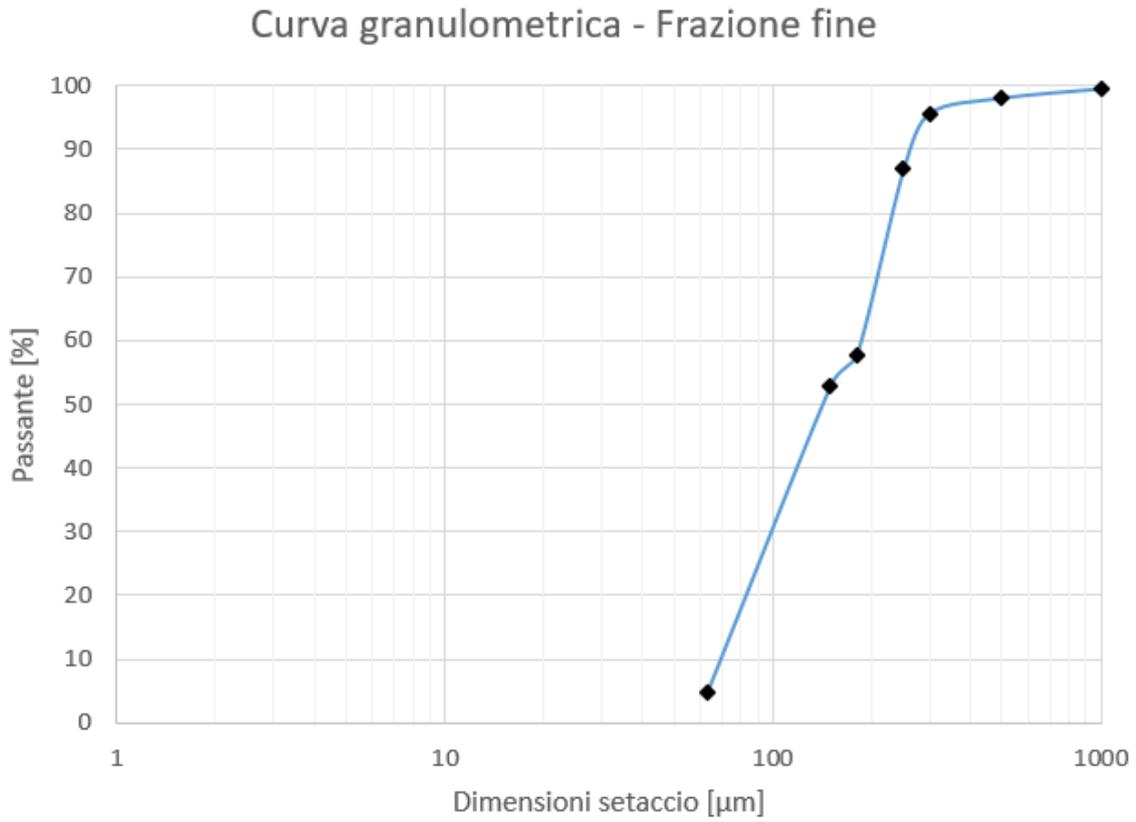


Fig. 2.2 – Distribuzione granulometrica delle particelle della “Frazione fine”.

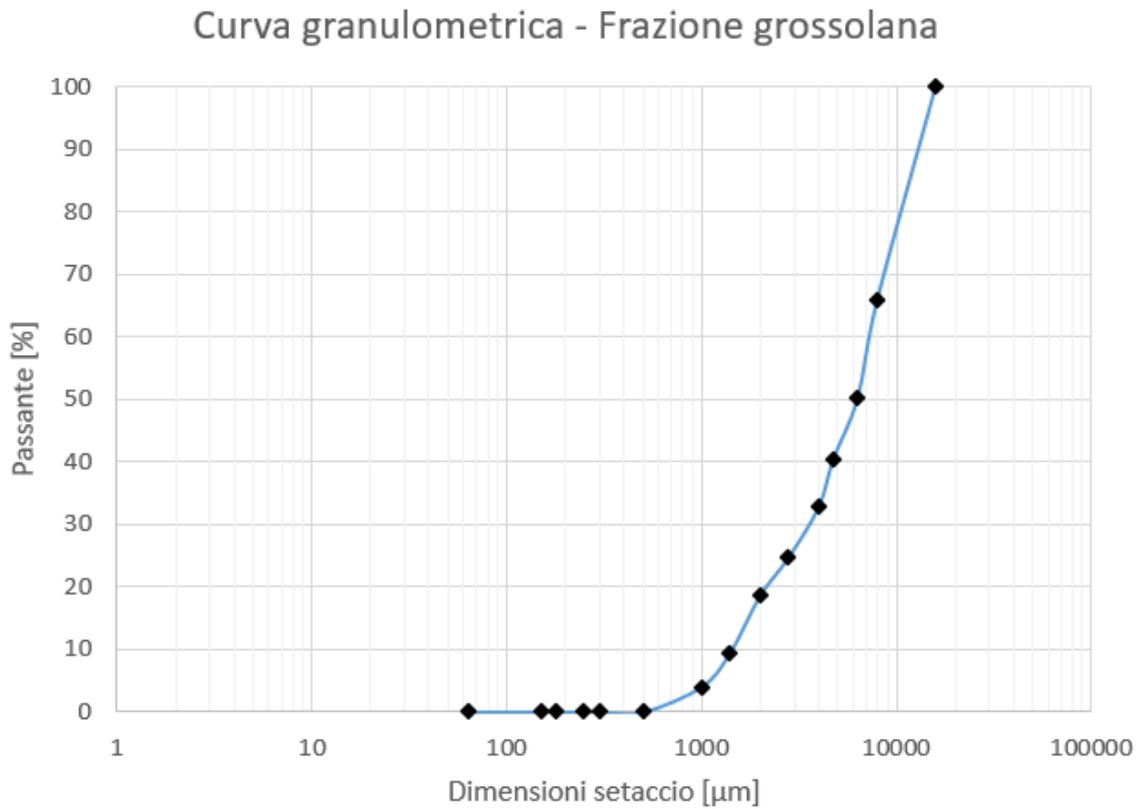


Fig. 2.3 – Distribuzione granulometrica delle particelle della “Frazione grossolana”.

Come si nota dai risultati riportati in Fig. 2.3 all'interno del campione grossolano è presente circa il 25% di materiale con dimensioni inferiori ai 4,0 mm e quindi potenzialmente impiegabile tale quale in sostituzione dell'inerte ordinario per il confezionamento di malte. Nel campione fine invece circa il 98% del materiale è passante al setaccio con apertura 0,500 mm.

Sulla frazione fine è stata quindi condotta una serie di prove finalizzate alla caratterizzazione chimica della campionatura inviata.

Le prove sono state condotte mediante analisi termica differenziale e termogravimetrica.

I risultati delle prove sono riportati in Figura 2.4. Avendo rilevato alcune variabilità il test è stato ripetuto sei volte in modo da ottenere un dato statisticamente significativo.

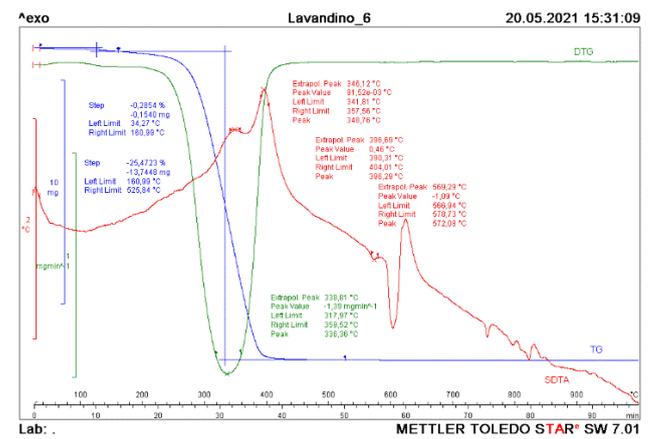
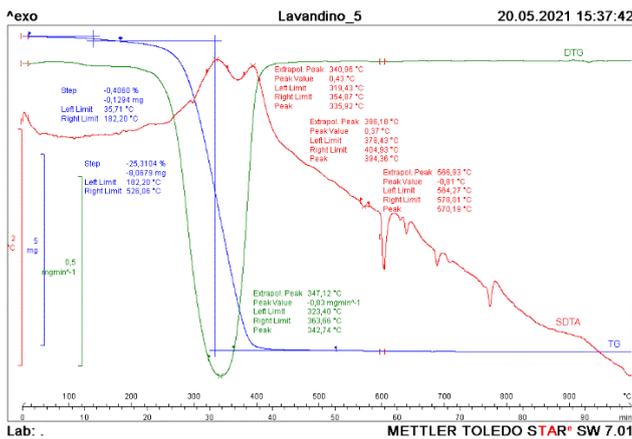
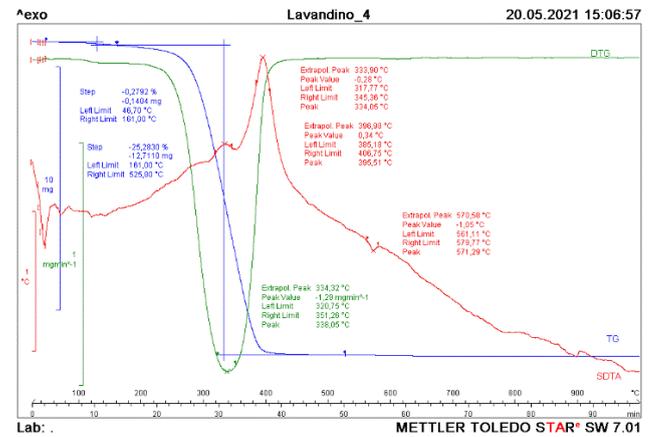
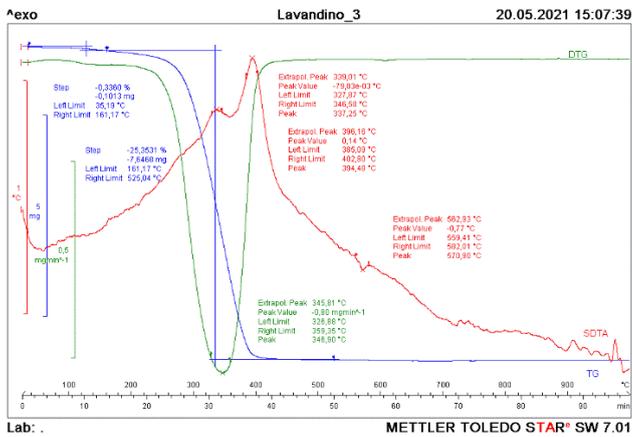
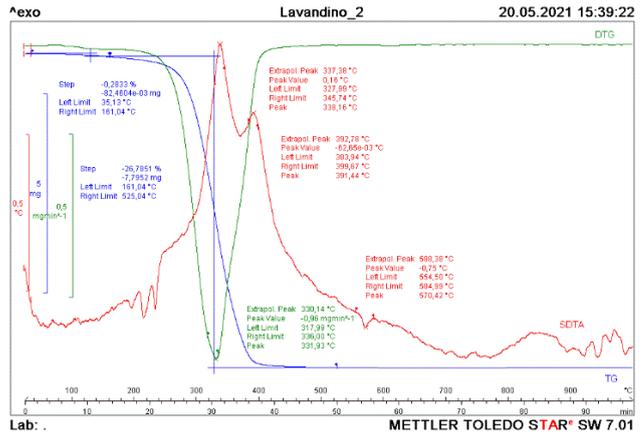
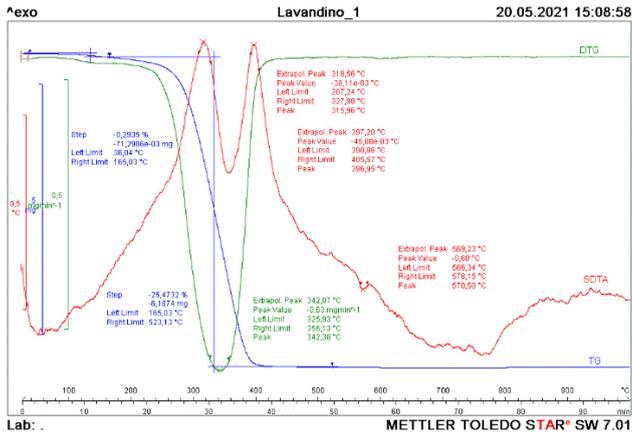


Fig. 2.4 – Risultati dell'analisi termica differenziale e termogravimetrica.

Sulla base dei risultati sperimentali risulta che la componente organica (costituita da resina acrilica) all'interno del campione è pari al $25,48 \pm 0,58 \%$.

La frazione fine potenzialmente può essere impiegata come filler per malte ed intonaci, allo scopo di conferire una certa plasticità all'impasto e di alleggerirlo. Va valutato l'impatto di questa parziale sostituzione in termini di decadimento delle proprietà meccaniche e della capacità di assorbimento capillare della malta.

2.2 HP COMPOSITES

L'azienda HP Composites ha inviato tre sacchi di materiale di scarto (vedi Fig. 2.5) contenenti rispettivamente una polvere di carbonio (a), uno sfido contenente una miscela di carbonio e di schiuma (b) e degli scarti di tessuti polimero-impregnati di scarto (prepeg) (c).



Fig. 2.5 – Materiale inviato dall'azienda HP Composites: polvere di carbonio (a), miscela di carbonio e di schiuma (b) e scarti di tessuti polimero-impregnati di scarto (prepeg) (c).

Come primo passo il campione della polvere di carbonio è stato caratterizzato da un punto di vista granulometrico. Vista l'eterogeneità del materiale è stato fatto un esame visivo dei trattenuti dei vari setacci a completamento della rilevazione meramente quantitativa.



Analisi granulometrica polvere di carbonio

Fig. 2.6 – Materiale trattenuto della polvere di carbonio nei diversi setacci.

I risultati dell'analisi vengono riportati nell'appendice 1 - alla fine di questo elaborato.

Dall'esame visivo risulta che:

- oltre 4,0 mm sono presenti pezzi grossolani da scartare;
- tra 4,0 mm e 0,5 mm la polvere di carbonio è mescolata con piccoli grumi di fibre di carbonio e con frammenti di natura metallica;
- la polvere di carbonio è presente in modo esclusivo solo al di sotto dell'apertura di 0,500 mm.

I risultati quantitativi dell'analisi granulometrica del materiale nel suo complesso sono riportati in Fig. 2.7.

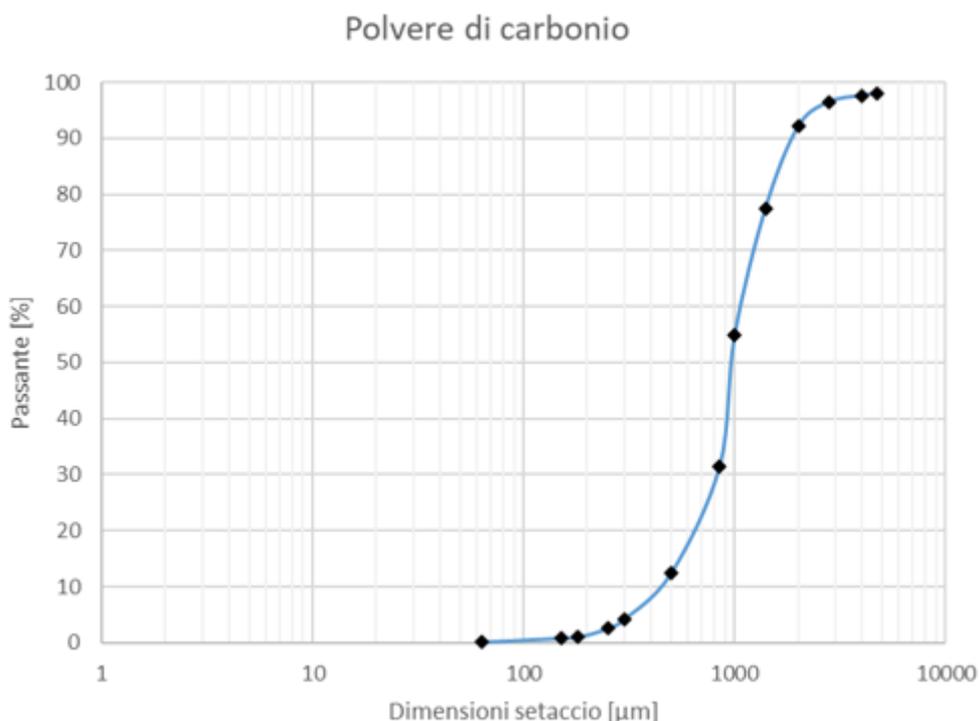


Fig. 2.7 – Risultati dell’analisi granulometrica condotta sulla frazione “Polvere di carbonio”.

Dal grafico si nota come la porzione di materiale passante al setaccio di 0,5 mm, costituita dalla sola polvere di carbonio, è pari a circa il 12-13% del campione complessivo. La presenza volumetrica sarà invece ovviamente maggiore vista la differente massa volumica degli elementi metallici, che arricchiscono le frazioni trattenute ai setacci superiori.

Per aumentare la frazione di materiale riutilizzabile e valorizzarlo, si suggerisce di effettuare una separazione mediante elettrocalamita degli elementi metallici a partire dalla frazione di materiale compresa tra 4,0 mm e 0,5 mm, cercando al contempo di districare i grumi di fibre, ad esempio macinandoli con un mulino a dischi.

Come secondo passo l’altra tipologia di materiale, cosiddetta ‘schiuma più carbonio’, è stata caratterizzata da un punto di vista granulometrico. Vista l’eterogeneità del materiale è stato fatto un esame visivo dei trattenuti dei vari setacci, a completamento della rilevazione meramente quantitativa.



Analisi granulometrica schiuma più carbonio

Fig. 2.8 – Materiale trattenuto della schiuma più carbonio nei diversi setacci.

I risultati dell'analisi vengono riportati nell'appendice 2 - alla fine di questo elaborato.

Dall'esame visivo risulta che:

- oltre 2,0 mm sono presenti ciuffi di fibre semi-incollate;
- tra 5,0 mm e 0,5 mm sono presenti frammenti di natura metallica;
- a partire dal setaccio con apertura 4,0 mm fino alle aperture più piccole sono presenti particelle di materiale organico di colore scuro (presumibilmente dovuto alla presenza di carbonio da confermare con analisi chimica) di dimensioni decrescenti fino ad arrivare alla cosiddetta 'polvere di carbonio';
- a partire dal setaccio con apertura 4,0 mm fino ai 0,300 mm, sono presenti particelle di materiale organico di colore chiaro (presumibilmente dovuto alla presenza di schiume la cui composizione chimica è da confermare con analisi successive);
- la cosiddetta 'polvere di carbonio' è presente in modo esclusivo solo al di sotto dell'apertura di 0,5 mm.

I risultati quantitativi dell'analisi granulometrica del materiale nel suo complesso sono riportati in Fig. 2.9.

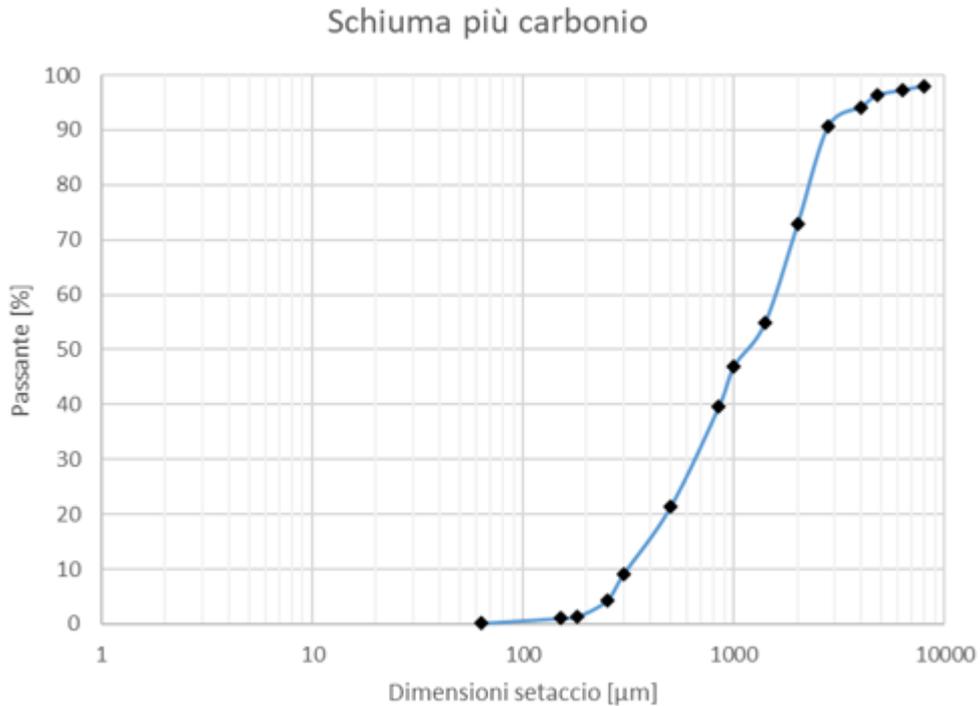


Fig. 2.9 – Risultati dell’analisi granulometrica condotta sulla frazione “Schiuma più carbonio”.

