

# **POLITECNICO DI TORINO**

**Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria dei Materiali**

Tesi di Laurea Magistrale

## **Materiali cementizi contenenti plastica di scarto**



**Relatori:**

Prof. Matteo Pavese

**Correlatori:**

Dr. Luca Lavagna;

Dr. Daniel Suarez-Riera

**Candidata**

Nicoletta Mangani

Anno Accademico 2021/2022

*A mamma, papà, Martina ed Eleonora*

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>Economia circolare: Recupero di materiali di scarto nel settore delle costruzioni</b>	<b>3</b>
2.1    ECONOMIA CIRCOLARE	3
2.2    LA SITUAZIONE ITALIANA DELLA FILIERA DELLE COSTRUZIONI	4
<b>RAEE: cosa sono e come possono essere riutilizzati</b>	<b>10</b>
3.1    RAEE: RIFIUTI DI APPARECCHIATURE ELETTRICHE O ELETTRONICHE	10
3.2    RICICLO DI RAEE	11
3.3    GESTIONE GLOBALE DEI RAEE	12
3.4    GESTIONE RAEE IN EUROPA	14
3.5    RICICLO DELLA PLASTICA CONTENUTA NEI RAEE	15
3.6    UTILIZZO DELLA PLASTICA PROVENIENTE DA RAEE NEL SETTORE EDILE	15
<b>Polimeri: proprietà e riciclo</b>	<b>17</b>
4.1    I POLIMERI	17
4.2    LA STRUTTURA	17
4.3    PROPRIETÀ MECCANICHE DEI POLIMERI	19
4.4    RICICLO POLIMERI	23
4.4.1    Il riciclo meccanico	23
4.4.2    Il riciclo chimico	25
4.4.3    Riciclo eterogeneo ed omogeneo	26
4.4.4    La termovalorizzazione	27
<b>Malta: ciclo produttivo e proprietà</b>	<b>28</b>
5.1    MALTA CEMENTIZIA	28
5.2    I LEGANTI	28
5.2.1    Il cemento Portland	29
5.2.2    Ciclo di produzione del cemento Portland	29
5.2.3    Struttura microscopica del cemento Portland	31
5.2.4    Presa e indurimento del cemento Portland	33
5.3    L'ACQUA	39
5.4    GLI INERTI	40
5.4.1    Distribuzione granulometrica degli inerti	41
5.5    GLI ADDITIVI	42
<b>Materiali e Metodi</b>	<b>44</b>
6.1    CEMENTO	45
6.2    ACQUA	45
6.3    INERTE: SABBIA	46
6.4    INERTE POLIMERICO	46
6.5    CONFEZIONAMENTO DEI PROVINI	49

6.5.1	<i>Provini di malta</i>	50
6.5.2	<i>Provini di malta con plastica</i>	51
6.5.3	<i>Provini di malta con plastica ed espandente</i>	55
6.5.4	<i>Provini di malta con plastica e fibre di polipropilene</i>	56
6.5.5	<i>Provini di malta con plastica e biochar</i>	58
6.5.6	<i>Provini di malta con plastica e biossido di silicio</i>	60
6.5.7	<i>Provini ricoperti di polvere di CaO, MgO, SiO<sub>2</sub></i>	63
6.5.8	<i>Provini ricoperti di polvere di ossido di calcio</i>	64
6.5.9	<i>Provini ricoperti di polvere di ossido di magnesio</i>	65
6.5.10	<i>Provini ricoperti di polvere di biossido di silicio</i>	65
6.5.11	<i>Provini con rapporto a/c 0,35</i>	66
6.6	PROVE MECCANICHE	67
6.6.1	<i>Calcolo dimensioni e densità provini</i>	68
6.6.2	<i>Prova a flessione a 3 punti</i>	71
6.6.3	<i>Prova a compressione</i>	73
6.6.4	<i>Caratterizzazione ottica</i>	75
	<b>Risultati</b>	<b>77</b>
7.1	ANALISI DEI RISULTATI	77
7.1.1	<i>Risultati prova a flessione</i>	77
7.1.2	<i>Risultati prova a compressione</i>	81
7.2	ANALISI DEI RISULTATI TRAMITE STEREOMICROSCOPIA	86
	<b>Conclusioni</b>	<b>94</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>97</b>

# Lista figure

<i>Figura 1. Principi di economia circolare applicati alla filiera delle costruzioni</i>	5
<i>Figura 2. Frazioni di materiale tipiche nei RAEE</i>	12
<i>Figura 3. Generazione di RAEE tra il 2019 e il 2030. Nota: i dati dal 2020 in poi sono proiezioni; l'unità di peso è in milioni di tonnellate</i>	13
<i>Figura 4. Struttura portante di un polimero.</i>	18
<i>Figura 5. Rappresentazione schematica della curva sforzo (Mpa)- deformazione (%) per materiali polimerici fragili o duttili e per un elastomero a temperatura ambiente.</i>	20
<i>Figura 6. Influenza della temperatura sull'andamento della curva sforzo (MPa)- deformazione (%) del polimetilmetacrilato.</i>	23
<i>Figura 7. Ciclo produttivo del cemento Portland</i>	30
<i>Figura 8. Schematizzazione della struttura del clinker di cemento portland, con cristalli di alite (scuri con contorni spigolosi), di belite (chiari e arrotondati) e della matrice che li lega, costituita da fase ferrica (parte chiara) e da celite (parte più scura).</i>	32
<i>Figura 9. Rappresentazione schematica della sequenza di cambiamenti microstrutturali durante l'idratazione del cemento portland</i>	35
<i>Figura 10. Andamento di permeabilità, porosità, resistenza meccanica in funzione del tempo di idratazione</i>	36
<i>Figura 11. Tipologie di pori</i>	37
<i>Figura 12. Influenza della porosità della pasta cementizia sulla resistenza a compressione e sulla permeabilità all'acqua: (a) effetto del rapporto tra solido e vuoti; (b) legame tra porosità, rapporto acqua/cemento e grado di idratazione</i>	39
<i>Figura 13. Percentuali dei polimeri contenuti all'interno dei RAEE</i>	48
<i>Figura 14. Cassero in acciaio</i>	49
<i>Figura 15. Posizionamento dei provini all'interno della vasca</i>	50
<i>Figura 16. Bilancia analitica</i>	51
<i>Figura 17. Setaccio con sabbia</i>	52
<i>Figura 18. Setaccio con plastica</i>	52
<i>Figura 19. Setacci impilati con al vertice il setaccio con dimensione della maglia maggiore</i>	53
<i>Figura 20. Giragiare</i>	55
<i>Figura 21. Fibre di polipropilene</i>	56
<i>Figura 22. Provino fibrorinforzato sottoposto a flessione</i>	57
<i>Figura 23. Becher contenente sabbia, plastica e biochar</i>	58
<i>Figura 24. Malta contenente biossido di silicio</i>	62

<i>Figura 25. Attrezzatura utilizzata per la realizzazione dei provini "impanati"</i>	63
<i>Figura 26. Colino contenente plastica bagnata, ricoperto con ossido</i>	64
<i>Figura 27. Lunghezza (a), larghezza (b) e altezza (h)</i>	68
<i>Figura 28. Prova a flessione a 3 punti</i>	72
<i>Figura 29. posizionamento del provino nella Zwick-Line Z050 per la prova a flessione</i>	73
<i>Figura 30. Forma a clessidra del provino dopo la prova a compressione e tensioni agenti</i>	74
<i>Figura 31. Posizionamento del provino nella Zwick-Line Z050 per prova a compressione</i>	75
<i>Figura 32. stereomicroscopio Leica EZ4 W</i>	76
<i>Figura 33. Macchina da taglio (BRILLANT 220)</i>	76
<i>Figura 34. Curva sforzo-deformazione per provini additivati con il 15% di plastica</i>	78
<i>Figura 35. Curva sforzo-deformazione per provini additivati con il 30% di plastica</i>	78
<i>Figura 36. Confronto dei valori di resistenza a flessione di provini additivati con il 15% in volume di plastica</i>	80
<i>Figura 37. Confronto dei valori di resistenza a flessione di provini additivati con il 30% in volume di plastica</i>	80
<i>Figura 38. Confronto dei valori di resistenza a compressione di provini additivati con il 15% in volume di plastica</i>	83
<i>Figura 39. Confronto dei valori di resistenza a compressione di provini additivati con il 30% in volume di plastica</i>	83
<i>Figura 40. Immagini ottenute con stereomicroscopio Leica EZ4 W di a) provino con il 15% in volume di plastica, fattore di scala 1 mm, b) provino con il 30% in volume di plastica, fattore di scala 0,5 mm</i>	86
<i>Figura 41. Immagini ottenute con stereomicroscopio Leica EZ4 W di a) provino con il 15% in volume di plastica additivato con MgO, fattore di scala 1 mm, b) provino con il 30% in volume di plastica additivato con MgO, fattore di scala 1 mm</i>	87
<i>Figura 42. Immagini ottenute con stereomicroscopio Leica EZ4 W di a) provino con il 15% in volume di plastica additivato con fibre di PP, fattore di scala 500 <math>\mu</math>m, b) provino con il 30% in volume di plastica additivato con fibre di PP, fattore di scala 0,5 mm e 2mm</i>	88
<i>Figura 43. Immagini ottenute con stereomicroscopio Leica EZ4 W di a) provino con il 15% in volume di plastica additivato con biochar, fattore di scala 1mm, b) provino con il 30% in volume di plastica additivato con biochar, fattore di scala 1mm</i>	89
<i>Figura 44. Immagini ottenute con stereomicroscopio Leica EZ4 W di a) provino con il 15% in volume di plastica additivato con SiO<sub>2</sub>, fattore di scala 1mm, b) provino con il 30% in volume di plastica additivato con SiO<sub>2</sub>, fattore di scala 1mm.</i>	90

- Figura 45. Immagini ottenute con stereomicroscopio Leica EZ4 W di a) provino con il 15% in volume di plastica additivato con CaO, fattore di scala 0,5 mm, b) provino con il 30% in volume di plastica additivato con CaO, fattore di scala 2mm. 90*
- Figura 46. Immagini ottenute con stereomicroscopio Leica EZ4 W di a) provino con il 15% in volume di plastica additivato con MgO, fattore di scala 500  $\mu$ m, b) provino con il 30% in volume di plastica additivato con MgO, fattore di scala 1mm. 91*
- Figura 47. Immagini ottenute con stereomicroscopio Leica EZ4 W di a) provino con il 15% in volume di plastica con a/c pari a 0,35, fattore di scala 1 mm e 2mm b) provino con il 30% in volume di plastica con a/c pari a 0,35, fattore di scala 1mm. 92*
- Figura 48. Immagini ottenute con stereomicroscopio Leica EZ4 W di a) provino con il 15% in volume di plastica additivato con SiO<sub>2</sub> e con a/c pari a 0,35, fattore di scala 0,5 mm b) provino con il 30% in volume di plastica additivato con SiO<sub>2</sub> e con a/c pari a 0,35, fattore di scala 1mm. 93*

# Lista tabelle

<i>Tabella 1. Materiale trattenuto nel setaccio in funzione della dimensione delle maglie del setaccio.</i>	46
<i>Tabella 2. Quantità del mix polimerico in percentuale</i>	48
<i>Tabella 3. Quantità di polimero e sabbia da inserire nell'impasto cementizio in funzione delle dimensioni.</i>	54
<i>Tabella 4. Quantità di polimero e sabbia da inserire nell'impasto cementizio in funzione delle dimensioni.</i>	54
<i>Tabella 5. Quantitativi in massa utilizzati per ogni singolo impasto</i>	66
<i>Tabella 6. Calcolo di volume, peso e densità media di ogni impasto cementizio</i>	68
<i>Tabella 7. Carico massimo (MPa) di provini contenenti il 15% in volume di plastica con differenti additivi</i>	79
<i>Tabella 8. Carico massimo (MPa) di provini contenenti il 30% in volume di plastica con differenti additivi</i>	79
<i>Tabella 9. Carico di rottura (MPa) di provini contenenti il 15% in volume di plastica con differenti additivi</i>	82
<i>Tabella 10. Carico di rottura (MPa) di provini contenenti il 30% in volume di plastica con differenti additivi</i>	82

# Abstract

La definizione più accreditata per indicare il concetto di sviluppo sostenibile - da anni, punto cardine delle nostre vite - potrebbe essere quello "*... che risponda alle necessità del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare le proprie esigenze...*"<sup>1</sup>.

