



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in ingegneria civile e ambientale

**PRODUZIONE E CARATTERIZZAZIONE DI MALTE CEMENTIZIE CON
AGGREGATI DA RICICLO: USO DI GUSCI DI SCARTO
DALLA FILIERA AGRO-ALIMENTARE**

PRODUCTION AND CHARACTERIZATIONS OF CEMENTITIOUS MORTARS WITH
RECYCLED AGGREGATES: USE OF SHELL WASTES FROM
AGRI FOOD CHAIN

Relatrice:

Prof.ssa Ing. Chiara Giosuè

Correlatrice:

Prof.ssa Maria Letizia Ruello

Correlatore:

Prof. Ing. Francesco Fatone

Tesi di laurea di:

Camilla Antonini

Anno Accademico

2021 / 2022

Sommario

1. INTRODUZIONE	7
1.1. Scopo dell'elaborato.....	10
2. MATERIALI	11
2.1. Gusci di scarto.....	11
2.2. Acqua di impasto	12
2.3. Sabbia	13
2.4. Cemento	13
2.5. Carbonato di calcio	14
3. METODI	16
3.1. Caratterizzazione dei materiali.....	16
3.1.1. Analisi granulometrica	16
3.1.1.1. Descrizione della prova	16
3.1.1.2. Quartatura.....	17
3.1.1.3. Scelta setacci	18
3.1.2. Cromatografia	18
3.1.2.1. Descrizione della prova	19
3.2. Caratterizzazione del materiale.....	21
3.2.1. Microscopio elettronico a scansione SEM (Scansion Electron Microscope)	21
3.2.2. Prova assorbimento d'acqua per determinare la condizione satura a superficie asciutta (SSA)	23
3.2.2.1. Descrizione della prova	24
3.2.2.2. Pretrattamenti prova SSA	25

3.3. Caratterizzazione chimica del materiale sciolto	26
3.3.1. Preparazione provini per analisi	26
3.3.2. Diffrazione a raggi X (XRD)	27
3.3.2.1. Descrizione della prova	27
3.3.3. Analisi termogravimetrica (TG).....	28
3.3.3.1. Descrizione della prova	28
3.4. Mix design.....	30
3.4.1 Getti	32
3.4.2. Preparazione dei campioni	33
3.5. Caratterizzazione delle malte cementizie	34
3.5.1. Prova di lavorabilità (Slump test).....	34
3.5.2. Caratterizzazione meccanica	35
3.5.2.1. Descrizione della prova	35
3.5.3. Densità	35
3.5.4. Misura della densità delle malte cementizie	36
3.5.5. Calcolo modulo elastico dinamico	37
3.5.6. Prova a flessione	38
3.5.6.1. Descrizione della prova	38
3.5.7. Prova a compressione.....	40
3.5.7.1. Descrizione della prova	40
3.5.8. Porosità	42
3.5.9. Porosimetria.....	42
3.5.9.1. Descrizione della prova	42
3.5.10. Assorbimento d'acqua per capillarità.....	44
3.5.10.1. Descrizione della prova	44
4. RISULTATI	46
4.1. Caratterizzazione dei materiali.....	46
4.1.1. Analisi granulometrica	46

4.1.2. Contenuto ioni liberi	48
4.2. Caratterizzazione chimica dei materiali	50
4.2.1. Diffrazione a raggi X (XRD)	50
4.2.2. Analisi termogravimetrica (TG).....	51
4.3. Caratterizzazione del materiale sciolto	53
4.3.1. Umidità dell'inerte	53
4.3.2. Risultati prova SEM dei materiali sciolti e malte	54
4.3.3. Risultati prova Edax degli aggregati.....	56
4.3.4. Risultati prova SEM per le malte cementizie	59
4.3.5. Risultati prova Edax per le malte cementizie, aggregati e leganti	62
4.3.6. Risultati prova lavorabilità	64
4.4. Caratterizzazione chimico-fisica delle malte cementizie	69
4.4.1. Analisi e risultati sulle malte cementizie	69
4.4.2. Analisi porosimetrica	76
4.4.3. Assorbimento d'acqua per capillarità.....	78
4.4.4. Contenuto ioni cloruro liberi nella malta cementizia	87
5. CONCLUSIONI.....	88
6. APPENDICE	91
6.1. Curve granulometriche T1, T2 e S1	91
6.2. Densità.....	93
6.3. Modulo elastico dinamico	94
6.4. Resistenza a flessione	95
6.5. Resistenza a compressione.....	96
6.6. Assorbimento d'acqua per capillarità	97

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA 100

1. INTRODUZIONE

Un approccio di economia circolare nella filiera agro-alimentare permette di recuperare risorse e materie prime riducendo significativamente gli impatti dei cicli produttivi.

Il concetto di circolarità può essere applicato in tutte le fasi della filiera: dalla coltivazione o allevamento fino alla gestione degli scarti. Questi ultimi rappresentano infatti una risorsa per la produzione di bio-materiali dalle innumerevoli applicazioni.

In particolare, nell'industria ittica i gusci dei molluschi sono costituiti per oltre il 95% da carbonato di calcio e questa sostanza viene utilizzata in molte applicazioni agricole e ingegneristiche.

I gusci di conchiglie rotte possono essere, ad esempio, valorizzate come correttori di acidità del suolo o usate nei mangimi per animali come supplemento di calcio. Il carbonato di calcio è anche utilizzato nelle mescole di cemento, nonché nel trattamento delle acque reflue e risulta essere anche un componente essenziale nei materiali da costruzione¹.

L'industria del cemento è la testimonianza dell'inquinamento atmosferico generato dai gas serra. L'uso di gusci di cozze come substrato per i componenti in calcestruzzo offre una valida alternativa ai sistemi convenzionali. I risultati ottenuti su questo studio, infatti, mostrano che i gusci di cozze possono essere utilizzati per il calcestruzzo non strutturale o per la formulazione di malta cementizia.

Un altro esempio può essere tratto dallo studio effettuato sui gusci di ostriche come materiale fine sostitutivo alla sabbia fluviale utilizzata nella realizzazione del calcestruzzo. In questo caso, i risultati hanno dato un riscontro positivo utilizzando lo stesso rapporto a/c, per quanto riguarda le proprietà di resistenza, mentre è stato riscontrato un calo nelle prove di lavorabilità, rispetto al calcestruzzo non modificato.

Infine, un ultimo esempio è dato dall'utilizzo di conchiglie frantumate come materiale sostitutivo nella realizzazione del calcestruzzo. I risultati, in questo caso, sono stati

¹ <https://www.ediltecnico.it/56567/gusci-molluschi-composizione-utilizzi/>

positivi e dunque, queste ultime possono essere utilizzate come sostituzione dell'aggregato fine nel calcestruzzo convenzionale.

La gran parte del carbonato di calcio proviene da miniere di calcare, meno sostenibili, per questo, tramite un approccio circolare si riesce ad ottenere un duplice risultato: il minor utilizzo di materiale vergine ed una riduzione significativa del materiale destinato alla discarica.

Uno dei maggiori propositi che negli ultimi decenni si sta promuovendo è quello di fornire soluzioni per aiutare a superare le sfide future legate alla produzione alimentare, ai cambiamenti climatici e al riutilizzo dei rifiuti; questo è infatti l'obiettivo generale che promuove il progetto *Sea2land*².

Il concetto chiave di questi ultimi anni che sta prendendo sempre più piede a livello globale è quello di *economia circolare*; espressione utilizzata per definire un'economia pensata per potersi rigenerare da sola.

In un'economia circolare i flussi di materiali sono di due tipi: quelli biologici, in grado di essere reintegrati nella biosfera, e quelli tecnici, destinati ad essere rivalorizzati. L'economia circolare è, dunque, un sistema economico atto a riusare i materiali in successivi cicli produttivi e, proprio per questo motivo, il concetto di *rifiuto* viene sostituito con il termine *sottoprodotto*³.

Le risorse limitate e i cambiamenti climatici rendono necessario il passaggio da una società del tipo *produzione-consumo-scarto* ad un'economia a zero emissioni di carbonio, sostenibile dal punto di vista ambientale, libera dalle sostanze tossiche e completamente circolare entro il 2050.

In linea con l'obiettivo dell'UE di neutralità climatica entro il 2050 previsto dal *Green Deal*, nel marzo 2020 la Commissione europea ha proposto il primo pacchetto di misure per accelerare la transizione verso un'economia circolare, come annunciato

² SEA2LAND Produzione di fertilizzanti avanzati a base biologica dagli scarti della pesca (sea2landproject.eu)

³ <https://www.proquest.com/openview/dc7fddb7e065108080f86a68c2dadcc4/1?pq-origsite=gscholar&cbl=756407>

nel *Piano d'azione per l'economia circolare*. Le proposte includono il potenziamento dei prodotti sostenibili, la responsabilizzazione dei consumatori verso la transizione verde, la revisione del regolamento sui materiali da costruzione e una strategia sui tessili sostenibili⁴.

È d'obbligo, quindi, concentrarsi sui termini chiave di questo tema: rifiuto, recupero, riuso e riciclo.

Si definisce *rifiuto* qualsiasi sostanza od oggetto che rientra nelle categorie riportate nell'Allegato A e di cui il detentore si disfi o abbia deciso o abbia l'obbligo di disfarsi, con riferimento alla *Parte Quarta del D. Lgs. 152/06*.

Per *recupero*, invece, deve intendersi qualsiasi operazione il cui principale risultato sia di permettere ai rifiuti di svolgere un ruolo utile, sostituendo altri materiali che sarebbero stati altrimenti utilizzati per assolvere una particolare funzione o di prepararli ad assolvere tale funzione, all'interno dell'impianto o nell'economia in generale, come riportato nell'art. 183 del *D. Lgs. 152/06* e nel suo allegato C sono riportate quelle che sono considerate operazioni di recupero, con riferimento alla *Direttiva 2008/98/CE*.

Il *riuso* è un'azione immediata e significa riutilizzare un oggetto che non è ancora diventato rifiuto, per la stessa finalità per cui era già stato utilizzato in precedenza.

Con il termine *riciclo*, infine, si intende una nuova utilizzazione di materiali di scarto e di rifiuto al fine di dare una seconda vita, che sia uguale alla precedente o diversa.

⁴ <https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20210128STO96607/economia-circolare-in-che-modo-l-ue-intende-realizzarla-entro-il-2050>

1.1. Scopo dell'elaborato

L'industria delle costruzioni risulta essere impattante nei diversi comparti ambientali, come in termini di emissioni o di utilizzo delle risorse.

Le malte cementizie si ottengono miscelando cemento in polvere, aggregato fine ed acqua.

Il consumo di sabbia nel mondo sta diventando insostenibile e l'edilizia è la causa principale. Per poter garantire l'approvvigionamento sostenibile degli aggregati fini,⁵ è importante provvedere con soluzioni alternative che prevedano l'utilizzo di materie prime alternative.

Nel caso specifico, i prodotti di scarto della filiera agro-alimentare, ovvero i gusci dei molluschi, possono essere classificati come sottoprodotti, dopo essere stati sottoposti a pretrattamenti per la valorizzazione e separazione della frazione organica da quella inorganica.

Valutata questa ipotesi, sono stati effettuati test ed analisi sui campioni preparati tramite pretrattamenti e sostituendo un aggregato convenzionale con delle risorse testate e valutate, che saranno commentati in modo dettagliato nei capitoli seguenti. Infine, sono stati effettuati, per ogni provino ottenuto, confronti con le caratteristiche e le prestazioni meccaniche di un provino di riferimento di malta cementizia.

⁵ *Il problema della sabbia: un'emergenza che l'edilizia deve riconoscere (caseinpaglia.it)*

2. MATERIALI

Nel presente capitolo sono descritti tutti i materiali utilizzati nel corso delle varie fasi della sperimentazione:

- gusci provenienti dal porto di Ancona: su di essi vengono eseguite le analisi di caratterizzazione e vengono realizzati i provini utilizzandoli come sostituti dell'aggregato naturale;
- sabbia calcarea: aggregato che viene utilizzato per la preparazione dei campioni e che viene sostituito in diverse percentuali con i gusci da rifiuti;
- cemento: legante per le malte cementizie, mantenuto in tutti i campioni invariato utilizzato nella realizzazione di provini.

2.1. Gusci di scarto

Con il termine *shell* si indicano i gusci dei molluschi e, nel caso in esame, questi materiali provengono dalla filiera agro-alimentare, dalla selezione di prodotti destinati al consumo del porto di Ancona.

I gusci appartengono alla categoria dei rifiuti che afferiscono al codice dell'elenco europeo dei rifiuti (EER) 020203 (scarti inutilizzabili per il consumo o la trasformazione), ma tramite i processi di recupero possono essere riutilizzati e riclassificati come sottoprodotto. Per essere riutilizzati in altre filiere devono essere trattati preliminarmente. Sono state, dunque, eseguite operazioni di lavaggio e di triturazione dei materiali al fine di eliminare e separare il materiale organico che mediante questi processi va in soluzione, mentre l'inerte sedimenta sul fondo del contenitore nel quale è avvenuto il processo.

In particolare, sono stati preparati due tipi di campioni provenienti dalla stessa industria e sottoposti a due diversi pretrattamenti:

il primo trattamento (*T1*) ha un rapporto in peso di acqua/sottoprodotto di 3:1 il secondo trattamento (*T2*) è eseguito con rapporto in peso di acqua/sottoprodotto un di 1:1.

Ne segue che, che il provino *T1* è stato sottoposto a operazioni più aggressive dovute all'azione dell'acqua e della triturazione, per questo il prodotto finale è più fine, mentre il provino *T2* è più grossolano.



Figura 1: Campione T1.



Figura 2: Campione T2.

2.2. Acqua di impasto

L'acqua è un ingrediente fondamentale per la realizzazione di tutte le fasi della presente sperimentazione: dal lavaggio, alla preparazione dei provini, fino alla formazione della malta cementizia.

Si predilige l'uso di acqua distillata, rispetto a quella di rubinetto perché quest'ultima contiene composti come ferro, cloro, magnesio e altri minerali naturali, mentre l'acqua distillata è nella sua forma più pura senza batteri o composti inorganici.⁶

⁶ <https://it.sawakinome.com/articles/chemistry-science-nature/difference-between-tap-water-and-distilled-water.html>

In particolare, l'acqua è un ingrediente essenziale per consentire la corretta riuscita dell'impasto; infatti, l'aggiunta di acqua permette di ottenere materiali più lavorabili e fluidi. Allo stesso tempo è importante calibrare il contenuto d'acqua ottimale al fine di non perdere le proprietà meccaniche delle miscele.

2.3. Sabbia

In base alla loro composizione chimica, le sabbie si dividono in quattro tipi: le calcaree, la micacea, le glauconiti e le sabbie silicee nonché le più usate. Questo materiale esercita la funzione di aggregato fine nelle malte.

L'utilizzo della sabbia dipende molto dalla sua composizione. La sabbia formata da silicati e da carbonati è quella che viene maggiormente utilizzata nell'edilizia. Infatti, è priva di ogni contenuto argilloso e si usa per produrre malte e calcestruzzi.

Le sabbie vengono vagliate attentamente mediante appositi dispositivi di tipo meccanico o manuale al fine di garantire uniformità di granulometria e per rimuovere eventuali impurità.

2.4. Cemento

Il cemento nasce con il progresso scientifico della chimica alle fine del Settecento con l'aumento della percentuale di argilla nelle miscele con il calcare da inviare al forno di cottura. In particolare, nel caso specifico si utilizza il cemento Portland, brevettato da Aspdin nel 1824⁷.

Il cemento è il cuore delle opere strutturali, infatti esso gioca un ruolo fondamentale sia nelle caratteristiche delle paste sia in quelle delle malte e dei calcestruzzi. Tali proprietà possono cambiare notevolmente a seconda del cemento che si utilizza. Si è reso necessario da parte dell'Unione Europea provvedere ad una normativa per la

⁷ Collepari M., Collepari S., Troli R., *Il nuovo calcestruzzo, V ed., Ed. Tintoretto, 2009.*

classificazione unica del cemento: la *UNI EN 197-1:2011*. Questa classifica i cementi in 5 tipi con 25 sottotipi per 6 diverse classi di resistenza.

Le classi di resistenza dei cementi sono 6, ciascuna indicata con un numero ed una lettera: il numero indica la soglia minima di resistenza meccanica a compressione, espressa in N/mm^2 , misurata a 28 giorni con una procedura standardizzata; la lettera, N o R, sta a significare il comportamento meccanico del cemento alle brevi stagionature. Per la seguente sperimentazione si è utilizzato un *CEM1 52,5R*.

Classe di resistenza (sigla)	Resistenza a compression (N/mm^2) minima garantita a:		
	2 giorni	7 giorni	28 giorni
32.5L	—	12	32,5
32.5N	—	16	32,5
32.5R	10	—	32,5
42.5L	—	16	42,5
42.5N	10	—	42,5
42.5R	20	—	42,5
52.5L	10	—	52,5
52.5N	20	—	52,5
52.5R	30	—	52,5

Figura 3: Tabella resistenze cemento.

2.5. Carbonato di calcio

Il carbonato di calcio, o triossocarbonato di calcio, è un solido cristallino bianco a temperatura ambiente. La sua formula è $CaCO_3$. È il materiale che costituisce una grande varietà di tipi di rocce, come il marmo e il travertino, mentre, tra i minerali costituiti dal carbonato di calcio ci sono la calcite e l'aragonite.

Si tratta di uno dei materiali più utili e versatili conosciuti al mondo. Questo composto è infatti il minerale più utilizzato nell'industria della carta, della plastica, delle vernici, nell'edilizia, nel campo agricolo e anche in campo alimentare⁸.

In particolare, nel campo dell'edilizia, il CaCO_3 è un componente essenziale per:

- la preparazione dei premiscelati di alta qualità per intonaci;
- utilizzo del filler per la produzione di conglomerati bituminosi;
- per la produzione di calce e malte.

In questo caso studio, il carbonato di calcio non è stato aggiunto agli impasti ma è stato usato come materiale di confronto per i materiali *T1* e *T2*.

⁸ <http://www.icopres.it/site/caco3.html>

3. METODI

In questo capitolo si descrivono le prove e i test effettuati sui provini *T1* e *T2* prima di procedere con la preparazione delle malte.

La caratterizzazione dei materiali viene effettuata tramite diverse prove di laboratorio a livello chimico, fisico, meccanico e morfologico.

Nello specifico, nel presente elaborato si approfondirà la caratterizzazione chimica, che comprende il contenuto in ioni come cloruri e solfati tramite cromatografia, la diffrattometria a raggi X e l'analisi termogravimetrica; caratterizzazione fisica che comprende la misura della densità, la porosimetria, l'assorbimento d'acqua e la distribuzione granulometrica; e caratterizzazione meccanica determinando la resistenza a compressione, flessione, densità e modulo elastico del provino e, per concludere la caratterizzazione morfologia tramite microscopia elettronica.

3.1. Caratterizzazione dei materiali

3.1.1. Analisi granulometrica

La prova granulometrica permette di ottenere una descrizione del materiale sulla base della dimensione dei grani che lo compongono.

Viene dunque costruita una curva granulometrica grazie alla quale è possibile evidenziare la composizione di un campione rappresentativo e le sue dimensioni.

3.1.1.1. Descrizione della prova

La prova può essere effettuata tramite due tecniche: per sedimentazione o per setacciatura. Nel caso in esame, verrà analizzata la seconda.

Per la determinazione della distribuzione granulometrica dell'aggregato si ricorre alla separazione tramite vagliatura, con setacci di diversa apertura delle maglie, scelti

facendo riferimento a diverse possibili normative; tra queste si decide di seguire la *UNI 2331-2332* (serie italiana).

Dopo la scelta dei setacci opportuni, questi vengono sovrapposti con apertura crescente dall'alto verso il basso e fatti vibrare, per un tempo di circa 3 minuti, in modo che i granuli si separino in frazioni e vengano trattenuti nei rispettivi setacci con il diametro corrispondente.

Viene successivamente prelevato singolarmente ogni setaccio e pesato il materiale trattenuto.

Le quantità delle singole frazioni granulometriche ottenute, espresse in percentuale, consentono di calcolare il peso del materiale trattenuto da ogni setaccio, rispetto al peso totale del campione iniziale.

I risultati vengono trascritti in un grafico, costituendo la cosiddetta curva granulometrica, la quale è espressa in scala logaritmica.

3.1.1.2. Quartatura

Come prima operazione si definisce il campione più rappresentativo da essere testato. Si è utilizzato il procedimento standard di inquartamento che viene usato per la preparazione dei campioni rappresentativi di rifiuti solidi urbani e descritto nella metodologia CNR. La totalità del materiale è stata disposta sopra un piano pulito in modo da formare una torta circolare di altezza pari a 7 cm e diametro pari a 50 cm; la torta è stata poi divisa in quattro quadranti di eguali dimensioni di cui ne sono stati selezionati due diagonalmente opposti e scartati gli altri due. Il materiale selezionato viene nuovamente disposto sul piano formando una torta di 50 cm di diametro e di altezza pari a 3 cm e il processo precedente viene ripetuto.

In questo modo si otterrà un materiale il più possibile rappresentativo.

Per la prova sono state selezionate due quantità simili da ogni contenitore mediante questa operazione, per un totale di 4 test da cui poi ricavare la media dei diversi test.

3.1.1.3. Scelta setacci

Le normative più comunemente utilizzate sono: la normativa *ASTM E11-70* e la normativa *UNI 2331-2332*.

Nella prova è stata considerata la seconda serie che presenta aperture delle maglie in *mm* partendo da 0,00 mm, 0,063 mm, 0,125 mm, 0,250 mm, 0,50 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 12 mm, 16 mm, fino a 22,6 mm.



Figura 4: Foto piano di lavoro con selezione di setacci.

3.1.2. Cromatografia

La cromatografia ionica ha lo scopo di quantificare ioni solubili come cloruri e solfati presenti all'interno dell'aggregato dopo la loro lisciviazione, e confrontarli con i limiti da normativa.

Non tutto ciò che è considerato inerte da utilizzare per la produzione delle malte e dei calcestruzzi è idoneo ad essere tale. Esistono, infatti, alcuni requisiti in assenza dei quali il calcestruzzo rischia di essere degradato, uno dei quali è l'assenza di sostanze nocive alla durabilità del calcestruzzo.

Tra queste sostanze ci sono il cloruro e il solfato. Il primo è correlato al rischio di corrosione dei ferri d'armatura e nel caso di assenza di armature non ci sono seri rischi

di degrado se non il danno di carattere superficiale per la formazione di depositi salini sulla superficie dei manufatti; il limite nel contenuto di cloruro è lo 0,03% secondo la *UNI EN 8520-2:2016* redatta a complemento all'applicazione della *UNI EN 12620-2:2008*.

Il secondo, invece, comporta il rischio di fessurazione del calcestruzzo per formazione di ettringite espansiva a seguito della reazione con gli alluminati del cemento; il limite nel contenuto di solfato, secondo le stesse normative, è lo 0,2% con riferimento all'inerte e lo 0,8% se esso fosse presente solo nella frazione fine.

È opportuno sottolineare che il gesso, forma in cui può presentarsi il solfato, è indispensabile se presente nel cemento, tanto da essere un costituente principale del cemento Portland, mentre è fonte di degrado se presente nell'inerte. Nel primo caso è un regolatore di presa, nel secondo, invece, è responsabile della formazione di pericolose tensioni del calcestruzzo indurito che possono determinarne fessurazioni deleterie.

Dunque, i cloruri e i solfati sono i contaminanti più corrosivi presenti nei materiali, per questo è importante studiare il quantitativo presente e provvedere ad eventuali correzioni⁹.

3.1.2.1. Descrizione della prova

La tecnica cromatografica sfrutta la diversa attitudine che ogni ione possiede di distribuirsi tra una fase mobile e una fase stazionaria. Grazie a questa tecnica si possono evidenziare gli ioni presenti nelle loro quantità (nel caso specifico cloruri e solfati) tramite la successione di vari picchi all'interno di una curva, ovvero da segnali generati dalle varie sostanze restituiti a tempi caratteristici, che sono riportati in un cromatogramma. In particolare, vengono analizzati i contenuti di solfato e cloruro libero in accordo ai limiti proposti dalla normativa per l'utilizzo come aggregato.

⁹ *Analizzatore di cloruri | Analizzatore di solfati (mt.com)*

Per effettuare il test, sono stati presi due campioni rappresentativi per ogni tipo di aggregato da rifiuto (*T1 e T2*) e, in laboratorio, dopo essere stata pesata la tara e il peso netto dell'aggregato, è stata aggiunta dell'acqua.

In particolare, per l'analisi dei solfati è stato aggiunto un quantitativo di acqua doppio rispetto all'aggregato, perché, per la normativa relativa al contenuto di questi ultimi, si considera un rapporto acqua/inerte di 2:1.

Per quanto riguarda la fase di preparazione per la quantificazione dei cloruri liberi, il rapporto acqua/inerte consideratosi è 1:1, come indicato dalla normativa.

In seguito, i provini sono stati posizionati in un rotore per assicurare la dissoluzione dei sali nelle soluzioni da analizzare per le successive 24h, per quanto riguarda i campioni per lo studio dei solfati; mentre per i campioni finalizzati allo studio dei cloruri il tempo di permanenza nel rotore è di 1h.

La prova si conclude con la quantificazione di cloruri e solfati all'interno degli aggregati tramite un cromatogramma ed il calcolo del contenuto percentuale su materiale secco da mettere a confronto con i limiti da normativa.

3.2. Caratterizzazione del materiale

3.2.1. Microscopio elettronico a scansione SEM (Scansion Electron Microscope)

Il microscopio è uno strumento scientifico che consente di ingrandire oggetti di piccole dimensioni grazie ad una lente. Esso può essere di diverso tipo, i più utilizzati sono quello ottico e quello elettronico. Il primo si basa sull'osservazione dello spettro elettromagnetico nella parte legata al campo della radiazione visibile sfruttando la luce, mentre il secondo utilizza fasci di elettroni.

Il microscopio elettronico può essere a scansione o a trasmissione, il primo è caratterizzato da un fascio elettronico emesso dalla sorgente e comandato in modo da eseguire una scansione che esplori, elemento per elemento, la superficie dell'oggetto in esame, il secondo, invece, utilizza lenti di tipo elettromagnetico. La sorgente di elettroni di un microscopio elettronico a scansione tipicamente è costituita da un filamento di tungsteno, in grado di creare il fascio di elettroni che andrà ad investire il campione mantenuto sottovuoto per evitare che l'aria disturbi la creazione del fascio; è fondamentale rendere conduttivo il materiale per permettere la rilevazione del segnale ed evitare la produzione di cariche elettrostatiche. Inoltre, il campione deve essere reso il più omogeneo possibile per consentire l'affidabilità dell'analisi.

Il microscopio elettronico a scansione SEM, fornisce informazioni sull'aspetto, sulla natura e sulle proprietà di superfici e degli strati sottostanti di campioni solitamente solidi, con risoluzione media di 2÷5 nm.