Non è stata presa in esame la campionatura di materiale prepeg, costituita da brandelli di tessuto pre-impregnato con resine, poiché il suo reimpiego prevede un trattamento di pirolisi. Tale trattamento si rende necessario per poter eliminare la resina residua e recuperare in tal modo il tessuto sottostante. In questo modo le fibre recuperate possono essere riutilizzate sotto forma di fibre corte. Tale trattamento è piuttosto oneroso da un punto di vista economico e prima di procedere si ritiene necessaria una valutazione preliminare di convenienza e di sostenibilità del processo descritto.

3. CARATTERIZZAZIONE CHIMICA

In questo capitolo viene trattato il passaggio successivo alla caratterizzazione fisica, ovvero quella chimica. Questa prova viene svolta attraverso l'analisi termica, con lo scopo di comprendere quali sono i materiali e le componenti chimiche che costituiscono il materiale.

L'analisi è stata eseguita solo sui campioni di scarto dell'azienda HP Composites, perché all'analisi granulometrica sono stati rilevati dei frammenti grossolani di lucentezza metallica e per questo si è preferito comprendere, in maniera più approfondita la composizione del materiale.

3.1 Analisi termica

I materiali in esame, denominati "Polvere di carbonio" e "Schiuma più carbonio", sono stati caratterizzati termicamente utilizzando la bilancia termogravimetrica (TGA) ed il calorimetro a scansione differenziale (DSC).

3.1.1 Analisi termogravimetrica

L'analisi termogravimetrica della polvere di composito contenente "Polvere di carbonio" e la miscela di composito di "Schiuma più carbonio" è stata eseguita sottoponendo i campioni ad una scansione termica dinamica in azoto ed in aria utilizzando un analizzatore termogravimetrico SEIKO INSTRUMENTS Exstar 6300 (analisi eseguite grazie alla collaborazione del Prof. Luigi Torre, responsabile del Laboratorio Di Scienza e Tecnologia Dei Materiali, del Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'Università Degli Studi Di Perugia).

1. Azoto: scansione termica dinamica da 30°C a 800°C con una velocità di riscaldamento pari a 10 °Cmin⁻¹ (azoto 250 ml min⁻¹).
2. Aria: scansione termica dinamica da 30°C a 900°C con una velocità di riscaldamento pari a 10 °Cmin⁻¹ (aria 250 ml min⁻¹).

La Fig. 3.1 mostra le curve TGA in atmosfera inerte dei campioni “Polvere di carbonio” (a) e “Schiuma più carbonio” (b) (2 ripetizioni).

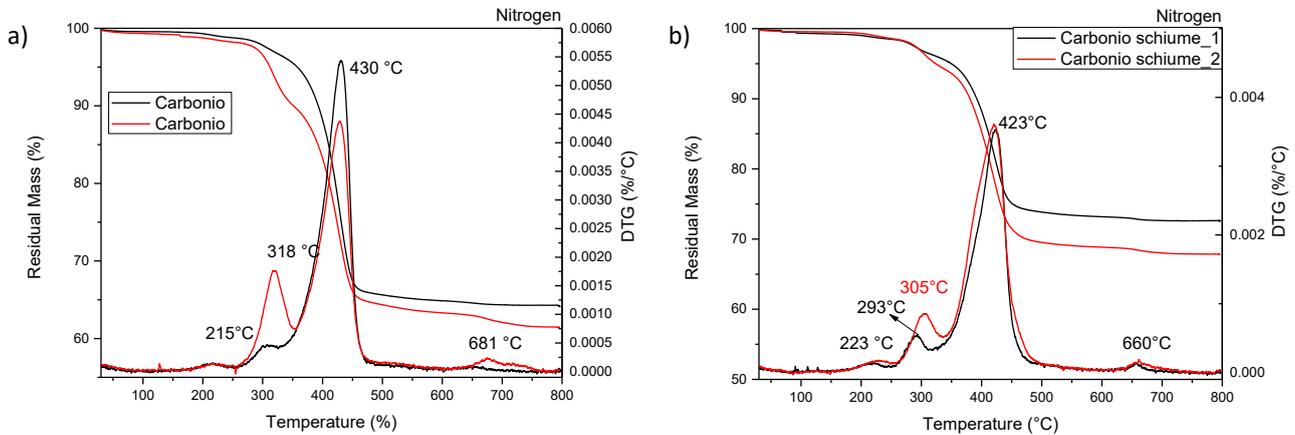


Fig. 3.1 - TGA in azoto del “Polvere di carbonio” (a) e del “Schiuma più carbonio” (b)

La Fig. 3.1 mostra che i campioni in esame si decompongono con un processo a multi-step. A 30°C si ha una prima perdita di massa. Il secondo picco di degradazione si trova a 215°C (nel caso del campione denominato “Polvere di carbonio”) e 223 °C (per il campione “Schiuma più carbonio”). Il terzo picco di degradazione invece è centrato a circa 318 °C nel caso del “Polvere di carbonio” e a circa 300°C nel caso del “Schiuma più carbonio”. Il picco principale di degradazione si trova per entrambi i materiali a circa 430 °C. Invece, il quinto ed ultimo picco si registra per valori superiori ai 660 °C. Dalle curve riportate in Fig. 3.1 si osserva che per ogni formulazione sono stati analizzati due campioni differenti della stessa formulazione, i materiali sono stati campionati da due zone differenti dello stesso contenitore. Le differenze osservabili confrontando le due diverse prove sono dovute ad una disomogeneità del materiale dentro lo stesso contenitore.

La Fig. 3.2 mostra le curve TGA in aria dei campioni polvere di carbonio (a) e schiuma più carbonio (b). Un simile andamento termodegradativo multistep è stato osservato analizzando i campioni in aria.

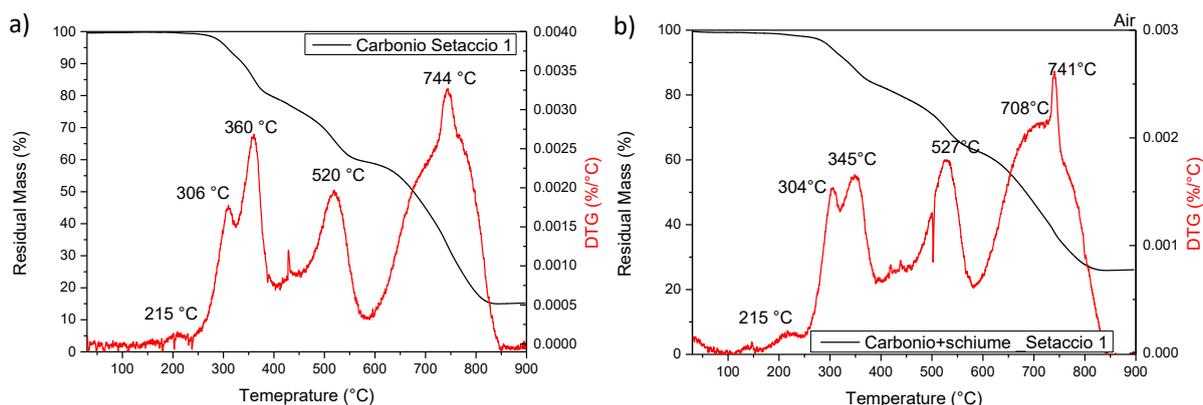


Fig. 3.2 - TGA in aria del "Polvere di carbonio" (a) e del "Schiuma più carbonio" (b).

L'analisi TGA ha evidenziato una sostanziale similitudine tra le due curve di perdita di peso (e relative derivate), sia in aria che in azoto, per i due diversi campioni, ad eccezione di un diverso residuo a fine test (900°C) maggiore nel caso del campione "Schiuma più carbonio" (pari a circa il 30%), mentre nel campione "Polvere di carbonio" la massa residua in aria è pari a circa il 15% in peso. Per entrambi, analizzando in dettaglio la curva di perdita di peso dopo gli 850°C, è confermato un guadagno di peso piuttosto che una perdita, risultato sperimentale che fa pensare ad una ossidazione di un elemento metallico. In merito alla possibile composizione, il picco presente con maggiore intensità (più elevato valore della derivata della perdita di massa) e sostanzialmente coincidente per entrambi i materiali, lascia intendere che la matrice sia comune e simile al profilo di perdita di una resina epossidica [2]. Non essendo nota la natura chimica della matrice e il sistema indurente utilizzato, non è possibile andare a determinare con certezza se il materiale epossidico abbia, di per sé, una degradazione multistep oppure no.

3.1.2 Calorimetro a scansione differenziale

L'analisi calorimetrica è stata effettuata con calorimetro a scansione differenziale (DSC) della TA INSTRUMENT modello Q200 (analisi eseguite grazie alla collaborazione del Prof. Luigi Torre, responsabile del Laboratorio Di Scienza e Tecnologia Dei Materiali, del Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'Università Degli Studi Di Perugia) impostando la prova in modulato, al fine di valutare i fenomeni reversibili e non reversibili che avvengono durante una scansione calorimetrica: tale modalità è utile infatti a separare eventuali processi termici sovrapposti, quali possono essere eventi endotermici di fusione/evaporazione in sovrapposizione ad eventi legati alla cinetica del

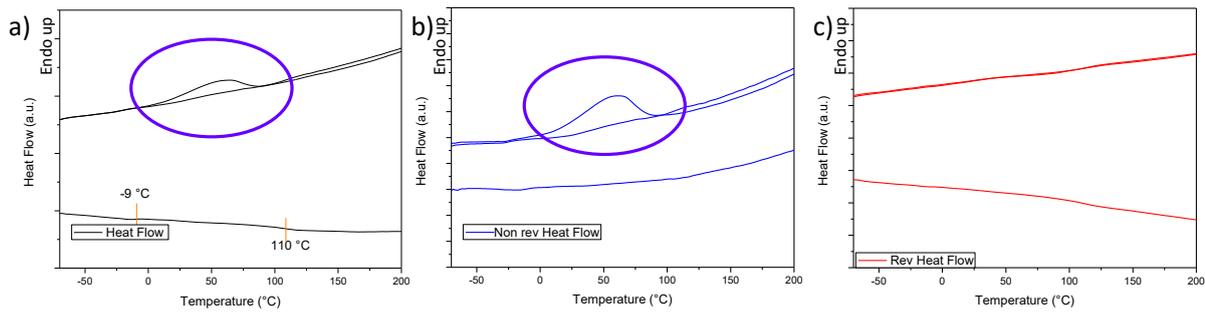
processo (come eventuali transizioni vetrose). Le prove dinamiche in temperature sono state riportate in Fig. 3.3, ed eseguite applicando la seguente rampa dinamica in temperatura:

- Equilibrate at -80.00 °C
- Modulate ± 0.80 °C every 60 s
- Ramp 5.00 °C/min to 200.00 °C
- Equilibrate at 200.00 °C
- Modulate ± 0.80 °C every 60 s
- Ramp 5.00 °C/min to -80.00 °C
- Equilibrate at -80.00 °C
- Modulate ± 0.80 °C every 60 s
- Ramp 5.00 °C/min to 200.00 °C

Il primo riscaldamento serve ad annullare la storia termica del prodotto (o a verificare possibili eventi termici non conclusi, come una evaporazione oppure una cura residua), il riscaldamento successivo a determinare eventuali transizioni termiche caratteristiche dei materiali polimerici in esame.

Nella Fig. 3.3 vengono riportati i flussi di calore (a) della parte non reversibile (b) e della parte reversibile (c) per il campione "Polvere di carbonio" e quello "Schiuma più carbonio". Nella fig. 3.3 l'ellisse viola vuota sta ad indicare un picco endotermico visibile nella parte non reversibile del flusso di calore. Tale comportamento indica un processo non reversibile quindi una perdita di alcune sostanze/materiali a basse temperature circa a 50 °C, come già osservato nell'analisi termogravimetrica. Come riportato nelle sezioni (a) i due diversi sistemi mostrano due temperature di transizione vetrosa, posizionate a -9 °C e 110 °C. La prima T_g è dovuta presumibilmente alla presenza di una frazione di gommosa, mentre la T_g osservata a 110 °C può dirsi legata alla matrice epossidica. Come nel caso dell'analisi TGA, i due materiali non mostrano sostanziali differenze in termini di flussi termici e quindi si ritiene che la loro composizione sia molto simile (almeno in termini di sostanze reagenti ad un flusso riscaldante): il picco endotermico, osservabile solo in prima scansione, fa pensare all'evaporazione di un coadiuvante di processo (un possibile distaccante) piuttosto che alla evaporazione di solvente/umidità.

Carbonio



Carbonio+schiuma

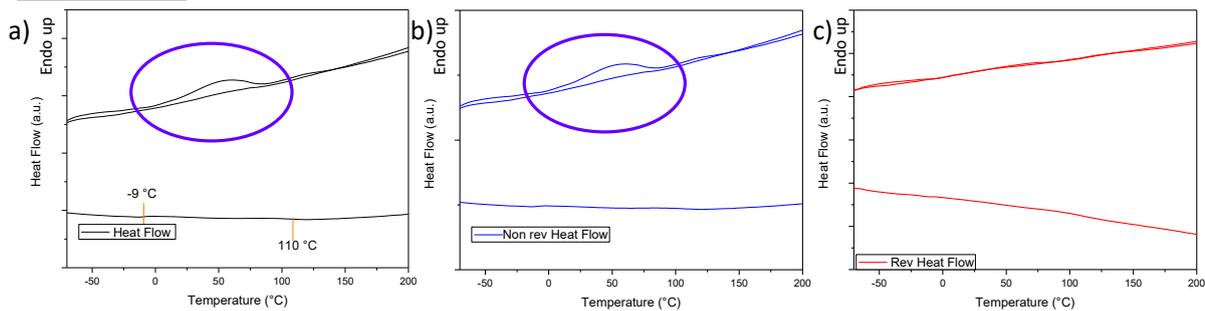


Fig. 3.3 - Flusso di calore (a), della parte non reversibile (b) e della parte reversibile (c) del campione "Polvere di carbonio" e di quello "Schiuma più carbonio".

3.2 Analisi spettroscopica

I campioni sono stati analizzati con lo spettrofotometro Jasco FT-IR 615 (analisi effettuata grazie alla collaborazione del Prof. Luigi Torre, responsabile del Laboratorio Di Scienza e Tecnologia Dei Materiali, Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'Università Degli Studi Di Perugia), gli spettri sono stati acquisiti in modalità trasmissione da 600 a 4000 cm^{-1} con risoluzione di 4 cm^{-1} dopo aver realizzato le pasticche di Kbr. La Fig. 3.4 mostra gli spettri FTIR da 4000 a 600 cm^{-1} (a) e 2000 a 600 cm^{-1} dei due diversi campioni in oggetto. Gli spettri IR di rivelano la presenza di bande di assorbimento caratteristiche per lo stretching $\text{Ar}-\text{C}=\text{C}-\text{H}$ e flessione $-\text{CH}_2$ e $-\text{CH}_3$ asimmetrico e simmetrico, $-\text{C}-\text{Ar}-\text{O}-\text{C}$ stretching e resina epossidica $\text{CH}_2-(\text{O}-\text{CH}-)$ vibrazione di allungamento dell'anello (Tabella 1). La presenza di gruppi epossidici negli spettri IR è stata dimostrata dalla presenza della banda a 3.056 cm^{-1} (ν C-H epossidica) e 915 cm^{-1} (γ C-O epossidica) [3].

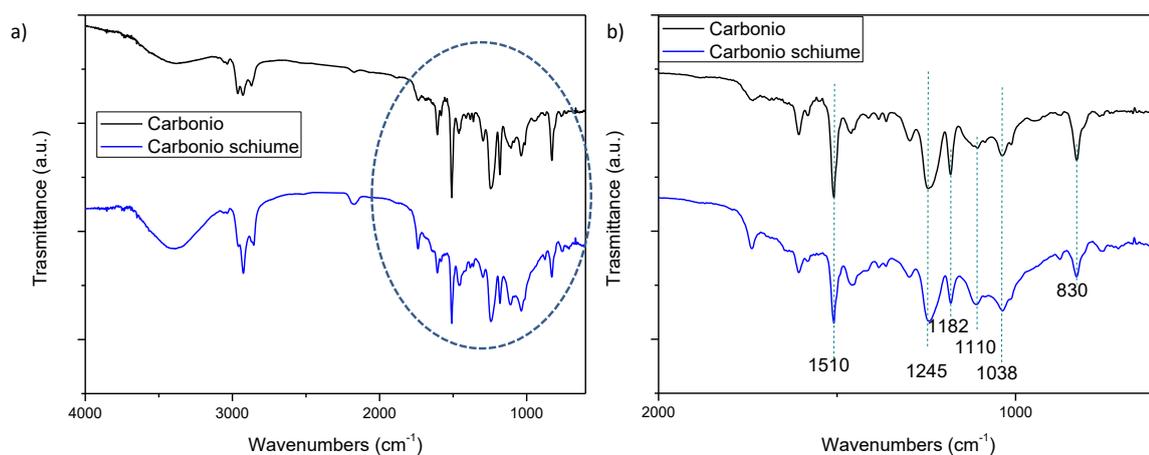


Fig. 3.4 - Spettri IR da 4000 a 600 cm^{-1} (a) e 2000 a 600 cm^{-1} del campione "Polvere di carbonio" e di quello "Schiuma più carbonio".

Tab 3.1 - Bande di assorbimento FT-IR per la resina epossidica [3,4].

IR (frequency, cm^{-1})	GY250 Epoxy resin
Ph-OH str	3,510 weak
C-OH str	-
-CH-(O-CH ₂) epoxy, str	3,056
Ar =C-H str	3,030
-NH ₂ , -NH str	-
-NH ₂ , -NH bend	-
-C assym str	2,925, 2,967
-CH ₂ -, -CH ₃ - sym str	2,855, 2,872
Ar -C-H overtone	2,000-1,600
-OH bend	-
Ar -C=C-H str	1,607, 1,580, 1,510
-CH ₂ -, -CH ₃ - bend	1,455, 1,362
-C-C-O-C- str	1,247, 1,184
-C-N- str	-
-O-C-C str	1,132
-C-O-C- str	1,036
CH ₂ -O-CH epoxy, bend	915
Ar 1,4 substit. ring and C-O-C (oxirane)	831
Ar =C-H, C-H,	830, 773
-C-H, -N-H bend	574, 638

3.3 Analisi Morfologica

L'analisi morfologica dei due campioni polvere di carbonio e schiuma più carbonio è stata eseguita mediante microscopio elettronico a scansione FESEM Zeiss Supra 25 (analisi effettuata grazie alla collaborazione del Prof. Luigi Torre, responsabile del Laboratorio Di Scienza e Tecnologia Dei Materiali, Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'Università Degli Studi Di Perugia), le relative immagini sono riportate in Fig. 3.5 e Fig. 3.6. È interessante notare come oltre alla presenza di fibre di carbonio e di fibre di vetro (Fig. 3.5a e 3.5c), siano stati trovati materiali porosi (Fig. 3.5b e 3.5e), residui con superficie completamente liscia (Fig. 3.5f, presumibilmente metallo) e residui di resina con aspetto non esclusivamente fragile, ma tenacizzata da particelle di presumibile natura gommosa (Fig. 3.5d).