Si è prestata particolare attenzione alla produzione di beni da strutturare, secondo un principio di risparmio energetico e di controllo della produzione di rifiuti, prevedendo il loro riutilizzo in altri settori.

È da questo obiettivo che parte il presente lavoro di tesi, volto ad analizzare, nelle costruzioni civili, l'utilizzo di materiali cementizi con aggiunta di additivi in plastica difficilmente riciclabili, per sopperire alla crescente domanda di materie prime non rinnovabili.

Al cemento è stato additivato del mix polimerico, in diverse percentuali in volume (15 -30%) in sostituzione alla sabbia, al fine di ottenere le medesime proprietà meccaniche di una malta base, e nel migliore dei casi, persino prestazioni superiori.

Sono state indagate le proprietà meccaniche di resistenza a compressione e resistenza a flessione sui provini realizzati in laboratorio.

È stato riscontrato in un primo momento un peggioramento delle proprietà meccaniche della malta contenente rifiuti plastici (15-30%) rispetto a una malta *standard*. La spiegazione di questo fenomeno è riconducibile sia alle scarse proprietà meccaniche della plastica impiegata sia alla scarsa adesione tra matrice e plastica, che ha determinato la formazione di porosità.

Tuttavia, riducendo il rapporto acqua/cemento, sono stati raggiunti promettenti risultati. Difatti, ponendo a confronto la malta con medesima composizione (15% in volume di plastica), ma con differente rapporto a/c (da 0,5 a 0,35), si è riscontrato un aumento della resistenza a flessione del 32% e a compressione del 50%. Con una sostituzione volumetrica del 30%, sono stati riscontrati aumenti ancora più marcati.

---

<sup>1</sup> World Commission on Environment and Development-1987.

Lo scopo è stato di individuare nuove modalità di impiego della malta, congiuntamente a fonti provenienti da rifiuti, per migliorarne le proprietà meccaniche e sensibilizzare il settore dell'edilizia all'utilizzo di fonti provenienti da rifiuti plastici difficilmente smaltibili, anche per contrastarne l'esponenziale aumento.

## Capitolo 1

# Introduzione

Il giorno che segna l'esaurimento delle risorse naturali che la terra è in grado di rigenerare in un anno è identificato come *Overshoot day*. Il giorno in cui inizieremo a sfruttare le risorse rinnovabili del 2023, sarà il 28 luglio prossimo e risulta anticipato di un giorno rispetto al 2022.

La data, che muta di anno in anno, viene calcolata da Gfn<sup>2</sup>, a seconda della rapidità con cui le risorse vengono sfruttate. Secondo le stime di Gfn, l'umanità sfrutta le risorse come se avesse a disposizione 1,75 Terre. [1]

Sarebbe auspicabile ed anche vantaggioso, smettere di appropriarsi indebitamente delle ricchezze appartenenti alle future generazioni, secondo Mathis Wackernagel, *"...questo obiettivo è attuabile con le tecnologie disponibili ed è economicamente vantaggioso dato che i benefici complessivi sono superiori a costi. Si possono stimolare settori emergenti come le energie rinnovabili..."*. [2]

Prefissato questo obiettivo, è necessario muoversi in un'ottica di economia circolare, trasformando gli scarti in materie prime. È da qui che parte la ricerca svolta, cercando una soluzione valida per dare una seconda vita ai rifiuti plastici.

I dati sulla plastica sono preoccupanti, l'uomo ha prodotto 8,3 miliardi di tonnellate di plastica fino ad adesso, di cui 6,3 sono spazzatura. Anche il calcestruzzo, che, dopo l'acqua, risulta essere il materiale più utilizzato al mondo, rappresenta, nella sua fase di produzione, quasi il 5% di emissioni di anidride carbonica globali. [3]

La necessità di trovare un utilizzo alternativo della plastica e di ridurre l'impatto ambientale provocato dalla produzione del calcestruzzo è il fulcro del seguente lavoro.

---

<sup>2</sup> Global footprint network è un'organizzazione internazionale che si occupa di contabilità ambientale calcolando l'impronta ecologica

In questo lavoro, infatti, viene ipotizzato un modo per immobilizzare i rifiuti plastici ed evitare il loro conferimento in discarica, utilizzandoli nel settore edile. Tali rifiuti, provenienti da apparecchiature elettriche ed elettroniche, vengono sostituiti in volume all'aggregato fine nella malta. Vengono indagate le proprietà meccaniche del nuovo impasto cementizio, influenzate principalmente dalla compatibilità chimica tra plastica e matrice, fornendo così solide basi su cui gli studi futuri potrebbero concentrarsi per migliorare le stesse.

## Capitolo 2

# Economia circolare: Recupero di materiali di scarto nel settore delle costruzioni

Il presente capitolo introduce il concetto di economia circolare, che si fonda sul principio delle 3 R: *Ridurre, Riutilizzare e Riciclare*. La Commissione Europea, nel report dell'anno 2015 ha evidenziato i benefici economici scaturenti da un modello circolare, a cui si sono ispirate le attività. Difatti, le stesse hanno generato dal 2016 un valore aggiunto superiore ai 147 miliardi di Euro, a fronte di investimenti iniziali di 17,5 miliardi di Euro. La strategia lineare *take-make-dispose*, basata sull'accessibilità a grandi quantità di risorse naturali ed energia, è stata soppiantata da un modello circolare, che permette di ottenere vantaggi dal punto di vista economico, sociale ed ambientale. Il concetto di economia circolare viene poi applicato nello specifico al settore delle costruzioni, menzionando a titolo esplicativo le possibili soluzioni. [4]

### 2.1 Economia Circolare

Con il termine economia circolare, secondo la definizione fornita dalla Ellen MacArthur Foundation, si intende *"... 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 senza entrare nella biosfera..."*.

L'economia circolare, quindi, è un modello di produzione e consumo che implica il riciclo dei materiali il più a lungo possibile, contribuendo a minimizzare la produzione di rifiuti.

Difatti, una volta che l'oggetto diventa rifiuto, laddove possibile, viene immesso nuovamente nel ciclo economico, utilizzando i materiali che lo compongono per altri scopi. Il concetto di

economia lineare<sup>3</sup> viene, dunque, superato dal concetto di economia circolare. Questo passaggio risulta però estremamente complicato, soprattutto nel settore delle costruzioni.

## **2.2 La situazione italiana della filiera delle costruzioni**

A seguito della crisi dello scorso decennio, il settore italiano delle costruzioni ha beneficiato di una rapida risalita, che ha portato ad un guadagno di 400 miliardi di Euro l'anno, generando in tal modo lavoro per quasi il 12% dell'occupazione nazionale. Inoltre, circa il 96% degli acquisti effettuati dalle imprese di costruzione è fornito dal sistema produttivo nazionale: la restante parte invece è costituita da prodotti di importazione, favorendo, dunque, la produzione interna al mercato italiano.

Inoltre, superata la crisi, la filiera delle costruzioni si è mossa verso un progetto di riqualificazione urbana e edilizia. Vengono citati, a titolo di esempio, programmi come "*Green Deal Energy Saving for home or business*", attuato nel Regno Unito, con lo scopo di una riqualificazione energetica degli edifici, o programmi come la legge Grenelle n. 2009-967 del 3 agosto 2009, in Francia, con investimenti su edifici privati al fine di renderli sostenibili.

Per quanto concerne il settore delle costruzioni, un quadro generale relativo ai principi dell'economia circolare è rappresentato nella figura 1.

---

<sup>3</sup> che comprende fattori produttivi (capitale, lavoro, terra, materie prime e fonti di energia) e flussi in uscita (prodotti e servizi offerti sul mercato).

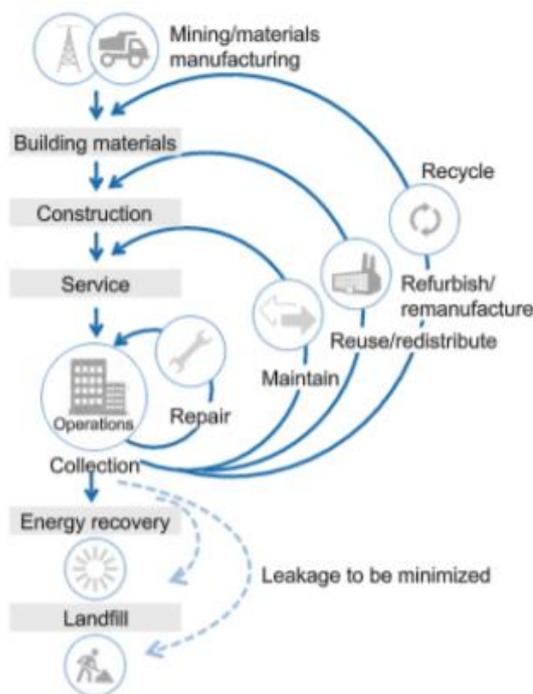


Figura 1. Principi di economia circolare applicati alla filiera delle costruzioni

Applicare il principio di economia circolare al mercato italiano consiste, dunque, nell'intervenire su aree che possono essere oggetto di politiche innovative di sviluppo, quali: rifiuti da costruzioni, materiali e sistemi edilizi ed infine progettazione integrata.

- **Rifiuti da costruzione**

Con il termine rifiuti da costruzione si identificano i materiali di scarto provenienti da attività, come dice la parola stessa, di costruzione. Bisogna considerare anche i rifiuti da costruzione intesi come consumi energetici, consumi di risorse ed emissioni inquinanti. Nello specifico, il settore delle costruzioni è responsabile del 39% delle emissioni totali di CO<sub>2</sub> e del 36% del consumo finale di energia a livello mondiale. Una percentuale così elevata fa ipotizzare in futuro ad una crescita della domanda di energia; si stima un aumento del 50% entro il 2060 (Global Abc, 2019). Inoltre, il settore edilizio porta ad un considerevole utilizzo di materie

prime (quasi il 45-50% del totale delle materie prime estratte) ed a un notevole consumo del suolo (Legambiente, 2017).

Il settore delle costruzioni produce circa il 40% del totale dei rifiuti. Un numero così elevato mostra come persista un modello di economia lineare, che spreca materie prime e produce rifiuti non recuperabili. I rifiuti a cui si fa riferimento provengono dalle demolizioni per interventi di riqualificazione, ristrutturazione o messa a norma degli edifici. In Italia si stimano 56,1 milioni di tonnellate di rifiuti da costruzione e demolizione (C&D). Dunque, un modello di edilizia circolare mira alla durabilità e al mantenimento delle prestazioni nel tempo dei prodotti di costruzione. Risulta, quindi, necessario un passaggio da modello lineare a modello circolare che limiti l'utilizzo di materie prime e di energia in ingresso, riducendo al minimo gli scarti.

- ***Materiali e componenti edilizi***

Partendo dal concetto per cui un edificio non è eterno, è necessario muoversi verso una strategia che promuova il riutilizzo di quest'ultimo tramite un disassemblaggio dei suoi componenti, una volta terminata la sua vita utile. Sono state, dunque, promosse diverse iniziative che mirano ad una transizione da modello lineare a modello circolare.