Il principale segnale utilizzato in questo strumento per la formazione dell'immagine è basato sull'emissione di:

- elettroni retrodiffusi - dipendono da Z e danno informazioni sulla composizione del materiale;
- elettroni secondari - generati nei primi 10nm, dipende dall'inclinazione locale del campione rispetto al fascio e forniscono informazioni sulla morfologia del materiale;

- elettroni Auger e/o Raggi x Legge di Mosely= e danno informazioni sulla composizione da parte del campione colpito da un fascio di elettroni ad alta energia.¹⁰

Il focus della prova, in questo caso, è lo studio della morfologia dei materiali sciolti e delle malte cementizie.

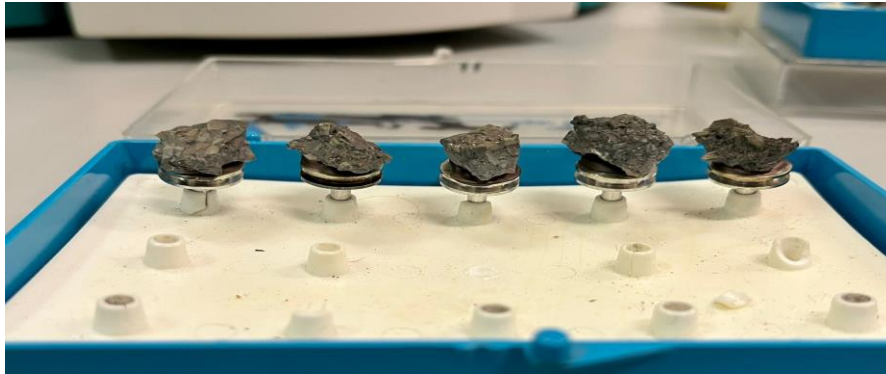


Figura 5: Campione posizionato su materiale conduttivo.

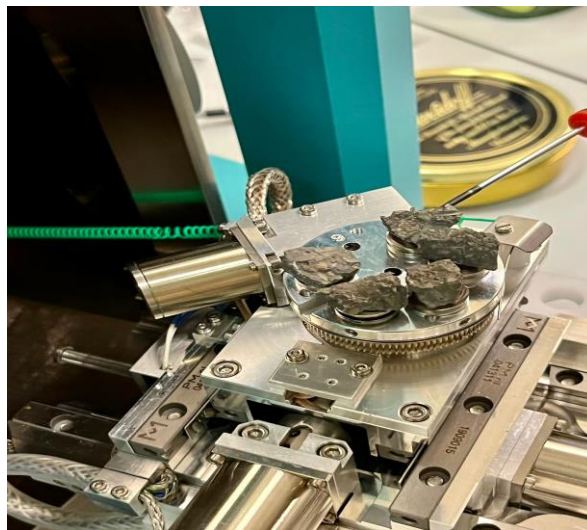


Figura 6: Posizionamento provini per effettuare l'analisi.

¹⁰ Collepardi M., Collepardi S., Troli R., *Il nuovo calcestruzzo*, V ed., Ed. Tintoretto, 2009.

3.2.2. Prova assorbimento d'acqua per determinare la condizione satura a superficie asciutta (SSA)

L'obiettivo della prova SSA, o meglio Prova del castelletto, è quello di trovare il corretto valore percentuale di acqua, necessario per poter ottenere un aggregato saturo a superficie asciutta (SSA).

L'umidità dell'aggregato è il parametro che rappresenta una grande e importante variabile per le caratteristiche dell'impasto sia allo stato fresco ma anche allo stato indurito delle malte. Infatti, l'umidità dell'aggregato può modificare l'acqua di impasto, essendo questa la componente che, da sola, è responsabile della lavorabilità e, rapportata al cemento, della resistenza meccanica.

Le condizioni in cui può trovarsi un aggregato sono diverse: satura, insatura, asciutta e bagnata. La sabbia può definirsi asciutta, o secca, se sia i vuoti che la superficie sono completamente asciutti, si ha questa condizione se la differenza tra il peso bagnato e il peso asciutto del materiale è inferiore allo 0,1% o allo 0,2% in peso, a seconda della procedura utilizzata per la determinazione del peso asciutto. Si dice, invece, che un aggregato è nella condizione SSA, satura a superficie asciutta, se le porosità sono tutte sature d'acqua mentre la superficie è completamente asciutta, senza acqua grondante. Si definisce insatura, o umida, la condizione per la quale c'è umidità all'interno dell'aggregato ma non c'è saturazione. Infine, si dice bagnato, o sovrasaturo, un aggregato con acqua sia dentro che fuori dai suoi vuoti.

Per determinare la quantità di umidità presente nell'aggregato si usa la formula:

$$Umidità (\%) = ((Peso\ umido - Peso\ secco) / (Peso\ secco)) \times 100$$

3.2.2.1. Descrizione della prova

La prova si svolge in due fasi: la preparazione del campione e la fase di misura.

Per quanto riguarda la prima parte, nel caso in questione, sono stati considerati 4 campioni diversi, due di sabbia e due di gusci, per ciascun tipo di trattamento, i quali sono stati pesati e successivamente sono stati aggiunti dei precisi quantitativi di acqua. Il fulcro della prova, inizia dopo che i provini sono stati a contatto con l'acqua per 24h, al fine di far penetrare correttamente l'acqua somministrata all'interno della porosità presente nell'aggregato.

Si procede, quindi, alternando processi di asciugatura e pesata dei vari campioni, intervallando a queste fasi una verifica della compattezza del materiale tramite un contenitore cilindrico, forato alle estremità, nel quale viene inserito e compattato il materiale, effettuando la prova del castelletto.

La prova si dirà conclusa quando, una volta inserito il materiale nel contenitore e dunque compattato, rimuovendolo, questo non si manterrà completamente coeso (Figura 7).

È importante sottolineare che, la prova, per ritenersi corretta e conclusa, non sarà solo necessario che il castelletto formatosi non sia compatto, ma è opportuno raggiungere il valore di umidità della condizione SSA idoneo, quindi, l'aggregato non dovrà essere né troppo bagnato ma neanche eccessivamente asciutto.

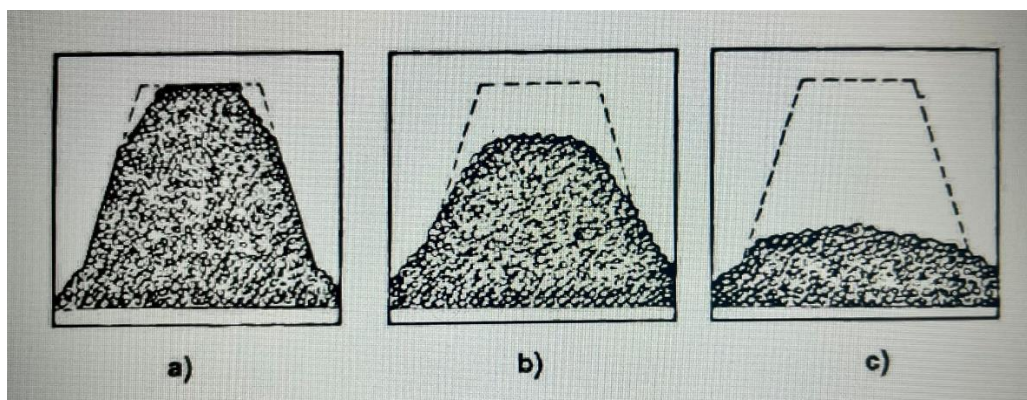


Figura 7: Descrizione delle fasi della prova SSA.

3.2.2.2. Pretrattamenti prova SSA

Per questa prova sono stati utilizzati 6 provini, due per la sabbia e due per i sottoprodotti di interesse ovvero i gusci di scarto, due per ciascuna tipologia.

Per poter effettuare la prova SSA, sono stati prelevati dei campioni rappresentativi e sono stati aggiunti a questi ultimi, diverse percentuali d'acqua in modo da ottenere un'analisi caratteristica.

In particolare, si è preparato un campione di sabbia, denominato *S1* con un contenuto di acqua al 10,2% ed un secondo provino con un contenuto di acqua al 35,5%.

Per quanto riguarda i gusci, invece, sono stati denominati rispettivamente: *T1* contenente un rapporto iniziale di acqua/inerte 3:1, nel quale è stato aggiunto un ulteriore 15% di acqua, e *T2* con un rapporto 1:1 iniziale di acqua/inerte con una successiva aggiunta del 17,5% di umidità.

Dopo aver pesato e mescolato i materiali insieme all'acqua somministrata, sono stati coperti e messi a riposo per le successive 24h.



Figura 8: Preparazione provino con gusci.



Figura 9: Preparazione provino con sabbia.

3.3. Caratterizzazione chimica del materiale sciolto

3.3.1. Preparazione provini per analisi

Per eseguire queste analisi è necessario preparare il materiale in maniera adeguato.

Dato che la quantità di materiale su cui si eseguirà la prova è molto piccola è opportuno che il provino da analizzare sia il più possibile omogeneo, così da essere maggiormente rappresentativo del totale. Per fare ciò, quindi, si procede alla macinazione del medesimo fino ad ottenere un passante al setaccio di apertura 90 μm .

La riduzione in polvere si effettua tramite pestaggio con pestello e mortaio in ceramica: si effettua la pulizia del mortaio con carta e con una piccola parte di materiale così da evitare la presenza di impurità o di materiali precedente pestati che andrebbero a contaminare il provino in analisi; poi si procede prima alla frantumazione del materiale battendo il pestello sul fondo del mortaio e, in seguito, per sfregamento e pressione, alla polverizzazione.



Figura 10: Mortaio e pestello utilizzati.¹¹

¹¹ pestello e mortaio - Bing images

3.3.2. Diffrazione a raggi X (XRD)

Tramite la prova di diffrazione a raggi X è possibile conoscere il tipo e le quantità di CaCO_3 (Paragrafo 2.5.) presenti nell'aggregato di riferimento.

Questa prova è di tipo semi quantitativo, infatti per avere un range di valori più dettagliato è necessario effettuare una prova termogravimetrica (TG), la quale verrà descritta in seguito (Paragrafo 3.3.3.).

3.3.2.1. Descrizione della prova

La tecnica di diffrazione a raggi X è basata sul fenomeno ottico della diffrazione: un fascio di raggi X, inviato sul campione, viene deviato o, appunto, diffratto, secondo un angolo che dipende dalla struttura cristallina dei composti presenti.

Ogni composto dà origine a uno o più segnali secondo un pattern caratteristico per ogni sostanza cristallina, tale da permettere l'identificazione per confronto con spettri di sostanze note. Questo metodo di indagine, infatti, non fornisce informazioni su materiali di natura vetrosa o resinosa per via dell'assenza di una struttura reticolare ordinata.

L'aggregato per essere sottoposto alla prova è stato macinato manualmente con un mortaio, fino al raggiungimento di una polvere passante ad un setaccio di 90 micron. Questo parametro è fondamentale per la riuscita della prova perché, rende l'aggregato omogeneo e, dunque, evita che lo strumento rilevi dei picchi non reali.

Infine, la curva e i risultati ottenuti con la scansione a raggi X, sono stati messi a confronto con il database dello strumento così da poter identificare i tracciati dei diversi materiali ¹².

¹² <https://www.cristallieminerale.com/cristalli/aragonite/>

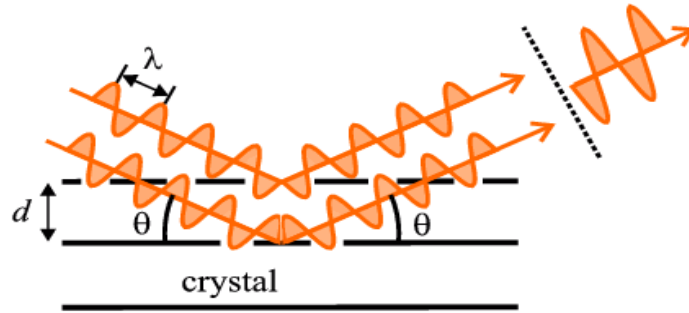


Figura 11: Rappresentazione fenomeno diffrazione¹³.

3.3.3. Analisi termogravimetrica (TG)

L'analisi termogravimetrica è una prova di tipo quantitativo, infatti, essa permette di caratterizzare un prodotto indipendentemente dal fatto che quest'ultimo abbia una struttura amorfa o cristallina.

La TG, associata alla prova di diffrazione a raggi X (Paragrafo 3.3.2.), permette di quantificare i diversi componenti e valutare con certezza il comportamento di un dato materiale alle variazioni di temperatura (t).

3.3.3.1. Descrizione della prova

La termogravimetria è un metodo sperimentale di caratterizzazione dei materiali rientrante nella famiglia delle analisi termiche e caratterizzazione chimica dei materiali.

La tecnica consiste nella misurazione continua della variazione di massa di un campione di materiale in funzione del tempo e all'aumentare della temperatura. In tal modo si potranno analizzare le varie perdite di peso, in relazione alla variazione di temperatura, per poter conoscere la composizione dell'aggregato in esame.

Il risultato di tale analisi è generalmente indicato in un Termogramma o Curva di Decomposizione Termica dove sono riportate diverse curve al variare della temperatura e allo scorrere del tempo di prova.

¹³ immagini diffrazione fenomeno - Bing images

Le curve riportate nei grafici sono scelte dall'elaboratore, tipicamente sono rappresentate le seguenti curve:

- la curva principale della perdita di peso, definita *TG*, ottenuta dal confronto tra due curve, quella della misura effettiva durante la prova e quella di riferimento relativa al solo crogiolo portacampione, in quanto quest'ultima, seppur minimamente, influenzerebbe il risultato finale;
- la derivata della curva precedente, denominata *DTG*, che rappresenta la velocità della perdita di peso, utile per identificare fenomeni con piccole perdite di massa, in corrispondenza dei punti di flesso della curva e per risolvere processi molto ravvicinati non ben visibili dalla curva principale;
- la curva *SDTA*, Singol Differential Thermal Analysis, utilizzata per studiare trasformazioni esotermiche ed endotermiche. Questa rappresenta la differenza di temperatura tra il campione ed un riferimento inerte, in corrispondenza di un picco della curva si ha la presenza di una trasformazione chimico-fisica.

3.4. Mix design

Il Mix design è letteralmente il progetto della miscela o, più esattamente, è il calcolo della composizione del calcestruzzo a partire dalle prestazioni richieste e dalle caratteristiche delle materie prime disponibili, si ottengono così gli ingredienti e le loro proporzioni per la composizione del calcestruzzo. In questo paragrafo sono quindi indicate le proporzioni con cui miscelare gli ingredienti per produrre paste e malte con caratteristiche adeguate.

Nell'eseguire un mix design si devono tenere in considerazione alcune regole di base:

- la *lavorabilità* (classe di consistenza): cresce all'aumentare del quantitativo di acqua utilizzata per l'impasto e dipende anche dalle caratteristiche degli inerti utilizzati (diametro massimo previsto e superficie dell'inerte: liscia o scabra) oltre che dalla presenza di eventuali additivi specifici;
- la *resistenza meccanica*: è funzione del rapporto acqua/cemento (a/c) e della quantità di cemento da utilizzare (se misurata a 28 giorni dipende anche dal tipo e dalla classe del legante); al diminuire del primo e al crescere della seconda aumenta la resistenza meccanica;
- il grado di *durabilità* (classe di esposizione): cresce in maniera inversamente proporzionale con il rapporto a/c^{14} .

Pertanto, il parametro principale del progetto di miscela è il rapporto a/c che deve essere idoneo a garantire le prestazioni richieste della miscela.

Questo significa che per aumentare la lavorabilità, senza l'utilizzo di additivi, bisogna aumentare la quantità di acqua ma proporzionalmente anche il tenore di cemento per mantenere costante il valore a/c atteso per non compromettere il grado di durabilità e la resistenza meccanica del materiale.

Nella ricerca è fondamentale definire il rapporto ottimale tra acqua e legante per ottenere malte che risultino contemporaneamente sufficientemente lavorabili e

¹⁴ Colleparidi M., Colleparidi S., Troli R., *Il nuovo calcestruzzo*, V ed., Ed. Tintoretto, 2009.

resistenti. Infatti, la lavorabilità è influenzata dal contenuto d'acqua e la resistenza dal rapporto tra l'acqua e il legante: il rapporto viene scelto, quindi, sulla base di entrambe le osservazioni.

In particolare, nel caso studio, prendendo come riferimento i valori ottenuti da un campione di riferimento, si è voluto sostituire parte dell'inerte con dell'aggregato precedentemente trattato, ovvero i gusci provenienti dal materiale di scarto del porto di Ancona, con lo scopo di confrontare le caratteristiche prestazionali di ogni campione ottenuto, a diversi percentuali di sostituzione.

	Acqua	Cemento	Sabbia SSA	Materiale sostituito SSA	a/c
	g/l	g/l	g/l	g/l	-
RIF	225	450	1350	-	0,5
T1 10%	225	450	1215	135	0,5
T1 20%	225	450	1215	135	0,5
T1 40%	225	450	1080	270	0,5
T2 10%	225	450	1080	270	0,5
T2 20%	225	450	810	540	0,5
T2 40%	225	450	810	540	0,5

Tabella 1: Calcoli Mix Design.

	Acqua	Cemento	Sabbia	Materiale sostituito	a/c
	g	g	g	g	-
RIF	415	829	2488	0	0,5
T1 10%	415	829	2239	249	0,5
T1 20%	415	829	2239	249	0,5
T1 40%	415	829	1991	498	0,5
T2 10%	415	829	1991	498	0,5
T2 20%	415	829	1493	995	0,5
T2 40%	415	829	1493	995	0,5

Tabella 2: Getto effettivo, per 2 litri di getto.

Come si vede dalla tabella 2, per la preparazione delle malte cementizie sono state considerate diverse percentuali di materiale di sostituzione (rifiuto alimentare precedentemente trattato, con due pretrattamenti) e sono stati miscelati assieme ad acqua e cemento di quantità fissa, mentre sabbia in quantità diversa, in base alla quantità di materiale di sostituzione.

3.4.1 Getti

Si realizzano le malte cementizie al fine di caratterizzare sia le proprietà allo stato fresco sia le proprietà allo stato indurito, dopo maturazione in apposita cella ad una temperatura di 20 ± 2 °C e umidità relativa $95 \pm 5\%$.

I provini che si realizzano tipicamente per lo studio delle malte sono di dimensioni 4x4x16 cm, nelle *Figure 12 e 13* sono raffigurati i casseri standard, normati *UNI EN 12390-1:2012*, che sono stati utilizzati.

3.4.2. Preparazione dei campioni

Con il quantitativo di aggregato preparato sono stati realizzati, per ogni campione, i provini di dimensioni 4x4x16 cm.

L'inserimento del materiale all'interno dei casseri avviene manualmente e viene accompagnato da fasi di vibrazioni meccaniche e manuali per favorire la compattazione del materiale e la fuoriuscita di aria.

Una volta completata questa operazione, i provini vengono avvolti con della pellicola e riposti a stagionare a temperatura di 20 ± 2 °C e umidità relativa $95 \pm 5\%$.



Figura 12: Struttura del cassero.



Figura 13: Foto campioni rimossi dai casseri.

3.5. Caratterizzazione delle malte cementizie

3.5.1. Prova di lavorabilità (Slump test)

La prova di lavorabilità esprime la capacità della malta allo stato fresco di muoversi e compattarsi.

In questa analisi, ogni campione è stato inserito all'interno di un cono metallico forato da entrambi i lati ed è stato sottoposto a 15 colpi consecutivi, per poter poi, dopo aver rimosso il cono, misurare di quanto il materiale si fosse espanso tramite la misurazione del diametro.

I valori ricercati in questa sperimentazione per il diametro sono nel range di 14-20 cm, che, in accordo con la normativa *UNI 1015-3* e *UNI 1015-6*, classificano le malte con slump compresi tra i 140 mm e 200 mm come plastiche.



Figura 14: Prova di lavorabilità.



Figura 15: Mortar Mixer.

3.5.2. Caratterizzazione meccanica

3.5.2.1. Descrizione della prova

La prova è costituita da una parte iniziale, nella quale vengono preparati i campioni e in cui viene fatta la prova di lavorabilità della miscela e, nei 2, 7 e 28 giorni successivi, verranno eseguite le prove per determinare la densità, il modulo elastico dinamico, la prova di resistenza a flessione e la di resistenza a compressione su un foglio di calcolo elettronico.

La preparazione dei provini inizia con la miscelazione per 2 minuti circa di acqua, sabbia, cemento e aggregato di sostituzione (gusci trattati), precedentemente pesati, nel miscelatore. In questo caso, per nessun campione è stato necessario aggiungere del super fluidificante, dunque, al termine dei minuti necessari è stata immediatamente eseguita la prova di lavorabilità e, di seguito, il materiale è stato disposto nei rispettivi casseri e riposto a stagionare.

Nei 2, 7 e 28 giorni successivi, sono stati selezionati alcuni dei campioni ottenuti con i casseri e sono state eseguite cronologicamente: la prova per determinare il modulo elastico dinamico, la prova di flessione e quella di compressione e, al termine, sono stati elaborati i risultati tramite un foglio di calcolo.

3.5.3. Densità

La porosità di un materiale deriva dall'insieme di pori presenti nella sua struttura. Tali pori possono essere chiusi, quando sono delimitati da una superficie chiusa, oppure aperti, quando sono comunicanti con l'esterno.

Esistono diversi tipi di densità:

- densità in mucchio (ρ_m): il rapporto tra la massa ed il volume di un campione considerando porosità tra granulo e granulo per materiali incoerenti, porosità aperte e porosità chiuse;

- densità apparente (ρ_a): massa del campione diviso il volume del campione considerando solo le porosità chiuse;
- densità reale (ρ_r): massa del campione diviso il volume reale del campione, che considera solo lo spazio occupato dal solido trascurando le porosità.

3.5.4. Misura della densità delle malte cementizie

La misura della densità è un aspetto fondamentale durante la fase di analisi dei risultati, in particolare è stata utilizzata per calcolare il modulo elastico dinamico e per confrontare varie perdite di peso rispettivamente a 2, 7 e 28 giorni di stagionatura temperatura di 20 ± 2 °C e umidità relativa $95 \pm 5\%$.

La densità, o massa volumica, è il rapporto tra la massa, M, e il volume, V, di una sostanza:

$$d = M/V \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

In questa ricerca sono state calcolate sia la densità allo stato fresco della malta sia quella allo stato indurito.

Per quanto riguarda la densità della malta allo stato fresco, questa è stata calcolata a partire dalla massa di impasto confezionato all'interno dei casseri poi divisa per il numero di provini e per il loro volume, così da trovare la densità di ciascun impasto.

Nel caso, invece, della densità allo stato indurito, essa è stata misurata a partire dalla massa del provino dopo averlo estratto dallo stampo.

Questa operazione viene fatta sia a 2 giorni di stagionatura, ovvero immediatamente dopo aver tolto i provini dal cassero, sia a 7 giorni e sia a 28 giorni; così è possibile ottenere un andamento della grandezza nel tempo e fare valutazioni sul comportamento della malta.

Essendo la densità il rapporto tra la massa e il volume del provino, dopo aver pesato i provini, si divide il risultato per il volume del singolo provino, $4 \times 4 \times 16$ cm cioè 256 cm^3 e si ottiene la densità allo stato indurito dello stesso.

In particolare, la prova è stata effettuata su più provini per ogni impasto realizzato, così da mediare il risultato su almeno due dati e renderlo meno aleatorio.

Il calcolo della densità allo stato indurito è utile durante la fase di studio degli impasti per fare molteplici valutazioni, in questo caso, tale dato è stato utilizzato sia per calcolare il modulo elastico dinamico che per valutare eventuali perdite di peso durante la stagionatura del provino.

3.5.5. Calcolo modulo elastico dinamico

Dopo aver pesato i singoli provini, essi vengono sottoposti alla prova elettrostatica mediante lo strumento Pundit. Grazie a questo strumento generatore di impulsi attraverso due sonde posizionate agli estremi del campione, si rileva il tempo impiegato da un'onda per trasmettersi da un estremo all'altro del campione.

Successivamente tramite un foglio elettronico, con i dati ottenuti è stato calcolato il modulo elastico dinamico tramite la formula:

$$E_{din}: \rho * v^2 * (1+v) * (1-2v) / (1-v) \quad (GPa)$$



Figura 16: Foto Pundit.

3.5.6. Prova a flessione

Nei giorni prestabiliti è stata effettuata la prova a flessione per i provini ottenuti precedentemente tramite una pressa meccanica dotata di una piastra di carico, collegata a sua volta ad un terminale che registra i dati rilevati.

Dalla teoria è noto che il calcestruzzo è un materiale con bassa resistenza a flessione, infatti i risultati ottenuti sono in accordo con i riferimenti teorici.

La formula seguente si applica per ricavare la resistenza a flessione dalla forza registrata:

$$R_f: (1.5 * F_m * L) / (b * h^2) \quad (MPa)$$

Con F_m si indica la forza applicata in *KN*.

3.5.6.1. Descrizione della prova

Il supporto per rottura a flessione è costituito da due rulli di sostegno di acciaio di lunghezza compresa tra 45 e 50 mm e diametro di $(10 \pm 0,5)$ mm, distanziati l'uno dall'altro di $(100 \pm 0,5)$ mm ed un terzo rullo di acciaio avente la stessa lunghezza e diametro, posizionato centralmente tra i rulli di sostegno.

I tre piani verticali attraversanti gli assi dei tre rulli devono essere paralleli e rimanere paralleli, equidistanti e perpendicolari alla direzione del prisma sottoposto alla prova. Uno dei rulli di sostegno e il rullo di carico devono essere in grado di inclinarsi leggermente, per consentire un'uniforme distribuzione del carico lungo la larghezza del prisma senza sottoporlo ad alcun sforzo torsionale.

Il campione è stato quindi posizionato con una delle sue facce sui rulli di sostegno. È stato applicato un carico senza urti a velocità costante, in modo da ottenere una rottura compresa in un periodo di tempo tra 30 e 90 s.

Attraverso il terminale collegato alla pressa sono stati ricavati i valori di carico e i valori di deformazione verticali misurati durante la prova. Da essi si ottiene poi il valore di tensione massima a flessione.



Figura 17: Foto portacampione per prova a flessione.



Foto 18: Foto campione dopo rottura a flessione.

3.5.7. Prova a compressione

A differenza della resistenza a flessione, è noto che il calcestruzzo ha una buona resistenza a compressione e, anche in questo caso, i risultati ottenuti sono in accordo con quanto studiato.

La resistenza a compressione è una delle più importanti proprietà di una malta, poiché ne permette di definire la qualità e predirne le diverse qualità della stessa.

La resistenza a compressione è determinata sollecitando il provino in maniera mono-assiale, che tende prima a contrarsi e poi a rompersi.