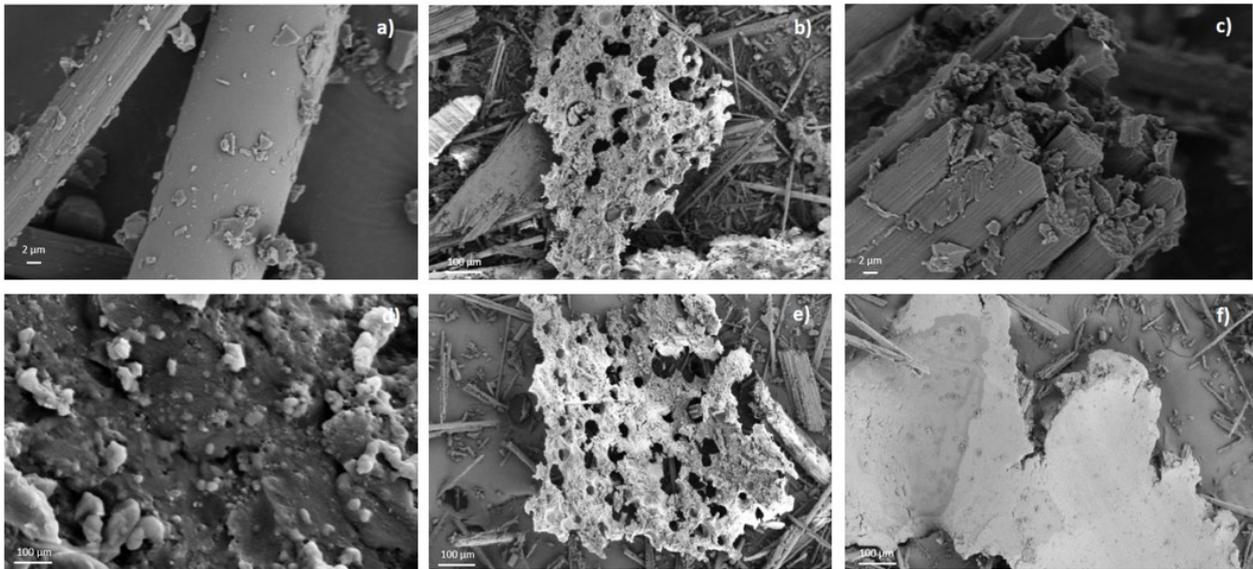


Fig. 3.5 - Immagini FESEM "Schiuma più carbonio" fibre di carbonio e di fibre di vetro (a) e c)), materiali porosi "schiume" (b) ed (e)), residui di resina (d) residui con superficie completamente liscia (f), presumibilmente metallo.

Nel caso del campione polvere di carbonio, si evidenzia la presenza di fibre e residuo di resina.

Carbonio Setaccio 1

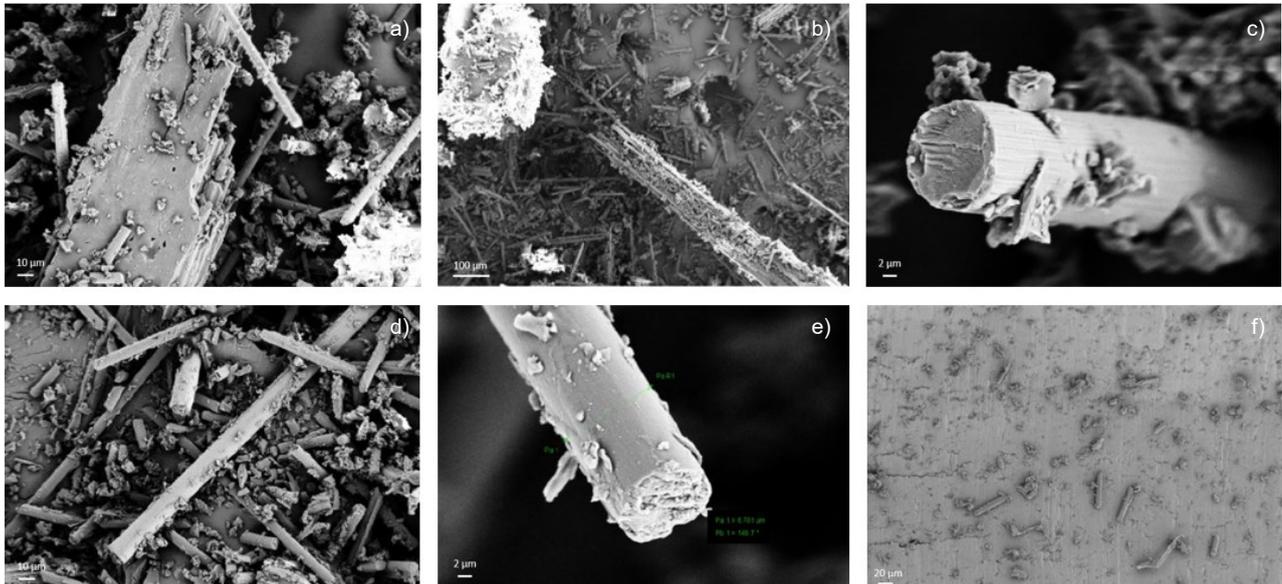


Fig. 3.6 - Immagini FESEM "Polvere di carbonio".

È stata eseguita anche analisi al microscopio ottico (Nikon Epiphot 300) (collaborazione con Prof. Luigi Torre, responsabile del Laboratorio Di Scienza e Tecnologia Dei Materiali, Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'Università Degli Studi Di Perugia), nelle Figure seguenti il risultato dell'indagine (Fig. 3.7, 3.8, 3.9). La Figura 3.7 mostra l'analisi morfologica delle fibre. La Figura 3.8 mostra materiali porosi residui di resina con aspetto non esclusivamente fragile, ma tenacizzata da particelle di presumibile natura gommosa. Infine, la Figura 3.9 mostra l'analisi morfologica della parte metallica.

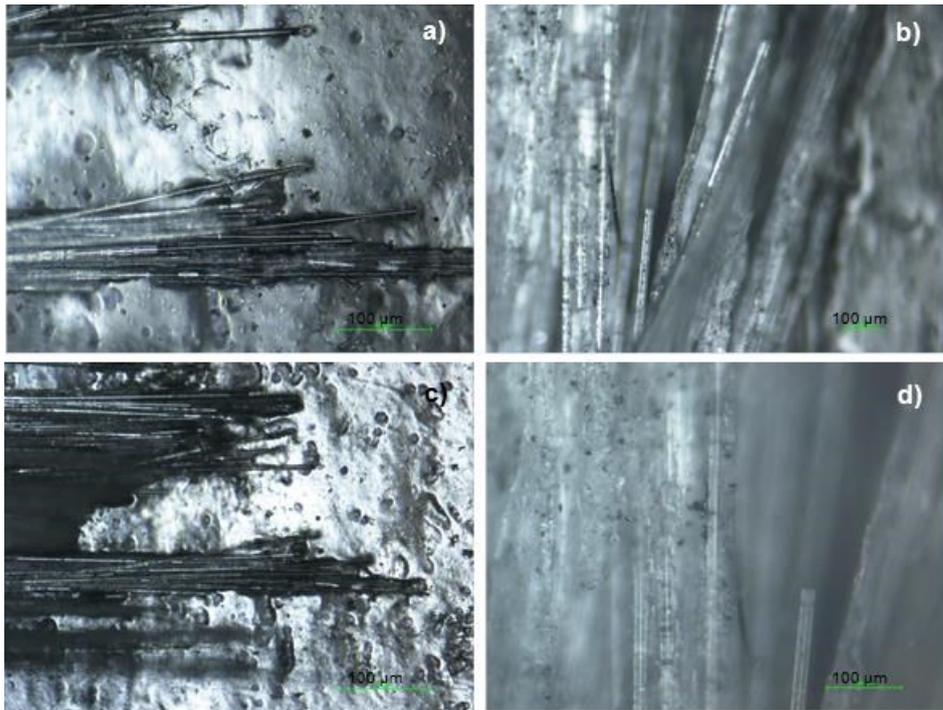


Fig. 3.7 - Micrografie al microscopio ottico della parte delle fibre.

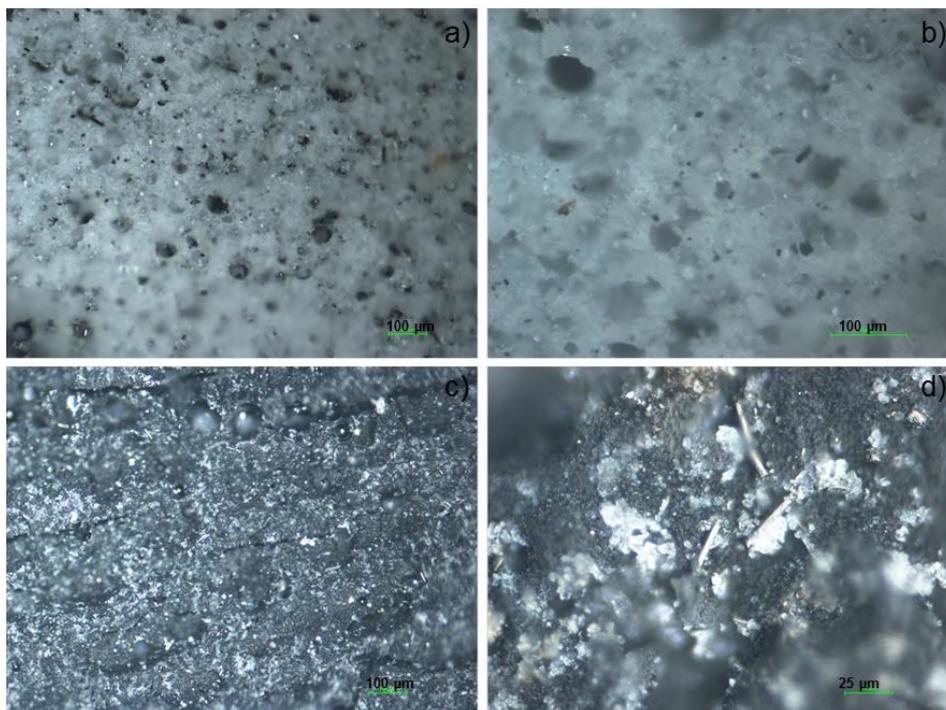


Fig. 3.8 - Micrografie al microscopio ottico della parte "bianca" (a) e b)) e parte "nera" (c) e d)).

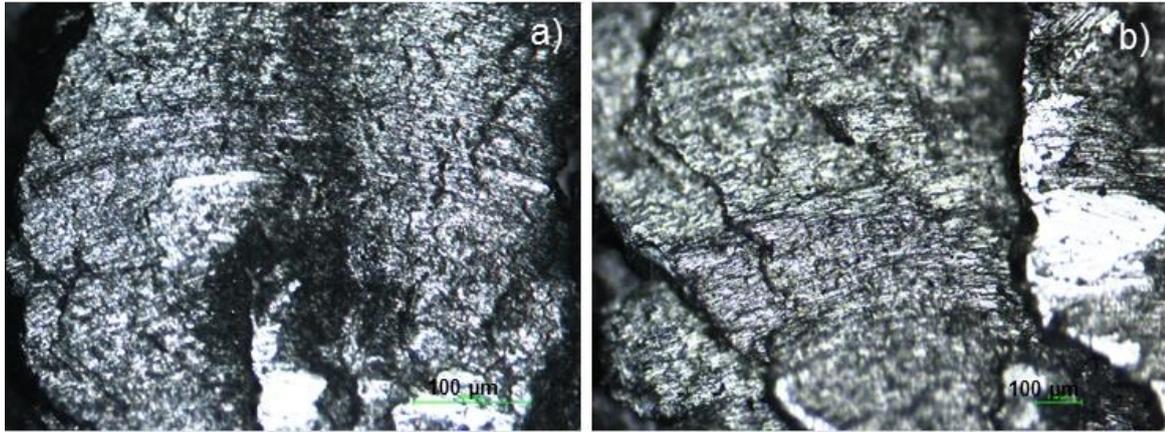


Fig. 3.9 - Micrografie al microscopio ottico della parte metallica.

4. PROVE MECCANICHE

4.1 Introduzione

In questa parte dell'elaborato vengono descritte le meccaniche eseguite per analizzare le ingegneristiche dei materiali realizzati.

I materiali di scarto delle varie aziende sono stati utilizzati per realizzare differenti malte. Le materie seconde sono state utilizzate al posto della sabbia (materiale inerte) nella composizione di una miscela di malta classica con rapporto acqua/cemento 0.6.

Sono state condotte delle prove di caratterizzazione meccanica (flessione e compressione), previste dalla norma UNI EN 1015-11, su provini di malta realizzati in forme rettangolare (4*4*16 cm).

Le miscele, realizzate con gli scarti forniti dall'azienda Delta, analizzate sono le seguenti:

- Malta classica con un rapporto $a/c= 0.6$ (malta di riferimento);
- Malta a cui è stato sostituito all'inerte (sabbia) la polvere di lavandini, scarto consegnato all'università da parte dell'azienda;
- Malta con aggiunta di superfluidificante (10 kg/m^3);
- Malta con aggiunta di superfluidificante (17 Kg/m^3).

Le miscele, realizzate con gli scarti forniti dall'azienda HP Composites, analizzate sono le seguenti:

- Malta classica con un rapporto $a/c= 0.6$ (malta di riferimento);
- Malta a cui è stato sostituito all'inerte (sabbia) la polvere di carbonio, scarto consegnato all'università da parte dell'azienda;
- Malta con aggiunta di superfluidificante (10 kg/m^3);
- Malta a cui è stato sostituito all'inerte (sabbia) la polvere di carbonio (trattenuta al setaccio di 0.5 mm);
- Malta realizzata con un inerte, costituito da 50% sabbia e il restante 50% dalla miscela carbonio più schiuma.

Di seguito vengono descritti la procedura eseguita, i materiali utilizzati ed i risultati annessi, con commento.

4.2 Materiali Utilizzati

I materiali utilizzati per il confezionamento dei provini sono:

- Il cemento utilizzato CEM I 52,5 R è un cemento Portland avente requisiti in accordo alla norma EN 197-1 e composizione riportata in Tab. 4.1.

Tab. 4.1 - Composizione CEM I 52,5 R.

CEM I 52,5 R	
Clinker	91,5%
Calcare	3,3%
Gesso	3,2%
Materie prime artificiali (Solfato ferroso, additivi inorganici, solfato di calcio)	0,7%
Materie prime seconde (Ceneri, gesso recuperato)	1,4%

1. Per il getto della malta di riferimento è stato utilizzato come aggregato la Sabbia 0/1 Po, di granulometria compresa tra 0-1 mm.



Fig. 4.1 - Sabbia 0/1 Po.

2. Per i restanti tre getti di malta è stato utilizzato come aggregato, al posto della sabbia, lo scarto di polvere da taglio di lavandini in materiale composito (composizione presunta: 80% circa costituito da quarzo ed il restante 20% da resina acrilica).

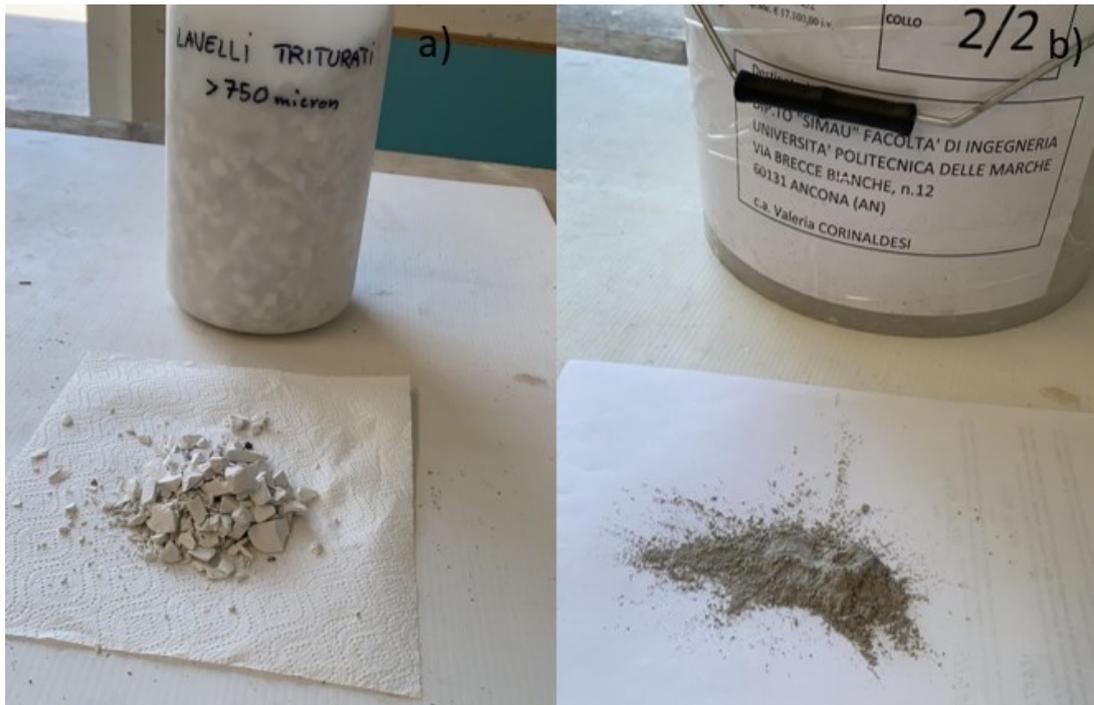


Fig 4.2 – Scarti di produzione di lavelli: frazione grossolana (a) e frazione fine (b).

3. Per il terzo e quarto getto, si è scelto di aggiungere un superfluidificante (SF) policarbossilico in polvere, in diverse dosi (SF10=10 Kg/m³, SF17=17 Kg/m³) per diminuire il tempo di presa ed ottenere così delle miscele caratterizzate da rapporti acqua-cemento molto bassi e da un'accelerazione delle resistenze alle brevi stagionature.
4. Per gli ultimi getti sono stati utilizzati come inerti la polvere di carbonio (a) ed una miscela di carbonio più schiuma (b), campioni consegnati dall'azienda HP Composites.

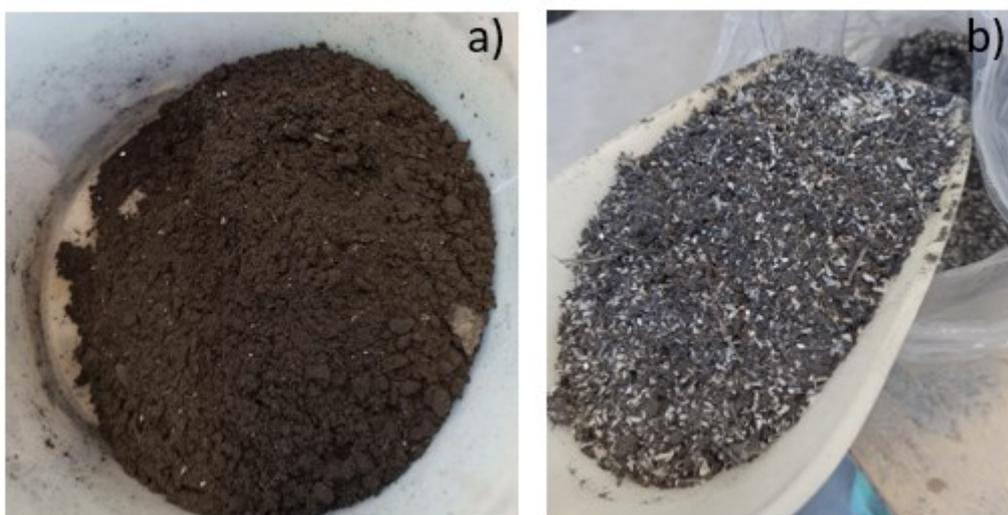


Fig. 4,3 – Campione di polvere di carbonio(a) e la miscela di carbonio più schiuma (b).

4.3 Mix Design

In questo capitolo vengono riportate le composizioni dei quattro getti di malta utilizzate per realizzare i provini su cui sono state eseguite le prove meccaniche. Le miscele ottenute vengono descritte con la fase del Mix-design.

Nelle Tabelle 4.2 e 4.3 sono state riportate le composizioni, rapporti acqua/cemento ed inerte/cemento utilizzati per realizzare le differenti malte.