Un esempio significativo trattato in un report dell'European Climate Foundation<sup>4</sup> è quello del settore dei materiali cementizi, i quali risultano essere responsabili del 7% delle emissioni globali di biossido di carbonio. Per ovviare a tale problema è stato proposto il riutilizzo di sottoprodotti industriali per la produzione di malte e calcestruzzi. Questa soluzione porterebbe a notevoli miglioramenti, quali la riduzione del volume di materiale smaltito in discarica, la riduzione del consumo di risorse naturali e di energia e di conseguenza le relative emissioni di gas serra derivanti dalla produzione dei materiali da costruzione.

I cementi solfo alluminosi, ad esempio, rappresentano un'alternativa *environmental friendly* al cemento Portland, per via delle basse temperature di cottura (circa 200°C al di sotto di quelle

---

<sup>4</sup> è un'iniziativa filantropica indipendente che si impegna a rispondere alla crisi climatica globale, favorendo lo sviluppo di una società a emissioni nette pari a zero.

del clinker di cemento Portland) e alle ridotte emissioni di CO<sub>2</sub>. Inoltre, questo tipo di cementi è caratterizzato da una rapida presa e da elevate prestazioni elasto-meccaniche e basso ritiro. Altri materiali che hanno destato interesse della comunità scientifica sono i materiali alcali-attivati (AAM – AlkaliActivated Materials), caratterizzati da composti inorganici ottenuti dalla reazione di polveri di natura allumino-silicatica con una soluzione alcalina in condizioni di temperatura prossime a quella ambiente. Rispetto al cemento Portland, in questo caso non è necessario l'utilizzo di forni ad alta temperatura che consumano elevate quantità di combustibile; ed inoltre le emissioni di CO<sub>2</sub> vengono ridotte significativamente, senza richiedere grandi investimenti economici per impianti e attrezzature.

Un'altra interessante scoperta è quella dell'utilizzo della loppa granulata d'altoforno o scoria d'altoforno come additivo nelle malte, ossia un sottoprodotto del processo di produzione della ghisa, durante il quale si formano grandi quantità di scoria di composizione simili a quella del cemento Portland.

Altro esempio sono le ceneri volanti, ottenute come sottoprodotto della combustione di carbone polverizzato nelle centrali termoelettriche, quest'ultime mostrano delle ottime proprietà leganti se mescolate in modo opportuno con soluzioni basiche e dunque possono essere utilizzate per produrre malte e calcestruzzi ad elevata resistenza agli attacchi chimici e alle alte temperature. Dunque, non solo i materiali di scarto provenienti dal settore delle demolizioni di edifici preesistenti possono essere riutilizzati, ma anche materiali come il vetro macinato, le scorie del settore siderurgico e i filler provenienti dalla lavorazione delle pietre naturali; in particolare si utilizzano i materiali appena citati in sostituzione all'aggregato naturale, che costituisce circa il 70% in peso nelle malte e calcestruzzi. Questo comporta una notevole riduzione del consumo di risorse naturali a favore del riciclo dei residui di altri processi.

Un'altra idea proposta è quella di riutilizzare le acque provenienti dal lavaggio delle autobetoniere e degli impianti di betonaggio per la produzione di calcestruzzi

preconfezionati, in modo da ridurre il consumo di acqua potabile e di sabbia fine che rimane in sospensione nelle acque di lavaggio.

Un'ulteriore ricerca è stata fatta in merito all'utilizzo di fibre naturali in prodotti cementizi, in particolare, queste vengono utilizzate come rinforzo della matrice cementizia. L'unione di fibre naturali e matrice cementizia porta ad avere buone proprietà meccaniche, termiche ed acustiche.

L'idea più recente è quella di utilizzare scarti di materie plastiche nel settore edilizio. La produzione annua di materie plastiche in Europa è di circa 60 milioni di tonnellate, che porta ad una produzione di circa 27 milioni di tonnellate di rifiuti plastici, di cui solo il 31 % è avviato al riciclo, mentre il 42 % è destinato ad incenerimento e il 27 % alla discarica. La direttiva UE 2018/852 pone come obiettivo riciclare il 50 % in peso della plastica entro il 2025 ed il 55 % entro il 2030. L'idea di riutilizzare gli scarti plastici all'interno del settore delle costruzioni porta due notevoli vantaggi: in primo luogo si riduce l'impatto ambientale dovuto alle materie plastiche; in secondo luogo, si prospetta lo sviluppo di un settore dell'edilizia sempre più sostenibile. Sostituire l'aggregato naturale con quello plastico, porta il materiale cementizio ad avere un miglioramento relativo ad alcune proprietà come l'isolamento termico e ad un peggioramento delle proprietà meccaniche.

Tuttavia, nonostante il riciclo di questi materiali mostri una tendenza in continua crescita, il mercato dei materiali riciclati copre solamente il 12% della domanda dei materiali dell'UE.

- ***Criteria di progettazione e gestione delle costruzioni***

In Italia, il boom delle costruzioni è avvenuto negli anni 60, dunque gli edifici ancora oggi esistenti sono caratterizzati da elevati consumi energetici, da fenomeni di degrado, da criticità in termini di benessere termo-igrometrico e visivo ed in termini d'inquinamento ed emissioni di CO<sub>2</sub> ed inoltre molto spesso non riescono a soddisfare gli *standard* di sicurezza sismica. I problemi appena citati rendono necessario un intervento di totale riqualificazione, che talvolta per via di fattibilità tecnica ed economica, risulta essere non attuabile e dunque

piuttosto che intervenire su un edificio preesistente si preferisce demolire e ricostruire. Con il termine progettazione integrata si intende una progettazione basata su un processo decisionale costituito da scelte ponderate che partono dagli obiettivi di progetto e dalla valutazione sistematica delle varie proposte progettuali. [5]

Il Processo di progettazione consiste nel creare un edificio nell'ottica dell'economia circolare e dunque utilizzare materiali di scarto, evitando l'utilizzo di materiali vergini. La progettazione deve indirizzarsi verso nuove sensibilità collettive in relazione all'emergenza ambientale. [4]

## Capitolo 3

# RAEE: cosa sono e come possono essere riutilizzati

Le apparecchiature elettroniche ed elettriche (AEE) ormai fanno parte integrante della nostra vita, al pari di tutti i beni primari. Infatti, sarebbe impensabile al giorno d'oggi una vita priva di tali apparecchiature. Le applicazioni sono svariate, vanno sia dall'uso domestico (domotica, elettrodomestici, televisore, stereo, computer) all'uso industriale (catene di montaggio, mezzi di trasporto); non vi è bene che non sia riconducibile all'uso dell'elettricità e dell'elettronica.

Il rovescio della medaglia nell'uso degli AEE è che gli stessi hanno una durata limitata nel tempo, vuoi per l'usura, vuoi per l'obsolescenza tecnologica che impone la sostituzione e l'aggiornamento costante delle apparecchiature. Da ciò scaturisce un accumulo non indifferente di rifiuti, ed infatti a livello mondiale i volumi di RAEE (rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche) sono passati da 41,8 Mt nel 2014 a 53,6 Mt nel 2019 e, si prevede che i volumi potrebbero raggiungere 74,7 Mt nel 2030. [6]

### 3.1 RAEE: rifiuti di apparecchiature elettriche o elettroniche

La definizione tecnica di RAEE è proposta all'art. 4 lettera e del D.Lgs. 49/2014: *“Le apparecchiature elettriche o elettroniche che sono rifiuti ai sensi dell'articolo 183, comma 1, lettera a) del D. Lgs. 3 aprile 2006, n. 152, inclusi tutti i componenti, sottoinsiemi e materiali di consumo che sono parte integrante del prodotto al momento in cui il detentore si disfi, abbia l'intenzione o l'obbligo di disfarsene”*. [7]

I RAEE sono costituiti da una complessa miscela di componenti, spesso contenenti centinaia di sostanze diverse, molte delle quali sono potenzialmente tossiche. La composizione dei RAEE varia notevolmente a seconda del dispositivo da cui provengono. In linea generale, i materiali presenti nei RAEE possono essere raggruppati in cinque categorie:

- materiali ferrosi
- materiali non ferrosi
- vetro
- plastica
- altri materiali

In termini di dimensioni e peso, i materiali ferrosi costituiscono la porzione maggioritaria di un tipico RAEE. [8]

### **3.2 Riciclo di RAEE**

Negli ultimi decenni, la produzione mondiale di RAEE (rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche) è aumentata esponenzialmente. Di conseguenza, il riciclo di questi ultimi è diventata la soluzione da adottare per sopperire il crescente consumo di apparecchiature elettriche ed elettroniche. Il riciclaggio dei RAEE è incentrato principalmente sul recupero delle frazioni metalliche; mentre le frazioni non metalliche, che assorbono gran parte dei rifiuti elettronici, trovano più difficoltà nell'essere riutilizzate. Le frazioni non metalliche dei RAEE contengono metalli pesanti, ritardanti di fiamma bromurati e sostanze tossiche. Motivo per cui, la continua ricerca sul riutilizzo delle risorse e sullo smaltimento sicuro delle frazioni non metalliche dei RAEE ha assunto un ruolo principale dal punto di vista della protezione ambientale. Alcuni di essi sono abbastanza facili da riciclare mentre altri sono difficili, come plastica, vetro e frazioni non metalliche.

Se trattati nel modo corretto, è possibile recuperare dai RAEE risorse preziose come metalli, vetro, plastica e altri materiali mostrati in figura 2 ( Widmer et al., 2005 ).

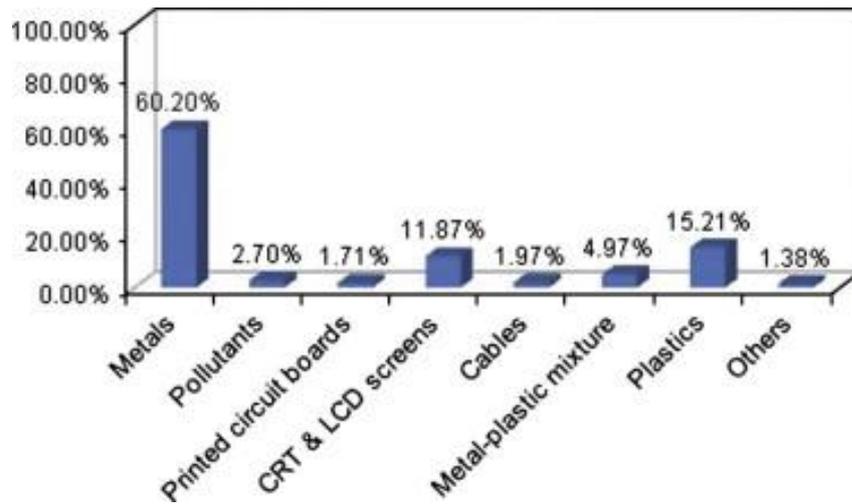


Figura 2. Frazioni di materiale tipiche nei RAEE

I rifiuti elettronici contengono circa il 10-30% in peso di plastica (Taurino et al., 2010). Quest'ultima spesso contiene ritardanti di fiamma bromurati (BFR). Inoltre, la componente plastica può includere più di 15 polimeri differenti che rendono difficile il processo di riciclaggio. [9]

### 3.3 Gestione globale dei RAEE

Ogni anno si assiste ad un incremento esponenziale di rifiuti provenienti da apparecchiature elettroniche ed elettriche. La produzione globale di RAEE, riferita ai dati relativi al 2019, è stata di circa 54 milioni di tonnellate in aumento rispetto alle 45 tonnellate del 2016, con una media di 7,3 kg/persona/anno. Come evidenziato dalla figura 3, entro il 2030 è previsto un aumento pari a 75 milioni di tonnellate.