La resistenza meccanica a compressione di una pasta di cemento dipende, a parità di temperatura e umidità di stagionatura, dal rapporto a/c e dal grado di idratazione, ovvero essa aumenta al diminuire del rapporto a/c e all'aumentare del grado di idratazione, come risultato della diminuzione del volume dei pori capillari e di conseguenza della porosità della matrice.

Il provino utilizzato si romperà completamente in modo grossolano.

Formula forza di compressione:

$$R_c: F_m/A \quad (MPa)$$

Con F_m si indica la forza applicata in KN e A la sezione sottoposta a compressione (mm^2).

3.5.7.1. Descrizione della prova

I provini utilizzati per questa prova sono le metà ottenute dalla prova di resistenza a flessione. Il campione è stato posizionato nella macchina in modo che il carico sia applicato ad una delle sue facce. È stato applicato il carico senza urti e incrementato progressivamente fino a rottura.

Attraverso il terminale collegato alla pressa, sono stati ricavati i valori di carico e i valori di deformazione assiali, da cui si ricava successivamente il valore della resistenza meccanica a compressione.



Figura 19: Foto portacampione per rottura a compressione.



Figura 20: Foto provino dopo rottura per compressione.

3.5.8. Porosità

Ogni materiale, anche quello che appare più compatto, è dotato di porosità: una frazione del suo volume è occupata da piccole cavità presenti nel suo interno. Le cavità sono dovute o a gas intrappolato o a fessure dovute a ritiro (diminuzione di volume durante la solidificazione) o a spazi intergranulari. Il loro volume rapportato al volume totale (volume apparente) costituisce la porosità del materiale. Le cavità possono essere comunicanti con l'esterno (porosità aperta) o meno (porosità chiusa). Le cavità aperte possono essere zone di raccolta di eventuali sostanze liquide presenti nell'ambiente o di condensa di vapori.

3.5.9. Porosimetria

La porosimetria è una tecnica analitica che permette di misurare alcune caratteristiche di un materiale riconducibili alla presenza di pori, tra cui: volume totale dei pori, diametro dei pori, area superficiale e densità assoluta.

Tale tecnica consiste nell'introdurre nel materiale da testare un liquido a elevata pressione che non bagni il materiale in questione. L'elevata pressione è necessaria per contrastare la tensione superficiale del liquido che, da sola, non permetterebbe al fluido di penetrare all'interno dei pori del materiale.

Spesso il liquido utilizzato è il mercurio, per cui si parla di porosimetria ad intrusione di mercurio¹⁵.

3.5.9.1. Descrizione della prova

La prova è stata eseguita su un campione di materiale estratto da un provino per ciascun impasto. Il materiale viene campionato, di circa 1 cm², nella parte interna del provino che si vuole analizzare, così da essere il più possibile rappresentativo del tutto, poi viene posto in stufa a 40 °C così da facilitare l'evaporazione dell'acqua e, infine,

¹⁵ Collepardi M., Collepardi S., Troli R., *Il nuovo calcestruzzo*, V ed., Ed. Tintoretto, 2009.

viene degassato così da avere una buona probabilità che i vuoti del provino siano privi di qualunque sostanza e pronti ad accogliere il mercurio.

L'utilizzo del mercurio è legato al fatto che la prova va eseguita con un mezzo tale da non provocare reazioni con il materiale con cui viene a contatto e tale da non bagnare in alcun modo la superficie dove staziona nell'attesa di essere costretto ad entrare nelle porosità, questo è possibile grazie ad uno specifico angolo di contatto del mercurio diverso da quello dell'acqua.

La quantità dei pori si calcola sulla base della quantità di mercurio che si è riusciti a far entrare nel materiale spingendolo fino ad un certo valore di pressione.

Il risultato della prova viene restituito in forma di grafico dove sono messi in relazione il volume di mercurio entrato nel campione e la pressione applicata, tale pressione può essere messa in relazione con il diametro dei rispettivi pori con l'equazione di Washburn, che descrive il flusso capillare in una serie di capillari:

$$P = (2\sigma \times \cos\theta) / r$$

Dove:

- P è la pressione impressa per far entrare il mercurio nei pori;
- σ rappresenta la tensione superficiale del mercurio;
- θ è l'angolo di contatto tra la superficie del mercurio e il materiale;
- r rappresenta il raggio del poro.

La prova di porosimetria assieme alla prova di assorbimento d'acqua per capillarità, permette di fare considerazioni riguardo le dimensioni dei pori presenti nei campioni.

3.5.10. Assorbimento d'acqua per capillarità

La prova di assorbimento d'acqua per capillarità ha lo scopo di fornire informazioni sul comportamento del materiale in esame in presenza di acqua.

Quest'analisi risulta fondamentale per valutare il fenomeno di risalita capillare.

3.5.10.1. Descrizione della prova

Per la prova sono stati utilizzati dei provini a diversa composizione, per avere una valutazione più completa. Essi sono stati preparati levigando la parte inferiore con carta abrasiva e mettendo i provini in una stufa per garantire tutta la perdita di acqua in eccesso, così da poter lavorare su un provino in condizione secca.

Per la prova almeno 1 cm di carta assorbente è stato saturato con acqua distillata dei fogli di carta filtro sovrapposti l'uno sull'altro all'interno di un contenitore, per simulare la situazione reale di un terreno umido.

Sono stati quindi pesati i vari provini e messi anch'essi all'interno del contenitore con la faccia levigata in precedenza a contatto con i fogli di carta filtro.

Si effettuano le pesate una volta a contatto con la carta filtro satura ad intervalli di 10, 20, 30 minuti e ancora, 1 ora, 4 ore, 6 ore, 24 ore, 48 ore, 72 ore, 96 ore e 168 ore con le pesate dei singoli provini così da poter poi effettuare medie e confronti sulle variazioni dell'assorbimento d'acqua.



Figure 21 e 22: Foto provini posizionati sui fogli di carta filtro.

4. Risultati

In questo capitolo si descrivono i risultati ottenuti da tutte le prove e dalle analisi, descritte nel capitolo precedente; inoltre, si riportano i confronti, le correlazioni e le osservazioni.

4.1. Caratterizzazione dei materiali

Le prime analisi che sono state fatte sono relative alla caratterizzazione dei materiali, che si utilizzano nella sperimentazione, prima di procedere alla realizzazione dei diversi impasti.

4.1.1. Analisi granulometrica

Dopo l'operazione di pesatura dei singoli setacci con il rispettivo inerte trattenuto, tramite un foglio di calcolo elettronico, sono stati effettuati i calcoli necessari per ottenere le curve granulometriche. È stato calcolato il peso netto, il trattenuto parziale e il trattenuto cumulativo entrambi percentuali delle quattro prove sostenute, e successivamente si sono confrontate le medie cumulative per tutti i materiali analizzati (*Appendice, Paragrafo 6.1.*).

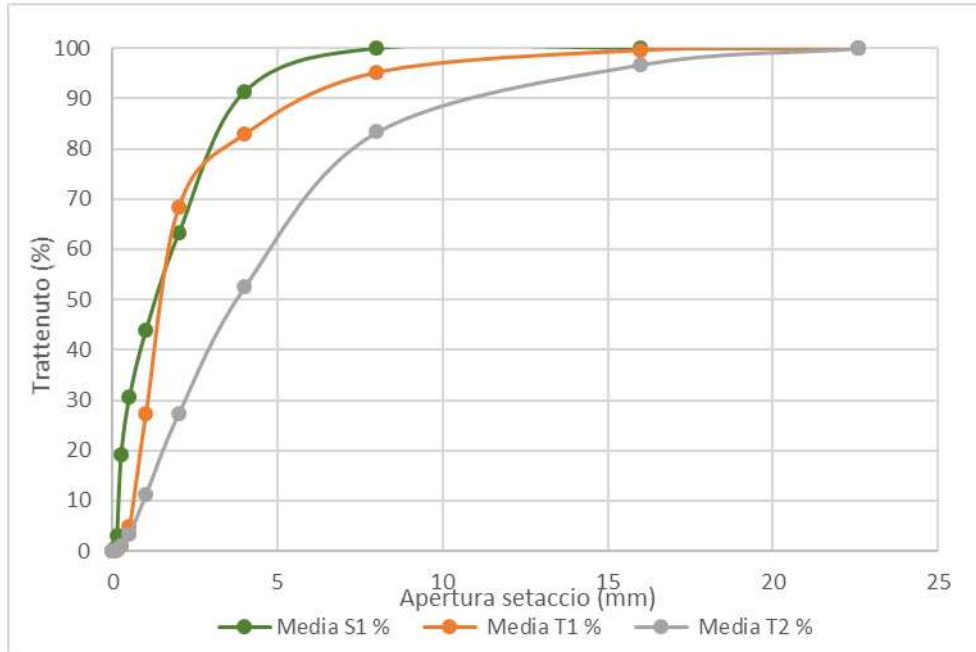


Figura 23: Curve granulometriche medie T1, T2 e S1.

Dalla *Figura 23* si osservano i risultati della prova granulometrica, che confermano le osservazioni visive effettuate. In particolare, si riportano le curve medie rappresentative dell'andamento complessivo del campione *T1* e *T2*.

Si nota che, il materiale costituente il *T1* ha maggior quantità di frazione fine rispetto a quello del *T2*, infatti il D50% risulta essere 2 mm per *T1* e 23 mm per *T2*. Si evidenzia dal confronto con la curva granulometrica della sabbia che, quest'ultima ha maggior contenuto di materiale fine rispetto alla curva del *T2*, ma risulta essere invece confrontabile con la curva ottenuta analizzando il campione *T1* (*Appendice, Paragrafo 6.1.*).

Questo risultato è facilmente spiegabile per via della presenza di acqua in rapporto 3:1 con il materiale inerte nel *T1*, rispetto al rapporto 1:1 del *T2*, pretrattati con la pompa ad immersione. Il maggior quantitativo di acqua e l'utilizzo della pompa tritratrice, hanno permesso di ottenere un materiale più fine rispetto allo stesso trattamento effettuato con un minor quantitativo di acqua.

4.1.2. Contenuto ioni liberi

Dalla prova della cromatografia ionica eseguita sul materiale sciolto (Paragrafo 3.1.2.) sono stati calcolati per i vari campioni le quantità di ione cloruro (Cl^-) e solfato (SO_4^{2-}) presenti.

	Cl^-	SO_4^{2-}
	mg/l	mg/l
T1 SO_4	234	159
T2 SO_4	664	257
T1 Cl	323	147
T2 Cl	1015	291

Tabella 3: Risultati Cl^- e SO_4^{2-} .

Poiché i diversi quantitativi (acqua e polvere) erano noti prima della preparazione delle soluzioni, sono state poi calcolate le percentuali degli ioni cloruri e dei solfati e sono state confrontate con i limiti che la normativa impone.

	Cl^-	SO_4^{2-}	Limiti normativa
	%	%	%
Limite solfati T1		0,03	0,20
Limite solfati T2		0,05	0,20
Limite cloruri T1	0,03		0,03
Limite cloruri T2	0,10		0,03

Tabella 4: Limiti cloruri e solfati.

Da normativa i valori considerati idonei sono:

- Solfati <0,2%
- Cloruri <0,03%.

Alla luce di questi risultati è quindi evidente che, la presenza dei cloruri supera, i limiti di legge nel campione *T2*. Il campione *T1*, sebbene di pochi punti, risulta essere sotto il limite imposto dalla normativa.

I limiti imposti per i solfati, come è possibile notare nella *tabella 4*, rientrano perfettamente nella soglia di favori accettabili dalla normativa *UNI EN 12620-2:2008*.

Dunque, sarà necessario dopo la prova del mix design a 28 giorni, ripetere l'analisi dei cloruri sulla malta cementizia per valutarne nuovamente le percentuali presenti e provvedere ad eventuali correzioni.

4.2. Caratterizzazione chimica dei materiali

4.2.1. Diffrazione a raggi X (XRD)

Dall'analisi diffrattometrica effettuata sui campioni T1 e T2 si è evidenziato che questi ultimi sono costituiti prevalentemente di carbonato di calcio ($CaCO_3$) presente nella forma allotropica dell'aragonite.

L'aragonite è un minerale carbonatico, una delle forme cristalline più comuni di carbonato di calcio presenti in natura.

Dal grafico seguente si nota che, confrontando i vari picchi, sia il diffrattogramma di T1 sia di T2 risultano essere caratterizzati dalla presenza di aragonite e si evidenzia la presenza in minima percentuale di calcite, anch'esso minerale carbonatico.

La differenza tra la calcite e l'aragonite è che, il primo minerale è più stabile rispetto al secondo e, questo fattore è una conseguenza del fatto che, l'aragonite è più giovane, come sostanza, rispetto alla calcite.

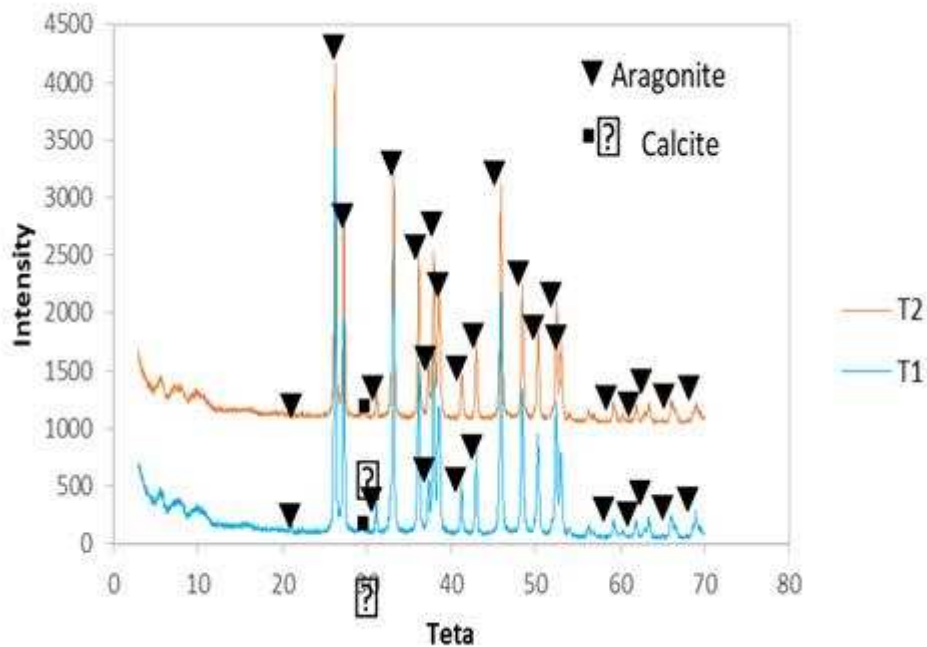


Figura 24: Grafico XRD.

4.2.2. Analisi termogravimetrica (TG)

Come è possibile vedere dai grafici seguenti, rispettivamente per il campione *T1* e *T2*, è presente una ripartizione in 4 step caratterizzati ognuno da propri range di temperatura alla quale corrisponde una precisa perdita di peso.

In particolar modo, tramite la linea blu si evidenzia la perdita di peso del materiale sostituito (rifiuto alimentare), mentre con la linea rossa si sottolinea il calore scambiato, ovvero, a seconda dell'andamento della curva, la cui direzione è dettata semplicemente da una convenzione strumentale, si valuta se è in corso un processo esotermico o endotermico.

Dunque, si deduce tra i vari risultati, la perdita in peso più significativa in *T1* del 42,1%, mentre in *T2* 41% (Figure 25 e 26), alla quale corrispondono una temperatura di circa 800°C, che ci permette di comprendere la composizione dell'aggregato da scarto; infatti, a questa temperatura è noto il verificarsi del processo di decomposizione del carbonato di calcio ($CaCO_3$).

Dunque, a quella temperatura la reazione che avviene è:



È possibile quantificare il contenuto di carbonio organico se si considera che la perdita di peso a circa 350 °C è tutta relativa alla scissione dei composti organici in CO_2 (data dall'ambiente ossidante cui si è effettuata l'analisi) e si ricava che in *T1* il contenuto di carbonio organico è 0,63% mentre in *T2* il contenuto è 1,23%.

	Carbonio organico	CaCO₃
	%	%
T1	0,63	95,78
T2	1,23	93,20

Tabella 5: Contenuto di carbonio organico.

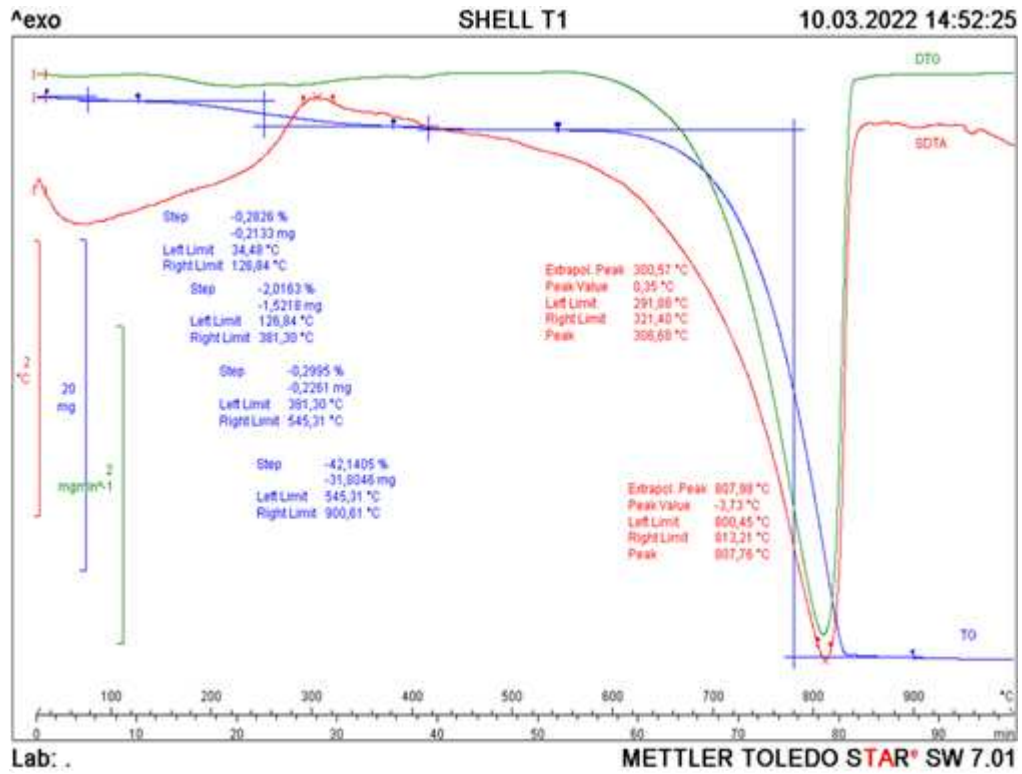


Figura 25: Risultati prova TG per T1.

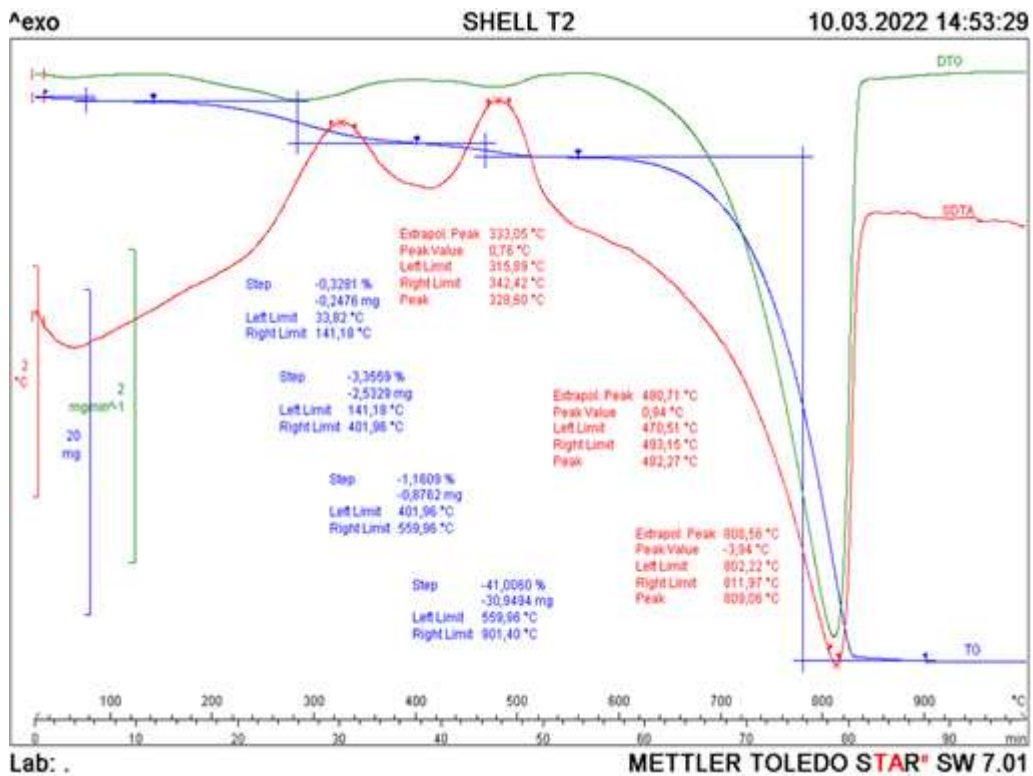


Figura 26: Risultati prova TG per T2.

4.3. Caratterizzazione del materiale sciolto

4.3.1. Umidità dell'inerte

Le pesate effettuate in laboratorio sono state riportate su un foglio di calcolo e sono stati calcolati, per ogni provino, peso lordo del materiale allo stato SSA, peso netto e Ssa%.

$$Ssa\% = ((\text{Peso netto prima dell'aggiunta di acqua} - \text{peso netto finale}) / \text{peso netto finale}) * 100$$

Campioni	Peso netto prima dell'aggiunta di acqua	Peso netto finale	SSA
	g	g	%
S1	1000	1038	3,8
T1	355	366	3,2
T2	299	314	5,1

Tabella 6: Risultati mediati prova SSA.

Dall'analisi effettuata si evince che i gusci, ed in particolare il campione T2, risultano avere un maggior assorbimento di acqua probabilmente a causa della loro maggior porosità dei gusci rispetto alla sabbia tradizionale e a causa della presenza di quantitativo di materiale organico. L'assorbimento di acqua risulta infatti maggiore per il campione di materiale T2, per un valore di 5,1%. Il campione T1 invece ha un assorbimento di acqua ssa paragonabile all'inerte tradizionale.

4.3.2. Risultati prova SEM dei materiali sciolti e malte

I campioni vengono sottoposti ad una scansione su tutta la loro area ed essi emettono dei segnali di risposta al fascio di elettroni generato dalla sorgente.

Il risultato è mostrato in diverse scale di grigi, ovvero le immagini più scure corrispondono ai materiali più leggeri, in quanto riemettono meno elettroni di quelli più pesanti che, invece, forniscono una colorazione più chiara.

Si riportano di seguito i suddetti risultati.

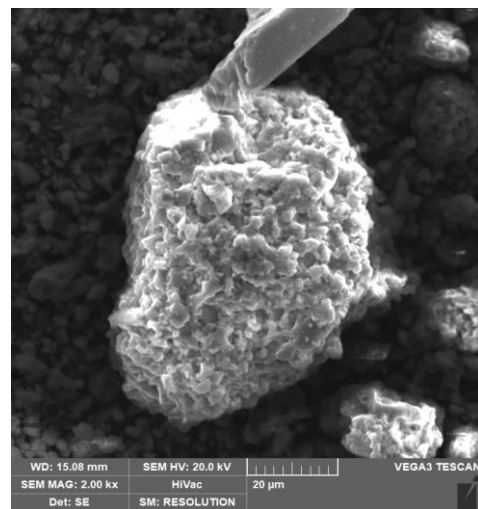
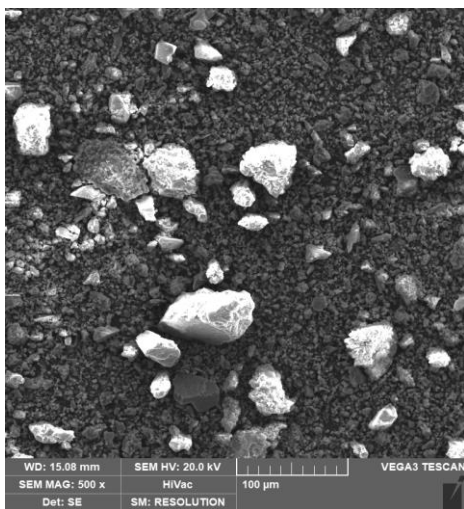


Figura 27: Immagine SEM calcite da carbonato di calcio.

Figura 28: Immagine SEM calcite da carbonato di calcio.