Tab. 4.2 – Composizione dei getti di malta realizzati con gli scarti dell'azienda Delta.

Componenti (Kg/m ³)	Rif	Malta con scarti Delta		
		Scarto lavandini	SF10	SF17
Sabbia	1350	-	-	-
Cemento	450	450	450	450
Acqua	270	703	495	405
Scarto lavandini	-	900	900	900
Superfluidificante	-	-	10	17
Acqua/Cemento	0,60	1,56	1,10	0,90
Inerte/Cemento	3,00	2,00	2,00	2,00

Tab. 4.3 – Composizione dei getti di malta realizzati con gli scarti dell'azienda HP Composites.

Componenti (Kg/m ³)	Rif	Malta con scarti HP Composites			
		Carbonio Composite	Carbonio Composite SF10	Carbonio Composite Trattenuto 0,5 mm	Carbonio + Schiuma
Sabbia	1350	-	-	-	675
Cemento	450	450	450	450	450
Acqua	270	1100	875	875	405
Polvere carbonio	-	600	600	600	-
Superfluidificante	-	-	10	-	-
Carbonio+Schiuma	-	-	-	-	300
Acqua/Cemento	0,60	2,44	1,94	1,94	0,90
Inerte/Cemento	3,00	1,33	1,33	1,33	0,67

4.4 Fasi operative

I provini sono stati realizzati secondo la seguente procedura:

1. Pesate dei componenti in base alle proporzioni indicate nelle tabelle precedenti.
2. Inserimento dei materiali in una miscelatrice da 5 l (a) e miscelazione fino al raggiungimento di un impasto uniforme e omogeneo (b).



Fig. 4,4 – Preparazione (a) e miscelazione dell'impasto del getto (b).

3. Getto all'interno degli appositi casseri precedentemente rivestiti con disarmante per facilitare la successiva scasseratura dei provini.
4. Rasatura e compattazione tramite tavola vibrante.



Fig. 4.5 – Fase di vibratura (a) e di copertura, con uno strato di pellicola, della miscela negli appositi casseri (b).

5. Copertura dei provini con uno strato di pellicola impermeabile in modo da limitare il fenomeno di essudazione dell'acqua.
6. Disarmo dei provini dopo 24 ore del getto.



Fig. 4.6 – Provini ottenuti dopo il disarmo.

7. Stagionatura umida dei provini a bagno nell'acqua rispettivamente tre provini per getto per tre giorni, altri tre provini per getto per sette giorni ed infine altri tre per ventotto giorni.

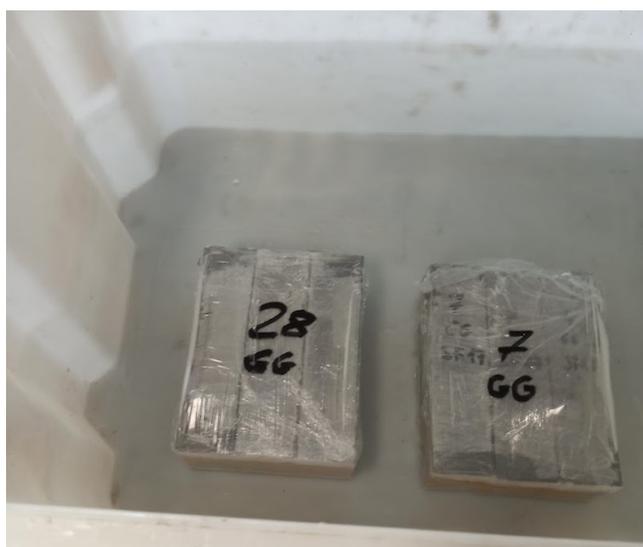


Figura 4.7 – Maturazione e stagionatura dei provini in ambiente umido.

4.5 Prove eseguite

In questo capitolo sono descritte la strumentazione e la modalità di esecuzione delle prove di flessione e di compressione eseguite a tre, sette e ventotto giorni sui provini dei diversi getti.

4.5.1 Prova di flessione

Dopo averli disarmati, i provini di dimensione $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, in applicazione alla norma UNI EN 1015-11 [29], sono stati sottoposti a prova di flessione su tre punti, utilizzando una pressa idraulica munita di cella di carico collegata ad un terminale, presso il Laboratorio Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU).



Fig. 4.8 – Pressa idraulica.

La prova, per la determinazione della resistenza a flessione, consiste nel sottoporre il provino, appoggiato alle due estremità e disposto longitudinalmente, ad un carico concentrato applicato al centro della faccia superiore del provino stesso e nel calcolare la forza necessaria per portarlo a rottura.



Fig. 4.9 - Setup di prova a flessione dei provini. Inizio della prova (a) e fine della prova (b)

4.5.2 Prova di compressione

Sulle due estremità di ogni provino, precedentemente sottoposto a prova di flessione, in accordo alla norma UNI EN 1015-11 [29], è stata eseguita una prova di compressione semplice, mediante una pressa idraulica, munita di cella di carico collegata ad un terminale, presso il Laboratorio Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell’Ambiente ed Urbanistica (SIMAU).



Fig. 4.10 – Setup di prova a compressione dei provini

4.6 Risultati delle prove

Si riportano di seguito i dati e i risultati ottenuti dalle prove meccaniche descritte nel paragrafo precedente.

Tab. 4.4 – Risultati delle prove di flessione e di compressione sui quattro getti di malta realizzati con gli scarti dell'azienda Delta.

Malta Rif		
Tempo	Resistenza a flessione	Resistenza a compressione
(Giorni)	(MPa)	(MPa)
0	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00
3	5,52 ± 0,35	23,82 ± 1,09
7	6,27 ± 0,29	28,09 ± 1,44
28	5,83 ± 0,72	41,88 ± 4,90
Malta Scarto Lavandini		
Tempo	Resistenza a flessione	Resistenza a compressione
(Giorni)	(MPa)	(MPa)
0	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00
3	1,31 ± 0,13	2,87 ± 0,13
7	1,46 ± 0,11	4,03 ± 0,16
28	1,80 ± 0,07	5,32 ± 0,07
Malta SF10		
Tempo	Resistenza a flessione	Resistenza a compressione
(Giorni)	(MPa)	(MPa)
0	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00
3	2,36 ± 0,48	8,46 ± 0,99
7	3,21 ± 0,07	11,10 ± 0,36
28	3,73 ± 0,19	14,97 ± 0,22
Malta SF17		
Tempo	Resistenza a flessione	Resistenza a compressione
(Giorni)	(MPa)	(MPa)
0	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00
3	3,66 ± 0,47	12,52 ± 0,49
7	3,88 ± 0,16	14,58 ± 0,53
28	4,26 ± 0,25	19,59 ± 0,97

Tab. 4.5 – Risultati delle prove di flessione e di compressione sui quattro getti di malta realizzati con gli scarti dell'azienda HP Composites.

Malta Rif		
Tempo (Giorni)	Resistenza a flessione (MPa)	Resistenza a compressione (MPa)
0	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00
3	5,52 ± 0,35	23,82 ± 1,09
7	6,27 ± 0,29	28,09 ± 1,44
28	5,83 ± 0,72	41,88 ± 4,90
Malta Carbonio Composite (trattenuto 0,5 mm)		
Tempo (Giorni)	Resistenza a flessione (MPa)	Resistenza a compressione (MPa)
0	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00
28	0,39 ± 0,05	0,43 ± 0,01
Malta Carbonio + Schiuma		
Tempo (Giorni)	Resistenza a flessione (MPa)	Resistenza a compressione (MPa)
0	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00
7	2,74 ± 0,07	4,83 ± 0,48
28	3,58 ± 0,29	26,20 ± 3,30

Inizialmente, durante la fase delle prove meccaniche, si sono confrontate le prime due miscele, quella di riferimento e quella in cui si è sostituito la sabbia (inerte), con lo scarto inviato dall'azienda Delta.

Come si può evincere dalla tabella 4.4, la resistenza a flessione e quella a compressione della malta analizzata e confrontata con quella di riferimento, al periodo di 28 giorni, hanno dato dei risultati insoddisfacenti, per poter ipotizzare un riutilizzo del campione di scarto come inerte in una miscela classica di malta.

Pertanto, considerata la scarsa qualità della malta, tale da renderla inutilizzabile, si è tentato di migliorarne le caratteristiche aggiungendo del superfluidificante polycarbossilico in polvere, in diverse dosi (10 Kg/m³, 17 Kg/m³), ottenendo due nuove miscele da testare. Si è cercato pertanto di intervenire sul tempo di presa e sulla resistenza alle brevi stagionature.

Eseguite le prove meccaniche sulle miscele così ottenute, si sono messi a confronto i risultati registrati con quelli della malta di riferimento. Si è riscontrato un notevole miglioramento dei valori delle resistenze, rispetto al getto privo di superfluidificante, ma comunque inferiori a quelli della malta di riferimento.

Pertanto, si è ipotizzata la possibilità di reimpiego dello scarto nella produzione di calcestruzzo alleggerito, come ad esempio quello che si utilizza nella realizzazione dei massetti.

Per lo scarto fornito dall'azienda HP Composites, si è seguita la stessa procedura precedentemente illustrata.

Si è deciso di mettere a confronto la miscela di riferimento, con quella che si ottiene sostituendo alla sabbia la polvere di carbonio e con quella che si ricava, aggiungendo allo scarto, il superfluidificante.

Purtroppo, non si sono potute effettuare le prove, a causa

- dell'eccessivo tempo di presa,
- del rigonfiamento avuto dai provini durante l'indurimento (come mostrano la fig. 4.11a e la fig. 4.11b), probabilmente dovuto alla presenza nel campione di scarto di elementi di metallo,
- della poca compattezza e poca durezza dell'impasto ottenuto.

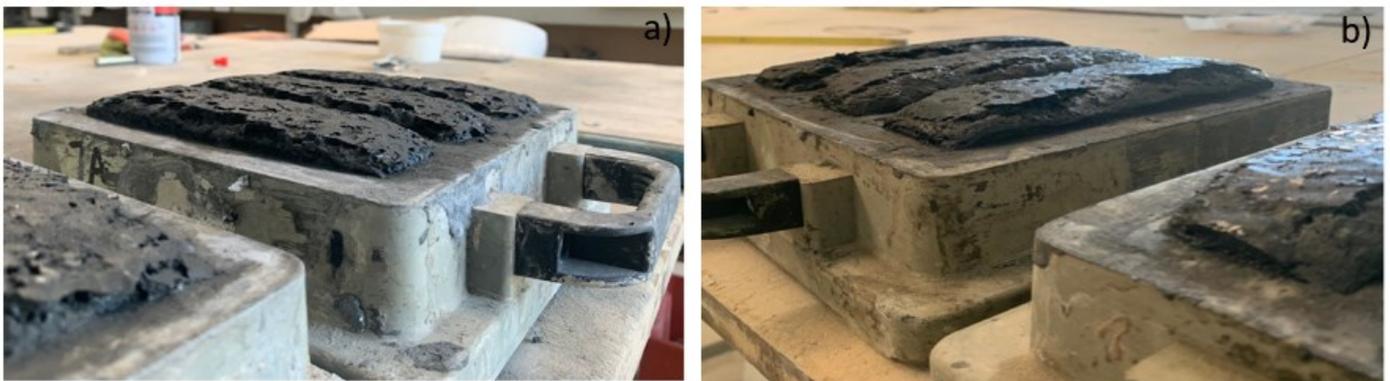


Fig. 4.11 – Rigonfiamento ottenuto dai provini. A sinistra quelli senza superfluidificante (a) ed a destra quelli invece che lo contengono (b).

Si è realizzata quindi una ulteriore miscela, sostituendo la sabbia con il trattenuto della polvere di carbonio al setaccio di dimensione 0,5 mm. Ciò per verificare se il rigonfiamento dipende dalla presenza dei frammenti metallici e se questi sono anche la causa della diminuzione della resistenza, sia a compressione, sia a flessione.

Con questa prova si è constatato un indurimento del materiale, che ha permesso lo scasseramento solo dopo sette giorni dal getto (due in forno e cinque all'aria aperta). Quindi si sono potute svolgere le prove meccaniche solo a 28 giorni.

Infine, si è realizzata una quinta miscela, utilizzando come inerte la schiuma più carbonio. In questo caso, lo scasseramento dei provini è stato possibile già dopo un giorno di forno, dal getto. Quindi è stato possibile effettuare le prove meccaniche.

Si è constatato inoltre che questo campione ha presentato un rigonfiamento, di molto inferiore a quello precedente. Come illustrato nella fig. 4.12 sottostante.



Fig. 4.12 – Confronto tra i provini ottenuti con la miscela schiuma più carbonio e quella con il trattenuto al setaccio 0,5 mm. La linea rossa indica il limite superiore del provino e quindi il rigonfiamento dei provini.

I risultati ottenuti nelle prove meccaniche sono stati riportati nella tab. 4.5.

Dalla loro analisi si evince che le varie malte non hanno dato valori di resistenza tali da poterne giustificare un utilizzo strutturale, ma solo un possibile reimpiego come calcestruzzo alleggerito [23,32].

Di seguito vengono riportati i diagrammi che mettono a confronto i risultati delle prove a flessione ed a compressione fatte sulle diverse miscele.

I grafici illustrativi dei risultati ottenuti a tre, a sette ed a ventotto giorni sono riportati nell'appendice 3 - alla fine di questo elaborato.

4.7 Diagrammi riepilogativi delle prove di flessione e di compressione sui getti

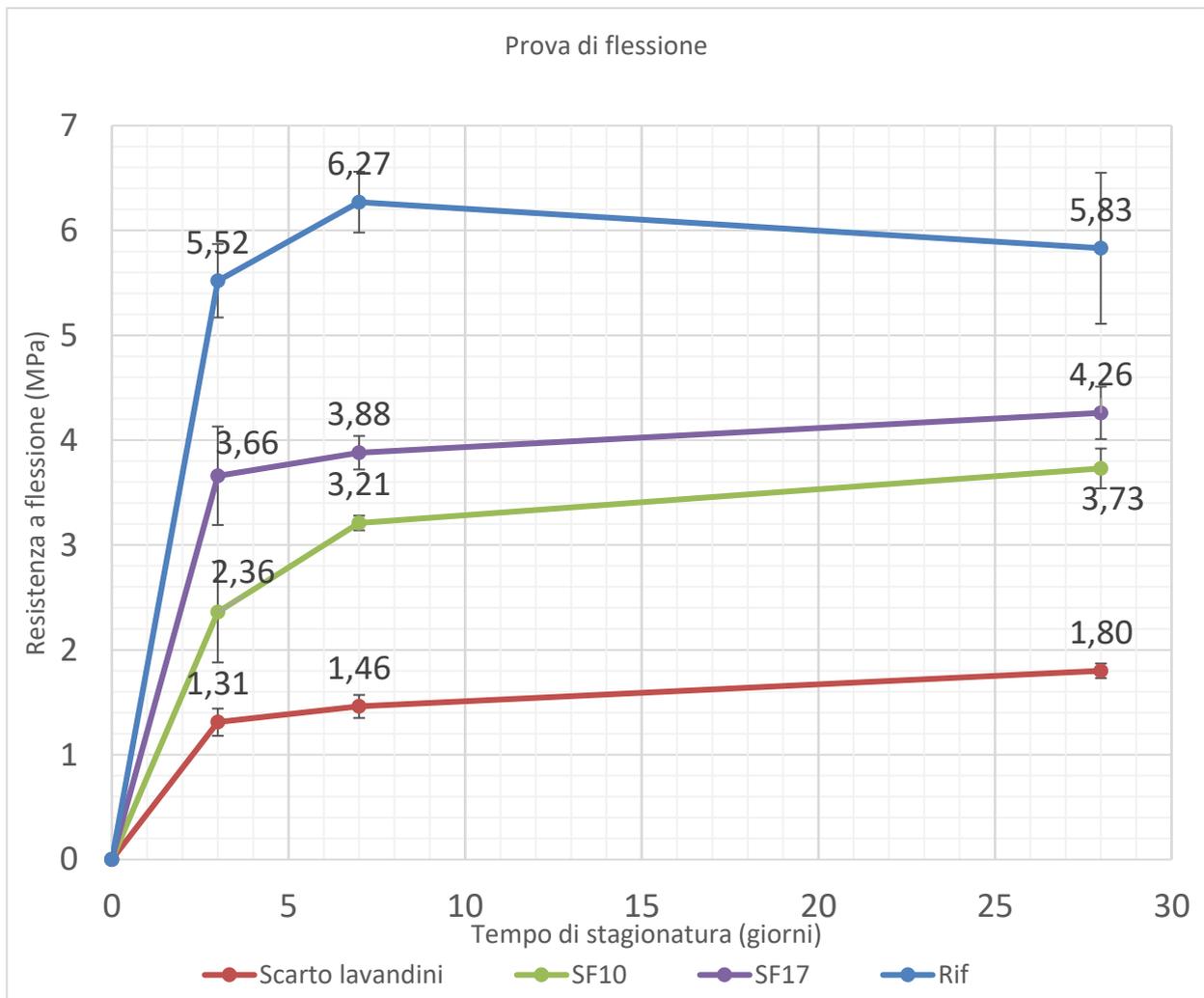


Fig. 4.13 – Confronto tra i risultati delle prove di flessione svolte sui provini delle malte realizzate con gli scarti dell'azienda Delta.

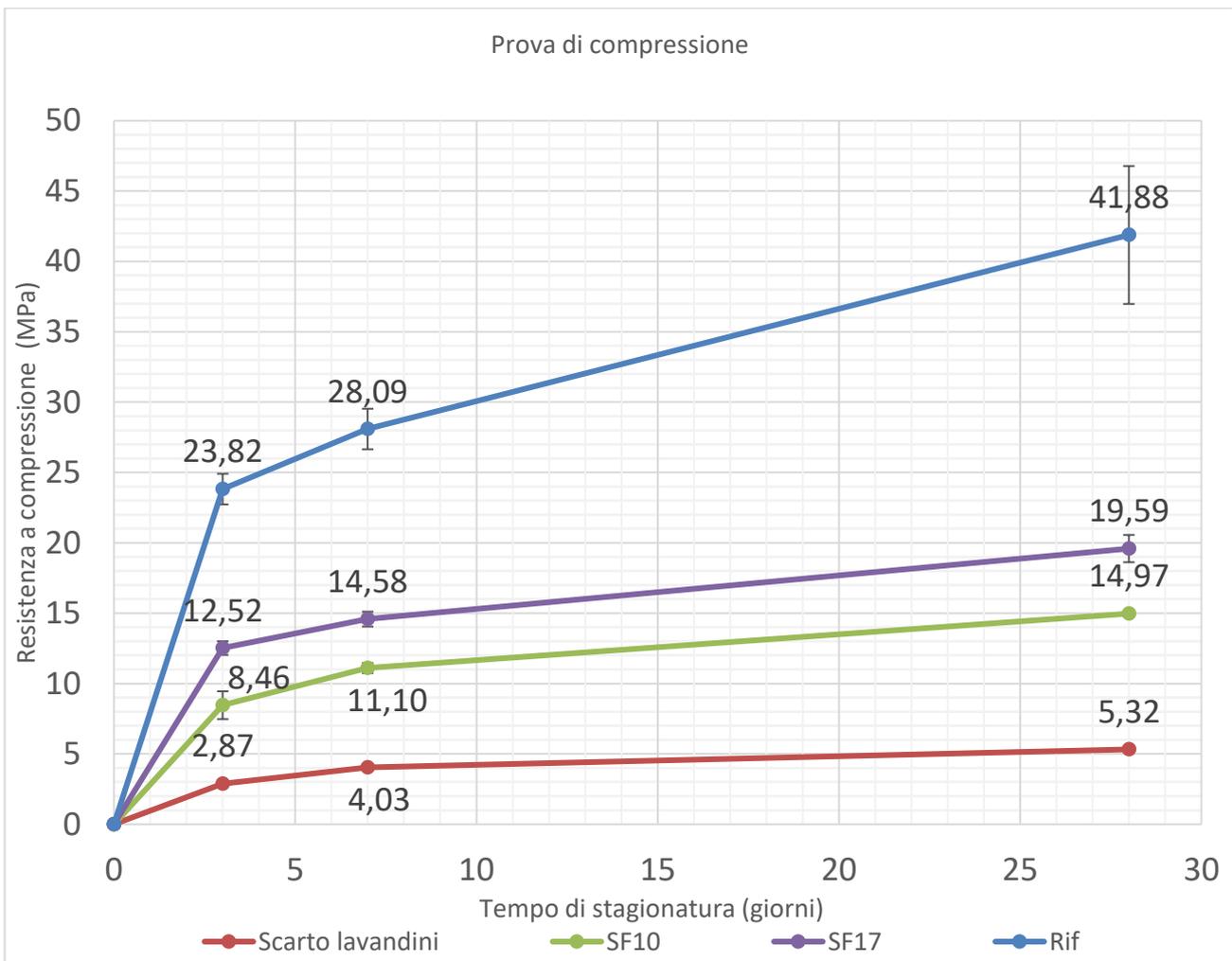


Fig. 4.14 – Confronto tra i risultati delle prove di compressione svolte sui provini delle malte realizzate con gli scarti dell'azienda Delta.