### 3 - RAEE: cosa sono e come possono essere riutilizzati

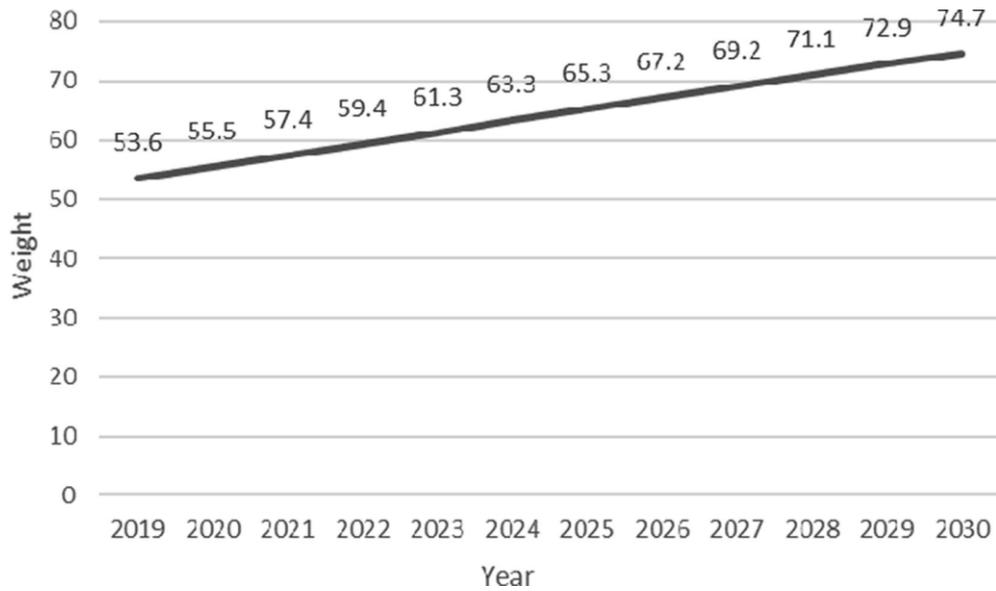


Figura 3. Generazione di RAEE tra il 2019 e il 2030. Nota: i dati dal 2020 in poi sono proiezioni; l'unità di peso è in milioni di tonnellate

Viste le previsioni future, la società odierna è costretta ad applicare delle strategie sostenibili al fine di gestire in modo efficace su scala globale la produzione di RAEE. Vengono, dunque, riportati quattro scenari di gestione tipici:

- Scenario 1: fa riferimento ai RAEE documentati e raccolti formalmente, in conformità con i requisiti di legge previsti dalla legislazione esistente. La raccolta dei RAEE viene effettuata attraverso punti di raccolta comunali, produttori e rivenditori di AEE (apparecchiature elettriche ed elettroniche) o attraverso accordi di ritiro. Una volta raccolti, i RAEE vengono trasportati in appositi impianti di trattamento, dove vengono trattati tramite processi, quali smontaggio manuale, triturazione e riciclo dei materiali, in condizioni controllate senza recare alcun danno all'ambiente.
- Scenario 2: fa riferimento allo smaltimento diretto dei RAEE insieme ai rifiuti domestici misti. I consumatori smaltiscono i RAEE insieme ai rifiuti domestici non differenziati. I rifiuti misti possono poi essere destinati alla discarica o all'incenerimento.
- Scenario 3: fa riferimento alla raccolta non ufficiale di RAEE. In questo scenario possono essere coinvolti intermediari o rivenditori di rifiuti. I RAEE vengono dunque

raccolti presso strutture specializzate o esportati in paesi in via di sviluppo. A differenza del primo scenario, questi rifiuti non sono ufficialmente documentati, questo rende il controllo e il tracciamento molto difficile, ciò solitamente è dovuto all'assenza di requisiti legali per la gestione dei RAEE. Ne consegue un trattamento che potrebbe non essere rispettoso dell'ambiente o i RAEE potrebbero essere destinati all'esportazione illegale.

- Scenario 4: fa riferimento alla raccolta informale di RAEE da parte di intermediari e demolitori di rifiuti. I metodi di trattamento sono spesso basilari e rudimentali; in genere, si ricercano costituenti metallici all'interno dei RAEE e si ricorre alla combustione aperta e alla lisciviazione acida per l'estrazione del metallo.

### **3.4 Gestione RAEE in Europa**

Per quanto concerne la gestione dei rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche in Europa, i dati relativi al 2019 sulla produzione di RAEE, indicano una produzione di 12 milioni di tonnellate (Forti et al., 2020).

Al fine di consentire una gestione ecologicamente corretta dei RAEE, l'Unione Europea ha definito la direttiva sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche, identificata come Direttiva RAEE. Tale direttiva (Direttiva 2002/96/CE), entrata in vigore nel 2003, fissa degli obiettivi in merito alla raccolta e al riciclaggio dei RAEE per tutti gli stati membri dell'Unione Europea (Eurostat, 2017).

L'obiettivo ultimo della seguente direttiva è quello di ridurre al minimo la produzione di rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche, promuovendo il riciclaggio ed il recupero dei materiali a fine vita, migliorando in tal senso le prestazioni ambientali. Essendo una direttiva dell'Unione Europea, ogni stato facente parte, per gli accordi sottoscritti, è tenuto ad elaborare varie strategie per raggiungere gli obiettivi prima citati. In particolare, la Direttiva accolla la responsabilità sia al produttore che all'importatore di apparecchiature elettroniche ed elettriche (AEE) di ritirare tutti i materiali elettrici ed elettronici a fine vita, smaltendoli in

modo ecologico. Poiché l'entrata in vigore della Direttiva, che fissava un minimo di 4 kg di raccolta di RAEE per persona all'anno, ha portato dei problemi tecnico giuridici negli Stati membri, la stessa è stata aggiornata nel 2012 (Direttiva 2012/19/UE) con la rideterminazione di nuovi parametri basati sulla generazione di almeno il 45 % del peso medio di AEE immessi sul mercato nei tre anni precedenti; del 65 % dal 2019 in poi. [8]

### **3.5 Riciclo della plastica contenuta nei RAEE**

In letteratura vi sono diversi studi effettuati sulla presenza dei costituenti plastici dei RAEE. Da questi studi si evince che i polimeri dominanti dei RAEE sono polistirene (PS), acrilonitrile-butadiene-stirene (ABS), miscele di policarbonato (PC/ABS), polivinilcloruro (PVC), polistirene ad alto impatto (HIPS), polipropilene (PP).

In passato, i rifiuti plastici venivano trattati mediante processi di incenerimento o deposizione in discarica, provocando considerevoli danni a livello ambientale. Nonostante con l'incenerimento sia possibile ottenere molta energia e il conseguente utilizzo per la generazione di elettricità (Astrup et al., 2009), questo può provocare l'emissione di componenti tossici, quali idrocarburi policiclici aromatici (IPA), policlorobifenili (PCB) e policlorodiossine (PCD), costituendo un pericolo per l'ambiente. [9]

### **3.6 Utilizzo della plastica proveniente da RAEE nel settore edile**

L'uso della plastica è dunque in costante crescita. Dati risalenti al 2013, affermano che la plastica è il materiale più diffuso del XXI secolo, tale primato è attribuibile alle innumerevoli proprietà che la plastica presenta, quali leggerezza, durata, basso costo e facilità di lavorazione. Lo svantaggio principale risiede nel fatto che viene prodotta più plastica di quanta ne venga riciclata.

In Europa, solo il 69% di plastica viene recuperato, mentre la restante parte finisce in discarica. Bisogna dunque spingere verso il riuso dei rifiuti plastici, spesso però la presenza di diversi tipi di plastica, che non sono facilmente separabili, porta alla realizzazione di materiali

con proprietà scadenti. Tenendo conto di questo aspetto l'Europa si è mossa verso l'utilizzo di materiali plastici di scarto nel settore edile, in particolare utilizzando questi ultimi come sostituti degli aggregati in malta o calcestruzzo. La percentuale di aggregati all'interno della malta è di circa il 70%, motivo per cui sostituendo quest'ultima con materiale plastico si ha chiaramente una grande influenza sulle proprietà dei compositi. I vantaggi che ne conseguono sono molteplici: calcestruzzi più leggeri e sostenibili, proprietà elevate in termini di conducibilità termica, aumento di tenacità ecc. Di contro, le proprietà meccaniche risentono negativamente della presenza della plastica. [10]

## Capitolo 4

# Polimeri: proprietà e riciclo

La sperimentazione del presente elaborato di tesi pone come obiettivo primario l'inserimento di inerte polimerico non riciclabile all'interno della pasta cementizia. Dunque, per comprendere a fondo i risultati ottenuti, è necessario conoscere il comportamento meccanico dei polimeri e capire da dove provengono i rifiuti plastici che vengono utilizzati per la campagna sperimentale.

### 4.1 I polimeri

Il termine polimero deriva dal greco (*polys* «molto» e *mèros* «parte») e fu utilizzato per la prima volta dal chimico svedese Jöns Jacob Berzelius. Si tratta di una macromolecola, costituita da una sequenza di uno o più tipi di atomi, chiamati “monomeri” legati fra loro per formare lunghe catene. I polimeri sono sostanze ad altissimo peso molecolare, vengono prodotte per sintesi, ma esistono anche polimeri naturali, quali cellulosa e proteine. I polimeri presentano caratteristiche macroscopiche e proprietà diverse dai monomeri di partenza da cui derivano. Le macromolecole possono essere catene lineari dove le macromolecole si sviluppano in una direzione preferenziale; ramificate dove le macromolecole si sviluppano in più direzioni; a legami incrociati o tridimensionali di monomeri dove le macromolecole sono legate fra loro con legami trasversali intermolecolari, formando un reticolo tridimensionale.

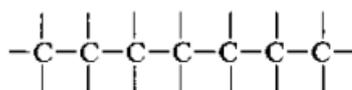
Quando un polimero è ottenuto da un solo monomero viene chiamato omopolimero, mentre quando sono coinvolti più monomeri si parla di copolimero.

### 4.2 La struttura

La struttura del polimero è determinata dal modo in cui i monomeri si legano fra loro e determina le proprietà del polimero. I legami presenti all'interno della struttura polimerica

sono di due tipi: legami forti, covalenti, identificati per la prima volta dal tedesco Hermann Staudinger, premio Nobel per la Chimica nel 1953, che sono i legami che si trovano all'interno della catena polimerica; e i legami secondari fra le catene (Van der Waals o legame a idrogeno).

Una rappresentazione semplificativa della struttura di un polimero è rappresentata secondo lo schema bidimensionale in figura 4. Le molecole si presentano come lunghe e flessibili catene, in cui la struttura portante è una fila di atomi di carbonio, legati fra loro con un legame singolo.



*Figura 4. Struttura portante di un polimero.*

In base alla struttura, è possibile suddividere i polimeri in amorfi, cristallini e semicristallini.

I polimeri amorfi sono costituiti da catene polimeriche che si dispongono casualmente formando una struttura chiamata "gomitolo statistico", non riuscendo ad assumere una struttura cristallina, un esempio di polimero amorfo è il policarbonato.

I polimeri cristallini presentano delle parti cristallizzate con un ordine ben preciso, in cui si formano dei cristalli lamellari di 10-20 nm di spessore fra i legami chimici, un esempio di polimero cristallino è il polietilene.

I polimeri semicristallini sono costituiti da zone amorphe con all'interno strutture cristalline lamellari, dette cristalliti.

I polimeri vengono inoltre suddivisi in: termoplastici, termoindurenti ed elastomeri.

Un polimero viene definito termoplastico se quando viene riscaldato rammollisce e può assumere la forma desiderata. Quando si trova allo stato liquido la catena polimerica si ripiega in modo randomico, ed è possibile cambiare forma molto facilmente. Portare un polimero allo stato liquido è estremamente semplice poiché i polimeri sono caratterizzati da basse temperature di fusione, motivo per cui sono facili da lavorare, ma instabili se esposti al calore. Allo stato solido, invece, possono essere in forma amorfa o semicristallina (semi

perché l'ordine degli atomi non è mai perfetto). I termoplastici sono costituiti da macromolecole di dimensioni ridotte che possono essere lineari o ramificate, con legami secondari tra le catene.