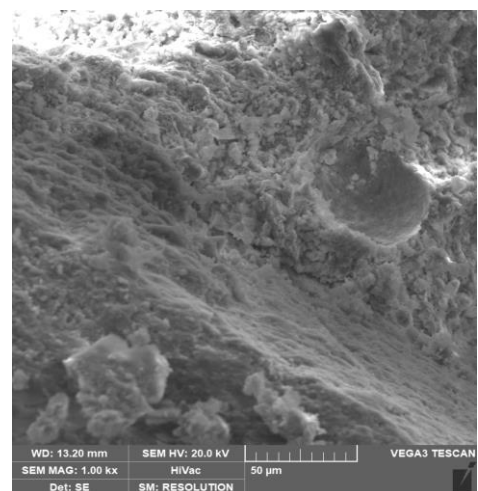
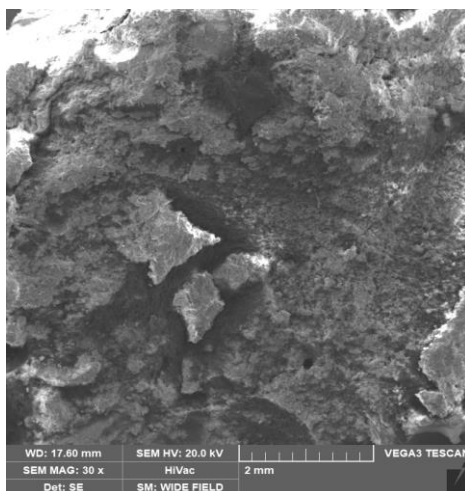
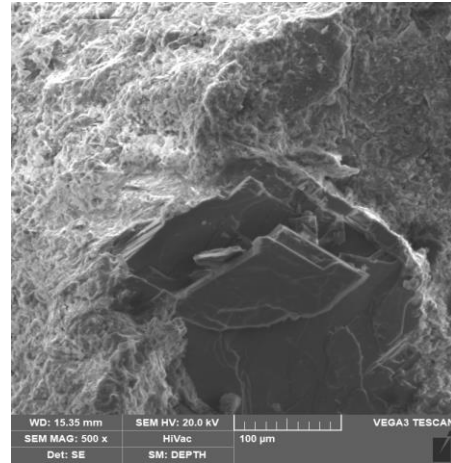
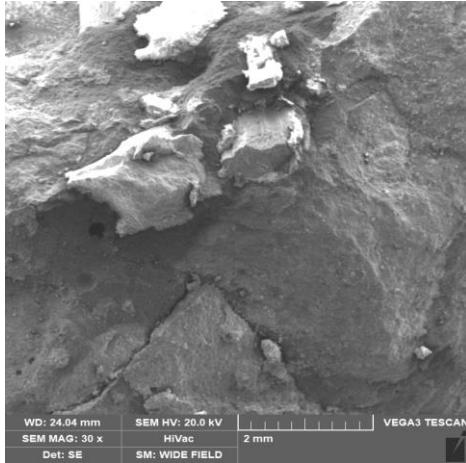
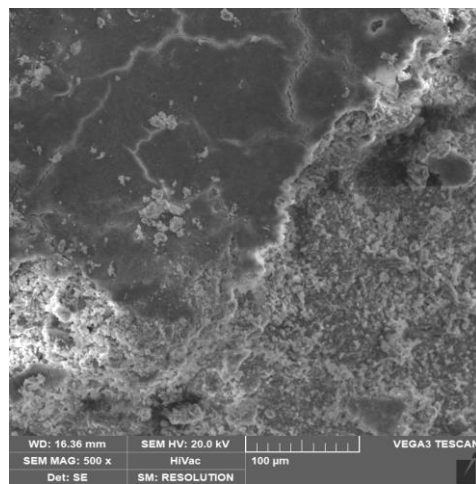
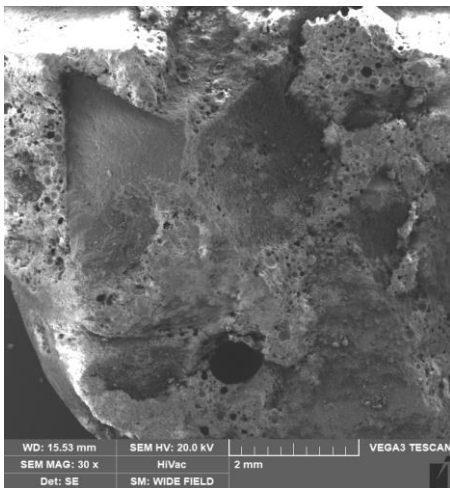


Figura 29: Immagine SEM interfaccia legante/aggregato tradizionale.

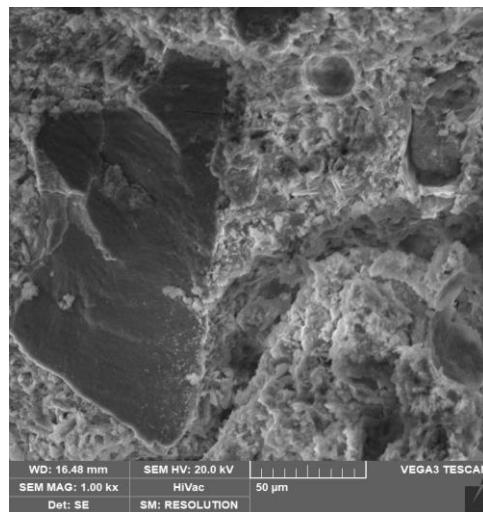
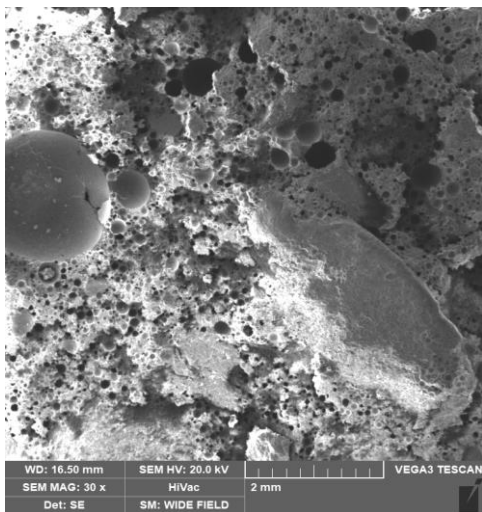
Figura 30: Immagine SEM interfaccia legante/aggregato tradizionale.



*Figura 31: Immagine SEM RIF2, aggregato ed interfaccia legante aggregato.
Figura 32: Immagine SEM RIF2, aggregato ed interfaccia legante aggregato.*



*Figura 33: Immagine SEM T1 40% ed interfaccia legante- aggregato/shell.
Figura 34: Immagine SEM T1 40% ed interfaccia legante- aggregato/shell.*



*Figura 35: Immagine SEM T2 40% ed interfaccia legante- aggregato/shell.
Figura 36: Immagine SEM T2 40% ed interfaccia legante- aggregato/shell.*

4.3.3. Risultati prova Edax degli aggregati

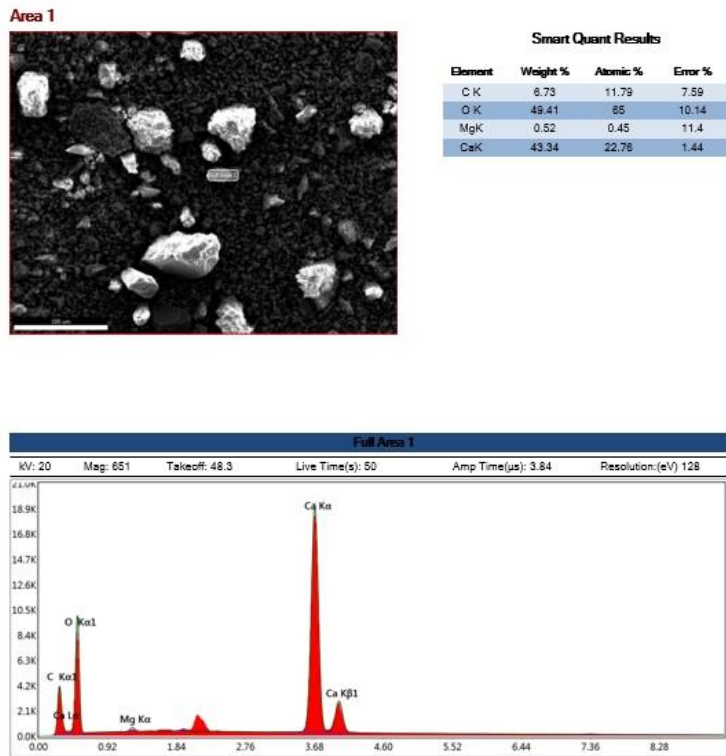


Figura 37: Risultati EDAX $CaCO_3$ RIF2.

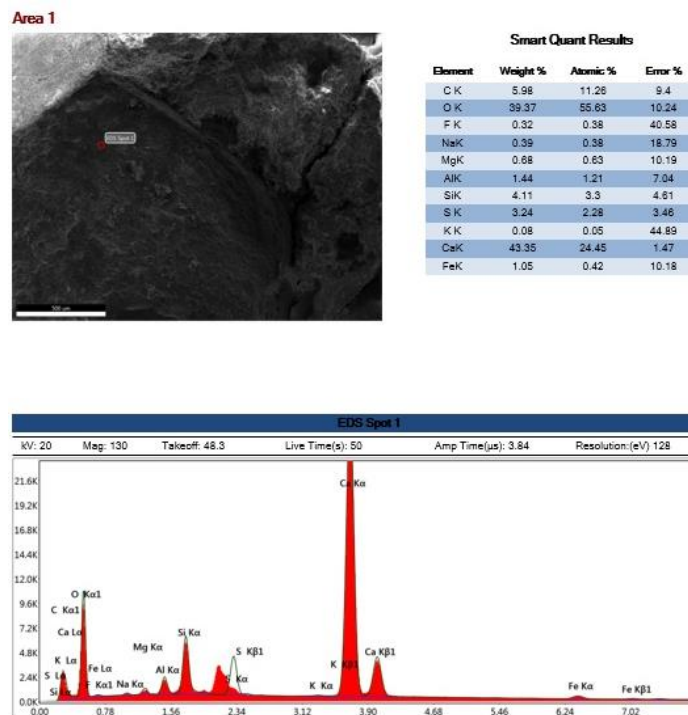


Figura 38: Risultati EDAX sul legante.

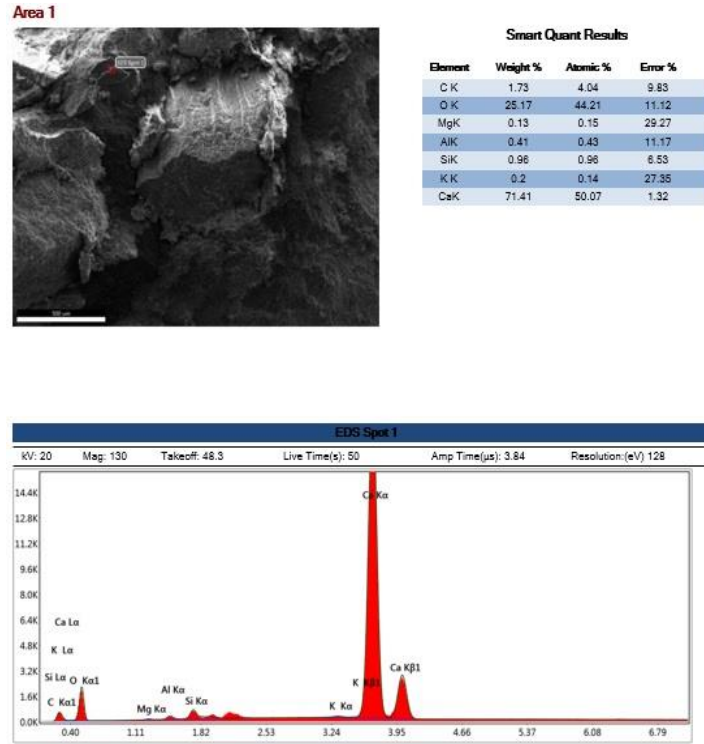


Figura 39: Risultati EDAX RIF2.

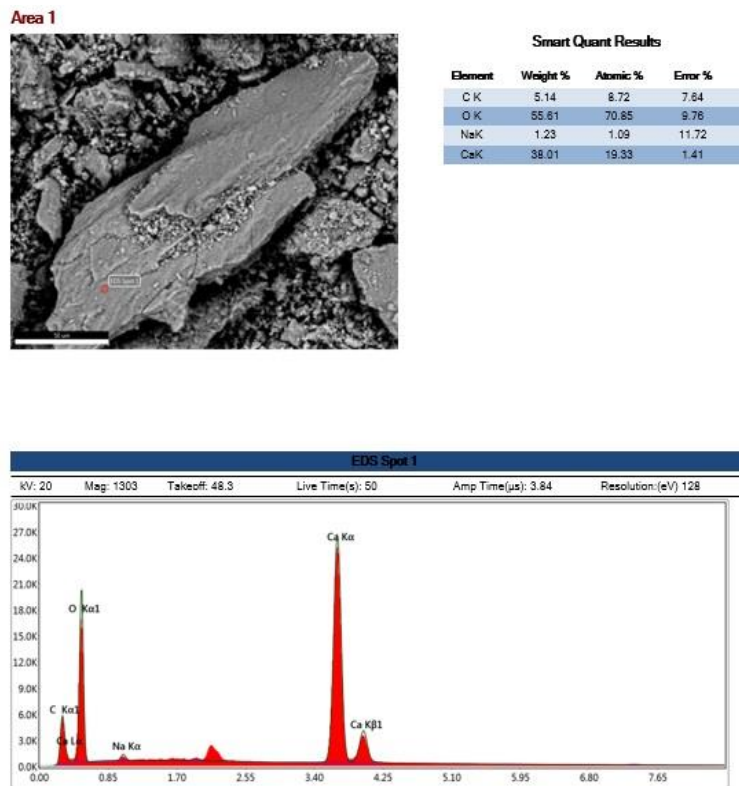
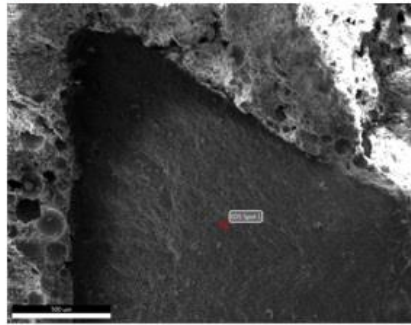


Figura 40: Risultati EDAX T1.

Area 1



Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Error %
C K	8.04	13.62	7.46
O K	51.5	65.45	9.94
MgK	0.57	0.47	10.18
SiK	1	0.73	5.6
CaK	38.88	19.73	1.4

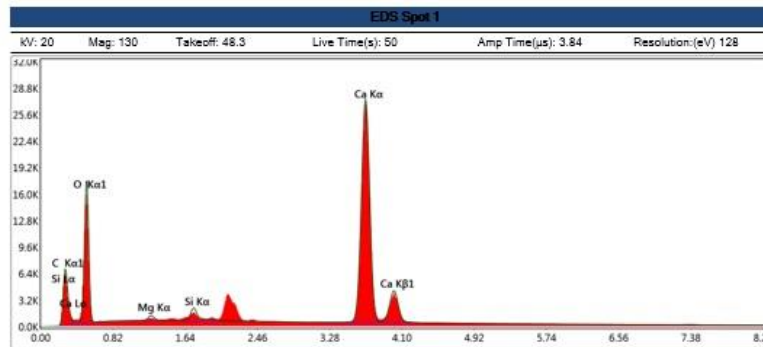


Figura 41: Risultati EDAX T1 40%.

Area 1



Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Error %
C K	7.56	12.99	7.56
O K	50.26	64.88	10.1
NaK	1.03	0.92	13.07
CaK	41.16	21.21	1.45

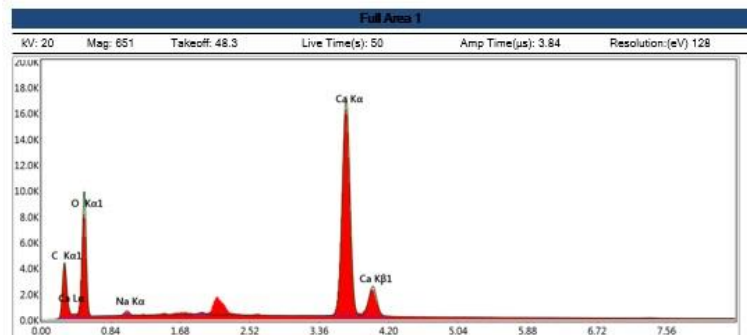


Figura 42: Risultati EDAX T2.

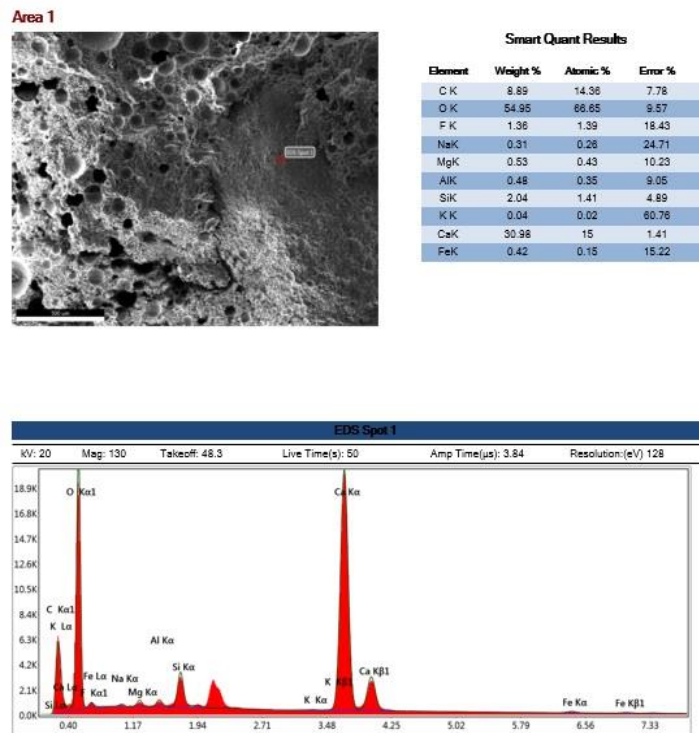
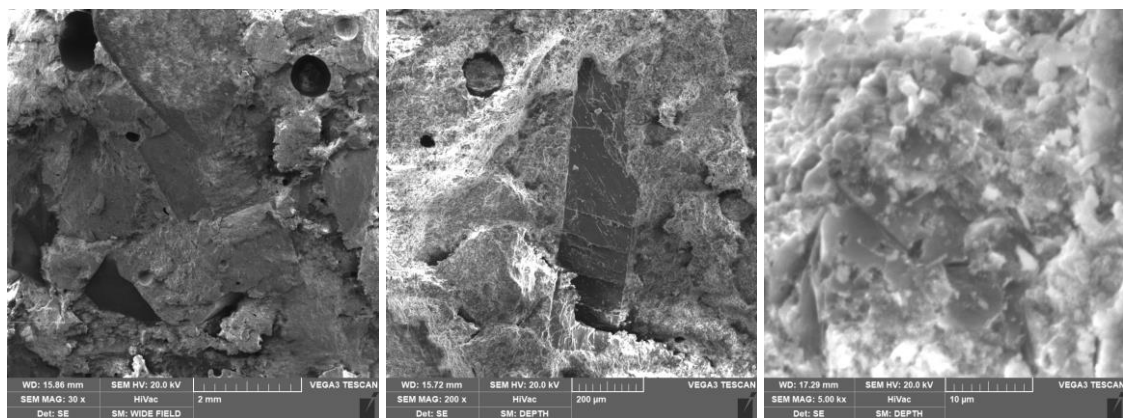


Figura 43: Risultati EDAX T2 40%.

4.3.4. Risultati prova SEM per le malte cementizie

RIF



T1 10%

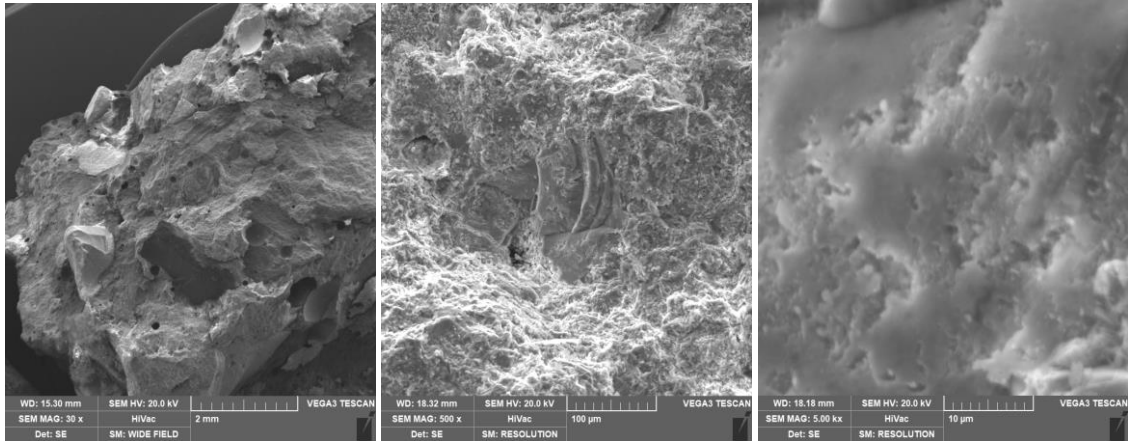


Figure 47, 48, 49: Immagine SEM del campione T1 10% a diverse scale di ingrandimento.

T1 40%

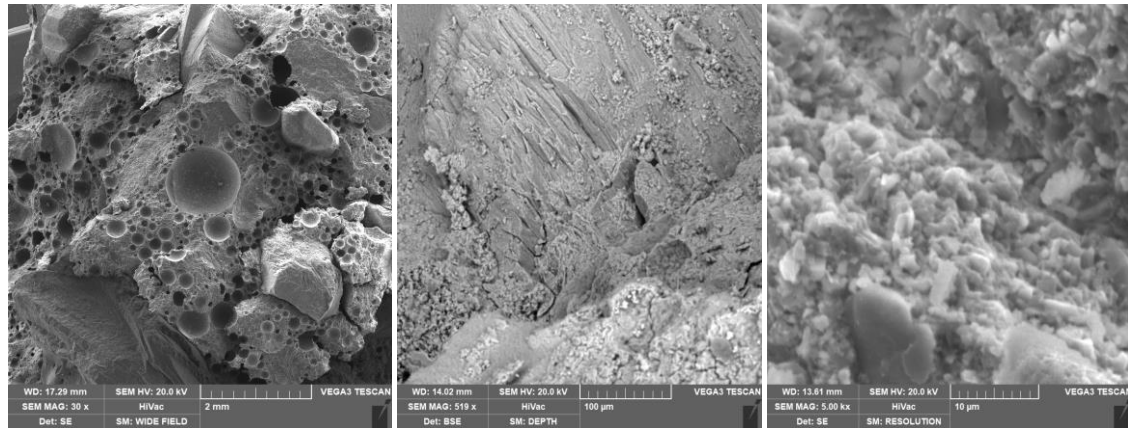


Figure 50, 51, 52: Immagine SEM del campione T1 40% a diverse scale di ingrandimento.

T2 10%

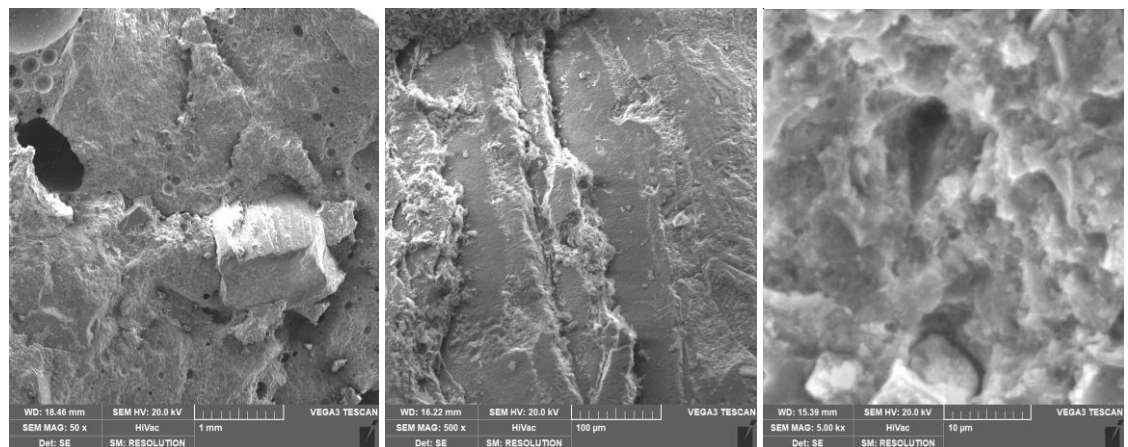


Figure 53, 54, 55: Immagine SEM del campione T2 10% a diverse scale di ingrandimento.

T2 40%

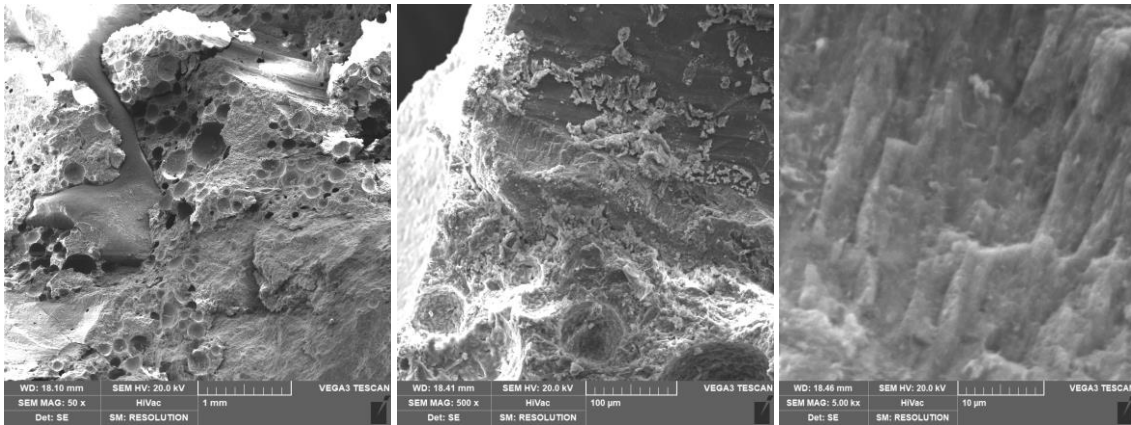


Figure 56, 57, 58: Immagine SEM del campione T2 40% a diverse scale di ingrandimento.

Come è possibile notare nelle immagini effettuate dalla scansione e dai risultati della sonda EDAX, all'aumentare della percentuale di materiale di sostituzione, è presente un corrispettivo aumento della percentuale di carbonio a partire da una percentuale del 5,1% e 1,7% rispettivamente per T1 e T2, fino ad un valore dell'8,0% in T1 40% e di 8,9% in T2 40% presente nel materiale. (Figure EDAX).

4.3.5. Risultati prova Edax per le malte cementizie, aggregati e leganti

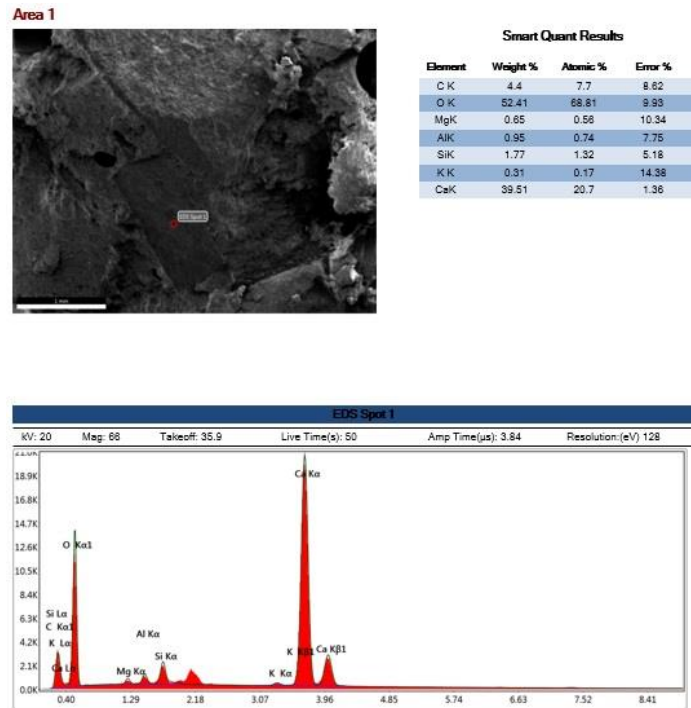


Figure 59: Risultati EDAX RIF 1.