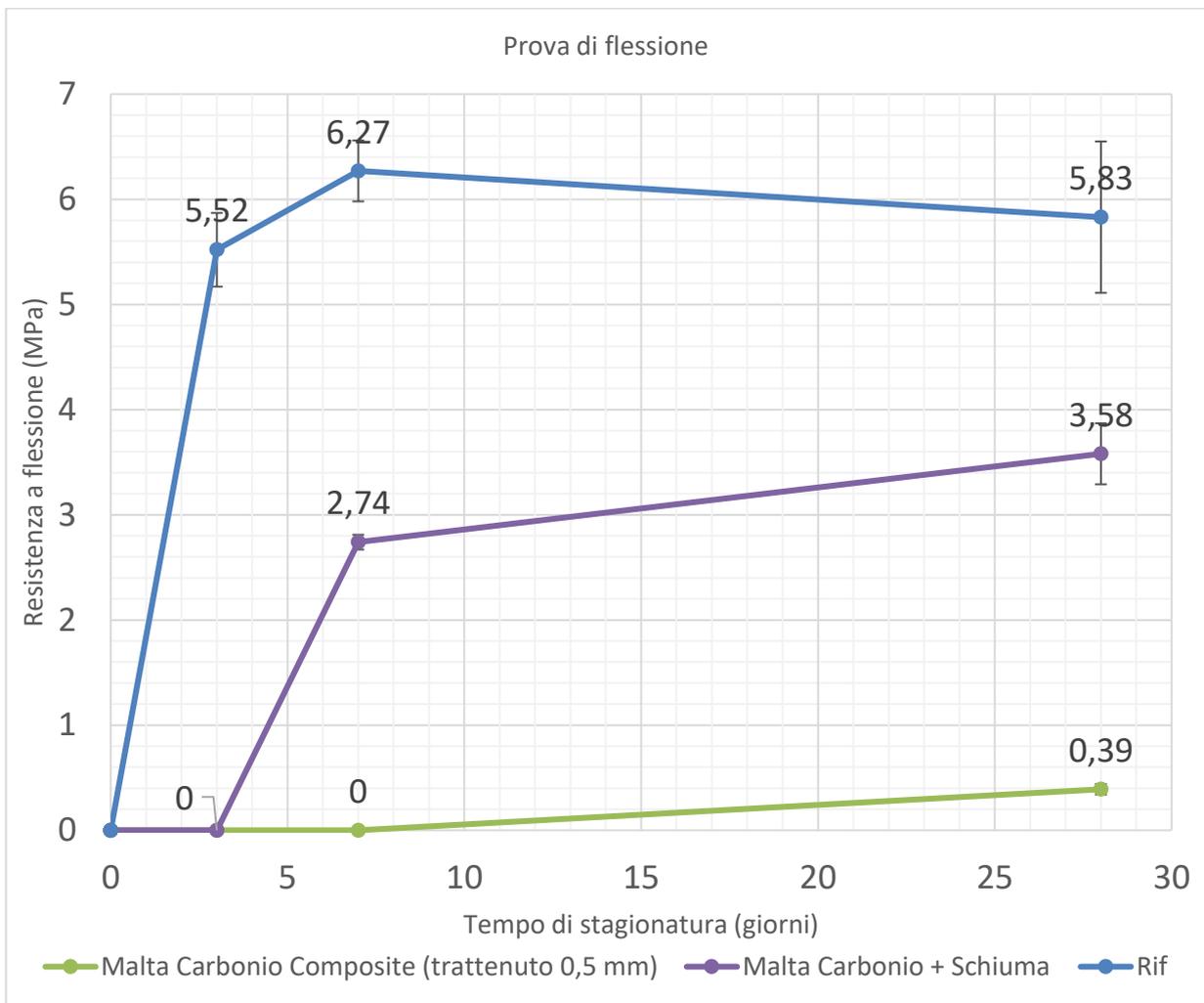


Fig. 4.15 – Confronto tra i risultati delle prove di flessione svolte sui provini delle malte realizzate con gli scarti dell'azienda HP Composites.

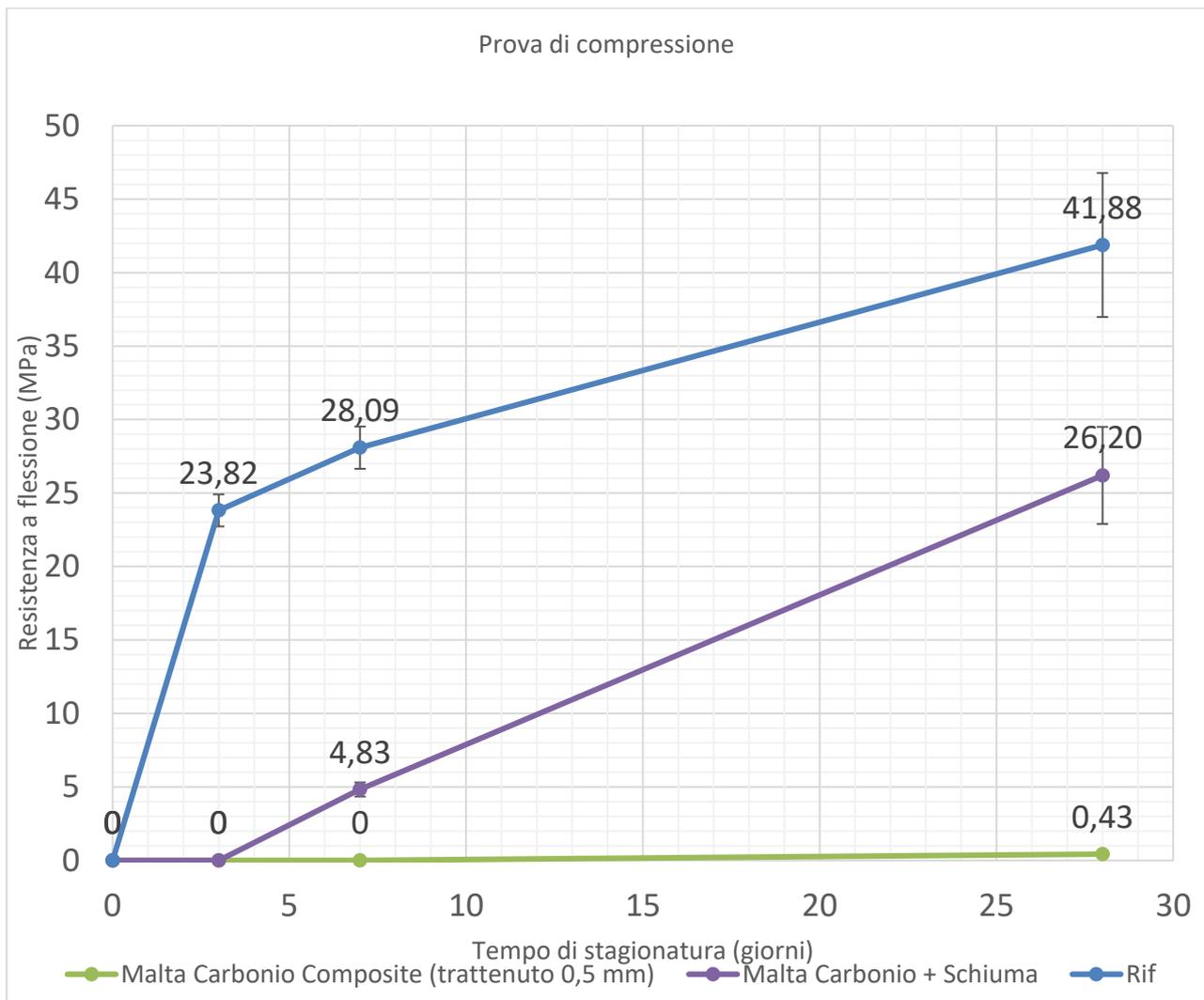


Fig. 4.16 – Confronto tra i risultati delle prove di compressione svolte sui provini delle malte realizzate con gli scarti dell'azienda HP Composites.

5. Prove chimico-fisiche

Il presente capitolo descrive l'attività sperimentale svolta nel Laboratorio Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU) dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona.

Sono state condotte delle prove di caratterizzazione chimico-fisica (massa volumica), previste dalla norma UNI EN 1097-3 [30], su provini di malta realizzati in forme rettangolare (4*4*16 cm).

La prova è stata eseguita sulle seguenti miscele, realizzate con gli scarti forniti dall'azienda Hp Composites:

- Malta a cui è stato sostituito all'inerte (sabbia) la polvere di carbonio, scarto consegnato all'università da parte dell'azienda;
- Malta con aggiunta di superfluidificante (10 kg/m³);
- Malta a cui è stato sostituito all'inerte (sabbia) la polvere di carbonio (trattenuta al setaccio di 0.5 mm);

Malta realizzata con un inerte, costituito da 50% sabbia e il restante 50% dalla miscela carbonio più schiuma.

5.1 Materiali Utilizzati

Vengono descritti di seguito i materiali utilizzati per il confezionamento dei provini.

1. Il cemento utilizzato CEM I 52,5 R è un cemento Portland avente requisiti in accordo alla norma EN 197-1 e composizione riportata in Tab. 5.1.

Tab. 5.1 - Composizione CEM I 52,5 R.

CEM I 52,5 R	
Clinker	91,5%
Calcare	3,3%
Gesso	3,2%
Materie prime artificiali (Solfato ferroso, additivi inorganici, solfato di calcio)	0,7%
Materie prime seconde (Ceneri, gesso recuperato)	1,4%

2. Per il getto della malta di riferimento è stato utilizzato come aggregato la Sabbia 0/1 Po, di granulometria compresa tra 0-1 mm.



Fig. 5.1 - Sabbia 0/1 Po.

3. Per il secondo getto, si è scelto di aggiungere un superfluidificante policarbossilico in polvere in diverse dosi (10 Kg/m^3 , 17 Kg/m^3), per diminuire il tempo di presa ed ottenere così delle miscele caratterizzate da rapporti acqua-cemento molto bassi e da un'accelerazione delle resistenze alle brevi stagionature.
4. Per questi getti sono stati utilizzati come inerti la polvere di carbonio ed una miscela di carbonio più schiuma, campioni consegnati dall'azienda HP Composites.

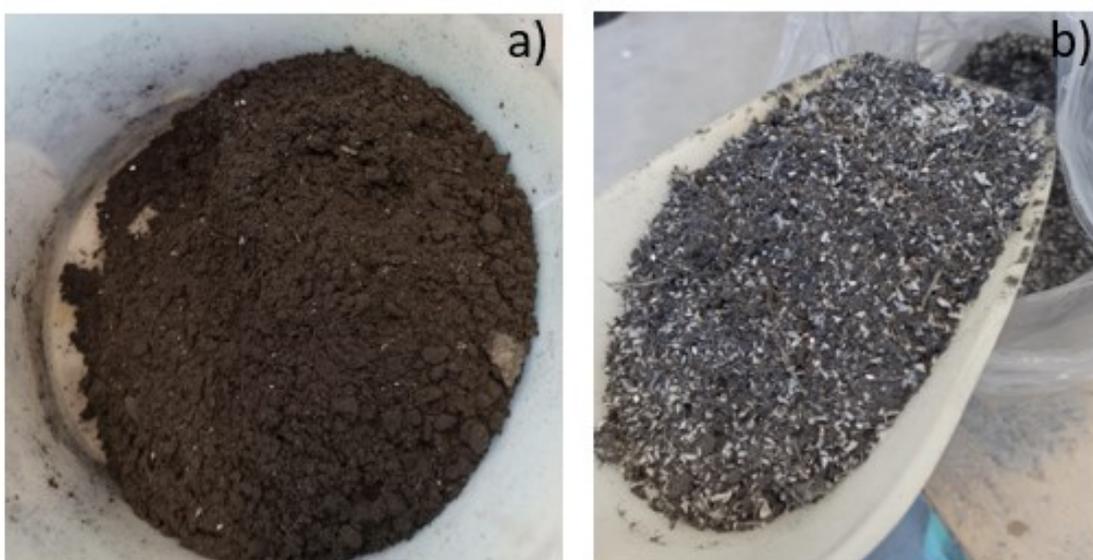


Fig. 5,2 – Campione di polvere di carbonio(a) e la miscela di carbonio più schiuma (b).

5.2 Mix Design

In questo capitolo vengono riportate le composizioni dei quattro getti di malta, utilizzati per realizzare i provini su cui sono state eseguite le prove meccaniche. Le miscele ottenute vengono descritte con la fase del Mix-design.

Di seguito vengono riportate le composizioni, con annessi rapporti acqua/cemento e inerte/cemento, dei getti di malta eseguiti.

Tab. 5.2 - Composizione dei getti di malta, realizzati con gli scarti dell'azienda HP Composites.

Componenti (Kg/m ³)	Rif	Malta con scarti HP Composites			
		Carbonio Composite	Carbonio Composite SF10	Carbonio Composite Trattenuto 0,5 mm	Carbonio + Schiuma
Sabbia	1350	-	-	-	675
Cemento	450	450	450	450	450
Acqua	270	1100	875	875	405
Polvere carbonio	-	600	600	600	-
Superfluidificante	-	-	10	-	-
Carbonio+Schiuma	-	-	-	-	300
Acqua/Cemento	0,60	2,44	1,94	1,94	0,90
Inerte/Cemento	3,00	1,33	1,33	1,33	0,67

5.3 Prove eseguite

In questo capitolo sono descritte la strumentazione e la modalità di esecuzione delle prove di misurazione della massa volumica sui provini dei diversi getti.

5.3.1 Massa volumica

Dopo averli disarmati, i provini di dimensione $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, in applicazione alla norma UNI EN 1097-3 [30], sono stati divisi a metà ed immersi in un contenitore graduato. Esaminando l'innalzamento dell'acqua è stata determinata la massa volumica. La prova è stata svolta presso il Laboratorio Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU).



Fig. 5.3 – Contenitore graduato utilizzato per la prova.

Il primo passaggio, per eseguire la prova, è quello di misurare la massa a secco del provino. Successivamente versare l'acqua all'interno del contenitore, fino ad un prefissato livello (1000ml). Immerso il provino si misura l'innalzamento eseguito dall'acqua. Infine, si misura la massa del campione umido. Fatti questi passaggi si determina la densità a secco ed umida dei campioni (kg/m^3), dividendo rispettivamente le masse (secca ed umida) per l'innalzamento ottenuto nella prova.



Fig. 5.4 - Setup di prova per la determinazione della massa volumica. Immersione del campione nel contenitore per misurare l'innalzamento dell'acqua (a) e successivamente valutazione della variazione di massa del provino (b).

5.4 Risultati della prova

Si riportano di seguito i dati e i risultati ottenuti dalla prova chimico-fisica descritta nel capitolo precedente.

Tab. 5.3 - Risultati della prova chimico fisica eseguita sui getti realizzati con gli scarti dell'azienda HP Composites.

Malte con scarti HP Composites	Massa Volumica	
	Media a secco (Kg/m ³)	Media a secco (Kg/m ³)
Carbonio Composite (1 Cassaforma)	978,92	1058,14
Carbonio Composite (2 Cassaforma)	1042,52	1114,19
Carbonio Composite SF10 (1 Cassaforma)	708,83	789,33
Carbonio Composite SF10 (2 Cassaforma)	804,10	892,78
Carbonio Composite SF10 (3 Cassaforma)	733,88	808,28
Carbonio+Schiuma	1636,04	1731,71
Carbonio Composite Trattenuto 0,5mm	1214,22	2198,58

Analizzando e confrontando i risultati ottenuti dalla prova, con la massa volumica di alcuni materiali classici utilizzati nel mondo dell'edilizia, come il calcestruzzo e la malta, che hanno rispettivamente una massa volumica di 2250-2400 Kg/m³ per il calcestruzzo e di 1800 Kg/m³ per la malta, si è potuto constatare una effettiva leggerezza dei campioni testati.

Si è deciso così di confrontare questi risultati con la massa volumica di un materiale ancora più leggero, come il calcestruzzo leggero (2000 kg/m³) e si è dedotto che questi campioni hanno valori molto vicini a quel parametro di riferimento.

Questo conferma l'ipotesi, fatta dopo le prove meccaniche, di poter utilizzare questi scarti nella produzione di calcestruzzo alleggerito [23,32].

APPENDICE 1 - ANALISI GRANULOMETRICA POLVERE DI CARBONIO



Residui grossolani di materiale ritrovati nel campione consegnato.



Campione di 'Polvere di carbonio' utilizzato per l'analisi granulometrica
Quantità: 300g



Setaccio 4760 μ m

Nel setaccio sono rimasti dei filamenti e frammenti grossolani di materiale.



Setaccio 4000 μm

Nel setaccio sono ancora presenti filamenti e frammenti grossolani di materiale, fibre di carbonio, con l'aggiunta di elementi dall'aspetto lucido, verosimilmente metallici.



Setaccio 2800 μm

In questo setaccio i residui grossolani di materiale sono diminuiti e la quantità di elementi di metallo e di fibre di carbonio è aumentata.



Setaccio 2000 μm

La quantità di materiale trattenuta dal setaccio inizia ad aumentare, sempre sottoforma di un insieme di frammenti di metallo e di grumi di fibre di carbonio.



Setaccio 1400 µm

La quantità di materiale trattenuta dal setaccio aumenta ancora. La composizione del campione rimasto è analoga a quella del setaccio precedente: elementi metallici e fibre di carbonio.



Setaccio 1000 µm

A questo setaccio è trattenuta una quantità maggiore di materiale rispetto al precedente. Il campione passante a questa apertura è principalmente composto da piccoli grumi di fibre di carbonio.



Setaccio 850 µm

È questo il setaccio con la dose maggiore di materiale trattenuto. La quantità di campione rimasta è rappresentata principalmente da polverina di carbonio. È visibile ancora qualche piccolo frammento metallico.



Setaccio 500 µm

La quantità di campione trattenuta dal setaccio, sotto forma di polvere di carbonio, inizia a diminuire. Non si riescono più a vedere e a distinguere ad occhio nudo i frammenti metallici dalla polvere di carbonio.



Setaccio 300 µm

La quantità di campione trattenuta dal setaccio sotto forma di polvere di carbonio continua a diminuire. I frammenti metallici sembrano completamente assenti.



Setaccio 250 µm

La quantità di campione trattenuta dal setaccio sotto forma di polvere di carbonio si è notevolmente ridotta.



Setaccio 180 μm

La quantità di campione trattenuta dal setaccio sotto forma di polvere di carbonio è simile a quella del setaccio precedente.



Setaccio 150 μm

La quantità di polvere di carbonio trattenuta dal setaccio è quasi nulla.



Setaccio 63 μm

Rispetto al setaccio precedente la quantità di polvere di carbonio trattenuta è maggiore.



Setaccio base

La quantità di materiale rimasta nel setaccio base è pochissima ed è apparentemente rappresentata solo da polvere di carbonio.

APPENDICE 2 - ANALISI GRANULOMETRICA SCHIUMA PIÙ CARBONIO



Campione di schiuma più carbonio utilizzato per l'analisi granulometrica.
Quantità: 600g



Setaccio 8000 μ m

Nel setaccio sono rimasti dei ciuffi di fibre semi-incollate tra loro e dei frammenti grossolani di materiale organico.