I polimeri termoindurenti presentano una struttura reticolata, che, a temperature elevate, impedisce alle catene polimeriche di staccarsi le une dalle altre. Infatti, se riscaldati anziché fondere, bruciano. Aumentando la temperatura i polimeri termoindurenti subiranno un ulteriore indurimento e non potranno più essere modellati. I polimeri termoindurenti hanno resistenza meccanica superiore rispetto ai termoplastici, per via dei legami covalenti fra le catene che rendono la struttura più rigida, e mostrano grande fluidità in fase di lavorazione. È necessario, però, che lo stampaggio del polimero avvenga prima della reticolazione, poiché a reticolazione avvenuta si forma un reticolo tridimensionale infusibile ed insolubile. Tra i polimeri termoindurenti vi sono le resine epossidiche e il fenolo-formaldeide.

Gli elastomeri sono delle sostanze naturali o sintetiche che presentano le proprietà chimico-fisiche tipiche della gomma naturale, difatti riescono a subire grandi deformazioni elastiche senza entrare nel campo plastico. Le catene polimeriche di un elastomero possono essere immaginate come "fili" intrecciati in punti chiamati cross-link. Quando subiscono una deformazione, le catene polimeriche passano da una matassa aggrovigliata a un'orientazione ordinata a seconda la direzione di stiro. Gli elastomeri vengono modellati nelle forme desiderate tramite estrusione o stampaggio a caldo.

### 4.3 Proprietà meccaniche dei polimeri

Una delle più semplici prove meccaniche che viene fatta per caratterizzare un materiale è la prova a trazione. Applicando una forza sulla superficie si genera un campo di sforzi (*stress*) che portano ad una deformazione (*strain*) del materiale. Lo *stress* ( $\sigma$ ) è definito dal rapporto:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4.1)$$

In cui  $F$  è la forza applicata,  $A$  è la superficie su cui agisce. Lo *stress* si misura in ( $\text{Nm}^{-2}$  o Pa)

La deformazione *strain* ( $\epsilon$ ) è definita come:

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l} = \frac{\Delta l}{l} \quad (4.2)$$

In cui  $l_0$  è la lunghezza originale,  $l$  è la lunghezza dopo la trazione.

La curva sforzo-deformazione di un materiale polimerico è molto importante per la valutazione fenomenologica delle proprietà meccaniche del materiale. Da essa, infatti, si possono trarre informazioni sul modulo di Young, sulla sollecitazione di snervamento,  $\sigma_s$ , alla quale iniziano le grandi deformazioni, su quella di rottura,  $\sigma_R$ , e sulle relative deformazioni  $\varepsilon_S$  ed  $\varepsilon_R$ .

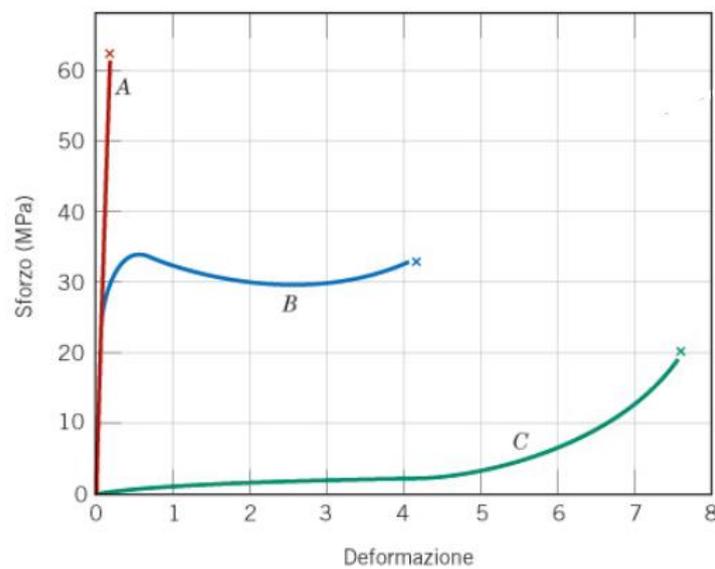


Figura 5. Rappresentazione schematica della curva sforzo (Mpa)- deformazione (%) per materiali polimerici fragili o duttili e per un elastomero a temperatura ambiente.

A seconda che si tratti di polimero fragile (A), polimero plastico (B) o polimero elastico (C), il comportamento meccanico cambia. In particolare, come è possibile osservare nel grafico sforzo-deformazione mostrato in figura 5, il comportamento può essere: di tipo A, ovvero il polimero, ancora in campo elastico arriva a rottura; di tipo B dove inizialmente il polimero è soggetto a deformazione elastica, raggiunto il carico di snervamento assume un comportamento plastico; ed infine di tipo C, la deformazione è completamente elastica (elastomeri). In generale il comportamento fragile (A) è caratterizzato da elevata resistenza, bassa duttilità e bassa tenacità. Il comportamento plastico (B) è caratterizzato da elevata

resistenza, elevata duttilità ed elevata tenacità ed infine il comportamento elastomerico (C) è caratterizzato da bassa resistenza, elevata duttilità e bassa tenacità.

Il limite di snervamento per i polimeri plastici rappresenta il valore massimo della curva sforzo-deformazione, subito dopo il tratto elastico ed il valore corrispondente della sollecitazione è identificato come carico di snervamento  $\sigma_s$ .

Il fenomeno di snervamento avviene a temperature ambiente sia nel caso di diversi polimeri amorfi che in quello di diversi polimeri semi-cristallini. A temperatura ambiente, questi polimeri sono caratterizzati da una sufficiente mobilità di rotazione di sequenze di unità monomeriche presenti nelle zone amorfe. Superato  $\sigma_s$ , si ottiene l'orientamento sotto stiro delle catene.

Nei polimeri completamente amorfi tale processo trasforma i gomiti statistici in catene prevalentemente orientate nella direzione di stiro. Nei polimeri semi-cristallini a struttura sferulitica<sup>5</sup>, le zone amorfe mobili si trovano sia nell'interno degli sferuliti che tra uno sferulita e l'altro. Il fenomeno di strizione è quindi più complesso.

Il carico di rottura ( $\sigma_R$ ), invece, corrisponde alla sollecitazione a cui avviene la rottura.

Il modulo elastico dei materiali polimerici può essere valutato attraverso la curva di trazione, come tangente all'origine della curva  $\sigma$ - $\epsilon$ . Il valore del modulo elastico dipende dalla velocità con cui viene effettuata la prova.

Il modulo elastico dei polimeri assume valori che vanno da 7 MPa per polimeri altamente elastici, a valori prossimi ai 4 GPa per polimeri rigidi. I carichi massimi per i polimeri sono dell'ordine di 100 MPa, mentre l'allungamento può essere anche superiore al 1000% per polimeri altamente elastici. [11]

I valori di modulo elastico, carico di rottura e carico di snervamento spesso vengono influenzati da temperatura, velocità di deformazione e dalla natura chimica dell'ambiente vicino.

---

<sup>5</sup> La sferulite è una regione semicristallina all'interno di un polimero lineare non ramificato, di forma sferoidale con diametro molto variabile (da pochi micron a qualche centimetro).

In genere, il modulo di Young e le sollecitazioni  $\sigma$  diminuiscono al crescere della temperatura ed aumentano al crescere della velocità di deformazione. La diminuzione del tempo di prova provoca il cambiamento del comportamento del materiale da elastomerico (curva C) a elastoplastico (curva B) a elastico fragile (curva A).

A basse temperature il carico cresce in modo approssimativo lineare con un aumento dell'allungamento fino alla rottura, con frattura fragile del polimero. A più alte temperature si osserva un fenomeno di snervamento e il carico diminuisce prima della rottura: frattura duttile ma ancora con un moderato allungamento a rottura (20%). A temperature ancora più elevate si osserva un fenomeno di *strain hardening*<sup>6</sup>. Si ha un allungamento importante, anche del 100%. Alla fine, a temperature ancora più elevate, si osserva una deformazione omogenea con un'elevatissima deformazione a rottura. In un polimero amorfo questo comportamento elastomerico si verifica al di sopra della temperatura di transizione vetrosa<sup>7</sup>, per cui il livello di sforzo applicato è molto basso. Il fenomeno inverso si osserva all'aumentare della velocità di deformazione. [12]

In figura 6 è mostrato un esempio dell'effetto della temperatura sulla curva di trazione.

---

<sup>6</sup> Noto come incrudimento, è un processo che rende il metallo più duro e più forte grazie alla deformazione plastica.

<sup>7</sup> rappresenta il valore di temperatura al di sotto della quale un materiale amorfo si comporta da solido vetroso.

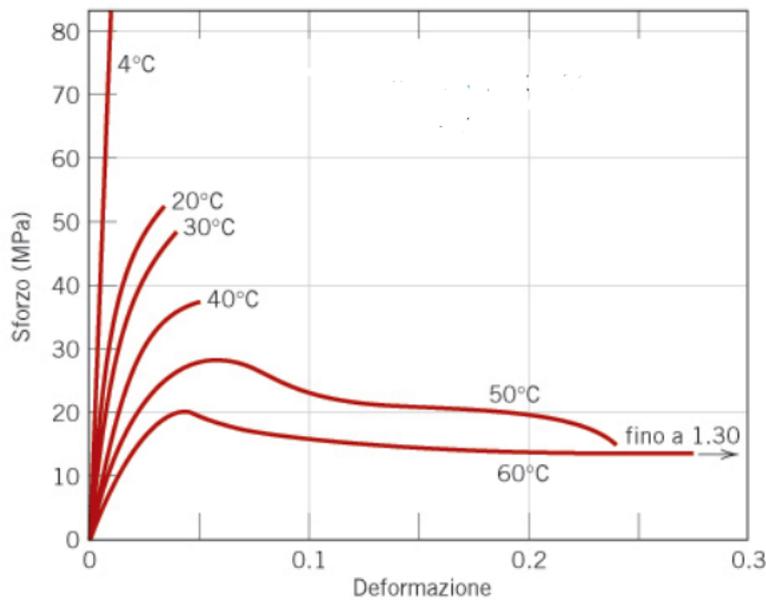


Figura 6. Influenza della temperatura sull'andamento della curva sforzo (MPa)-deformazione (%) del polimetilmetacrilato.

## 4.4 Riciclo polimeri

I rifiuti polimerici, se trattati nel modo opportuno rappresentano una importante fonte per il recupero sia di materiale da riutilizzare che di energia. Di contro, a causa degli elevati quantitativi da smaltire e della differente natura chimica dei polimeri, vi sono notevoli difficoltà nel permettere uno smaltimento che non provochi danni a livello ambientale e che sia sostenibile.

I rifiuti plastici possono essere trasformati in nuove materie prime, tramite il processo di riciclaggio, che può essere di tipo meccanico o chimico.

### 4.4.1 Il riciclo meccanico

Il riciclo meccanico consiste nella lavorazione meccanica di rifiuti plastici, che a seguito del processo diventano la materia prima per la produzione di nuovi oggetti. Questi ultimi avranno proprietà strettamente dipendenti dalla qualità del prodotto di riciclo. Il processo di

riciclo meccanico consta di diverse fasi: raccolta, selezione, triturazione, lavaggio e macinazione.

1. La prima fase del riciclo meccanico è quella di raccolta, che può essere o differenziata per tipologia di prodotto, o multimateriale per due o più tipologie di prodotto. Le materie plastiche vengono raccolte in appositi centri dove i rottami polimerici vengono imballati e successivamente trasportati negli impianti di trasformazione.