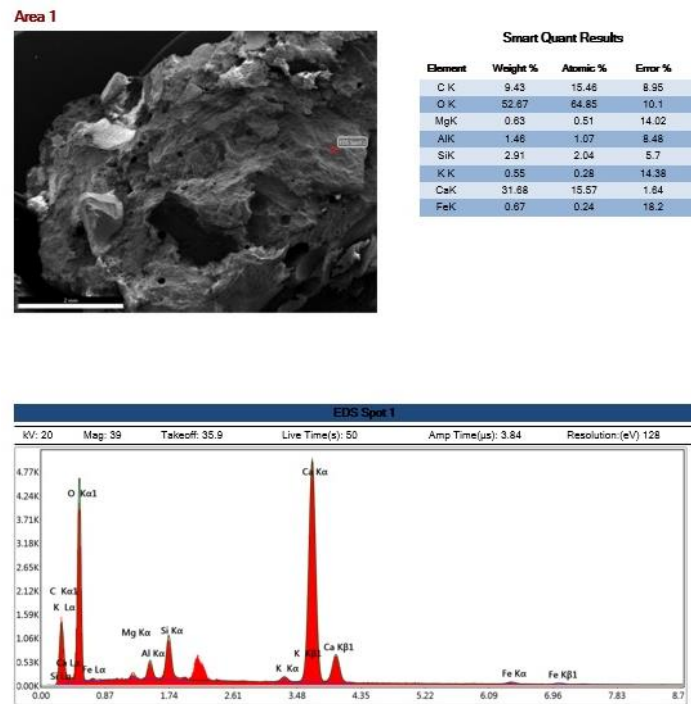


Figura 60: Risultati EDAX T1 10%.

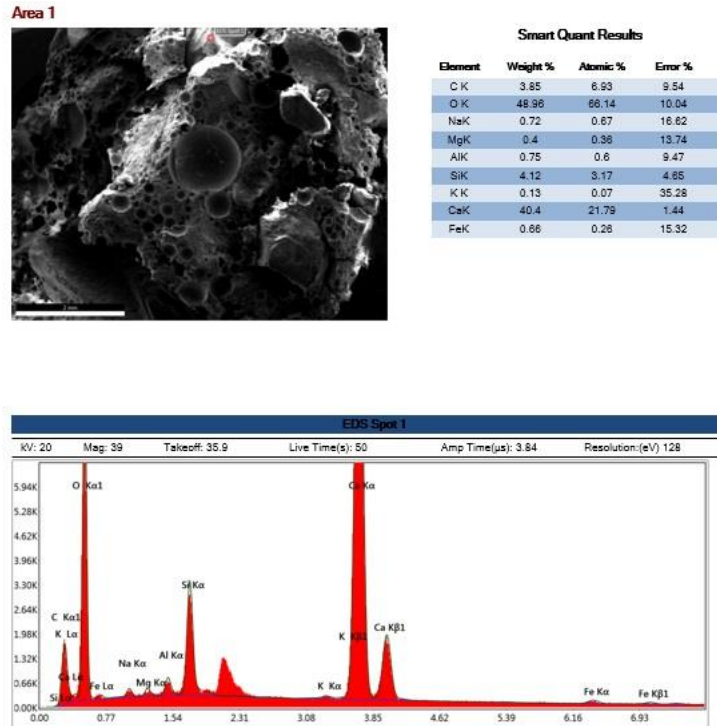


Figura 61: Risultati EDAX T1 40%.

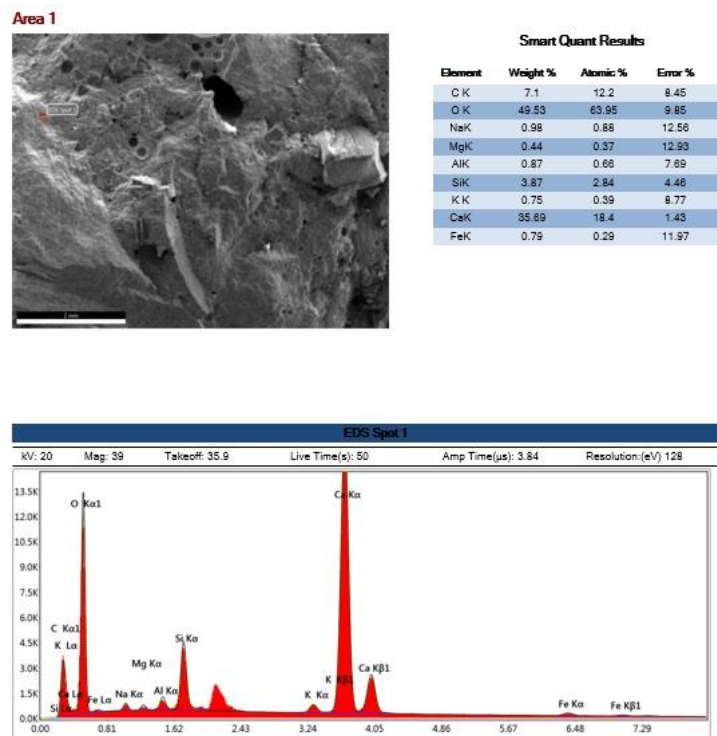


Figura 62: Risultati EDAX T2 10%.

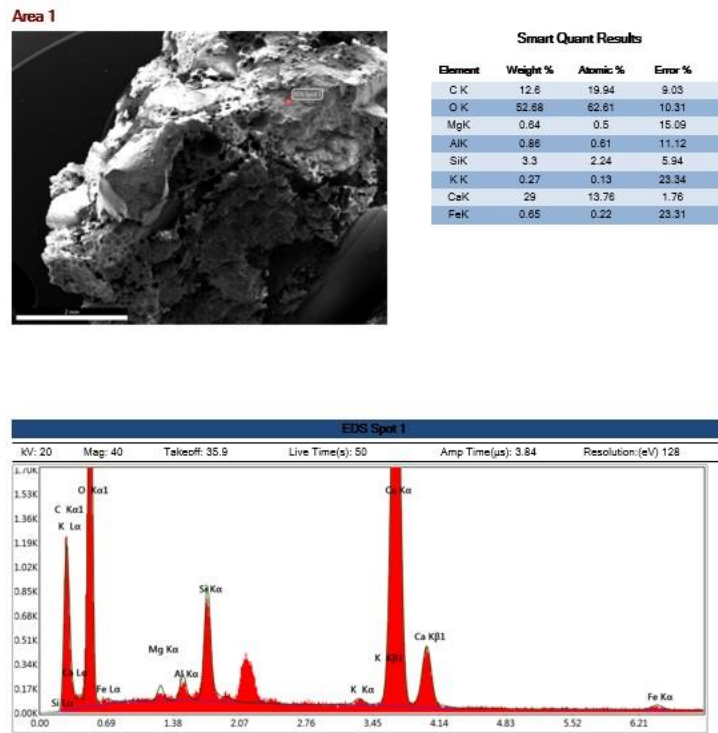


Figura 63: Risultati EDAX T2 40%.

4.3.6. Risultati prova lavorabilità

RIF



Figure 64 e 65: Prova lavorabilità per due provini di campione di riferimento.

T1 10%



Figure 66 e 67: Prova lavorabilità per due provini di campione T1 10%.

T1 20%



Figure 68 e 69: Prova lavorabilità per due provini di campione T1 20%.

T1 40%



Figure 70 e 71: Prova lavorabilità per due provini di campione T1 40%.

T2 10%



Figure 72 e 73: Prova lavorabilità per due provini di campione T2 10%.

T2 20%



Figure 74 e 75: Prova lavorabilità per due provini di campione T2 20%.

T2 40%



Figure 76 e 77: Prova lavorabilità per due provini di campione T2 40%.

	Diametro 1	Diametro 2	Media
	cm	cm	cm
RIF	15,0	14,7	14,8
T1 10%	15,4	15,0	15,2
T1 20%	14,4	14,5	14,5
T1 40%	15,6	16,0	15,8
T2 10%	14,0	13,9	14,0
T2 20%	14,0	14,5	14,3
T2 40%	15,0	15,0	15,0

Tabella 7: Risultati prova lavorabilità.

I valori ricavati in questa sperimentazione sono nel range di 14-20 cm, che, in accordo con la normativa *UNI 1015-3* e *UNI 1015-6*, classificano le malte con slump compresi tra i 140 mm e 200 mm come plastiche.

4.4. Caratterizzazione chimico-fisica delle malte cementizie

4.4.1. Analisi e risultati sulle malte cementizie

(Grafici e tabelle Appendice, Capitolo 6)

	Giorni	Densità	E_{din}	R_f	R_c
	Gg	kg/m²	GPa	MPa	MPa
RIF	2	2195	32,8	7,0	38,3
	7	2203	34,2	5,5	45,0
	28	2141	114,2	8,3	50,0
T1 10%	2	2264	31,2	6,4	35,3
	7	2196	30,7	5,9	41,8
	28	2160	111,1	7,1	47,2
T1 20%	2	2235	29,5	6,4	30,7
	7	2212	29,3	5,7	36,4
	28	2159	95,2	7,1	44,4
T1 40%	2	2156	25,1	5,6	21,4
	7	2167	26,1	5,1	25,0
	28	2037	78,3	5,1	29,3
T2 10%	2	2240	27,2	5,4	30,3
	7	2201	30,7	5,8	40,1
	28	2190	100,2	7,5	43,0
T2 20%	2	2129	26,3	5,3	23,5
	7	2122	27,4	5,1	29,3
	28	2093	75,1	5,8	31,2
T2 40%	2	2158	22,2	4,4	18,5
	7	2111	25,1	5,0	21,7
	28	2046	72,4	5,7	26,2

Tabella 8: Risultati malte cementizie.

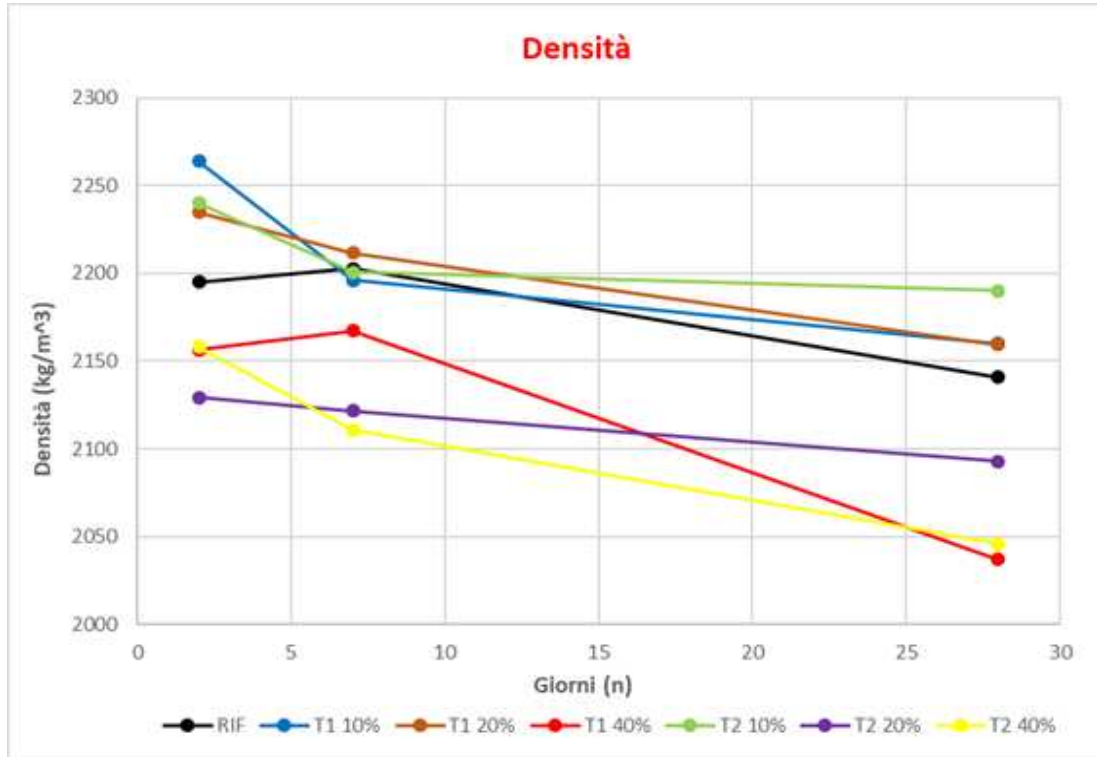


Figura 78: Grafico riassuntivo calcolo densità.

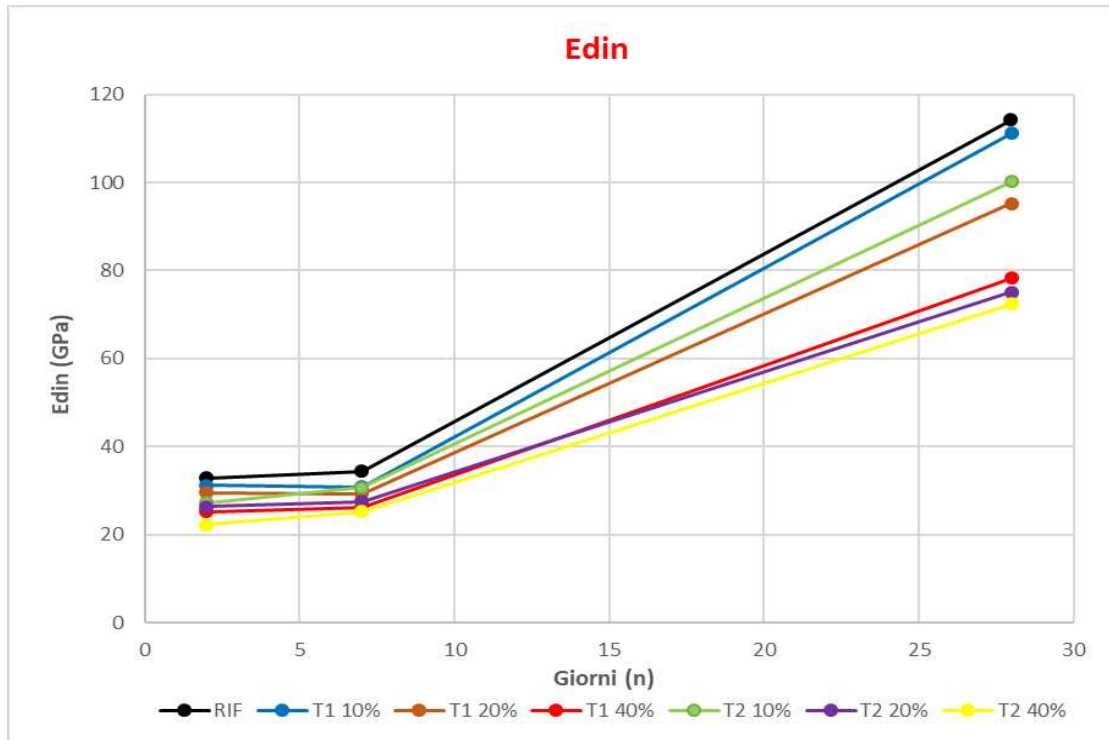


Figura 79: Grafico riassuntivo calcolo modulo elastico dinamico (E_{din}).

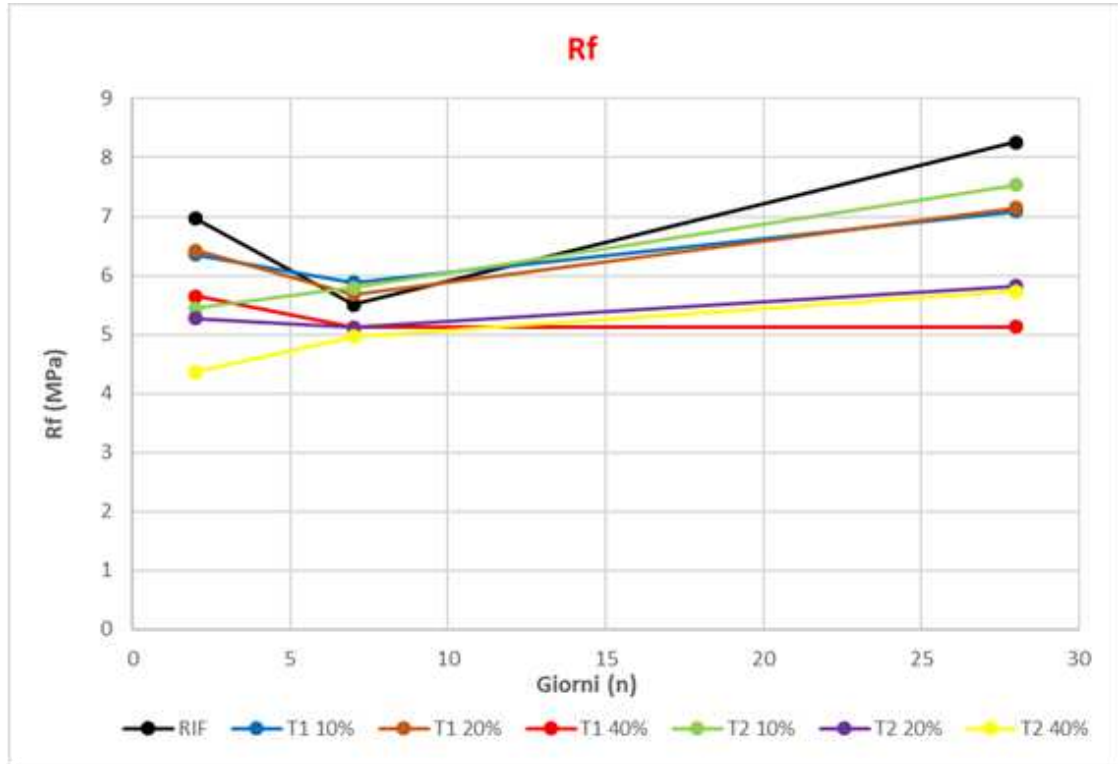


Figura 80: Grafico riassuntivo calcolo resistenza a flessione (R_f).

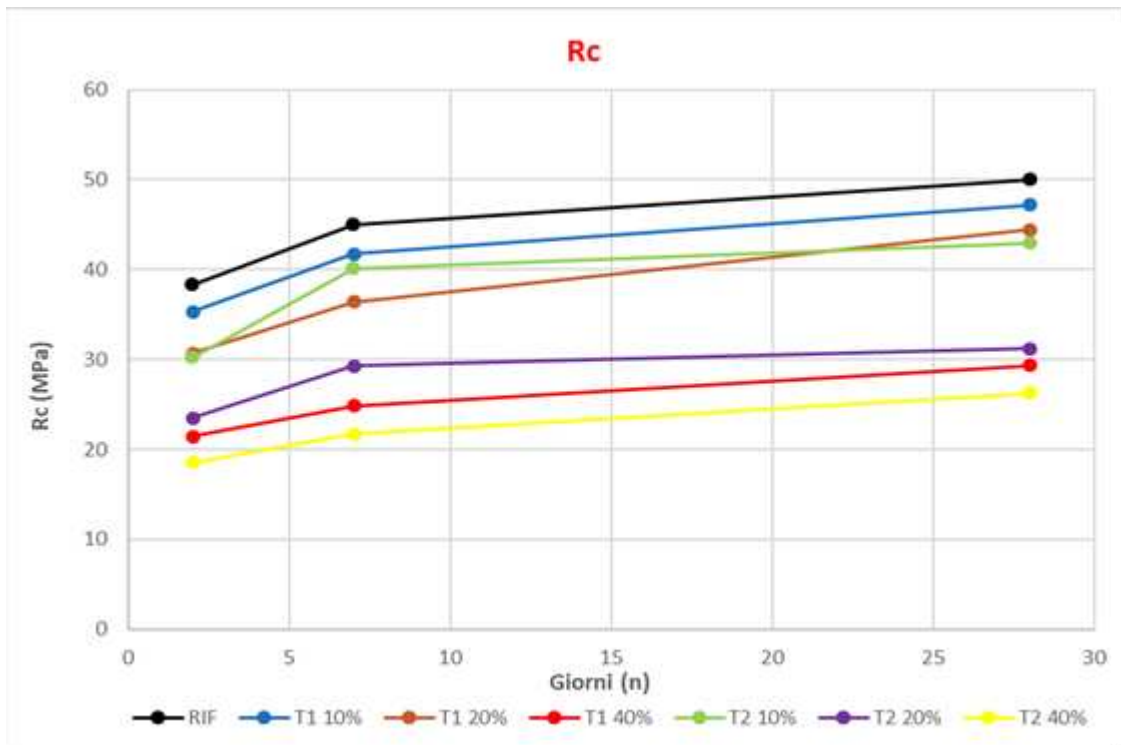


Figura 81: Grafico riassuntivo calcolo resistenza a compressione (R_c).

Dalle prove effettuate, si è giunti ai risultati presenti nei grafici precedenti, indicanti rispettivamente: densità, modulo elastico dinamico, resistenza a flessione e resistenza a compressione; i quali mostrano lo sviluppo delle diverse proprietà nel tempo di maturazione.

Per quanto riguarda la *densità* a 28 giorni, T1 10% ha una differenza tra il campione di riferimento e i vari provini del -0,9% mentre il T2 10% del -2,3%. Questo risultato evidenzia come sostituendo una piccola porzione di materiale con i gusci, si riesca ad ottenere dei valori di densità identici ed anche aumentando la percentuale di materiale sostituito, quindi considerando le differenze rispetto al campione di riferimento, di T1 20%, T2 20%, T1 40% e T2 40%, si ottengono, in ogni caso, valori di densità accettabili che si discostano di valori minimi dal campione di riferimento (*Figura 82*), infatti le differenze calcolate sono rispettivamente del -0,9%, 2,3%, 4,9% e del 4,4% (*Appendice, Paragrafo 6.2.*).

I valori ottenuti di E_{din} a 28 giorni, hanno dato una differenza dal campione di riferimento con T1 10% e T2 10% dello 0,9% e del 4,3% (*Appendice, Paragrafo 6.3.*) e, anche aumentando la percentuale di rifiuto alimentare sostituito, quindi considerando: T1 20%, T2 20%, T1 40% e T2 40%, si ottengono dei valori di differenza rispetto al provino di riferimento rispettivamente di: 5,9%, 13,1%, 11,9% e 14,1%, i quali possono considerarsi ancora dei buoni risultati e quindi valori accettabili (*Figura 83*).

La R_f a 28 giorni ha dato come risultati delle percentuali di differenza rispetto al campione di riferimento, rispettivamente per T1 10% e T2 10% di 14,2% e 8,8%.

Per i campioni con la maggior percentuale di sostituzione, invece, si è ottenuto come risultato rispettivamente per: T1 20%, T2 20%, T1 40% e T2 40% di: 13,5%, 29,5%, 37,9% e 30,6%, ossia i valori percentuali che si discostano dal provino di riferimento (*Appendice, Paragrafo 6.4.*); i quali mostrano una diminuzione della resistenza a flessione con l'aumento della percentuale di materiale sostituito (*Figura 84*).

I risultati dopo 28 giorni di stagionatura mostrano che, per tutti i campioni, esiste una correlazione tra percentuale di sostituzione e resistenza meccanica R_c : nello specifico, si può vedere sia dal grafico riassuntivo (*Figura 85*) sia dalla *tabella 8* che, all'aumentare

del quantitativo di materiale sostituito corrisponde una perdita di resistenza meccanica più significativa. Dunque, all'aumentare del quantitativo di materiale sostituito aumenta anche l'influenza che hanno i pretrattamenti effettuati prima del mix design.

I valori ottenuti dalla prova a compressione con minor percentuale di materiale sostituito hanno raggiunto proprietà pressoché identiche a quelli del campione di riferimento, infatti, i valori di differenza rispetto al provino di riferimento, dei campioni T1 10% e T2 10% sono rispettivamente del 5,5% e 14,0%, mentre, aumentando la percentuale di materiale sostituito, le proprietà investigate mostrano valori ancora inferiori rispetto il provino di riferimento, di un 11,0% e di un 37,6% rispettivamente per il campione T1 20% e T2 20% (*Appendice, Paragrafo 6.5.*), fino ad arrivare a dei valori di: 41,3% e 47,5% per i campioni T1 40% e T2 40%, rispetto al campione di riferimento.

Si nota anche che, i campioni realizzati con materiale di sostituzione di tipo *T1* hanno delle prestazioni meccaniche in termini di resistenza migliori, nel complesso, rispetto a quelli realizzati con l'aggiunta di tipo *T2*, la sostituzione di 10 o 20% dell'aggregato tradizionale infatti porta ad una diminuzione massima del 10% della resistenza a compressione rispetto al riferimento.

Infine, è importante sottolineare che, nelle analisi e nei confronti teorici di questo tipo, variazioni fino al 5% rispetto al materiale senza sostituzioni, sono da considerarsi degli ottimi risultati perché, il materiale in questione, potrà essere utilizzato come sostituto del campione di riferimento nelle successive lavorazioni dato che avrà delle prestazioni pressoché simili. Questo ragionamento può essere applicato per i provini che hanno delle basse percentuali di materiale sostituito, mentre al crescere di queste, cresceranno anche le variazioni prestazionali.

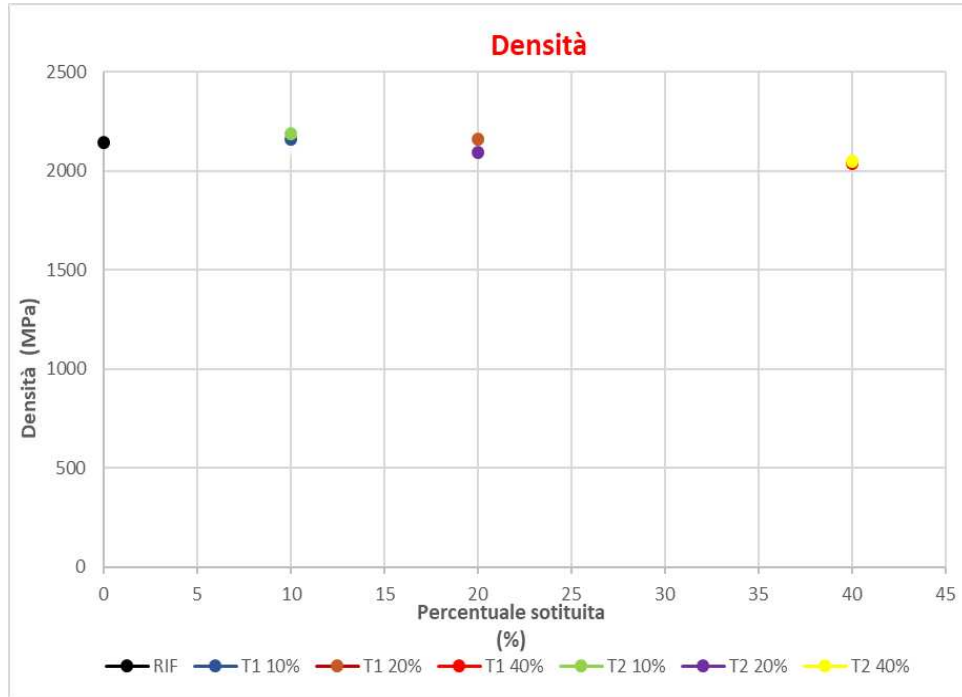


Figura 82: Correlazione tra percentuale di sostituzione e densità.