Setaccio 6350 μ m

In questo setaccio sono rimasti dei filamenti di materiale (ciuffi di fibre semi-incollate) di dimensione inferiore rispetto a quelli del setaccio precedente.



Setaccio 4760 μm

In questo setaccio sono presenti dei frammenti di materiale di lucentezza metallica. I filamenti presenti (ciuffi di fibre semi-incollate) hanno dimensioni ancora più piccole.



Setaccio 4000 μm

In questo setaccio la quantità dei ciuffi di fibre è diminuita. È aumentata invece la quantità dei frammenti di lucentezza metallica e quella di materiale organico di colore scuro (presumibilmente contenete carbonio) e di colore chiaro.



Setaccio 2800 μm

In questo setaccio sono rimasti dei piccoli residui di ciuffi di fibre. Si può notare più nettamente la distinzione tra frammenti di lucentezza metallica e quella di materiale organico di colore scuro e di colore chiaro.



Setaccio 2000 µm

Questo setaccio è quello che ha trattenuto la maggiore quantità di materiale. Non vi è più la presenza dei ciuffi di fibre, ma solamente dei frammenti di lucentezza metallica e quella di materiale organico di colore scuro e di colore chiaro.



Setaccio 1400 µm

La quantità di materiale trattenuta da questo setaccio si avvicina a quella del precedente. Sono presenti solo frammenti di lucentezza metallica e quella di materiale organico di colore scuro e di colore chiaro.



Setaccio 1000 µm

La quantità frammenti di lucentezza metallica inizia a diminuire ed aumenta invece quella del di materiale organico di colore scuro e di colore chiaro.



Setaccio 850 µm

Diminuisce ancora la quantità di materiale trattenuto. La parte preponderante rimasta nel setaccio è quella di materiale organico di colore scuro. I frammenti di lucentezza metallica e quelli di materiale organico di colore chiaro sono diminuiti e sono presenti in modesta quantità.



Setaccio 500 µm

In questo setaccio non si vedono più frammenti di lucentezza metallica né il materiale organico di colore chiaro, ma resta solo il materiale organico di colore scuro, in forma non più particellare come nei precedenti setacci, ma in polvere.



Setaccio 300 µm

La quantità di materiale continua ancora a diminuire e non si vedono più i puntini grigi dovuti a micro-frammenti di materiale metallico ma soltanto qualche sporadica particella di materiale organico di colore chiaro, ma solo il materiale organico scuro sotto forma di polvere.



Setaccio 250 µm

In questo setaccio la dose di materiale trattenuta è ancora inferiore ed è rimasta solo la 'polvere di carbonio'.



Setaccio 180 µm

In questo setaccio vi è solo la presenza della polvere di carbonio. La situazione di questo setaccio è analoga al precedente.



Setaccio 150 µm

In questo setaccio si inizia a vedere che diminuisce la quantità della polvere di carbonio.



Setaccio 63 μ m

La quantità di materiale trattenuta dal setaccio è maggiore rispetto a quella del setaccio precedente. Il materiale rimasto è come nei casi precedenti costituito da 'polvere di carbonio'.



Setaccio base

Il materiale presente all'ultimo setaccio è rappresentato da una modestissima quantità di polvere di carbonio, di dimensioni ancora più piccole, quasi impalpabile.

APPENDICE 3 - RISULTATI PROVA A FLESSIONE ED A COMPRESSIONE A 3,7,28 GIORNI

Risultati della prova di flessione

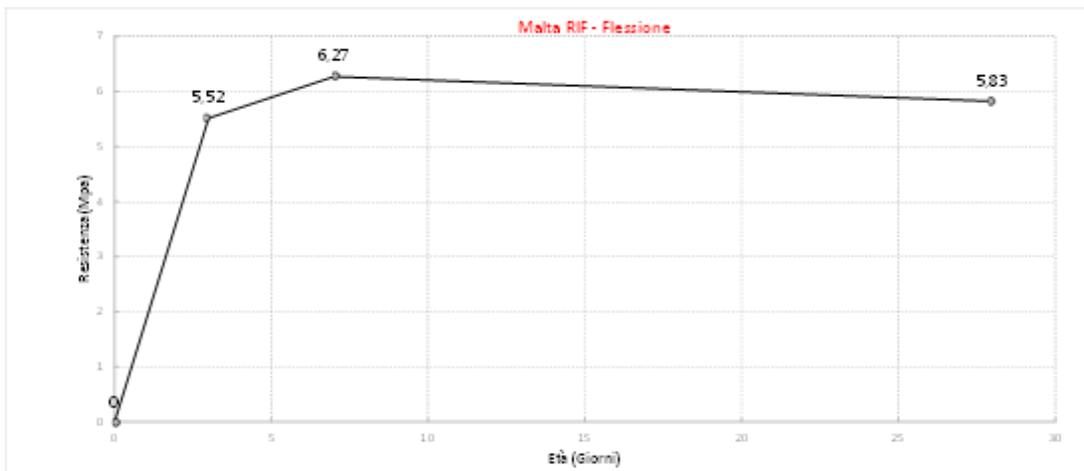


Fig. 1 - Risultati delle prove di flessione della malta di riferimento.

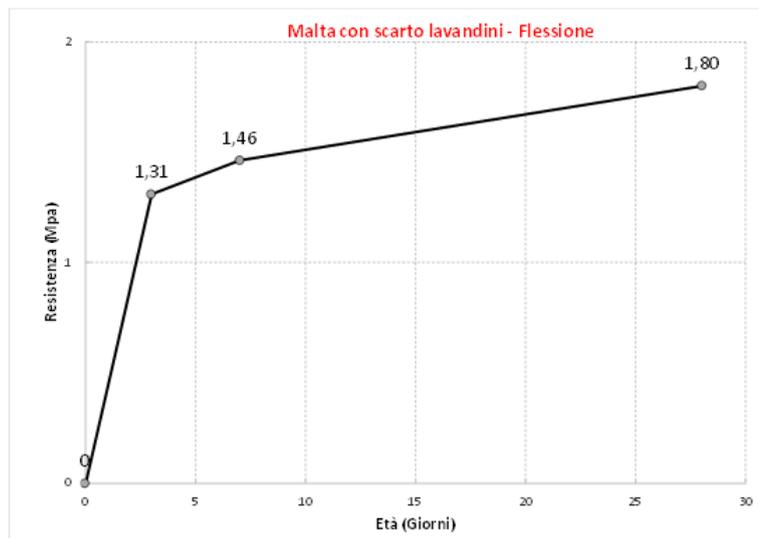


Fig. 2 - Risultati della prova di flessione della malta con scarto di lavandino.

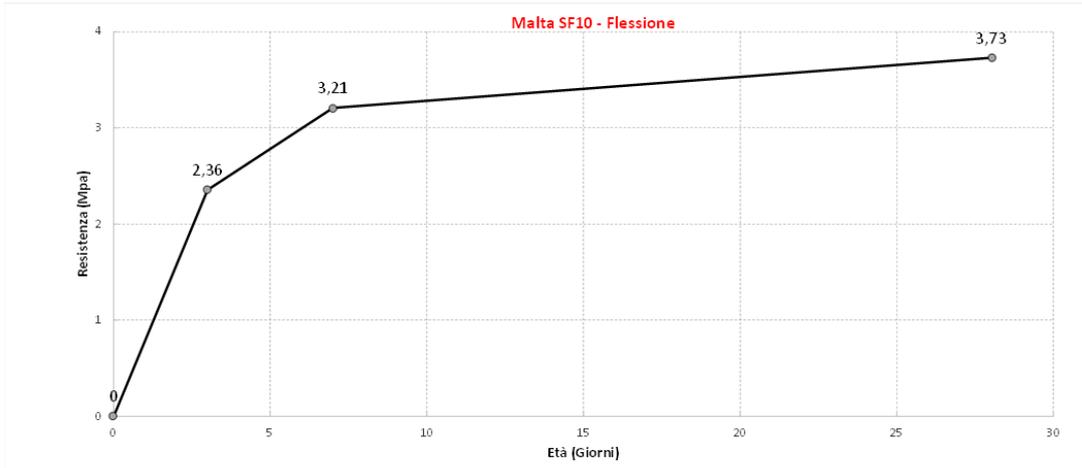


Fig.3 - Risultati della prova di flessione della malta SF10.

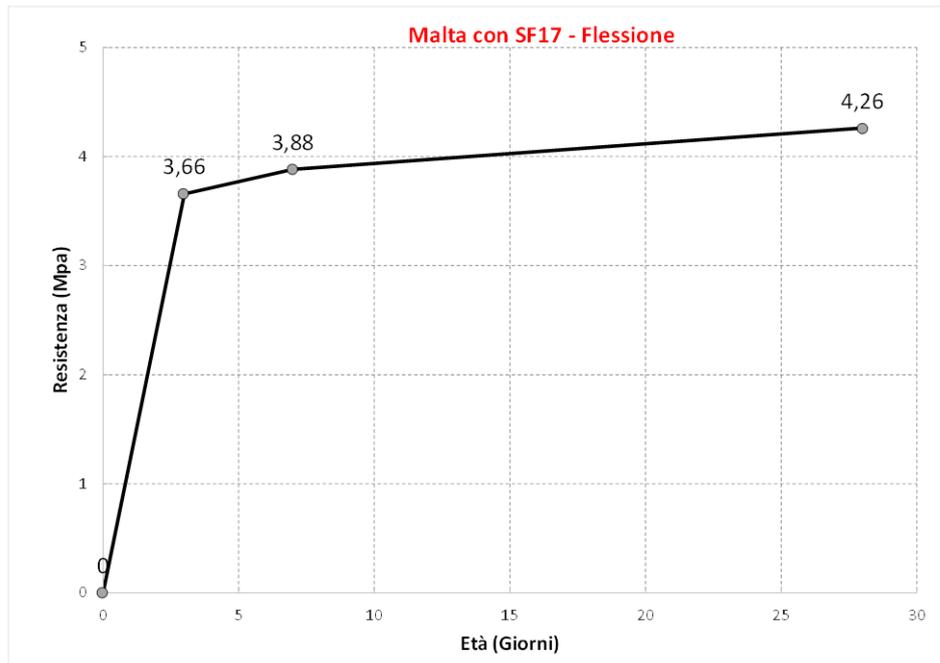


Fig.4 - Risultati della prova di flessione della malta SF17.

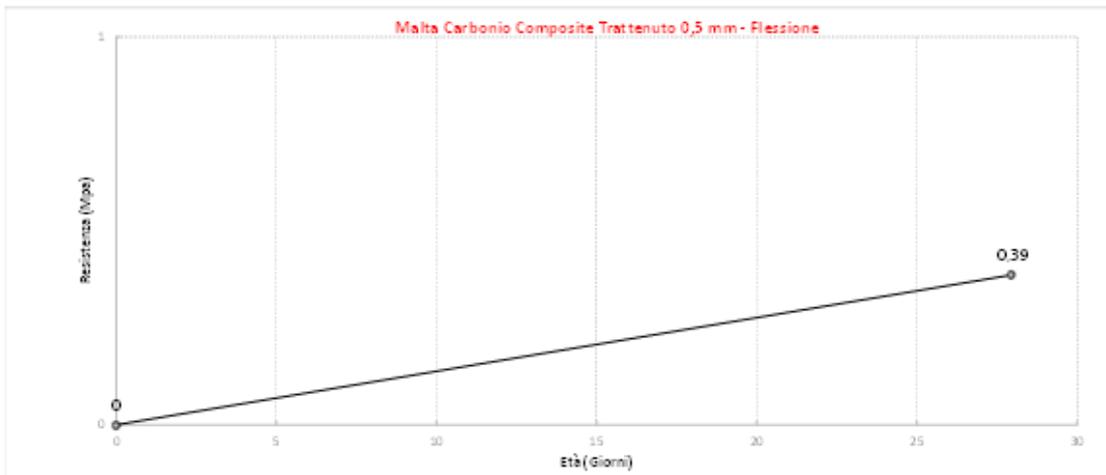


Fig. 5 - Risultati della prova di flessione della malta Carbonio Composite Trattenuto 0.5 mm.

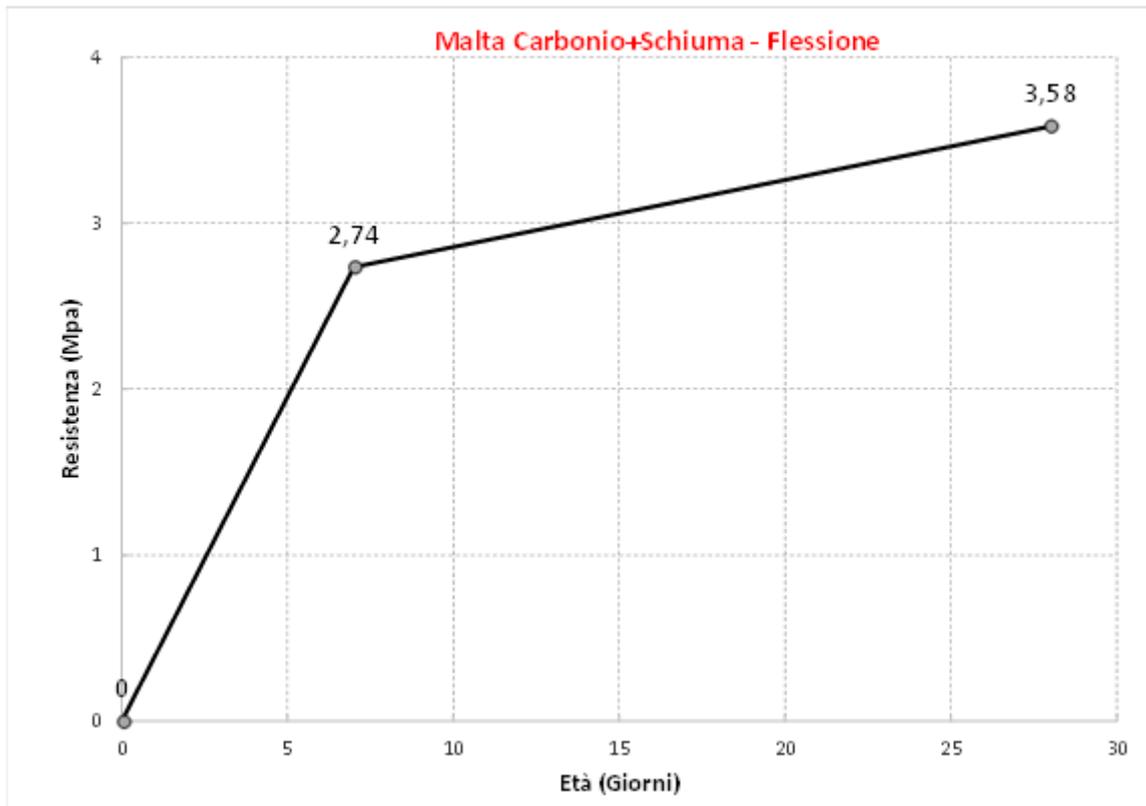


Fig. 6 - Risultati della prova di flessione della malta Carbonio + Schiuma.

Risultati della prova di compressione

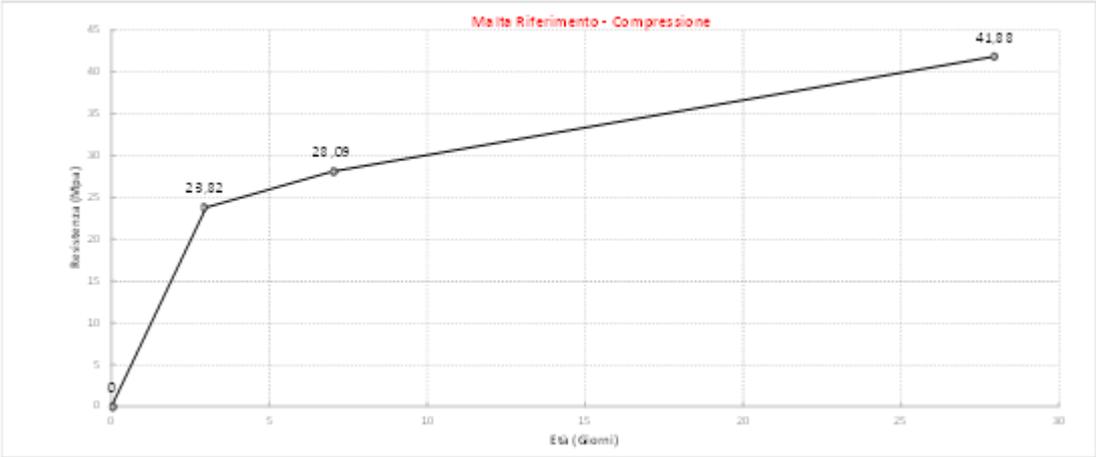


Fig. 7 - Risultati delle prove di compressione della malta di riferimento.

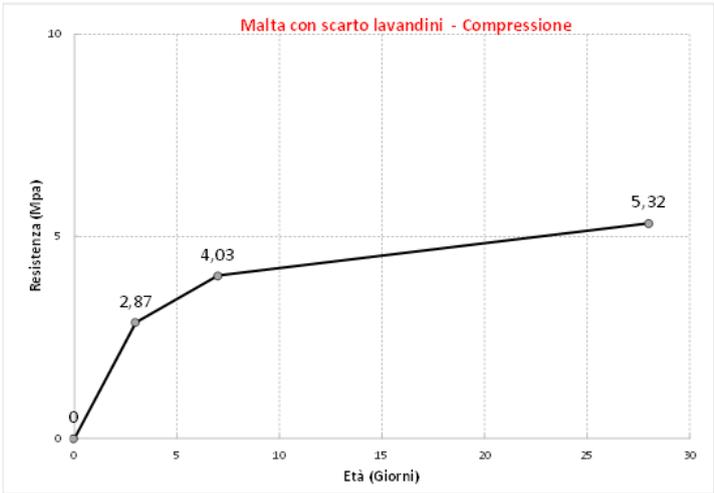


Fig. 8 - Risultati della prova di compressione della malta con scarto di lavandino.

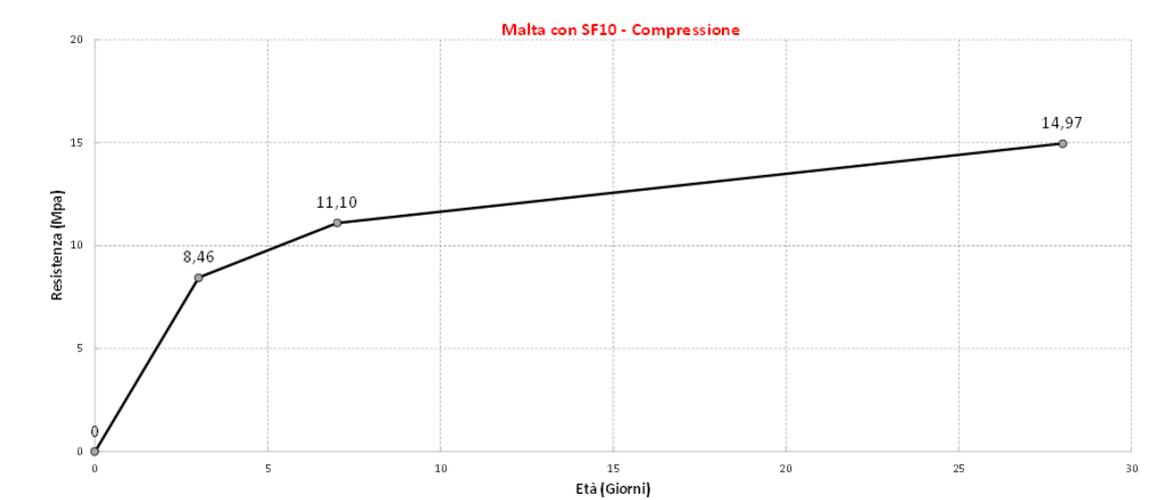


Fig. 9 - Risultati della prova di compressione della malta SF10.