2. Segue poi la fase di selezione, che consiste nell'eliminare eventuali componenti esterni come carta, vetro e alluminio dagli imballaggi in plastica. Essa in passato veniva effettuata manualmente, facendo scorrere il rifiuto plastico sopra appositi nastri trasportatori, l'operatore selezionava visivamente il rifiuto da recuperare e quello da scartare. Oggi la selezione è di tipo meccanico, in questo caso il materiale viene suddiviso in funzione della dimensione tramite appositi macchinari. Una volta eliminati i contaminanti, la plastica viene suddivisa in base alla tipologia di polimero.

3. La terza fase è quella della triturazione, che consiste nel triturare i rifiuti plastici producendo un materiale con dimensioni di pezzatura omogenea, anche se con forme irregolari. È fondamentale che la pezzatura del prodotto ottenuto sia omogenea, per garantire una buona processabilità del materiale trattato. Per effettuare tale operazione vengono utilizzati dei mulini che permettono di macinare svariati tipi di prodotti, dal film, alle bottiglie, a pezzi stampati di grosse dimensioni. La riduzione del volume risulta essere considerevole, a seguito della frantumazione, in quanto si tratta solitamente di oggetti cavi (es. bottiglie), che a seguito della triturazione perdono la loro forma iniziale e di conseguenza non occupano più il volume iniziale.

4. Segue una fase di lavaggio, dove vengono separate le parti che potrebbero essere dannose per la fase di trasformazione. Il lavaggio può avvenire in diversi modi, in base al tipo di polimero riciclato. Il sistema più utilizzato per i polimeri che possiedono densità inferiore a 1g/cc è quello in cui il materiale appena triturato è immesso in una vasca nella quale viene mantenuta una corrente d'acqua, in questo modo la corrente d'acqua trascina il materiale

secondo una precisa direzione, lasciando nel fondo della vasca di lavaggio i materiali che presentano densità maggiore rispetto all'acqua, come ad esempio parti metalliche, terra, o altri polimeri. Per polimeri con densità superiore a 1g/cc il lavaggio avviene ponendo il materiale sopra ad un nastro trasportatore, sul quale viene spruzzata dell'acqua. Spesso per rendere questo processo il più efficace possibile viene utilizzata una seconda vasca di lavaggio dove viene ripetuta la medesima operazione.

5. Il prodotto lavato viene poi convogliato all'interno di un mulino macinatore. Questa operazione viene effettuata solo nel caso di oggetti rigidi; nel caso di oggetti morbidi (es. film) viene effettuata dopo un'operazione di essiccamento. La macinazione ha il compito di ridurre ulteriormente le dimensioni del materiale. Dopo la macinazione, il granulato viene sottoposto nuovamente ad un eventuale lavaggio, seguito da pressatura tramite un sistema di presse a vite, centrifugazione ed essiccamento. Per essiccare il prodotto è necessario investire il materiale con una corrente d'aria calda o con gas combustibili, per mezzo di essiccatori verticali a zig-zag o centrifughi per ottenere un residuo d'acqua del 2-3%. Il materiale essiccato, per omogeneizzare meglio il prodotto, viene spedito ai silos di stoccaggio. Può seguire una fase di estrusione, in cui il materiale preso dai silos viene inserito all'interno di un estrusore con piastra forata con diametro dei fori di 2-4 mm. Dall'estrusore fuoriesce il polimero sottoforma di fili estrusi, che una volta raffreddati, possono essere tagliati tramite taglierina trasversale.

#### **4.4.2 Il riciclo chimico**

Il riciclo chimico, a differenza di quello meccanico, consiste in una serie di processi che decompongono il polimero nei monomeri d'origine. Questo tipo di processi, in particolare quelli termo-chimici, puntano ad ottenere combustibili alternativi rispetto a quelli di origine fossile. I vantaggi che se ne traggono sono innumerevoli, come ad esempio la riduzione delle emissioni di anidride carbonica nell'atmosfera, il non utilizzo di fonti non rinnovabili, una riduzione di rifiuti in discarica. I polimeri che vengono trattati con processi di tipo chimico

sono ad esempio polietilentereftalato, le poliammidi e poliuretani, che per loro natura chimica, sono più facilmente depolimerizzabili. Tra i processi utilizzati per il riciclo chimico vi sono: pirolisi, idrogenazione, gassificazione, chemiolisi, glicolisi, metanolisi e ammonolisi.

La pirolisi è il processo più utilizzato che può avvenire sia a temperature elevate (650-850°C), che a basse temperature (450-550°C), provocando la scissione delle molecole mediante riscaldamento sottovuoto. Il prodotto che si ottiene è una miscela di idrocarburi liquidi e gassosi. Sono notevoli i vantaggi che è possibile ottenere con questo processo. In primo luogo, si ottiene una riduzione di gas del 5-10% rispetto al processo di incenerimento. In secondo luogo, i contaminanti non fuoriuscirebbero poiché l'intero sistema di pirolisi è sigillato (Scheirs, 1998).

L'idrogenazione è un processo di degradazione a base di idrogeno e calore, dove i polimeri vengono trasformati in idrocarburi liquidi.

La gassificazione è un processo che avviene ad alte temperature (800-1600°C), dove in assenza d'aria, si produce una miscela di ossido di carbonio e idrogeno che può essere utilizzata come combustibile o per sintesi di prodotti chimici.

Chemiolisi, Glicolisi, Metanolisi, Ammonolisi: processi di depolimerizzazione, in cui il polimero viene trasformato nei monomeri di partenza tramite l'aiuto di reagenti chimici.

### ***4.4.3 Riciclo eterogeneo ed omogeneo***

Il riciclo, poi, si suddivide in eterogeneo ed omogeneo. Nel riciclo eterogeneo viene lavorato un materiale che presenta un mix di polimeri differenti fra loro, ad esempio, film in PE alta e bassa densità, barattoli, taniche, film in PP ecc. In questo mix polimerico è possibile trovare anche materiali non plastici come metalli, motivo per cui è necessario effettuare una prima separazione di tipo dimensionale e morfologica, seguita da una magnetica per eliminare materiali estranei al processo di lavorazione. Seguono poi le fasi di triturazione del materiale, densificazione ed estrusione. La maggiore problematica che si riscontra in questo tipo di riciclo è legata alla temperatura di lavorazione che differisce in base al tipo di polimero.

Trattandosi di un mix di polimeri, il prodotto che si ottiene non avrà le stesse caratteristiche, che invece è possibile ottenere con un riciclo omogeneo. In questo caso colui che ricicla dovrà fare un'ispezione del polimero da trattare, assicurandosi l'assenza di contaminanti, come altri polimeri, inerti o additivi. Per effettuare questo tipo di separazione possono essere utilizzati numerosi sistemi, ad esempio: separazione magnetica, separazione per flottazione, separazione per densità, galleggiamento, separazione elettrostatica. Seguono poi le medesime fasi del riciclo eterogeneo.

### **4.4.4 La termovalorizzazione**

Una valida alternativa al riciclo è l'impiego di termovalorizzatori per la produzione di energia, l'utilizzo nei forni dei cementifici o la produzione di energia termoelettrica.

La termovalorizzazione consente di recuperare energia dai rifiuti plastici. Le plastiche, infatti, rappresentano un buon combustibile, e possono essere bruciate se mescolate insieme ai rifiuti solidi urbani. Ogni impianto di combustione dei rifiuti segue cinque step: preparazione del rifiuto; combustione del rifiuto; recupero del calore; controllo di emissioni gassose in atmosfera; stabilizzazione delle ceneri e dei residui solidi provenienti dalla combustione.

Per la combustione dei rifiuti solidi vengono utilizzati i cosiddetti forni a griglia che si dividono in griglia fissa e griglia mobile. La differenza sostanziale fra i due tipi di forni risiede nel quantitativo di tonnellate che riescono a lavorare, la griglia fissa ha una potenzialità di qualche tonnellata al giorno, al contrario della mobile che può bruciare da 4 a 30 t/h di rifiuti e produrre per ciascuna tonnellata di rifiuti 450 kWh di energia elettrica.

I fumi prodotti dalla combustione vengono fatti passare attraverso la camera di post-combustione, dove cedono il proprio calore trasformando l'acqua in vapore. L'energia contenuta nel vapore può essere utilizzata come energia termica.

È possibile effettuare una stima del quantitativo di residui prodotti dagli impianti di termovalorizzazione, quali scorie pari al 10 - 12% del volume dei rifiuti bruciati e pari al 15 - 20% in peso; ed il 5% in peso di ceneri. [13]

## Capitolo 5

# Malta: ciclo produttivo e proprietà

### 5.1 Malta cementizia

Con il termine malta viene indicata una miscela caratterizzata da legante (cemento), acqua e inerte (sabbia), che allo stato fresco ha una consistenza plastica. Essa differisce dal calcestruzzo, in quanto quest'ultimo viene ottenuto tramite miscelazione di cemento, acqua, sabbia e ghiaia. L'impasto prodotto è in grado di indurire nel tempo, a seguito di presa e indurimento.

### 5.2 I leganti

I leganti sono prodotti inorganici che si presentano sotto forma di polveri finissime che, miscelati con acqua, formano una massa plastica e lavorabile in grado di perdere progressivamente, per mezzo di reazioni chimiche irreversibili, la propria plasticità e trasformarsi in una sostanza rigida e dura. Vengono definiti leganti tutti quei prodotti che servono nelle opere murarie per collegare gli altri materiali. Le polveri sono ottenute da processi di cottura e macinazione di rocce e terre naturali, come le pozzolane o il calcare, oppure da sottoprodotti derivanti da processi industriali, che possono presentarsi o in polveri (ceneri volanti, nanosilice) o in granuli (loppe granulate d'alto forno) che necessitano quindi di macinazione.

Distinguiamo:

- leganti di uso generale, che a loro volta vengono divisi in base alle condizioni in cui avviene l'indurimento in: leganti aerei, ovvero possono indurire solo in presenza di aria (calci aeree) e leganti idraulici possono indurire sia a contatto con l'aria che con l'acqua (calci idrauliche, cementi propriamente detti e agglomeranti cementizi),
- leganti di uso speciale (gesso, cemento romano, cemento Sorel)

Ai fini del presente elaborato di tesi, viene fatto riferimento unicamente ai leganti idraulici, in particolare al cemento Portland.

### **5.2.1 Il cemento Portland**

La norma Europea ENV 197 definisce cemento: *“un materiale inorganico finemente macinato che, mescolato con acqua, forma una pasta che rapprende e indurisce a seguito di reazioni e processi di idratazione e che una volta indurita mantiene la sua resistenza e stabilità anche sott’acqua”*.

Il cemento Portland è il tipo di cemento più importante. Si ottiene per macinazione del prodotto di cottura di una miscela di argilla e calcare (clinker) con piccole aggiunte di gesso e, eventualmente, di altri materiali. Il cemento Portland può essere mescolato con pozzolana oppure con loppa d’alto forno per ottenere rispettivamente il cemento pozzolanico e quello d’alto forno.

Il clinker è una miscela di:

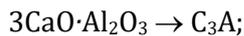
-silicato tricalcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ),

- $\beta$ -silicato bicalcico ( $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ),

-alluminato tricalcico ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ )

-frazione solida ternaria indicata come  $4\cdot\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ . (ferrite)

Per semplificazione si utilizza C al posto di CaO, A al posto di  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , F al posto di  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , S al posto di  $\text{SiO}_2$ . In questo modo avremo che:



La composizione media del cemento Portland, fatta astrazione da piccole aggiunte di gesso, oscilla per lo più fra i seguenti valori:  $\text{SiO}_2$  20 ÷ 24%,  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  7 ÷ 11%, CaO 63 ÷ 67%

### **5.2.2 Ciclo di produzione del cemento Portland**

Il ciclo di produzione di un cemento Portland può essere schematicamente suddiviso in cinque fasi. La prima fase prevede un'azione di miscelazione e macinazione delle materie prime, segue poi la cottura fino a circa 1450°C in modo da ottenere una fusione parziale e un 20-25% di fase liquida. Successivamente il prodotto ottenuto dalla cottura, definito clinker, viene raffreddato velocemente (si fa una tempra); viene poi aggiunta una piccola quantità di gesso ( $\text{CaSO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) al clinker e infine avviene la macinazione.