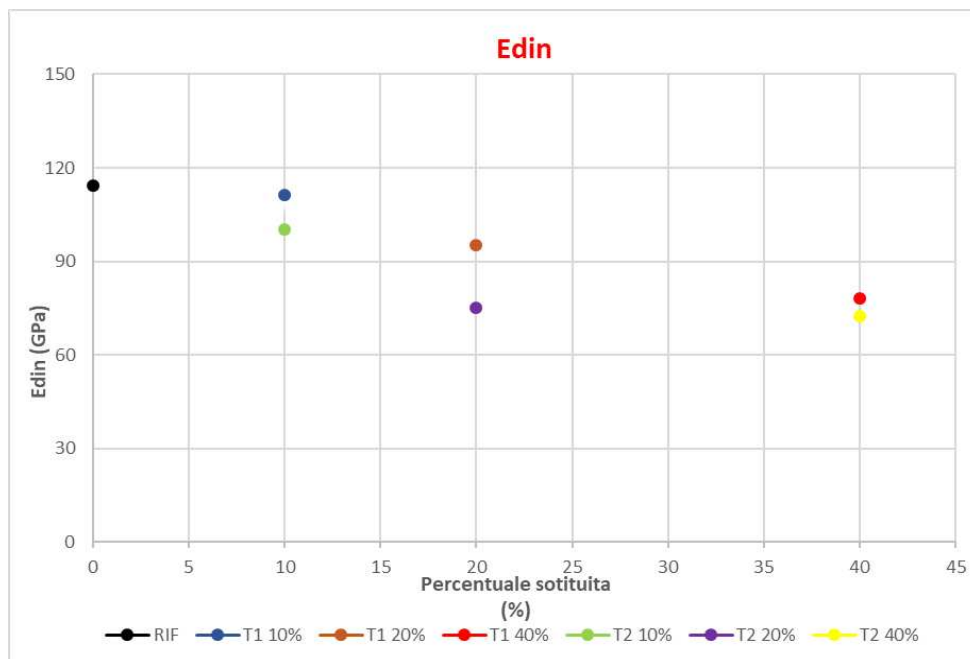


Figura 83: Correlazione tra percentuale di sostituzione e modulo elastico dinamico.

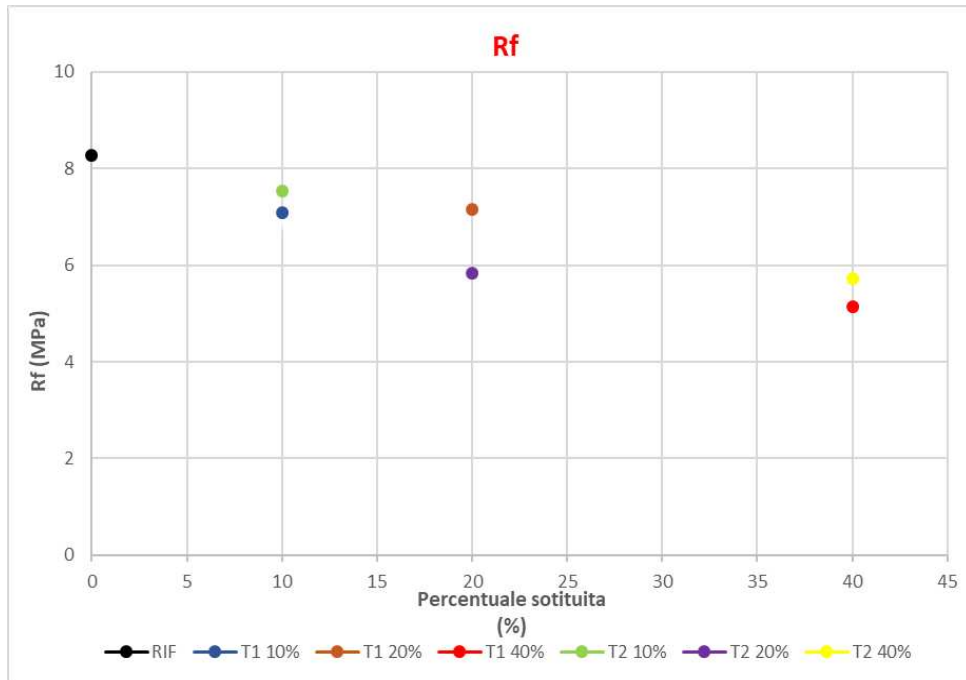


Figura 84: Correlazione tra percentuale di sostituzione e resistenza flessione.

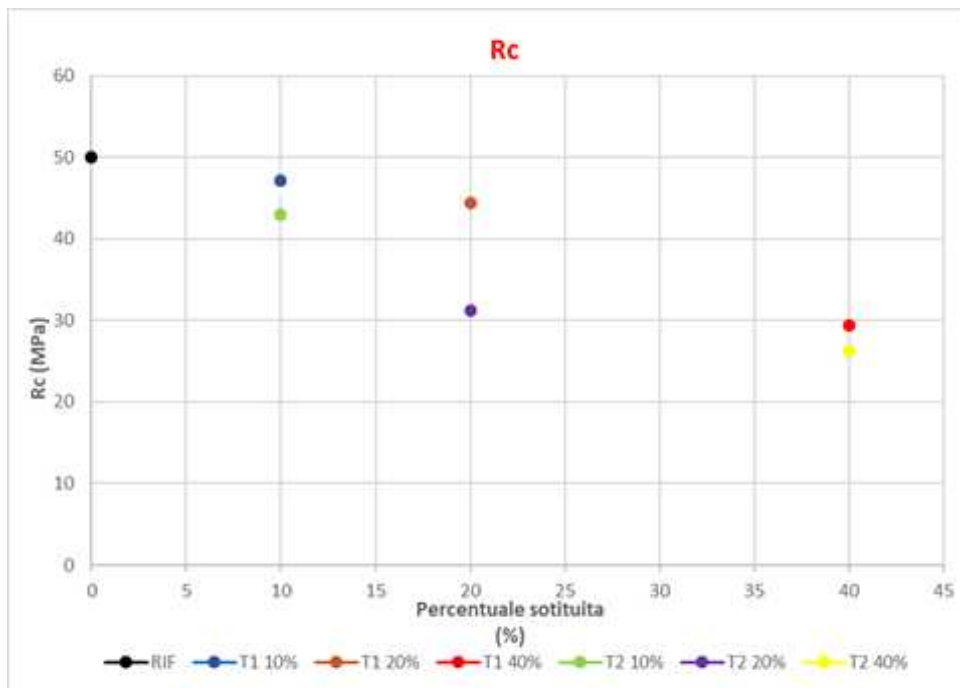


Figura 85: Correlazione tra percentuale di sostituzione e resistenza meccanica.

4.4.2. Analisi porosimetrica

Dall'equazione di Powers il volume dei pori dipende dal rapporto a/c e dal grado di idratazione della malta, dato che in questa ricerca i due fattori sono gli stessi per tutti gli impasti la differenza tra le porosità dipenderà principalmente dalla differenza tra le diverse componenti delle miscele. Si riportano, in seguito, i valori di porosità percentuale ed i grafici relativi sia alla distribuzione della porosità relativa sia alla porosità cumulativa.

Total pore size	unità	RIF	T1 10%	T1 20%	T1 40%	T2 10%	T2 20%	T2 40%
Accessible porosity	%	14,86	15,59	17,27	25,40	16,80	23,77	23,66

Tabella 9: Valori porosità percentuale.

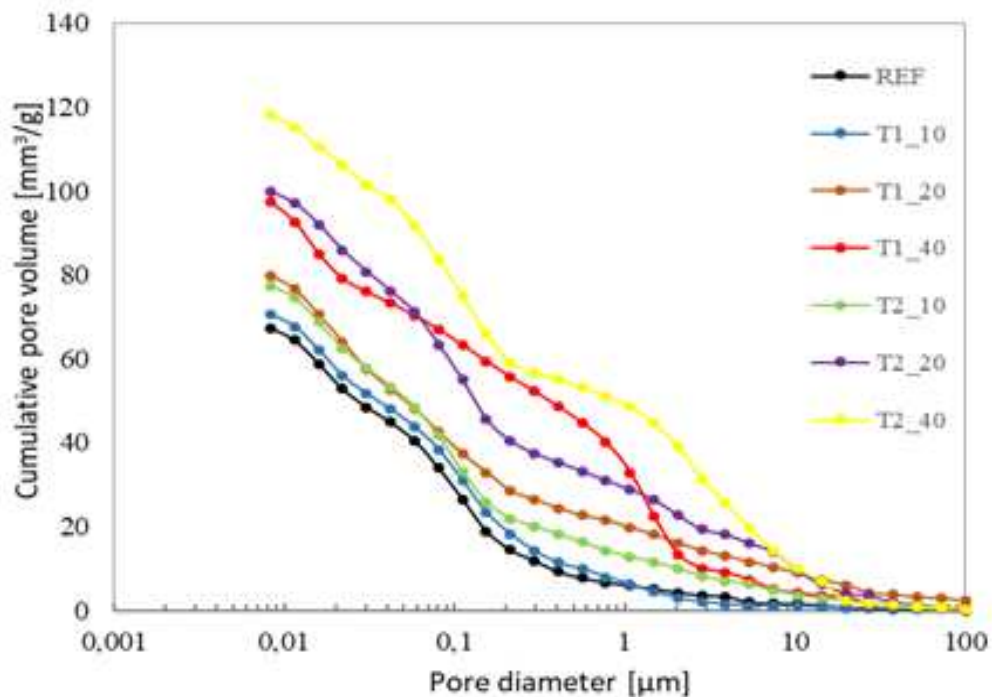


Figura 86: Grafico porosità cumulativa.

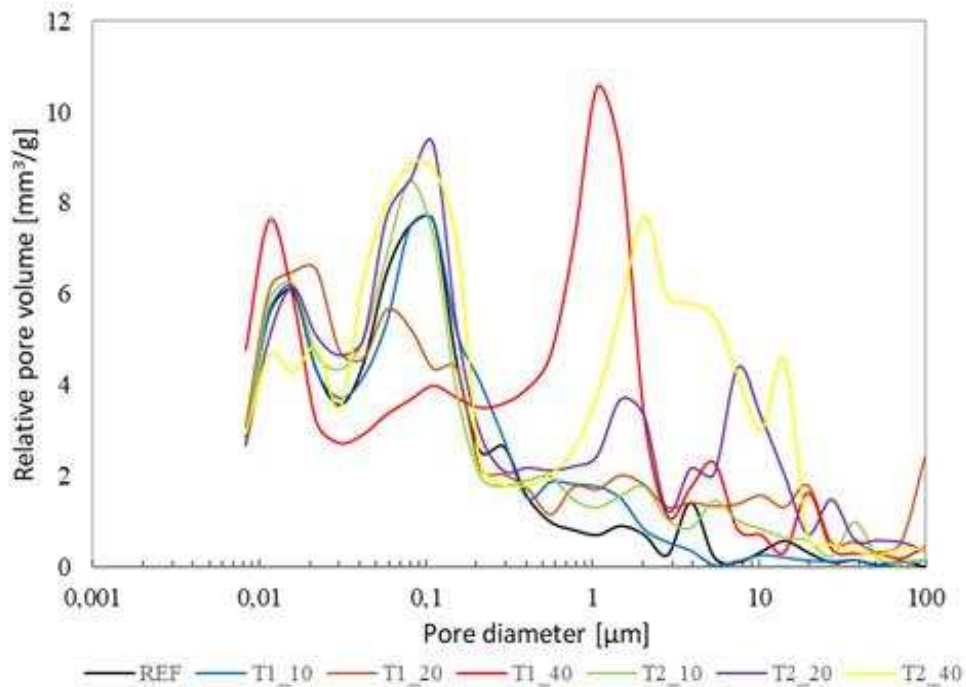


Figura 87: Grafico porosità relativa.

Alla luce di questi risultati, si nota che, in ogni provino, all'aumentare della percentuale di materiale sostituito corrisponde un aumento della porosità totale; infatti il campione di riferimento ha una porosità del 14,9%, mentre il campione T1 10% fa registrare una porosità del 15,6% a confronto con T2 10% del 16,8%, i provini T1 20% e T2 20% hanno dato dei valori di porosità rispettivamente del 17,3% e 16,8%.

Infine, i campioni T1 40% e T2 40% presentano dei valori di porosità del 25,4% e 23,7% (Tabella 9).

Dunque, mettendo a confronto il trattamento di tipo T1 e il T2, si evidenzia che il primo ha nel complesso minore porosità rispetto al campione T2.

4.4.3. Assorbimento d'acqua per capillarità

ID	Tempo min	Tempo vs	Q RIF B kg/m ²	Q RIF C kg/m ²	Q RIF D kg/m ²	Q ₁ kg/m ²
RIF	0	0	0	0	0	0
RIF	10	24,5	0,12	0,18	0,12	0,14
RIF	20	34,6	0,12	0,25	0,12	0,16
RIF	30	42,4	0,12	0,31	0,18	0,20
RIF	60	60,0	0,25	0,43	0,31	0,33
RIF	240	120,0	0,56	1,06	0,68	0,77
RIF	360	147,0	0,75	1,25	0,87	0,95
RIF	1440	293,9	1,62	2,5	1,75	1,95
RIF	1152	415,7	2,31	3,31	2,43	2,68
RIF	1728	509,1	2,81	4,00	3,00	3,27
RIF	2304	587,9	3,31	4,50	3,56	3,79
RIF	4032	777,7	4,43	5,81	4,68	4,97

Tabella 10: Risultati prova assorbimento d'acqua per capillarità per campione di riferimento.

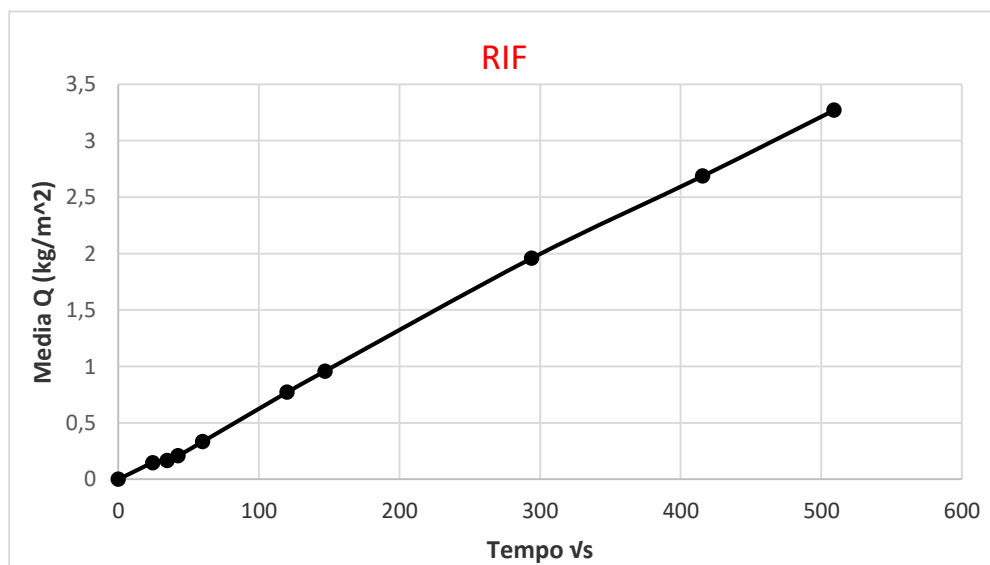


Figura 88: Grafico riassuntivo campione di riferimento.

ID	Tempo	Tempo	Q T1 10%	Q T1 10%	Q T1 10%	Q ₂
	min	vs	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²
T1 10%	0	0	0	0	0	0
T1 10%	10	24,5	0,18	0,12	0,12	0,14
T1 10%	20	34,6	0,25	0,18	0,12	0,18
T1 10%	30	42,4	0,25	0,18	0,18	0,20
T1 10%	60	60,0	0,37	0,18	0,31	0,33
T1 10%	240	120,0	0,75	0,81	0,68	0,75
T1 10%	360	147,0	0,87	0,87	0,81	0,85
T1 10%	1440	293,9	1,62	2,00	1,75	1,79
T1 10%	1152	415,7	2,25	2,56	2,43	2,41
T1 10%	1728	509,1	2,68	3,06	3,00	2,91
T1 10%	2304	587,9	3,18	3,56	3,50	3,41
T1 10%	4032	777,7	4,18	4,56	4,87	4,54

Tabella 11: Risultati prova assorbimento d'acqua per capillarità per T1 10%.

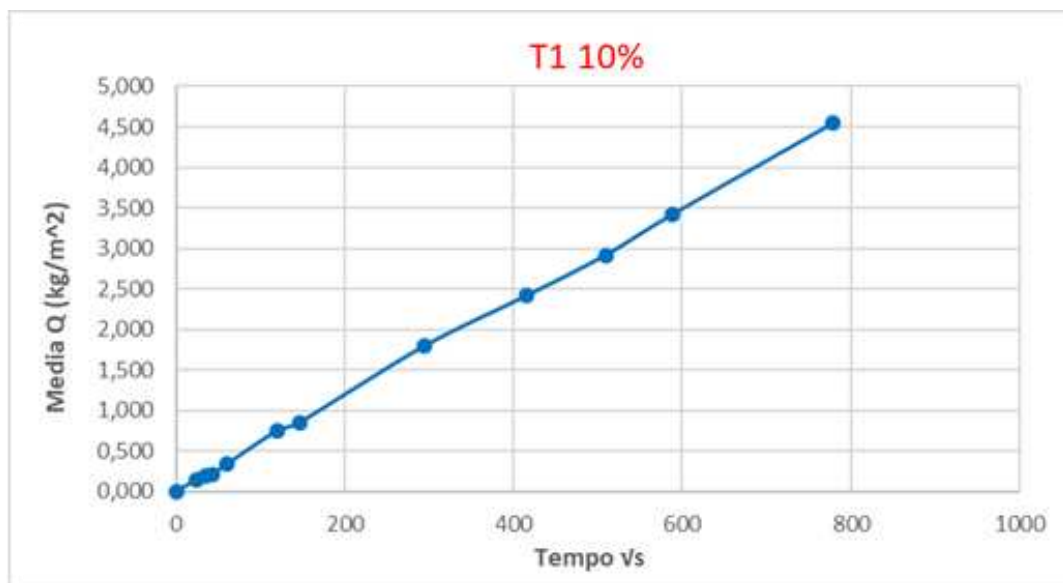


Figura 89: Grafico riassuntivo T1 10%.

ID	Tempo min	Tempo vs	Q T1 20% kg/m ²	Q T1 20% kg/m ²	Q T1 20% kg/m ²	Q ₃ kg/m ²
T1 20%	0	0	0	0	0	0
T1 20%	10	24,5	0,12	0,31	0,12	0,18
T1 20%	20	34,6	0,18	0,37	0,18	0,25
T1 20%	30	42,4	0,25	0,37	0,25	0,29
T1 20%	60	60,0	0,37	0,5	0,37	0,41
T1 20%	240	120,0	0,81	1,00	1,06	0,95
T1 20%	360	147,0	1,00	1,18	1,25	1,14
T1 20%	1440	293,9	2,06	2,18	2,62	2,29
T1 20%	1152	415,7	2,75	2,75	3,43	2,97
T1 20%	1728	509,1	3,25	3,25	4,18	3,56
T1 20%	2304	587,9	3,87	3,81	4,87	4,18
T1 20%	4032	777,7	5,18	5,06	6,31	5,52

Tabella 12: Risultati prova assorbimento d'acqua per capillarità per T1 20%.

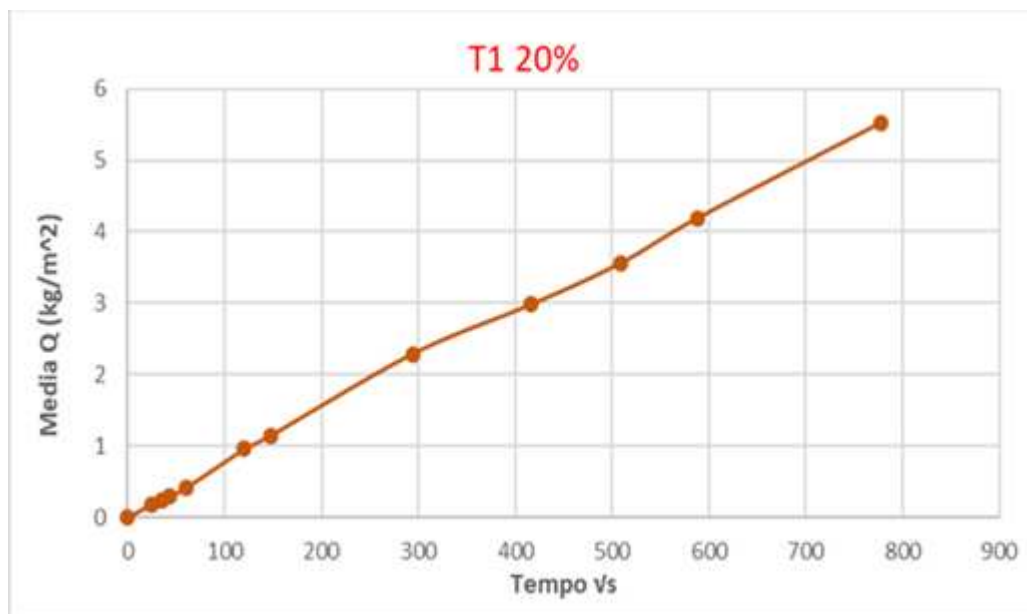


Figura 90: Grafico riassuntivo TI 20%.

ID	Tempo min	Tempo vs	Q T1 40% kg/m ²	Q T1 40% kg/m ²	Q T1 40% kg/m ²	Q ₄ kg/m ²
T1 40%	0	0	0	0	0	0
T1 40%	10	24,5	0,12	0,12	0,12	0,12
T1 40%	20	34,6	0,18	0,25	0,18	0,20
T1 40%	30	42,4	0,18	0,25	0,25	0,22
T1 40%	60	60,0	0,31	0,50	0,50	0,43
T1 40%	240	120,0	0,75	1,00	0,93	0,89
T1 40%	360	147,0	0,87	1,12	1,06	1,02
T1 40%	1440	293,9	1,87	2,18	2,25	2,10
T1 40%	1152	415,7	2,37	2,81	2,93	2,70
T1 40%	1728	509,1	2,81	3,31	3,50	3,20
T1 40%	2304	587,9	3,25	3,68	3,93	3,62
T1 40%	4032	777,7	4,31	4,81	5,18	4,77

Tabella 13: Risultati prova assorbimento d'acqua per capillarità per T1 40%.

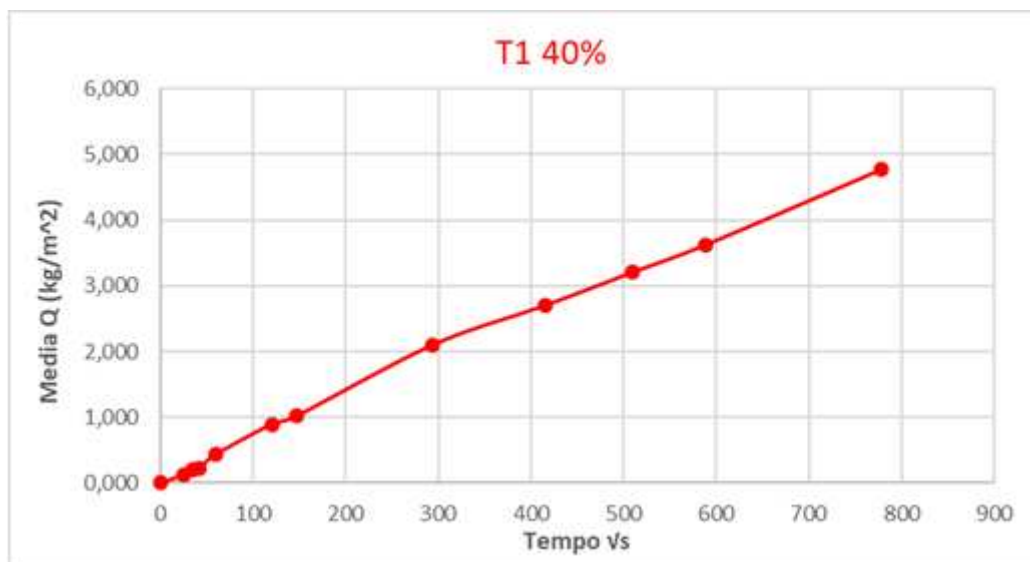


Figura 91: Grafico riassuntivo T1 40%.

ID	Tempo min	Tempo vs	Q T2 20% kg/m ²	Q T2 20% kg/m ²	Q T2 20% kg/m ²	Q ₅ kg/m ²
T2 10%	0	0	0	0	0	0
T2 10%	10	24,5	0,18	0,12	0,18	0,16
T2 10%	20	34,6	0,25	0,18	0,25	0,22
T2 10%	30	42,4	0,37	0,25	0,31	0,31
T2 10%	60	60,0	0,50	0,37	0,56	0,47
T2 10%	240	120,0	1,18	0,93	1,18	1,10
T2 10%	360	147,0	1,43	1,12	1,37	1,31
T2 10%	1440	293,9	2,75	2,25	2,62	2,54
T2 10%	1152	415,7	3,43	2,87	3,31	3,20
T2 10%	1728	509,1	3,87	3,43	3,87	3,72
T2 10%	2304	587,9	4,25	3,75	4,31	4,10
T2 10%	4032	777,7	5,31	4,81	5,56	5,22

Tabella 14: Risultati prova assorbimento d'acqua per capillarità per T2 10%.

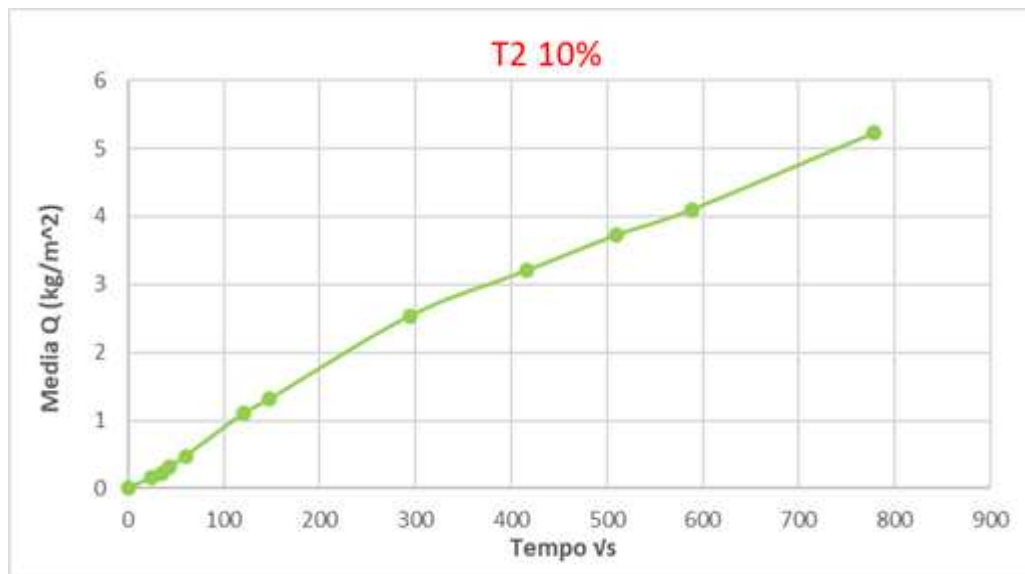


Figura 92: Grafico riassuntivo T2 10%.