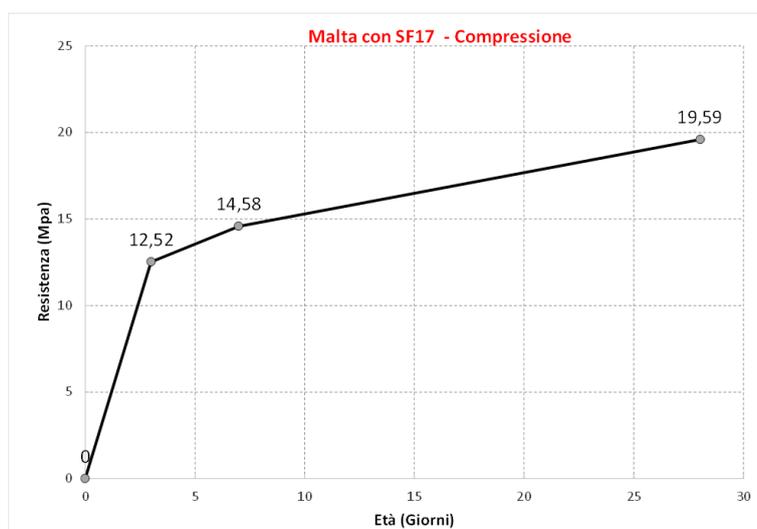


Fig. 10 - Risultati della prova di compressione della malta SF17.

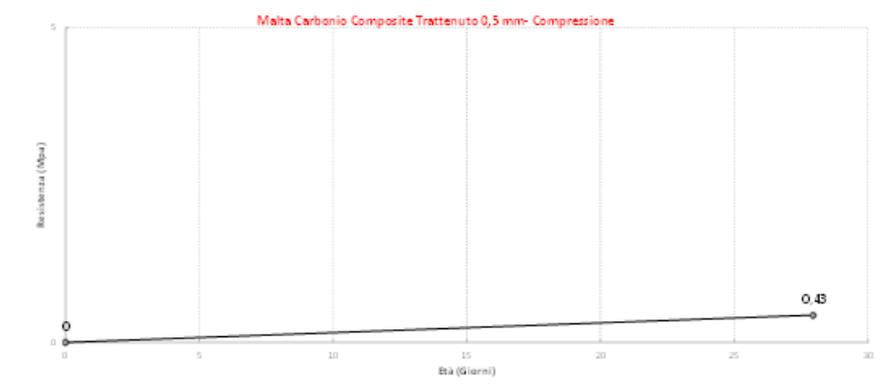


Fig. 11 - Risultati della prova di compressione della malta Carbonio Composite Trattenuto 0.5 mm.

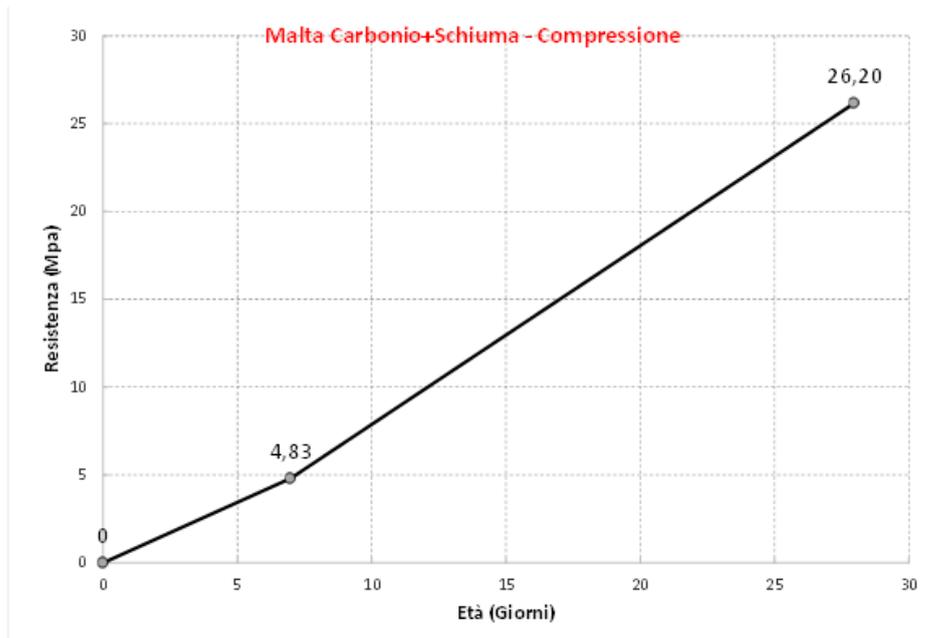
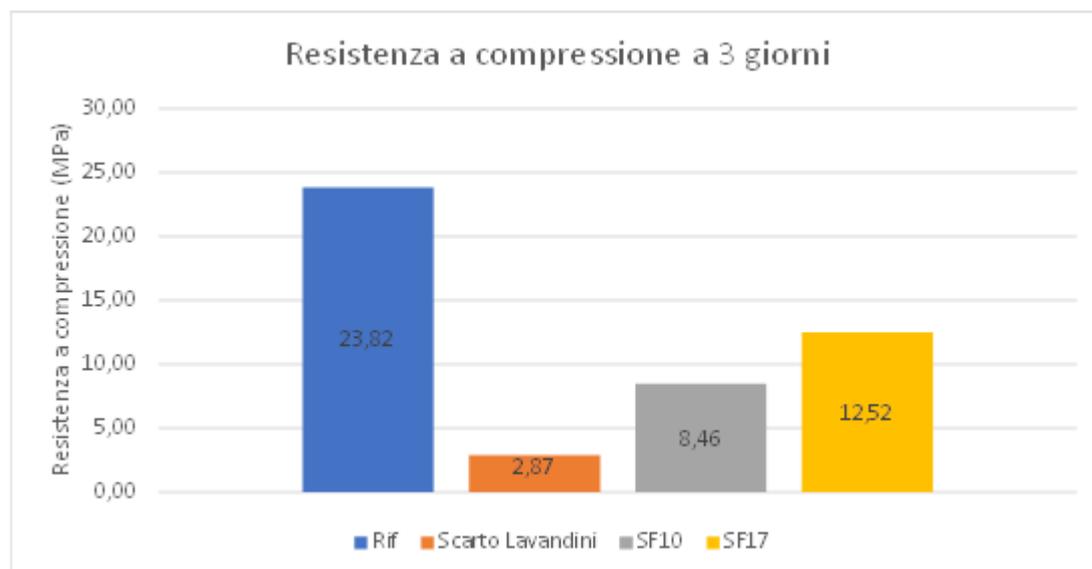
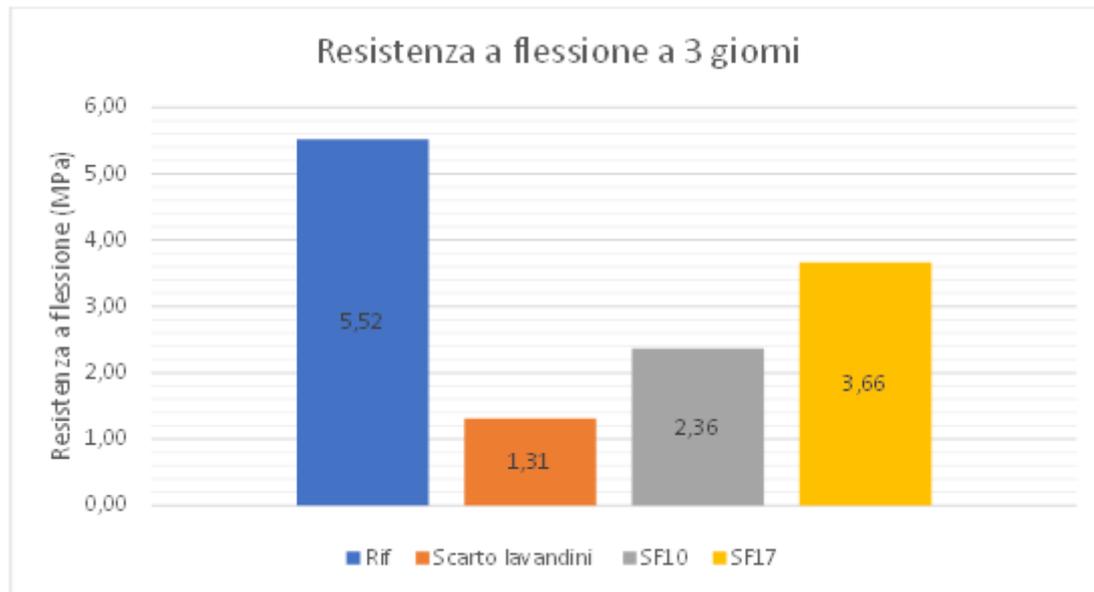


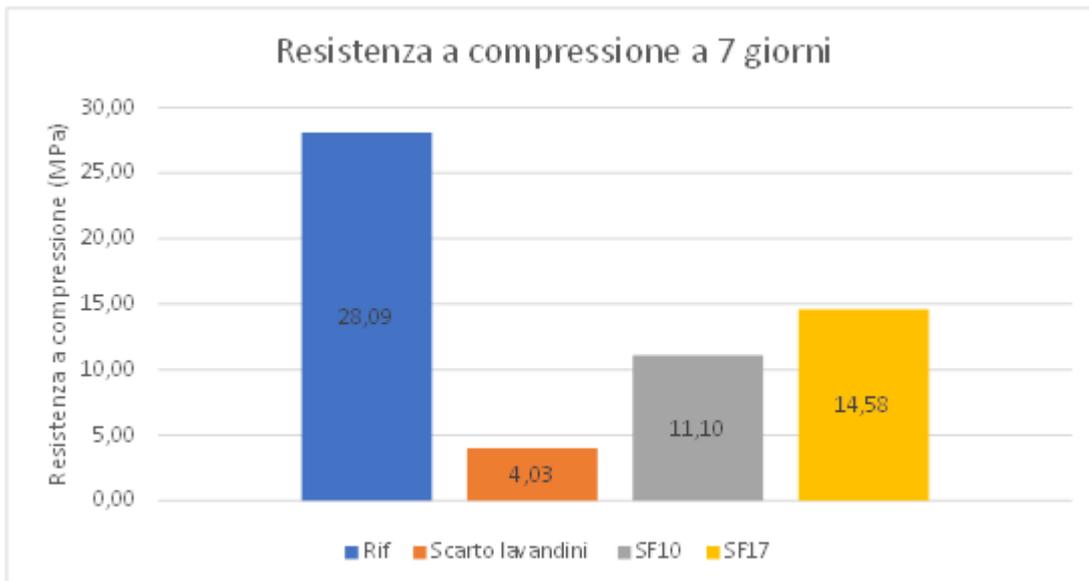
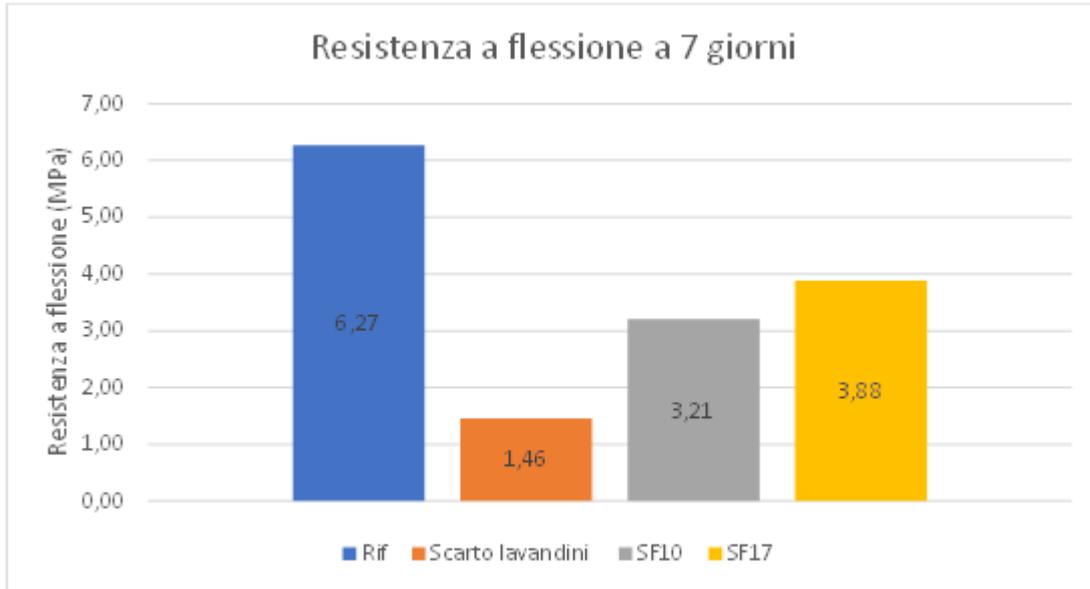
Fig. 12 - Risultati della prova di compressione della malta Carbonio + Schiuma.

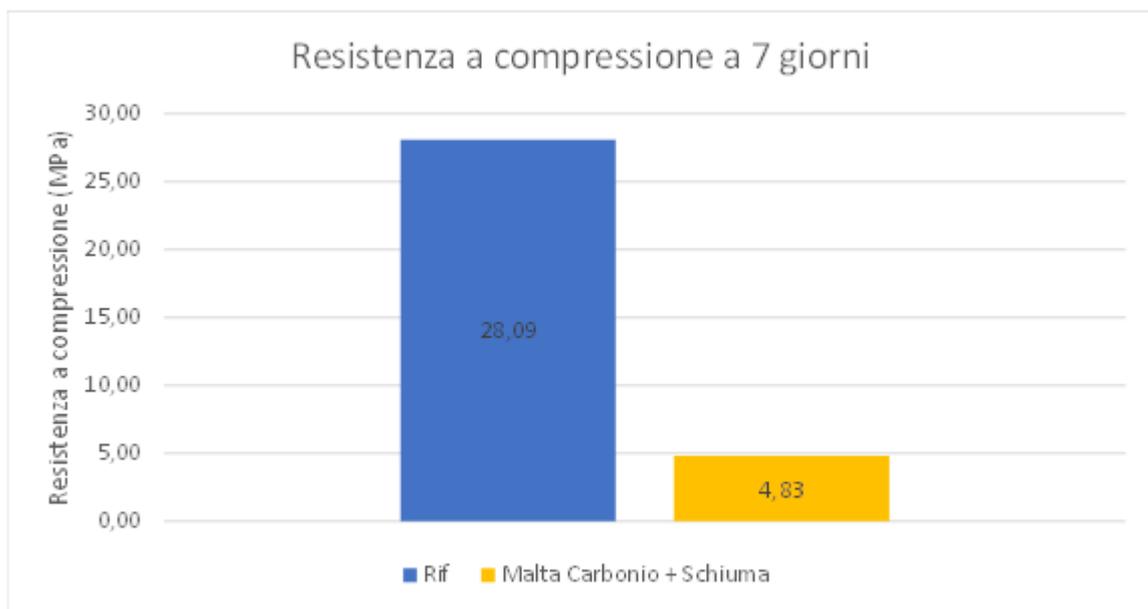
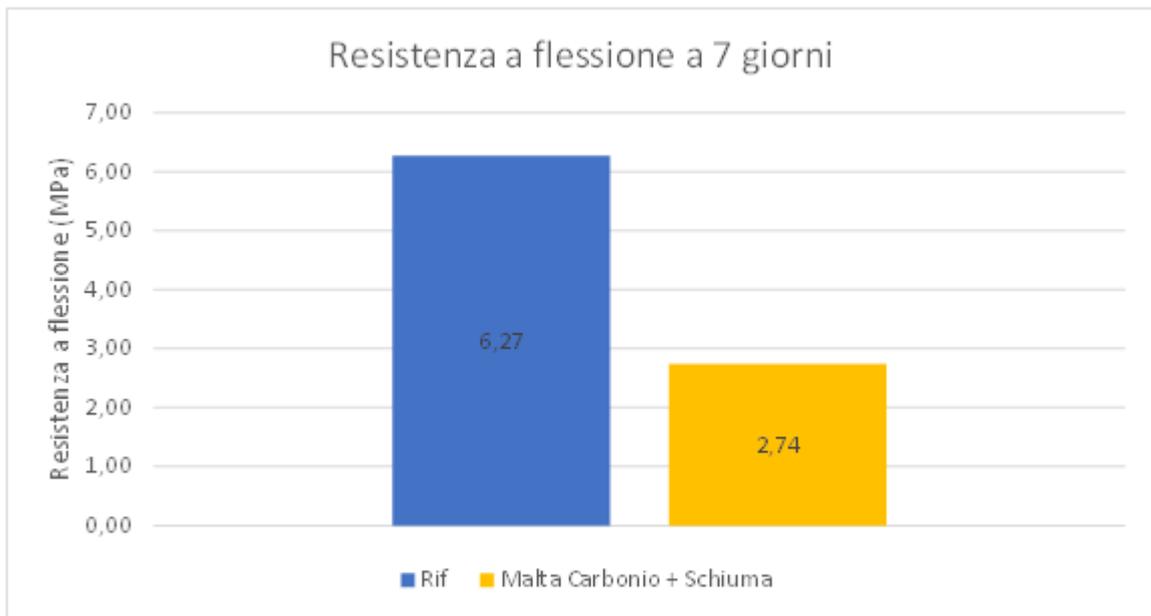
Confronto dei risultati delle due prove

3 Giorni

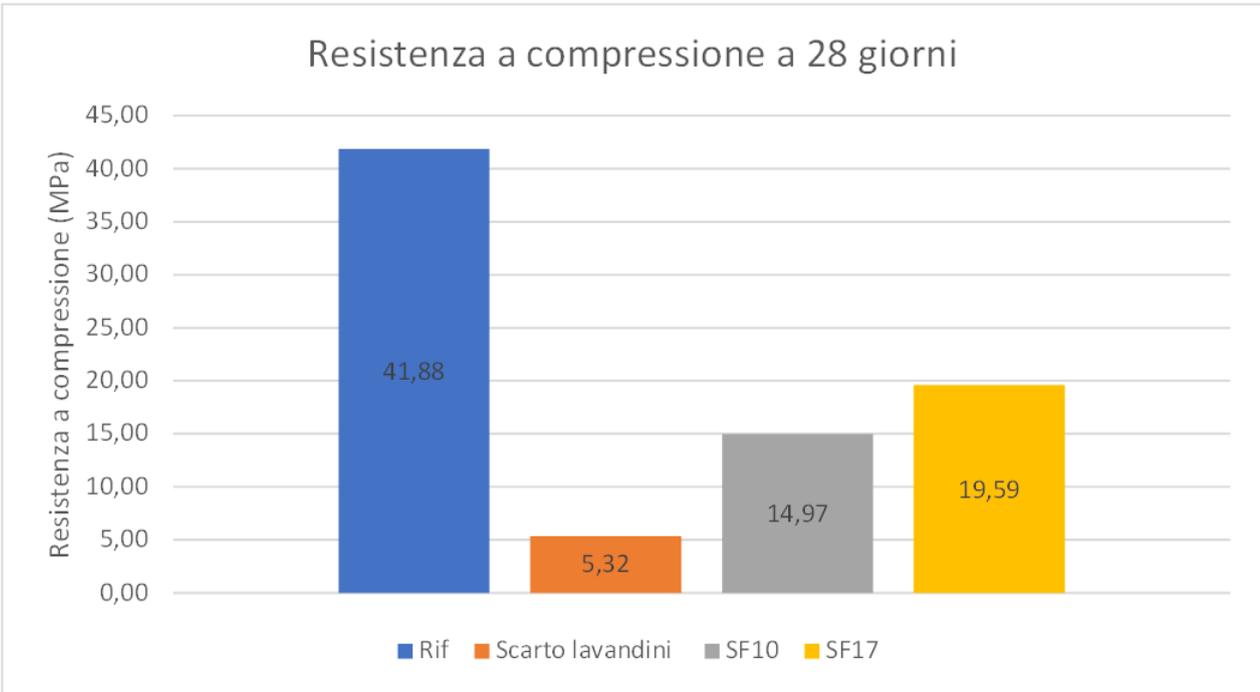
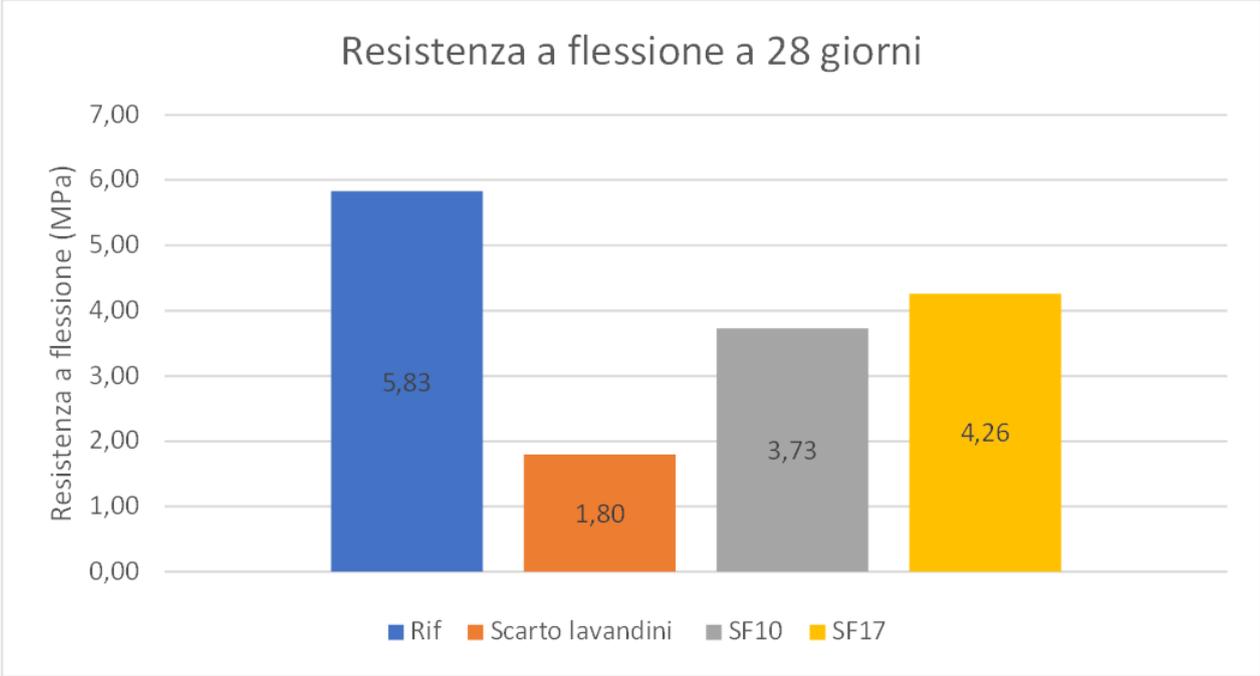