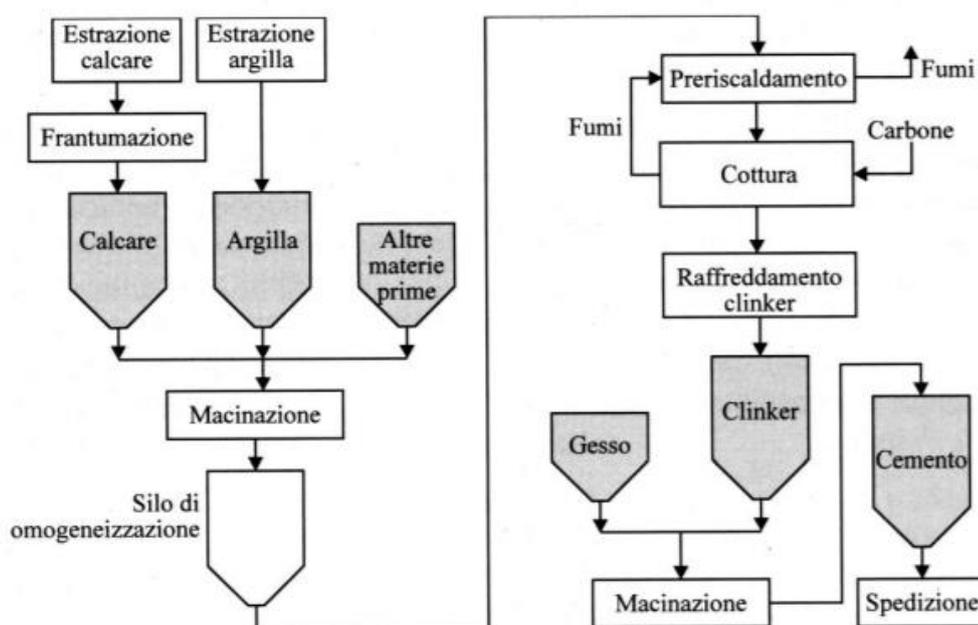
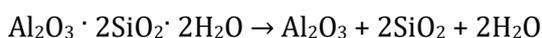


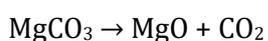
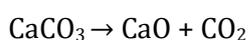
Figura 7. Ciclo produttivo del cemento Portland

La cottura prevede varie reazioni a diverse temperature:

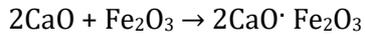
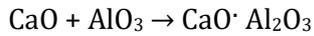
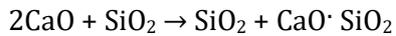
Alla temperatura di 100°C non avverrà alcuna reazione, ma si avrà la perdita di acqua non legata. Successivamente a temperature di circa 500°C, si avrà la decomposizione dell'argilla e la perdita dell'acqua legata nelle argille a seguito della reazione:



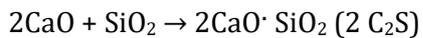
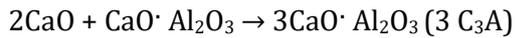
Da questa temperatura fino ai 950°C si realizza la decarbonatazione del calcare, secondo la seguente reazione:



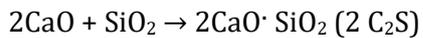
Alla stessa temperatura si verifica anche la reazione tra prodotti di decomposizione del carbonato di calcio e dell'argilla:



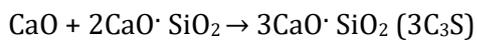
Tra i 1000°C e i 1200°C si formano il silicato bicalcico C<sub>2</sub>S e l'alluminato tricalcico C<sub>3</sub>A:



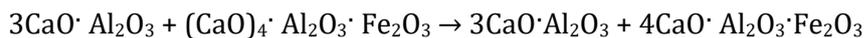
Nel range di temperatura tra 1200°C e 1250°C continua la formazione di C<sub>2</sub>S, la cui concentrazione raggiunge il massimo:



A seguire, tra i 1250°C e i 1450°C, inizia la formazione di fase liquida (costituita dalla fusione dei componenti C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF) e la formazione di silicato tricalcico C<sub>3</sub>S:



Il processo termina con la fase di raffreddamento, in cui la fase liquida si trasforma in C<sub>3</sub>A e in C<sub>4</sub>AF:



### **5.2.3 Struttura microscopica del cemento Portland**

Le principali fasi del clinker sono alite, belite, celite e ferrite.

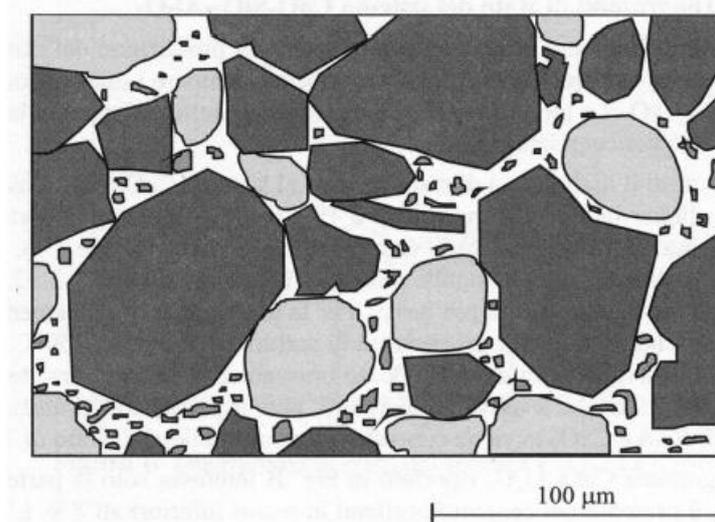


Figura 8. Schematizzazione della struttura del clinker di cemento portland, con cristalli di alite (scuri con contorni spigolosi), di belite (chiari e arrotondati) e della matrice che li lega, costituita da fase ferrica (parte chiara) e da celite (parte più scura).

**ALITE (C<sub>3</sub>S):** rappresenta il principale componente del clinker di cemento Portland, in quanto è presente in percentuali che variano dal 50 al 70%. Si tratta della fase presente nel clinker che presenta delle sostituzioni ioniche, che possono raggiungere valori pari al 3-4% e sono: Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> al posto di Ca<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup>, P<sup>5+</sup>, S<sup>6+</sup> al posto di Si<sup>4+</sup>. L'alite permette un rapido indurimento: in un mese dalla realizzazione dell'impasto la maggior parte della resistenza meccanica a cui dà luogo si è già sviluppata.

**BELITE (C<sub>2</sub>S):** è il secondo maggior costituente del clinker di cemento Portland, essendo presente in percentuali che variano tra il 10-30%. Così come per l'alite, nella belite sono presenti numerose sostituzioni ioniche. La belite dà luogo ad un indurimento lento. Affinché la resistenza meccanica si sviluppi occorre una stagionatura dell'impasto di parecchi mesi.

**CELITE (C<sub>3</sub>A):** è presente nel clinker in proporzioni tra 5 e 12%. Il C<sub>3</sub>A dà luogo ad un indurimento rapidissimo ma può generare una presa precoce che non permette una corretta idratazione, con limitata resistenza finale. Il problema viene risolto aggiungendo solfati di calcio al clinker che hanno effetto ritardante.

**FERRITE (C<sub>4</sub>AF):** è presente nel clinker in piccole proporzioni. Tipicamente Mg<sup>2+</sup>, Si<sup>4+</sup>, Ti<sup>4+</sup> e Mn<sup>3+</sup> sostituiscono Fe<sup>3+</sup> e il clinker deve il suo colore scuro alla presenza proprio della ferrite.

Il contributo allo sviluppo di resistenza meccanica è limitato ai brevi tempi di idratazione (ma comunque non molto significativo). Le sue proprietà idrauliche sono dunque secondarie [14].

#### **5.2.4 Presa e indurimento del cemento Portland**

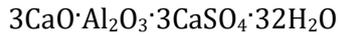
La pasta cementizia subisce nel tempo processi di idratazione dei vari costituenti presenti nel cemento, con formazione di prodotti con solubilità molto bassa. Al procedere dell'idratazione, l'acqua libera si riduce, l'impasto perde la sua plasticità e diventa sempre meno lavorabile (inizio presa), finché solidifica completamente (termine della presa). Il processo di idratazione continua, per un periodo (detto di indurimento), con velocità via via decrescente, che può durare mesi o anni. In questo periodo si sviluppa e poi si consolida la resistenza meccanica della pasta cementizia. Con il termine maturazione (o stagionatura) viene indicato l'insieme delle procedure di controllo, principalmente controllo di umidità e temperatura, con lo scopo di promuovere l'idratazione del cemento e quindi lo sviluppo delle caratteristiche meccaniche. [15]

- **Idratazione degli alluminati**

Il cemento è costituito principalmente da silicati e da alluminati. Gli alluminati si idratano molto più velocemente dei silicati, ma a differenza di questi ultimi, non portano un contributo sensibile alla resistenza meccanica. La reazione del  $C_3A$  con  $H_2O$  è immediata, produce idrati cristallini ed è fortemente esotermica.

Anche l'idratazione dei ferroalluminati ( $C_4AF$ ) produce gli stessi idrati cristallini, i prodotti di idratazione dei due costituenti sono intimamente mescolati.

L'idratazione del  $C_3A$  è velocissima e dunque è necessario rallentarla. Se così non fosse, l'impasto perderebbe la plasticità nel giro di pochi minuti, cioè in un tempo insufficiente perché possa essere messo in opera e costipato. Il gesso viene aggiunto per rallentare il processo. A contatto con l'acqua il gesso libera in soluzione ioni solfati ( $SO_4^{2-}$ ) e calcio ( $Ca^{2+}$ ) che reagiscono con gli ioni alluminio presenti ( $[AlO_2]^-$ ) per formare un trisolfato, chiamato ettringite:

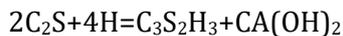


che successivamente tende a trasformarsi in monosolfato:



L'ettringite ricopre rapidamente i grani di cemento che stanno reagendo e quindi ne rallenta la velocità di idratazione. D'altra parte, gli ioni solfato determinano anche un'accelerazione della velocità di idratazione dei silicati. La quantità di gesso che si deve aggiungere per ottimizzare la presa non dipende solo dalla quantità di alluminati disponibile a reagire con l'acqua, ma anche da parametri connessi con l'idratazione dei silicati.

- **Idratazione dei silicati**



L'idratazione del  $\text{C}_3\text{S}$  e quella del  $\text{C}_2\text{S}$  danno approssimativamente gli stessi prodotti ma le proporzioni sono diverse. Le reazioni di idratazione sono diverse anche per quanto riguarda la velocità con cui avvengono, essendo l'idratazione del primo molto più veloce di quella del secondo. Durante l'idratazione del silicato tricalcico viene prodotta una maggiore percentuale dell'ordine del 30-40% di portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) rispetto a quella prodotta durante l'idratazione del silicato bicalcico (10-15%); questo implica che da quest'ultimo si ottiene un maggiore tenore di silicati di calcio idrati (85-90%) rispetto a quello ottenuto dall'idratazione dell'alite (60-70%). Il C-S-H, che costituisce circa l'80% del volume e il 50% della massa indurita, è responsabile della resistenza meccanica finale. È costituito da piccole particelle solide a forma di filamenti o lamelle estremamente sottili, dello spessore dell'ordine del nanometro che si estendono per decine o centinaia di nanometri.