ID	Tempo	Tempo	Q T2 20%	Q T2 20%	Q T2 20%	Q ₆
	min	vs	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²
T2 20%	0	0	0	0	0	0
T2 20%	10	24,5	0,31	0,25	0,25	0,27
T2 20%	20	34,6	0,37	0,31	0,31	0,33
T2 20%	30	42,4	0,37	0,37	0,37	0,37
T2 20%	60	60,0	0,56	0,56	0,50	0,54
T2 20%	240	120,0	1,12	1,13	1,06	1,10
T2 20%	360	147,0	1,31	1,25	1,25	1,27
T2 20%	1440	293,9	2,56	2,56	2,50	2,54
T2 20%	1152	415,7	3,12	3,18	3,12	3,14
T2 20%	1728	509,1	3,62	3,81	3,75	3,72
T2 20%	2304	587,9	4,06	4,18	4,25	4,17
T2 20%	4032	777,7	5,31	5,31	5,43	5,35

Tabella 15: Risultati prova assorbimento d'acqua per capillarità per T2 20%.

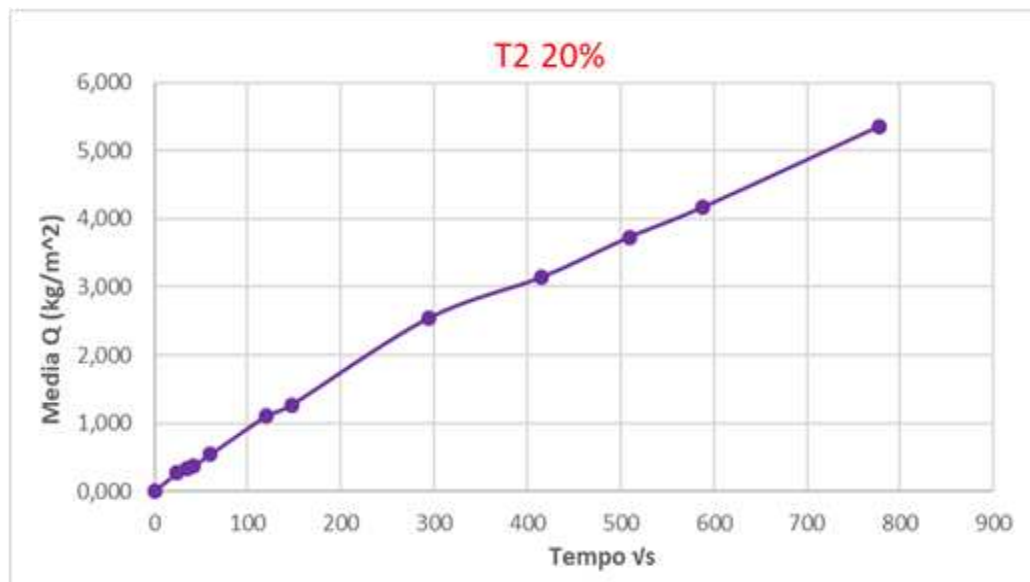


Figura 93: Grafico riassuntivo T2 20%.

ID	Tempo	Tempo	Q T2 40%	Q T2 40%	Q T2 40%	Q ₇
	min	vs	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²
T2 40%	0	0	0	0	0	0
T2 40%	10	24,5	0,25	0,12	0,12	0,16
T2 40%	20	34,6	0,31	0,18	0,18	0,22
T2 40%	30	42,4	0,37	0,31	0,25	0,31
T2 40%	60	60,0	0,56	0,37	0,37	0,43
T2 40%	240	120,0	1,06	0,93	0,81	0,93
T2 40%	360	147,0	1,25	1,00	0,93	1,06
T2 40%	1440	293,9	2,37	1,93	2,00	2,10
T2 40%	1152	415,7	3,00	2,43	2,75	2,72
T2 40%	1728	509,1	3,5	2,93	3,37	3,27
T2 40%	2304	587,9	3,93	3,43	3,81	3,72
T2 40%	4032	777,7	5,06	4,56	5,00	4,87

Tabella 16: Risultati prova assorbimento d'acqua per capillarità per T2 40%.

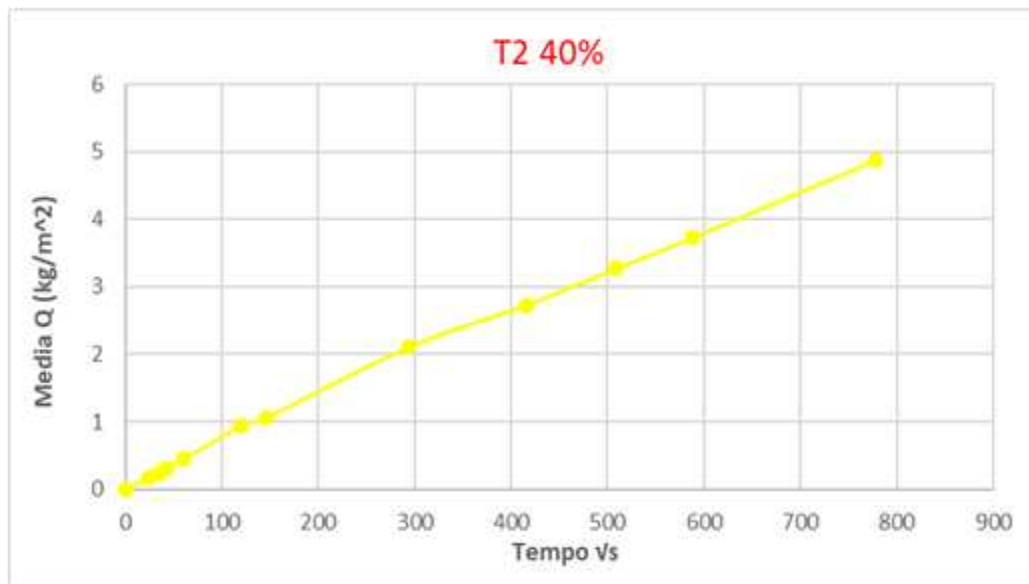


Figura 94: Grafico riassuntivo T2 40%.

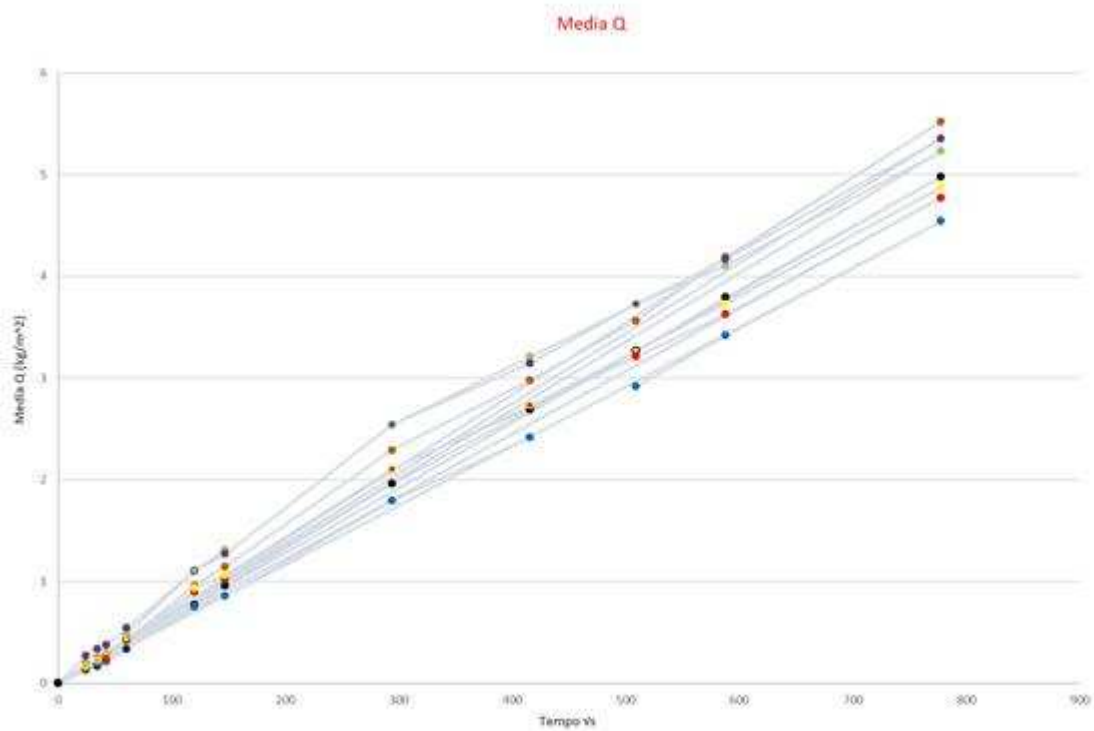


Figura 95: Grafico riassuntivo delle medie di tutti i campioni.

ID	Tempo	Q ₇	%
	min	kg/m ²	%
RIF	4032	5,0	-
T1 10%	4032	4,5	8,8
T1 20%	4032	5,5	-10,9
T1 40%	4032	4,8	4,2
T2 10%	4032	5,2	-5,0
T2 20%	4032	5,4	-7,5
T2 40%	4032	4,9	2,1

Tabella 17: Media di tutti i campioni analizzati.

Dai grafici ottenuti e dalla tabella riassuntiva delle medie dei rispettivi assorbimenti al tempo finale di 168 ore, si evidenzia che i campioni preparati con T1 e T2, ed in particolare *T1 10%*, *T1 20%* e *T2 20%* assorbono più acqua rispetto al campione di riferimento, per un valore di 8,8%, -10,9% e -7,5% rispetto al provino di riferimento (*Risultati campione B, Appendice, Paragrafo 6.6.*).

Per questo motivo, questi ultimi sono maggiormente soggetti alle problematiche che può comportare il fenomeno della risalita d'acqua per capillarità.

Questo fenomeno è dovuto alla presenza di porosità nel materiale e, questa può provocare la risalita di acqua nei campioni e ne comporta effetti non desiderati come: deterioramento dei muri, erosione dovuta alla presenza di sali nell'acqua ed anche possibile dispersione termica.¹⁶

I restanti campioni, invece, hanno dato come risultati dei valori che sono confrontabili con il valore del campione di riferimento.

Infine, si denota dal grafico riassuntivo che, nel complesso, tutti i campioni subiscono una crescita pressoché lineare nel tempo, conforme all'andamento della curva del campione di riferimento.

¹⁶ *Cos'è l'umidità di risalita definizione e possibili soluzioni al problema (elosystem.it)*

4.4.4. Contenuto ioni cloruro liberi nella malta cementizia

Nella *tabella 18* sono riportati i risultati della prova dei cloruri dopo la preparazione delle malte cementizie. Come si vede dai valori percentuali, i risultati ottenuti rispettano i valori emessi dalla Legge *UNI EN 8520-2-2016*, nella quale il valore massimo di cloruri accettabile è <0,03%.

	Media Cl	Media
	mg/l	%
RIF	27,4	0,003
T1 10%	35,2	0,004
T1 20%	36,4	0,004
T1 40%	36,6	0,004
T2 10%	37,7	0,004
T2 20%	43,8	0,004
T2 40%	60,5	0,006

Tabella 18: Risultati prova cloruri dell'aggregato finale.

5. Conclusioni

Per promuovere l'economia circolare nelle costruzioni occorre seguire un approccio olistico che tenga conto di tanti aspetti strettamente correlati tra loro.

Affinché una scelta tecnica risulti essere quella ottimale occorre soddisfare almeno tre requisiti fondamentali:

- sicurezza e qualità, requisito imprescindibile per assicurare che la soluzione proposta sia valida e sostenibile nel tempo in termini di sicurezza strutturale, funzionalità e durabilità;
- fattibilità economica, in quanto una soluzione troppo costosa non è concorrenziale con le altre e quindi costituisce una via non percorribile;
- impatto ambientale complessivo, che tenga conto di tutte le fasi del ciclo di vita e di tutti gli aspetti, inclusi logistica e trasporto.

Se l'unico obiettivo fosse la salvaguardia delle risorse naturali e il minor conferimento in discarica di rifiuti, l'incentivazione all'utilizzo di materiali riciclati, sarebbe sicuramente la via giusta da seguire per incoraggiare l'utilizzo di materiali alternativi e per superare la diffidenza verso materiali derivati da rifiuti.

Per avere una visione globale è necessario integrare l'approccio tecnico con una valutazione della sostenibilità ambientale ed economica effettuata mediante analisi del ciclo vita *Life Cycle Assessment* che tenga conto di tanti altri aspetti, i quali potrebbero inficiare in tutto o in parte la validità della soluzione proposta.¹⁷

Per poter però iniziare uno studio di fattibilità è necessario caratterizzare il rifiuto e valutare le proprietà fisiche, morfologiche e chimiche. Per quanto riguarda la composizione mineralogica risulta essere la stessa, composta principalmente da aragonite, una forma allotropica del carbonato di calcio.

¹⁷ <https://www.ingenio-web.it/articoli/aggregati-da-riciclo-possono-sostituire-gli-inerti-naturali-per-il-confezionamento-di-calcestruzzi-ordinari/>

Dalle analisi effettuate si rileva come il pretrattamento influenzi sia il contenuto di materiale organico, sia la distribuzione granulometrica, oltre che per la concentrazione di cloruri liberi massima rilevata, pari a 0,004% per T1 e 0,006% T2.

Una volta caratterizzati i materiali si passa alla realizzazione delle malte ed allo studio delle diverse proprietà. Di seguito, si riporta la tabella indicante i risultati finali ottenuti delle prove effettuate sulle malte cementizie. Per ogni campione è stato effettuato il calcolo della differenza di prestazioni sul provino a 28 giorni di stagionatura rispetto al materiale di riferimento, espresso in percentuale.

	Densità	E _{din}	R _f	R _c
	%	%	%	%
T1 10%	-0,9	0,9	14,2	5,5
T1 20%	-0,9	5,9	13,5	11,0
T1 40%	4,9	11,9	37,9	41,3
T2 10%	-2,3	4,3	8,8	14,0
T2 20%	2,3	13,1	29,5	37,6
T2 40%	4,4	14,1	30,6	47,5

Tabella 19: Differenze in percentuale dopo 28 giorni di stagionatura rispetto al campione di riferimento.

Dalla tabella si evidenzia che, per quanto riguarda i valori di resistenza a flessione e a compressione, i risultati ottenuti mostrano una tendenza crescente di differenza rispetto al provino di riferimento al crescere della percentuale di sostituzione della sabbia con il rifiuto alimentare precedentemente trattato, come è stato esposto nei capitoli precedenti.

Per quanto riguarda i valori di densità e di modulo elastico dinamico, invece, i risultati ottenuti mostrano come anche aumentando la percentuale di materiale sostituito si riescano ad ottenere dei valori confrontabili con quelli del provino di riferimento.

Un aspetto da sottolineare è l'aumento di porosità al crescere della percentuale di materiale sostituito. Questo fattore risulta particolarmente rilevante ai fini della scelta del materiale perché, i pori sono fattori di innesco di sostanze nocive e acqua, che portano quindi ad un deterioramento delle materie più rapido.

È importante sottolineare che, nelle analisi e nei confronti teorici di questo tipo, variazioni fino al 5% rispetto al materiale senza sostituzioni con rifiuti alimentari, sono da considerarsi degli ottimi risultati perché, il materiale in questione, potrà essere utilizzato come sostituto del campione di riferimento nelle successive lavorazioni dato che avrà delle prestazioni pressoché simili.

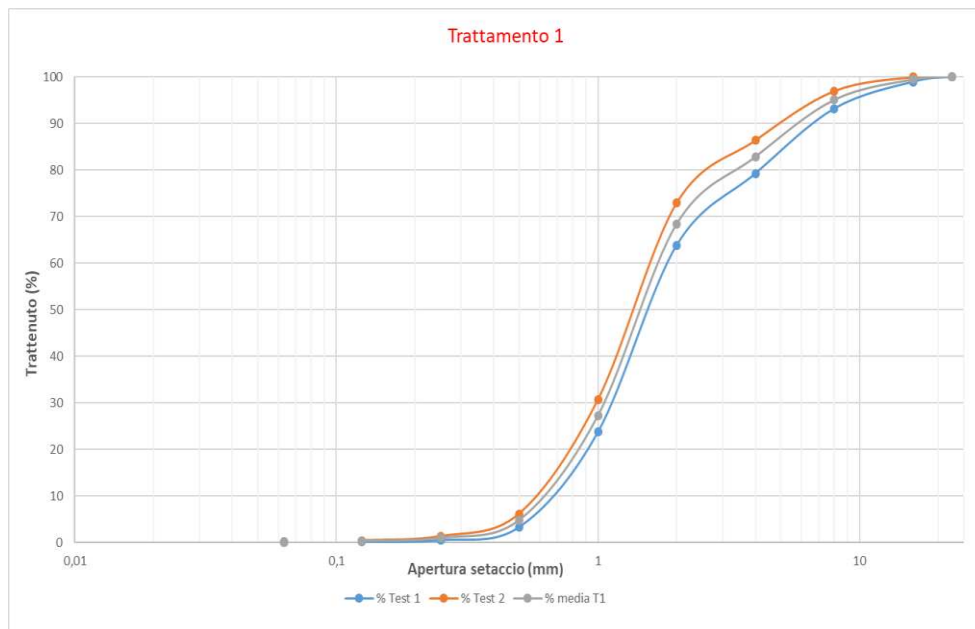
Si può attestare anche che, i campioni realizzati con materiale di sostituzione di tipo T1 hanno delle prestazioni migliori, nel complesso, rispetto a quelli realizzati con l'aggiunta di tipo T2.

In conclusione di questa ricerca, si afferma che, è possibile utilizzare materiale di scarto per produrre della malta cementizia perché, in accordo con i risultati ottenuti, utilizzando delle basse percentuali di materiale sostituito, si riescono ad ottenere delle prestazioni e delle caratteristiche del materiale confrontabili con quelle di un provino di riferimento.

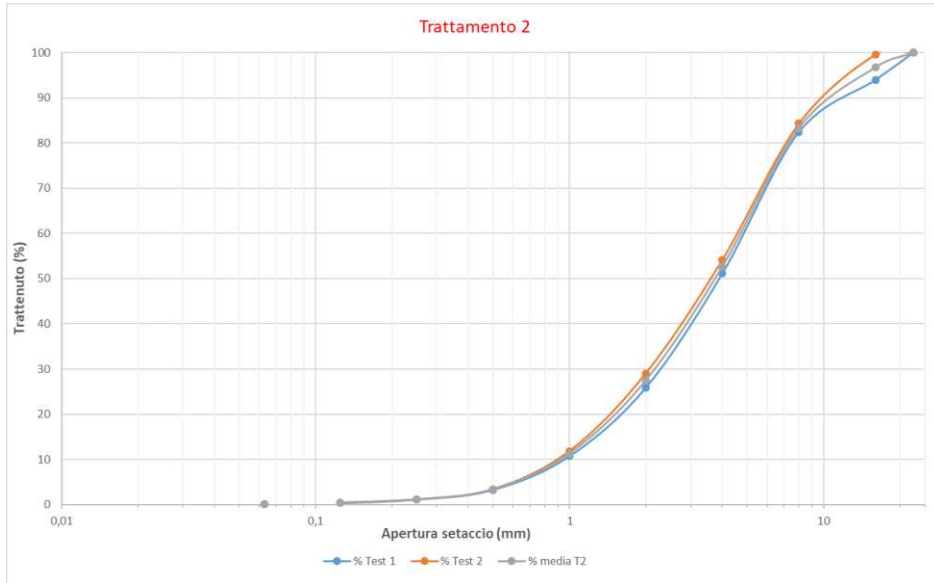
6. APPENDICE

6.1. Curve granulometriche T1, T2 e S1

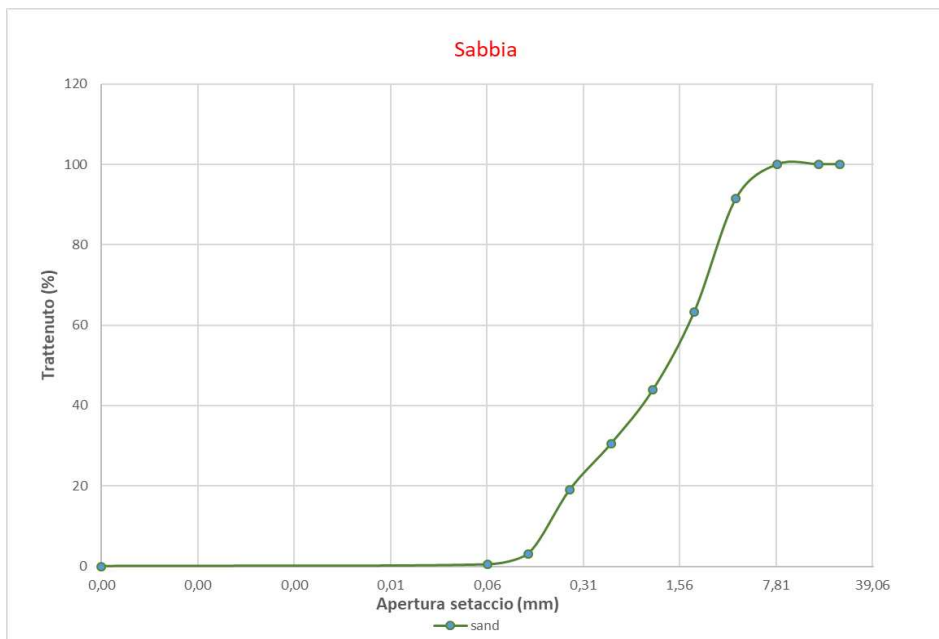
Apertura setaccio (mm)	Peso tara (g)	Test 1 (g)	Test 2 (g)	Peso netto (g)	Peso netto (g)	tenuto par (%)	tenuto par (%)	tenuto cum (%)	tenuto cum (%)	Test 1 (%)	Test 2 (%)	Media T1 (%)
22,60	547,10	547,10	547,10	0	0	0	0	0	0	100	100	100
16,00	636,30	640,10	636,30	3,80	0	1,06	0	1,06	0	98,94	100	99,47
8,00	534,80	555,40	545,90	20,60	11,10	5,76	3	6,83	3	93,17	97,00	95,09
4,00	475,50	525,20	514,60	49,70	39,10	13,91	10,57	20,73	13,57	79,27	86,43	82,85
2,00	542,10	597,10	591,90	55	50	15	13	36	27	63,88	72,96	68,42
1,00	490,80	634,20	647,20	143,40	156,40	40,12	42,29	76,25	69,33	23,75	30,67	27,21
0,50	460,60	533,40	551,20	72,80	90,60	20,37	24,50	96,61	93,83	3,39	6,17	4,78
0,25	422,50	432,50	440,40	10,00	17,90	2,80	4,84	99,41	98,67	0,59	1,33	0,96
0,13	348,10	349,40	351,40	1,30	3,30	0,36	0,89	99,78	99,57	0,22	0,43	0,33
0,06	394,80	395,20	396,10	0,40	1	0	0	100	100	0,11	0,08	0,10
0,00	439,90	440,30	440,20	0,40	0,30	0,11	0,08	100	100	0	0	0



Apertura setaccio (mm)	Peso tara (g)	Test 1 (g)	Test 2 (g)	Peso netto (g)	Peso netto (g)	tenuto par (%)	tenuto par (%)	tenuto cum (%)	tenuto cum (%)	Test 1 (%)	Test 2 (%)	Media T2 (%)
22,60	547,10	547,10	547,10	0	0	0	0	0	0	100	100	100
16,00	636,30	654,40	638,10	18,10	1,80	6,02	0,45	6,02	0,45	93,98	99,55	96,76
8,00	534,80	569,60	595,60	34,80	60,80	11,57	15,30	17,59	15,75	82,41	84,25	83,33
4,00	475,50	569,70	595,30	94,20	119,80	31,32	30,15	48,90	45,90	51,10	54,10	52,60
2,00	542,10	618,00	641,80	75,90	99,70	25,23	25,09	74,14	70,99	25,86	29,01	27,44
1,00	490,80	536,40	559,20	45,60	68,40	15,16	17,21	89,30	88,20	10,70	11,80	11,25
0,50	460,60	483,00	494,10	22,40	33,50	7,45	8,43	96,74	96,63	3,26	3,37	3,31
0,25	422,50	428,90	431,50	6,40	9,00	2,13	2,26	98,87	98,89	1,13	1,11	1,12
0,13	348,10	350,40	350,80	2,30	2,70	0,76	0,68	99,63	99,57	0,37	0,43	0,40
0,06	394,80	395,60	396,00	0,80	1,20	0,27	0,30	99,90	99,87	0,10	0,13	0,11
0,00	439,90	440,20	440,40	0,30	0,50	0,10	0,13	100	100	0	0	0



Sabbia	Peso netto	test 1	test 2	attenuto	Tattenuto	Tuto	Cumuluto	Cumuluto	Cumulato	Cumula	cumulativ	%	%	%	%	%
mm	g	g	g	g	g	g	g	g	%	%	%	%	%	%	%	%
22,6	547,1	547,1	547,1	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16	636,3	640,1	636,3	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
8	535,1	535,1	535,1	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
4	568,7	603	592,8	34,3	24,1	34,3	24,1	10,0	7,1	8,6	90,0	92,9	91,4	91,4	91,4	91,4
2	542,9	645	632,6	102,1	89,7	136,4	113,8	39,7	33,7	36,7	60,3	66,3	63,3	63,3	63,3	63,3
1	396,6	464,2	461,4	67,6	64,8	204	178,6	59,4	52,9	56,1	40,6	47,1	43,9	43,9	43,9	43,9
0,5	460,8	505,8	506,3	45	45,5	249	224,1	72,5	66,4	69,4	27,5	33,6	30,6	30,6	30,6	30,6
0,25	422,7	459,6	464,1	36,9	41,4	285,9	265,5	83,3	78,6	80,9	16,7	21,4	19,1	19,1	19,1	19,1
0,125	412	459,4	472,8	47,4	60,8	333,3	326,3	97,1	96,6	96,8	2,9	3,4	3,2	3,2	3,2	3,2
0,063	394,9	403,3	405	8,4	10,1	341,7	336,4	99,5	99,6	99,6	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0,0001	440,1	441,8	441,4	1,7	1,3	343,4	337,7	100,0	100,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0