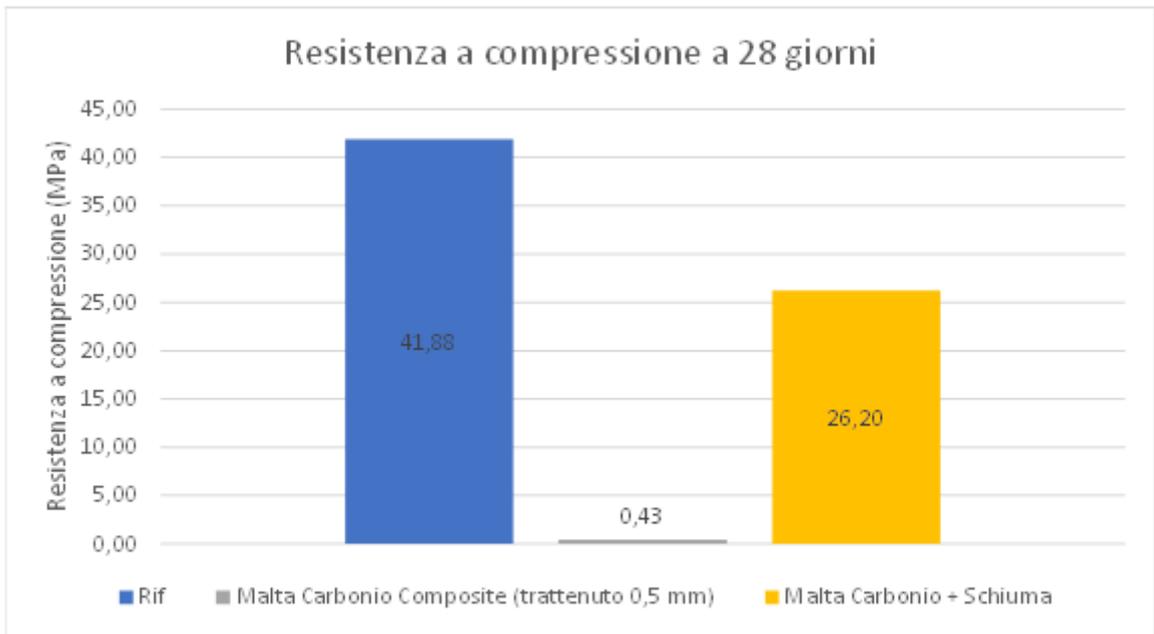
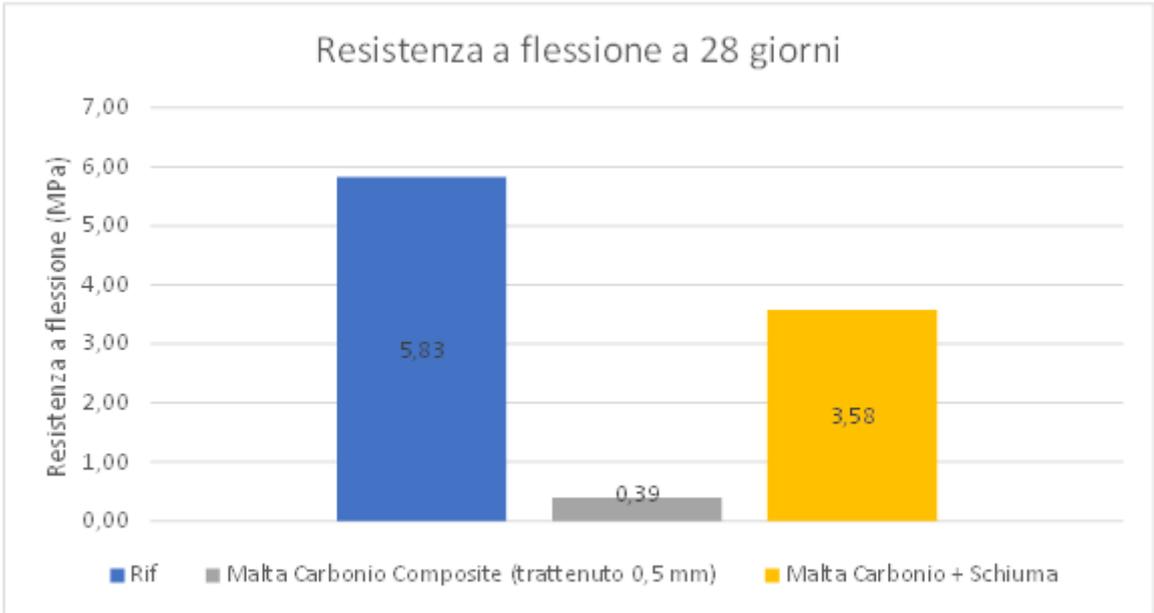
7 Giorni





28 Giorni





6. Conclusione

I rifiuti da costruzione/demolizione e gli scarti industriali di natura edile rappresentano due delle principali componenti dei rifiuti solidi del settore edile. Ogni anno ne vengono prodotte enormi quantità considerate nocive sia per l'ambiente sia per le persone [10].

Nasce quindi la necessità di riconvertirli per riciclarli e riutilizzarli nei processi edili, con abbattimento dei costi di smaltimento e risparmio degli oneri di costruzione. Obiettivo che è alla base dell'edilizia circolare [7,8,10].

Questo elaborato vuole dimostrare che è possibile ricavare dal materiale misto di scarto, fornito dall'impresa Delta (rifiuti da costruzione) e dall'HP Composites (scarti da lavorazioni), nuove materie riutilizzabili.

Dallo studio e dagli esperimenti effettuati sulle malte ottenute, sostituendo l'inerte (sabbia), generalmente utilizzato, con i materiali di scarto forniti - la polvere di lavandini dalla Delta, la polvere di carbonio e la schiuma più carbonio dalla HP Composites - è emerso che queste hanno una leggerezza ed una resistenza inferiori a quella di una miscela di malta classica e del calcestruzzo utilizzato in edilizia.

Quindi, in base ai risultati ottenuti nelle prove meccaniche e chimico-fisiche, è possibile ipotizzare il reimpiego di questi materiali di scarto quali componenti del calcestruzzo alleggerito, che in edilizia trova largo impiego principalmente nella realizzazione dei massetti [23,32].

Lo studio effettuato si è basato sul riutilizzo del materiale fornito nella sua interezza. È importante proseguire la ricerca e valutare la separazione delle varie componenti degli scarti. Ciò sicuramente permetterebbe una maggiore possibilità di impiego delle diverse parti di materiale ottenuto, anche se dovrà essere valutato il costo della lavorazione del rifiuto.

In questa ottica, potrebbe essere interessante approfondire lo studio del recupero e reimpiego delle fibre di carbonio, materiale resistente e particolarmente costoso sul mercato. Attualmente, infatti, le fibre di carbonio hanno un utilizzo privilegiato nel risanamento delle strutture lesionate.

La richiesta delle aziende all'Università di effettuare studi relativi alla rivalorizzazione dei materiali di scarto originati della loro produzione, nasce dalla presa di coscienza generale di quanto sia oggi importante recuperare e riutilizzare. «*Nulla si crea, nulla si distrugge, tutto si trasforma*». Questo enunciato di Antoine-Laurent Lavoisier, chimico e fisico francese vissuto nel 1700, è oggi particolarmente attuale. Le motivazioni economiche, legate alla necessità di ridurre le spese di smaltimento e di approvvigionamento dei materiali, si sommano all'esigenza di salvaguardare il nostro ecosistema, ampiamente già compromesso. [20,25,26].

Per questo oggi l'edilizia circolare è in forte espansione [7,8,10].

Numerosi sono gli studi che possiamo citare al riguardo. Tra questi interessanti sono le pubblicazioni dell'Università degli studi di Torino, Dipartimento di Scienze della Terra: "Recupero

delle macerie: il caso torinese” e “La gestione delle macerie in area urbana: produzione di materiali riciclati e possibilità di autoconsumo”. [21,22]

Nel nostro Paese sono state già realizzate diverse strutture nel rispetto dei principi dell’edilizia circolare. L’Allianz Stadium ed il Palaghiaccio a Torino e lo stadio “Antonio Landieri” di Scampia a Napoli ne sono degli esempi. Queste strutture sono sorte con il recupero ed il riciclo dei materiali.



Fig. 6.1 - L’Allianz Stadium (a) ed il Palaghiaccio di Torino (b) e lo stadio “Antonio Landieri” di Scampia a Napoli (c).

Tra questi l’Allianz Stadium, o stadio della Juventus, ne è il principale esempio, anche a livello tecnologico. Come illustrato nel rapporto Recycle, di Legambiente, per realizzare l’impianto sono stati recuperati materiali dismessi del vecchio stadio “Delle Alpi”, tutti riutilizzati nel nuovo cantiere. Rifiuti per 40.000 metri cubi di calcestruzzo, sono stati frantumati ed impiegati come sottofondo alla base del nuovo impianto. Sono state recuperate 5.000 tonnellate di acciaio, 2.000 metri quadrati di vetro e 300 tonnellate di alluminio. Ciò, oltre a ridurre l’impiego di nuove materie prime, ha permesso un risparmio economico stimato in 2.000.000 di euro circa.

Intervento simile per la realizzazione del Palaghiaccio di Torino, che è sorto sulle ceneri degli impianti olimpici di Torino 2006.

In questo caso i materiali riciclati, sono stati utilizzati come aggregato, usato per realizzare il sottofondo interno ed esterno alla struttura. Sono stati impiegati 20.000 metri cubi di aggregato riciclato. [5,6,9,17]

Dare nuova vita a tutti gli scarti delle lavorazioni edili industriali ed ai rifiuti derivanti dalle costruzioni e demolizioni degli edifici, rappresenta un traguardo a cui deve tendere il settore edilizio odierno. [19]

L'Italia è un paese fortemente a rischio sismico e numerosi sono stati i terremoti che ci hanno colpito negli ultimi anni: nel 1997 in Umbria, nel 2009 in Abruzzo, nel 2012 in Emilia-Romagna e per ultimo nel 2016 quello che ha colpito Marche, Lazio e Umbria.

Oltre alle numerose vittime ed ai danni inestimabili al patrimonio storico culturale e edilizio privato, il nostro paese è stato sommerso da tonnellate di macerie, per non considerare quante ne verranno ancora prodotte dalla demolizione degli edifici tuttora pericolanti.

Diventa quindi fondamentale recuperare questo materiale, che altrimenti graverebbe per lo smaltimento sulle discariche, con grave danno economico ed ecologico.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Park, W. J., Kim, R., Roh, S., & Ban, H. (2020) - Analysis of major environmental impact categories of road construction materials. - *Sustainability*, 12(17), 6951;
2. Norazlina Mohamad Yatim et al 2020 Mater - Res. Express 7 015615
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/ab688f>;
3. Nikolic, Goran, Sasa Zlatkovic, Milorad Cakic, Suzana Cakic, Caslav Lacnjevac, and Zoran Rajic. "Fast fourier transform IR characterization of epoxy GY systems crosslinked with aliphatic and cycloaliphatic EH polyamine adducts." *Sensors* 10, no. 1 (2010): 684-696.;
4. Maity, Parimal, Subramanyam V. Kasisomayajula, Venkitanarayanan Parameswaran, Sumit Basu, and Nandini Gupta. "Improvement in surface degradation properties of polymer composites due to pre-processed nanometric alumina fillers." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 15, no. 1 (2008): 63-72;
5. Legambiente – Rapporto-Recycle 2017;
6. Lo stadio nasce dal riciclo, scelta green che taglia i costi, *Confindustria* -
<https://economiecircolare.confindustria.it/lo-stadio-nasce-dal-riciclo-scelta-green-che-taglia-i-costi>;
7. Pietro Mezzi - Economia circolare in edilizia: quali strategie per costruzioni sostenibili – in "Infobuild" 2019;
8. Linee guida per la progettazione circolare di edifici - Gruppo di lavoro Economia Circolare di GBC Italia – Green Building Council Italia 2020
9. Arch. Graziella Pillari - Riciclo dei rifiuti edili e smaltimento degli scarti da demolizione – in "ArchitetturaEcosostenibile" 2019;
10. Arch. Emanuele Meloni - I rifiuti da costruzione e demolizione (C&D) e l'edilizia circolare – in "Infobuild" 2021;
11. Pietro Mezzi - La demolizione selettiva avanzata- in "Infobuild" 2019;
12. Dossier Economia Circolare – Ance (Associazione Nazionale Costruttori Edili) 2021 -
<https://www.anceaies.it/wp-content/uploads/2021/06/Dossier-Economia-circolare.pdf>;
13. Sito dell'azienda Delta - <https://www.marche-manufacturing.it/it/content/delta-srl>;
14. Sito dell'azienda HP Composites - <https://www.hpcomposites.it/>;
15. Gangemi (a cura di), *Riciclare in architettura. Scenari evolutivi della cultura del progetto* edizioni Clean, 2004;
16. Fondo Fasda – Cosa sono i rifiuti inerti e come smaltirli - <https://www.fasda.it/rifiuti-inerti-cosa-sono/>;

17. *Paola Altamura - Costruire a zero rifiuti: strategie e strumenti per la prevenzione e l'upcycling dei materiali di scarto nell'edilizia, Edizioni FrancoAngeli 2015;*
18. *Antonello Monsù Scolaro - Progettare con l'esistente: riuso di edifici, componenti e materiali per un processo edilizio circolare, Edizioni FrancoAngeli 2017;*
19. *Fabrizio Cumo, Adriana S. Sferra, Elisa Pennacchia - Uso, disuso, riuso. Criteri e modalità per il riuso dei rifiuti come materiale per l'edilizia, Edizioni FrancoAngeli 2015;*
20. *Cinzia Talamo e Marco Migliore - Le utilità dell'inutile. Economia circolare e strategie di riciclo dei rifiuti-pre-consumo per il settore edilizio, Maggioli Editore 2017;*
21. *Giovanni Badino, Giovanna Antonella Dino, Mauro Fornaro e Massimiliano Milone - Recupero delle macerie: il caso torinese - https://www.researchgate.net/profile/Giovanna-Dino/publication/271203941_Recupero_delle_macerie_il_caso_torinese/links/54c11ac00cf25b4b8071b40e/Recupero-delle-macerie-il-caso-torinese.pdf;*
22. *phd. ing. Giovanna Antonella Dino, prof. ing. Mauro Fornaro e ing. Massimiliano Milone - La gestione delle macerie in area urbana: produzione di materiali riciclati e possibilità di autoconsumo - https://www.researchgate.net/profile/Giovanna-Dino/publication/271204326_La_gestione_delle_macerie_in_area_urbana_produzione_di_materiali_riciclati_e_possibilita_di_autoconsumo/links/54c123bb0cf2dd3cb958053d/La-gestione-delle-macerie-in-area-urbana-produzione-di-materiali-riciclati-e-possibilita-di-autoconsumo.pdf;*
23. *Arch. Gaia Mussi - Che cos'è il calcestruzzo alleggerito e quali sono i suoi pregi – in “Infobuild” 2021;*
24. *Modofluido – Economia circolare vs Economia lineare: differenze - <https://modofluido.hydac.it/economia-circolare-lineare-differenze>;*
25. *Edilnet.it - <https://www.edilnet.it/guida/smaltimento-macerie-edili-quali-i-prezzi-345>;*
26. *Prezzi.Info.it – Costo Smaltimento Rifiuti Edili - <https://prezzi.info/prezzi-smaltimento/costo-smaltimento-rifiuti-edili/#:~:text=Per%20avere%20un'idea%20di,di%2035%20euro%20a%20mq;>*
27. *Rem Ecologia - Rifiuti edili? Ecco come gestire gli scarti in cantiere. Le giuste metodologie per una corretta gestione dei rifiuti edili 2020 - <https://www.remecologia.it/news/rifiuti-edili>;*
28. *Eco-Network - Smaltimento rifiuti edili: come farlo correttamente e a norma di legge - <https://www.eco-network.it/smaltimento-rifiuti-edili-come-farlo-correttamente-e-a-norma-di-legge>;*

29. *UNI EN 1015-11 (2019) - Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita;*
30. *UNI EN 1097-3 (1999) - Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati - Determinazione della massa volumica in mucchio e dei vuoti intergranulari;*
31. *T.U. Ambiente - D.Lgs. 152/2006 - Norme in materia ambientale;*
32. *UNI EN 206:2016 - Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità.*

8. RINGRAZIAMENTI

Se chiudo gli occhi, ricordo quel lontano giorno di settembre, in cui ho iniziato la mia avventura di studente all'Università Politecnica delle Marche.

Ero poco più che un ragazzino, appena uscito dalle superiori, che ogni giorno si perdeva per quei grandi corridoi dell'Università.

Oggi al termine di questa avventura, dopo tante prove ed esami, tutto questo mi sembra un sogno. Giunto alla conclusione, sono ancora più convinto della scelta fatta e felice di aver intrapreso questo percorso formativo.

Un ringraziamento quindi ai miei genitori ed a mio fratello. Senza di loro tutto questo non sarebbe stato possibile. Mi sono stati vicini in ogni momento, sia bello che brutto e mi hanno sempre supportato, ma anche sopportato.

Ringrazio tutti i parenti e gli amici con i quali ho condiviso le esperienze di questi anni. Da ciascuno, anche se in modo diverso, ho ricevuto affetto, sostegno e calore.

Un ringraziamento particolare e sentito alla prof.ssa Valeria Corinaldesi che, proponendomi questo lavoro, mi ha permesso di approfondire un argomento particolarmente interessante, innovativo e molto stimolante. È stata sempre presente in tutte le fasi e nella redazione dell'elaborato.

Ringrazio inoltre la mia correlatrice, la prof.ssa Francesca Luzi che, con il proprio lavoro, ha reso questa tesi completa e mi ha supportato in tutta la stesura di questo elaborato.

Ringrazio infine, ma sicuramente non per ultimo, il dottorando Nicola Generosi, che, dal primo momento, mi ha aiutato in ogni fase del lavoro, anche pratica, dispensando consigli fondamentali per la buona riuscita della tesi.