6.2. Densità

2 giorni							
			peso	media pes	densità	edia dens	volume
			g	g	kg/m ³	kg/m ³	cm ³
ref	0	ref 1	576,9	1,05	2253,52	2195	256
		ref 2	547		2136,72		
T1 10%	10	T1 10% 1	575,8	0,99	2249,22	2264	
		T1 10% 2	583,3		2278,52		
T1 20%	20	T1 20% 1	564,7	0,97	2205,86	2235	
		T1 20% 2	579,6		2264,06		
T1 40%	40	T1 40% 1	547	0,98	2136,72	2156	
		T1 40% 2	557		2175,78		
T2 10%	10	T2 10% 1	577,8	1,02	2257,03	2240	
		T2 10% 2	569,2		2223,44		
T2 20%	20	T2 20% 1	547,6	1,01	2139,06	2129	
		T2 20% 2	542,6		2119,53		
T2 40%	40	T2 40% 1	556,9	1,02	2175,39	2158	
		T2 40% 2	548		2140,63		

7 giorni							
			peso	media pes	densità	edia dens	volume
			g	g	kg/m ³	kg/m ³	cm ³
ref	0	ref 1	562,96	563,91	2199,06	2203	256
		ref 2	564,85		2206,45		
T1 10%	10	T1 10% 1	562,30	562,23	2196,48	2196	
		T1 10% 2	562,16		2195,94		
T1 20%	20	T1 20% 1	573,00	566,15	2238,28	2212	
		T1 20% 2	559,30		2184,77		
T1 40%	40	T1 40% 1	546,90	554,80	2136,33	2167	
		T1 40% 2	562,70		2198,05		
T2 10%	10	T2 10% 1	563,27	563,35	2200,27	2201	
		T2 10% 2	563,43		2200,90		
T2 20%	20	T2 20% 1	545,04	543,15	2129,06	2122	
		T2 20% 2	541,25		2114,26		
T2 40%	40	T2 40% 1	537,30	540,33	2098,83	2111	
		T2 40% 2	543,36		2122,50		

28 giorni									
			peso	media pes	densità	edia dens	volume	dev.st	%
			g	g	kg/m ³	kg/m ³	cm ³		
ref	0	ref 1	545,65	548,07	2131,45	2141	256		
		ref 2	550,48		2150,31			13,3411	-0,88949
T1 10%	10	T1 10% 1	553,71	552,94	2162,93	2160			
		T1 10% 2	552,17		2156,91			4,25369	-0,86121
T1 20%	20	T1 20% 1	559,47	552,79	2185,43	2159			
		T1 20% 2	546,1		2133,20			36,9298	4,857088
T1 40%	40	T1 40% 1	531,09	521,45	2074,57	2037			
		T1 40% 2	511,8		1999,22			53,2816	-2,299
T2 10%	10	T2 10% 1	552,5	560,67	2158,20	2190			
		T2 10% 2	568,83		2221,99			45,1057	2,245172
T2 20%	20	T2 20% 1	540,59	535,76	2111,68	2093			
		T2 20% 2	530,93		2073,95			26,6822	4,431044
T2 40%	40	T2 40% 1	523,41	523,78	2044,57	2046			
		T2 40% 2	524,15		2047,46			2,04398	

6.3. Modulo elastico dinamico

2 giorni										
			tempo	E din	media Edin	velocità	peso	densità	edia densi	volume
			μS	GPa	GPa	m/s	g	kg/m ³	kg/m ³	cm ³
ref	0	ref 1	39,2	33,789	32,832	4081,63	576,90	2253,516	2195,12	256
		ref 2	39,3	31,875		4071,25	547,00	2136,719		
T1 10%	10	T1 10% 1	41,3	30,382	31,194	3874,09	575,80	2249,219	2263,87	
		T1 10% 2	40,5	32,005		3950,62	583,30	2278,516		
T1 20%	20	T1 20% 1	42	28,811	29,550	3809,52	564,70	2205,859	2234,96	
		T1 20% 2	41,5	30,288		3855,42	579,60	2264,063		
T1 40%	40	T1 40% 1	44,3	25,085	25,144	3611,74	547,00	2136,719	2156,25	
		T1 40% 2	44,6	25,202		3587,44	557,00	2175,781		
T2 10%	10	T2 10% 1	43,8	27,106	27,215	3652,97	577,80	2257,031	2240,23	
		T2 10% 2	43,3	27,323		3695,15	569,20	2223,438		
T2 20%	20	T2 20% 1	43,2	26,408	26,288	3703,7	547,60	2139,063	2129,3	
		T2 20% 2	43,2	26,167		3703,7	542,60	2119,531		
T2 40%	40	T2 40% 1	47,8	21,936	22,227	3347,28	556,90	2175,391	2158,01	
		T2 40% 2	46,8	22,518		3418,8	548,00	2140,625		

7 giorni										
			tempo	E din	media Edin	velocità	peso	densità	edia densi	volume
			μS	GPa	GPa	m/s	g	kg/m ³	kg/m ³	cm ³
ref	0	ref 1	38,4	34,360	34,240	4166,67	562,96	2199,063	2202,75	256
		ref 2	38,6	34,119		4145,08	564,85	2206,445		
T1 10%	10	T1 10% 1	41,4	29,526	30,733	3864,73	562,3	2196,484	2196,21	
		T1 10% 2	39,8	31,940		4020,1	562,16	2195,938		
T1 20%	20	T1 20% 1	41,4	30,088	29,312	3864,73	573	2238,281	2211,52	
		T1 20% 2	42	28,536		3809,52	559,3	2184,766		
T1 40%	40	T1 40% 1	44,3	25,081	26,109	3611,74	546,9	2136,328	2167,19	
		T1 40% 2	43,2	27,136		3703,7	562,7	2198,047		
T2 10%	10	T2 10% 1	40,7	30,603	30,683	3931,2	563,27	2200,273	2200,59	
		T2 10% 2	40,6	30,763		3940,89	563,43	2200,898		
T2 20%	20	T2 20% 1	42,5	27,158	27,452	3764,71	545,04	2129,063	2121,66	
		T2 20% 2	41,9	27,747		3818,62	541,25	2114,258		
T2 40%	40	T2 40% 1	44,2	24,752	25,121	3619,91	537,3	2098,828	2110,66	
		T2 40% 2	43,8	25,491		3652,97	543,36	2122,500		

28 giorni												
			tempo	E din	media Edin	velocità	peso	densità	edia densi	volume	DEV.ST	%
			μS	GPa	GPa	m/s	g	kg/m ³	kg/m ³	cm ³		
ref	0	ref 1	38,4	112,852	114,195	4166,67	545,65	7222,51	7251	256		
		ref 2	38,1	115,539		4199,48	550,48	7279,38			40,2133	0,906
T1 10%	10	T1 10% 1	38,8	109,397	111,125	4123,71	553,71	7148,05	7185			
		T1 10% 2	38,4	112,852		4166,67	552,17	7222,51			52,6504	5,899
T1 20%	20	T1 20% 1	40,3	97,631	95,173	3970,22	559,47	6882,00	6823			
		T1 20% 2	41	92,715		3902,44	546,1	6764,50			83,0833	11,851
T1 40%	40	T1 40% 1	44	75,014	78,258	3636,36	531,09	6303,28	6392			
		T1 40% 2	42,8	81,502		3738,32	511,8	6480,01			124,965	4,255
T2 10%	10	T2 10% 1	40,1	99,099	100,228	3990,02	552,5	6916,32	6942			
		T2 10% 2	39,8	101,357		4020,1	568,83	6968,45			36,8636	13,053
T2 20%	20	T2 20% 1	44,6	72,027	75,098	3587,44	540,59	6218,48	6304			
		T2 20% 2	43,4	78,169		3686,64	530,93	6390,42			121,58	14,118
T2 40%	40	T2 40% 1	43,8	76,047	72,393	3652,97	523,41	6332,06	6227			
		T2 40% 2	45,3	68,740		3532,01	524,15	6122,39			148,26	

6.4. Resistenza a flessione

2 giorni			Fm	Rf	media Rf	dev. St	%
			KN	MPa	MPa		
ref	0	ref 1	3,22	7,547	6,96		
		ref 2	2,72	6,375		0,82864	8,754
T1 10%	10	T1 10% 1	2,58	6,047	6,35		
		T1 10% 2	2,84	6,656		0,43089	7,744
T1 20%	20	T1 20% 1	2,86	6,703	6,42		
		T1 20% 2	2,62	6,141		0,39775	18,855
T1 40%	40	T1 40% 1	2,41	5,648	5,65		
		T1 40% 2	2,41	5,648		0	21,717
T2 10%	10	T2 10% 1	2,8	6,563	5,45		
		T2 10% 2	1,85	4,336		1,57442	24,242
T2 20%	20	T2 20% 1	2,4	5,625	5,27		
		T2 20% 2	2,1	4,922		0,49718	37,374
T2 40%	40	T2 40% 1	1,65	3,867	4,36		
		T2 40% 2	2,07	4,852		0,69606	

7 giorni			Fm	Rf	media Rf	dev. St	%
			KN	MPa	MPa		
ref	0	ref 1	2,35	5,508	5,51		
		ref 2	2,35	5,508		0	15,488
T1 10%	10	T1 10% 1	2,54	5,953	5,88		
		T1 10% 2	2,48	5,813		0,09944	18,350
T1 20%	20	T1 20% 1	2,6	6,094	5,68		
		T1 20% 2	2,25	5,273		0,58005	26,431
T1 40%	40	T1 40% 1	2,27	5,320	5,12		
		T1 40% 2	2,1	4,922		0,28174	16,835
T2 10%	10	T2 10% 1	2,67	6,258	5,79		
		T2 10% 2	2,27	5,320		0,66291	26,431
T2 20%	20	T2 20% 1	2,22	5,203	5,12		
		T2 20% 2	2,15	5,039		0,11601	28,620
T2 40%	40	T2 40% 1	2,09	4,898	4,97		
		T2 40% 2	2,15	5,039		0,09944	

28 giorni			Fm	Rf	media Rf	DEV.ST	%
			KN	MPa	MPa		
ref	0	ref 1	3,17	7,430	8,26		
		ref 2	3,88	9,094		1,17667	14,184
T1 10%	10	T1 10% 1	2,91	6,820	7,09		
		T1 10% 2	3,14	7,359		0,38117	13,475
T1 20%	20	T1 20% 1	2,94	6,891	7,15		
		T1 20% 2	3,16	7,406		0,3646	37,872
T1 40%	40	T1 40% 1	2,23	5,227	5,13		
		T1 40% 2	2,15	5,039		0,13258	8,794
T2 10%	10	T2 10% 1	3,25	7,617	7,54		
		T2 10% 2	3,18	7,453		0,11601	29,504
T2 20%	20	T2 20% 1	2,56	6,000	5,82		
		T2 20% 2	2,41	5,648		0,24859	30,638
T2 40%	40	T2 40% 1	2,5	5,859	5,73		
		T2 40% 2	2,39	5,602		0,1823	

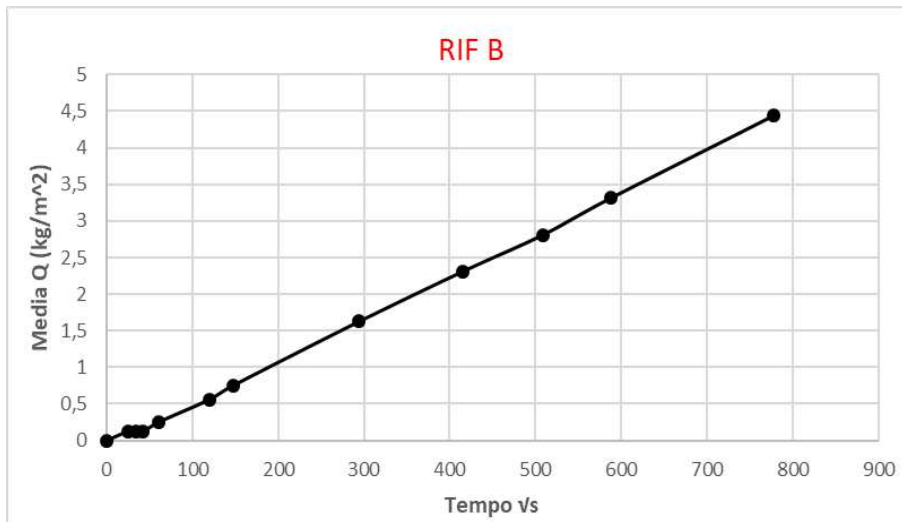
6.5. Resistenza a compressione

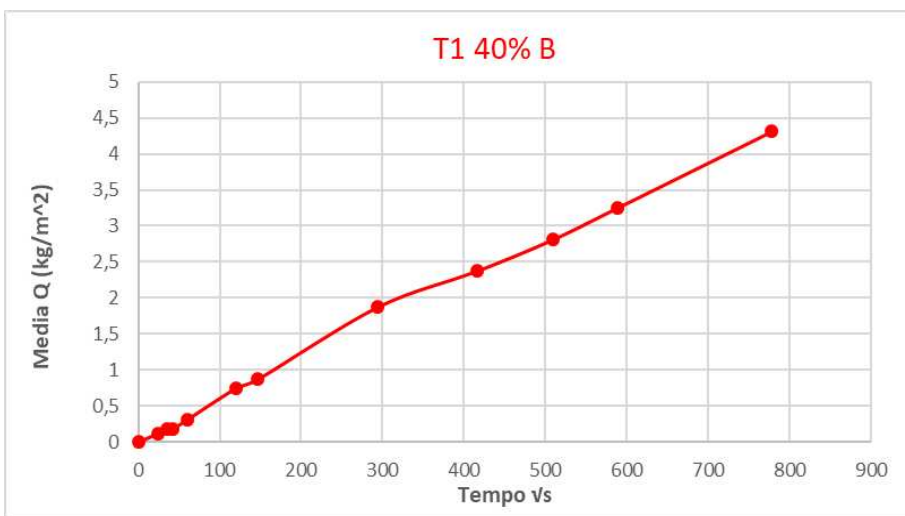
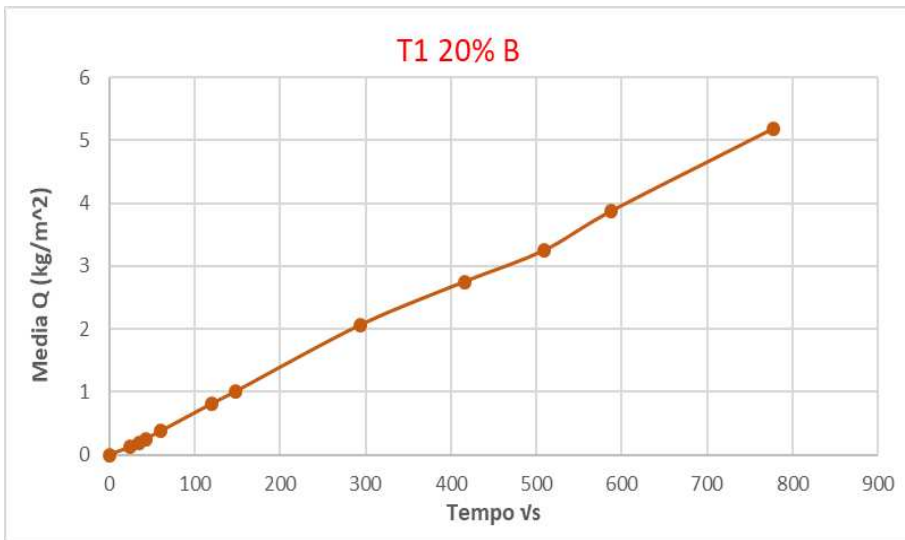
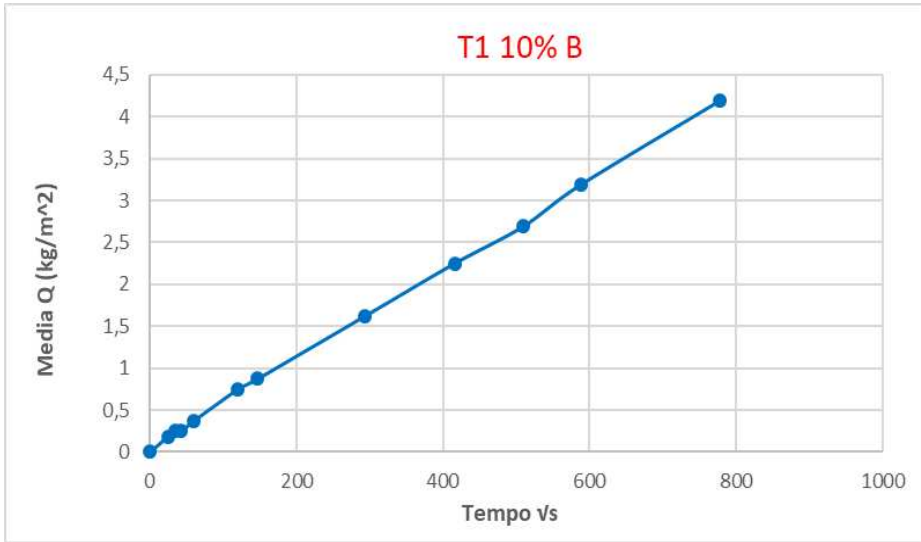
2 giorni			Fm	Rc	media Rc	area	dev.st	%
			KN	MPa	MPa	mm ²		
ref	0	ref 1	62,57	39,106	38,25	1600	1,211	
		ref 2	59,83	37,394				
T1 10%	10	T1 10% 1	56,67	35,419	35,30		0,172	7,721
		T1 10% 2	56,28	35,175				
T1 20%	20	T1 20% 1	49,57	30,981	30,70		0,402	19,747
		T1 20% 2	48,66	30,413				
T1 40%	40	T1 40% 1	37,4	23,375	21,43		2,758	43,987
		T1 40% 2	31,16	19,475				
T2 10%	10	T2 10% 1	46,39	28,994	30,25		1,781	20,907
		T2 10% 2	50,42	31,513				
T2 20%	20	T2 20% 1	39,04	24,400	23,49		1,282	38,578
		T2 20% 2	36,14	22,588				
T2 40%	40	T2 40% 1	28,6	17,875	18,54		0,937	51,536
		T2 40% 2	30,72	19,200				

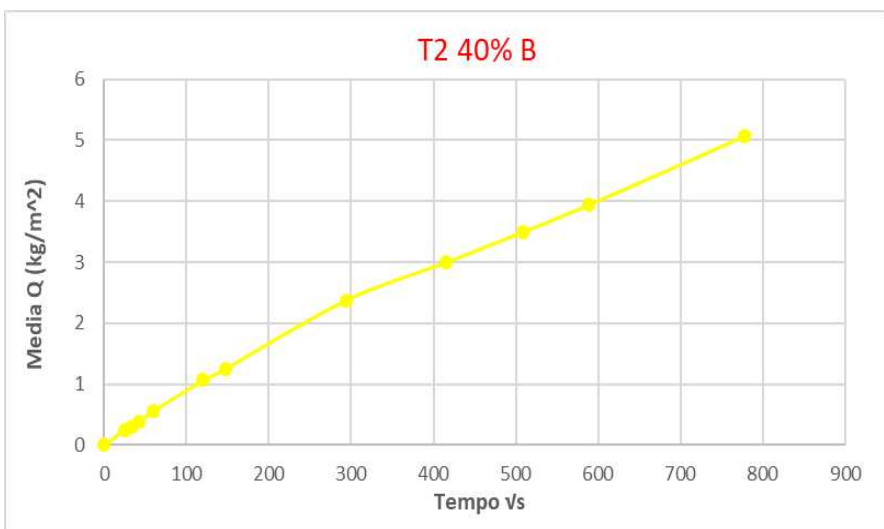
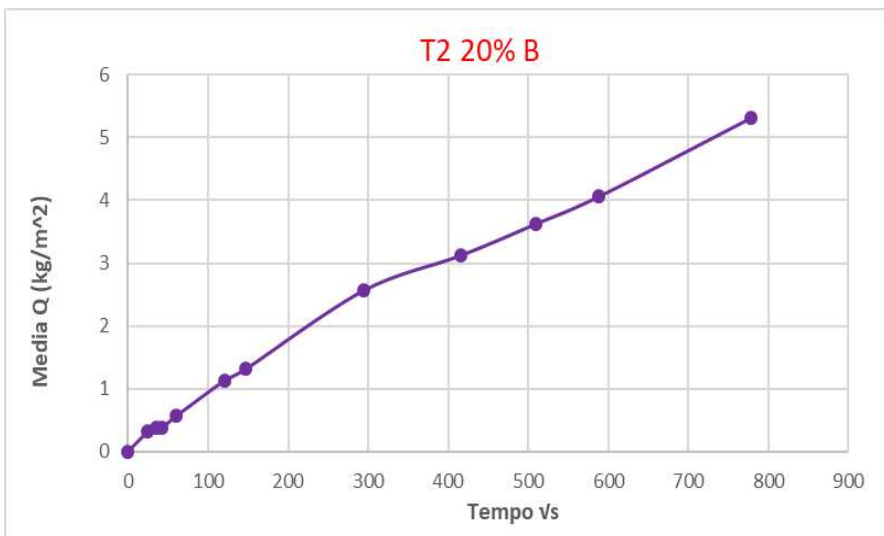
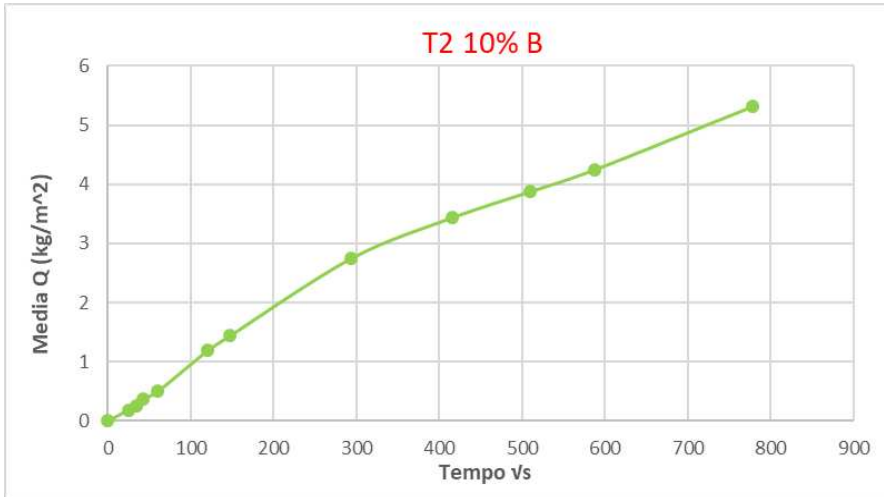
7 giorni			Fm	Rc	media Rc	area	dev.st	%
			KN	MPa	MPa	mm ²		
ref	0	ref 1	69,91	43,694	44,95	1600	1,777	
		ref 2	73,93	46,206				
T1 10%	10	T1 10% 1	68,15	42,594	41,76		1,180	7,098
		T1 10% 2	65,48	40,925				
T1 20%	20	T1 20% 1	53,88	33,675	36,42		3,880	18,979
		T1 20% 2	62,66	39,163				
T1 40%	40	T1 40% 1	37,37	23,356	24,85		2,112	44,716
		T1 40% 2	42,15	26,344				
T2 10%	10	T2 10% 1	62,8	39,250	40,09		1,184	10,818
		T2 10% 2	65,48	40,925				
T2 20%	20	T2 20% 1	48,74	30,463	29,30		1,644	34,816
		T2 20% 2	45,02	28,138				
T2 40%	40	T2 40% 1	35,56	22,225	21,68		0,773	51,773
		T2 40% 2	33,81	21,131				

28 giorni			Fm	Rc	media Rc	area	dev.st	dev.st	%
			KN	MPa	MPa	mm ²			
ref	0	ref 1	76,09	47,556	49,96	1600	2,432	3,438	
		ref 2	83,87	52,419					
		ref 3	79,86	49,913					
T1 10%	10	T1 10% 1	75,6	47,250	47,19		5,069	3,522	5,546
		T1 10% 2	83,57	52,231					
		T1 10% 3	67,35	42,094					
T1 20%	20	T1 20% 1	71,73	44,831	44,45		1,141	0,362	11,042
		T1 20% 2	72,55	45,344					
		T1 20% 3	69,06	43,163					
T1 40%	40	T1 40% 1	47,89	29,931	29,33		1,877	1,914	41,298
		T1 40% 2	43,56	27,225					
		T1 40% 3	49,33	30,831					
T2 10%	10	T2 10% 1	72,24	45,150	42,97		2,549	3,522	13,990
		T2 10% 2	64,27	40,169					
		T2 10% 3	69,76	43,600					
T2 20%	20	T2 20% 1	47,68	29,800	31,19		2,114	2,700	37,582
		T2 20% 2	53,79	33,619					
		T2 20% 3	48,22	30,138					
T2 40%	40	T2 40% 1	46,36	28,975	26,25		3,081	1,494	47,465
		T2 40% 2	42,98	26,863					
		T2 40% 3	36,65	22,906					

6.6. Assorbimento d'acqua per capillarità







BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

Lazzari R., *Lunga vita ai gusci dei molluschi: la composizione e i possibili utilizzi*, Maggioli Editore, 24 luglio 2017.

Progetto sea2land, SEA2LAND Produzione di fertilizzanti avanzati a base biologica dagli scarti della pesca (sea2landproject.eu)

Carbonaro C., Giordano R., Andreotti J., Faruku D., *Approccio circolare per l'innovazione tecnologica con scarti della filiera agroindustriale*, Techne; Vol. 22, (2021): 208-217.

Ricci M., *Il problema della sabbia: un'emergenza che l'edilizia deve riconoscere*, CaselInPaglia, 2022.

Parlamento Europeo, *Economia circolare: in che modo l'UE intende realizzarla entro il 2050?*, 10 ottobre 2022.

Romagno M., *Riciclo: dai gusci dei molluschi un aiuto all'agricoltura*, Smart Engineering, 06 luglio 2017.

Colleparidi M., Colleparidi S, Troli R., *Il nuovo calcestruzzo*, V Ed., Ed. Tintoretto, 1 gennaio 2009.

Corinaldesi V., *Aggregati da Riciclo: Possono sostituire gli inerti naturali per il confezionamento di calcestruzzi ordinari*, Ingenio, 24 marzo 2021.

Tittarelli F., *Scienza e tecnologia dei materiali*, 2020/2021.

Mengucci M., *Valorizzazione dei rifiuti RAEE in diverse catene di valore: effetto dell'impiego di frammenti LCD in materiali da costruzione*, Tesi Magistrale, 2018/2019.

Ferraro V., *Carbonato di calcio*, Icopres, 2017.

Sawakinome, <https://it.sawakinome.com/articles/chemistry-science-nature/difference-between-tap-water-and-distilled-water.html>.

Cristalli e minerali, <https://www.cristallieminerali.com/cristalli/aragonite/>.