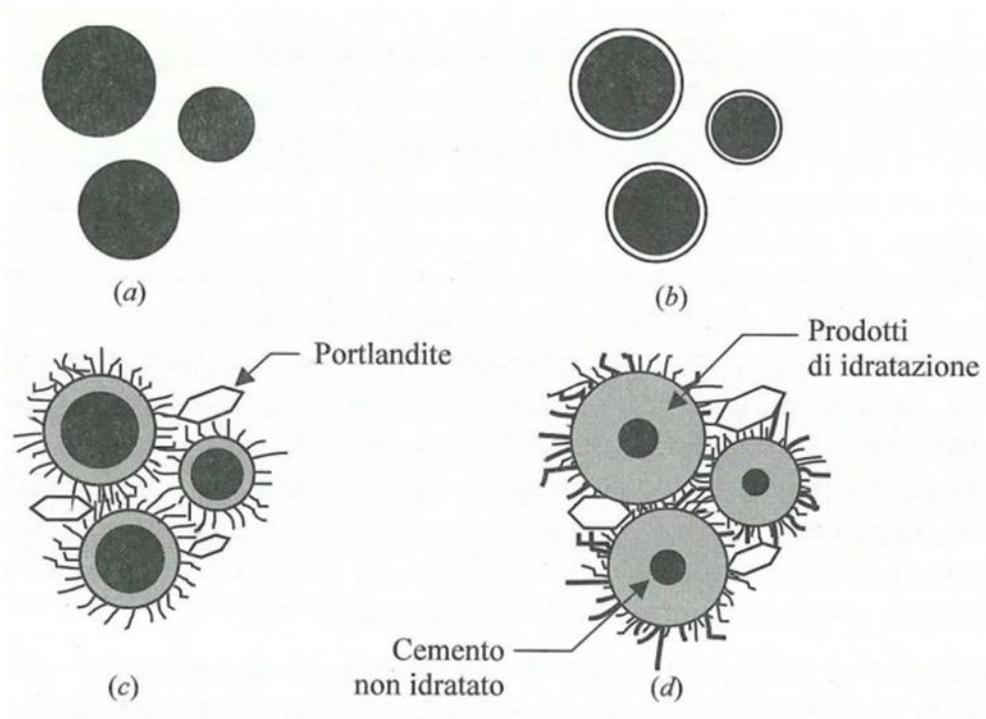


Figura 9. Rappresentazione schematica della sequenza di cambiamenti microstrutturali durante l'idratazione del cemento Portland

Essendo il presente studio di tesi basato sull'analisi delle proprietà meccaniche di malte contenenti aggregati di natura plastica in parziale sostituzione di aggregati naturali, è utile andare ad analizzare i parametri che influenzano la resistenza meccanica di una malta, al fine di poter comprendere i risultati ottenuti.

➤ *Contributo del tempo di idratazione*

Il tempo di idratazione influenza le proprietà della malta. Nello specifico, come si evince dal grafico in figura 10 che riporta l'andamento tipico di permeabilità, porosità e resistenza meccanica durante l'idratazione di un cemento Portland si nota che all'aumentare del tempo di idratazione, terminata la presa, diminuirà la porosità del campione cementizio e si assisterà ad un aumento graduale della resistenza meccanica. Maggiore è il tempo di idratazione, maggiore sarà la resistenza meccanica.

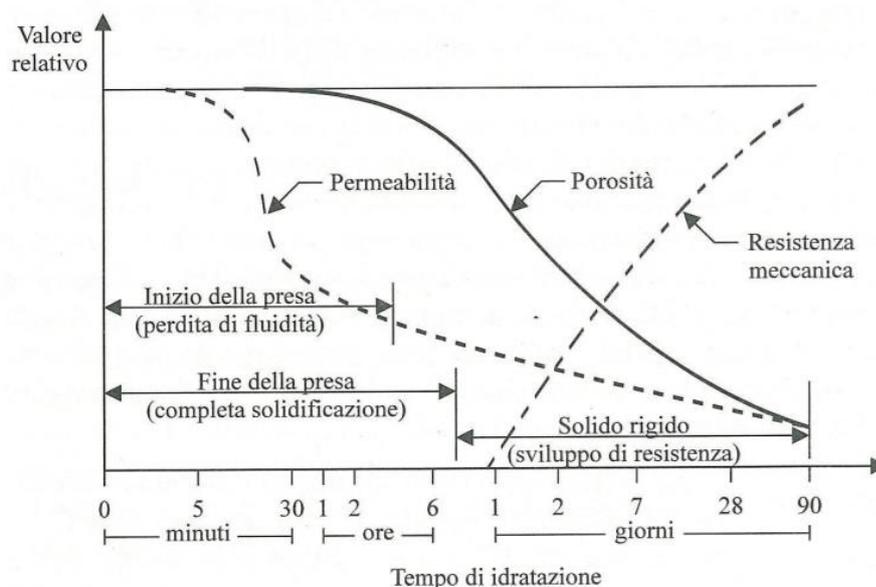


Figura 10. Andamento di permeabilità, porosità, resistenza meccanica in funzione del tempo di idratazione

#### ➤ Contributo della porosità

Altra caratteristica da evidenziare è il tipo di porosità che la pasta di cemento idrata presenta.

Esistono 3 tipi di pori.

- pori dovuti agli spazi interstiziali tra aghi del gel C-S-H, che hanno dimensione che va da qualche frazione di nm a qualche nm.
- i pori capillari, che possono avere diametri compresi fra 10 e 50 nm (è il caso di malta ben idratata e con bassi rapporti acqua/cemento), ma anche diametri che arrivano a 3-5  $\mu\text{m}$ , questo avviene quando la malta è ottenuta in condizioni non ottimali.
- pori o vuoti dovuti all'inglobazione d'aria. Questi vuoti possono rimanere nella malta dopo il getto in seguito a un insufficiente costipamento e avere dimensioni fino a qualche mm.

I vuoti d'aria possono avere una forma irregolare e sono tipicamente isolati l'uno dall'altro; quindi, non contribuiscono alla permeabilità del materiale.

Inoltre, possono essere aggiunti intenzionalmente, con l'ausilio di agenti aeranti, all'impasto in modo da conferire al calcestruzzo resistenza all'azione del gelo/disgelo; in questo caso risultano di circa 0,05-0,2 mm di diametro.

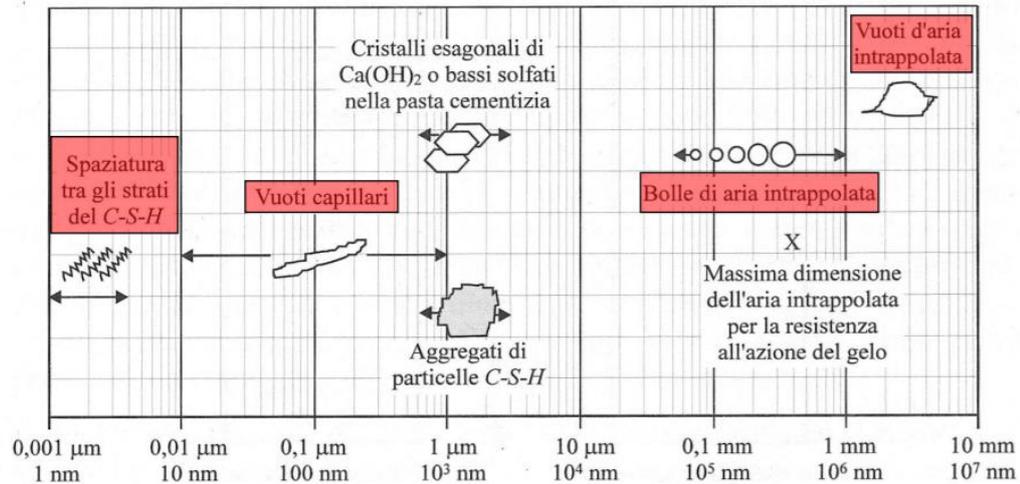


Figura 11. Tipologie di pori

Al procedere dell'idratazione il volume dei solidi cresce e di conseguenza il volume dei pori capillari diminuisce. Il valore di quest'ultimo a idratazione completa è ovviamente tanto maggiore quanto maggiore è la distanza iniziale tra le particelle di cemento e quindi la quantità d'acqua utilizzata per l'impasto. Pertanto, la porosità capillare diminuisce al crescere del grado di idratazione e al diminuire del rapporto in massa tra acqua e cemento ( $a/c$ ). Quanto appena detto è riassumibile matematicamente tramite la teoria di Powers.

➤ *Influenza della porosità capillare sulla resistenza meccanica (teoria di Powers)*

la porosità capillare può essere modificata tramite il rapporto  $a/c$  e/o tramite il grado di idratazione ( $h$ ), ovvero la frazione di cemento idrato. La teoria di Powers viene utilizzata per spiegare matematicamente la dipendenza della porosità capillare da rapporto  $a/c$  e grado di idratazione:

$$V_p = 100 a/c - 36.15 h \quad (5.1)$$

Dove  $V_p$  è il volume dei pori in litri per ogni 100 Kg di cemento,  $a/c$  rapporto acqua cemento e  $h$  è l'idratazione. Riducendo il rapporto  $a/c$  o aumentando il grado di idratazione, si può ridurre la porosità capillare. La porosità, inoltre, può essere annullata imponendo un  $a/c$  pari a 0,3165 ed  $h$  pari a 1.

Powers ha elaborato un modello matematico che potesse mettere in relazione la porosità capillare con la resistenza a compressione di un composto cementizio, in assenza di macrovuoti dovuti a incompleta compattazione, la formula viene qui riportata:

$$R_c = K \left( \frac{V_g}{V_p + V_g} \right)^3 \quad (5.2)$$

$V_g$  è il volume del cemento idratato per ogni 100 Kg di cemento anidro, quando  $V_p$  è pari a zero,  $R_c$  eguaglia la costante  $K$ . Per ottenere questo valore di resistenza meccanica si può agire riducendo il rapporto acqua cemento e aggiungendo additivi superfluidificanti che sono in grado di compattare il conglomerato cementizio. Sempre secondo la teoria di Powers  $V_g$  è calcolabile ed avrà un valore pari a:

$$V_g = 67.90 h \quad (5.3)$$

Secondo l'equazione (5.3) a idratazione completa, quindi quando  $h$  è uguale a 1, il volume del cemento idratato  $V_g$  è di 67.90 litri, per ogni 100 Kg di cemento ed assume valori proporzionalmente crescenti all'aumentare di  $h$  tra zero (inizio impasto) ed 1.

Andando ad inserire le equazioni 5.1 e 5.3 nell'equazione 5.2, si ricava la seguente formula:

$$R_c = K \left( \frac{0.6790\alpha}{0.3185\alpha + a/c} \right)^3 \quad (5.4)$$

Per migliorare la resistenza a compressione di un conglomerato cementizio, si può dunque giocare su diversi fattori. Matematicamente è possibile osservare che aumentando il rapporto acqua cemento, trovandosi quest'ultimo al denominatore, si assiste ad una riduzione della resistenza a compressione, viceversa se questo diminuisce, la resistenza aumenta. È chiaro che ridurre il rapporto  $a/c$  comporta una riduzione elevata della lavorabilità dell'impasto, motivo per cui è necessario inserire additivi fluidificanti o superfluidificanti capaci di compensare la minore lavorabilità dell'impasto fresco. Altro fattore su cui è possibile intervenire è il grado di idratazione ( $h$ ), tale parametro si trova al numeratore; quindi, un aumento di quest'ultimo provoca un aumento di  $R_c$ , per modificare il grado di idratazione è possibile utilizzare o cementi più reattivi oppure prolungare il tempo di stagionatura. [16]

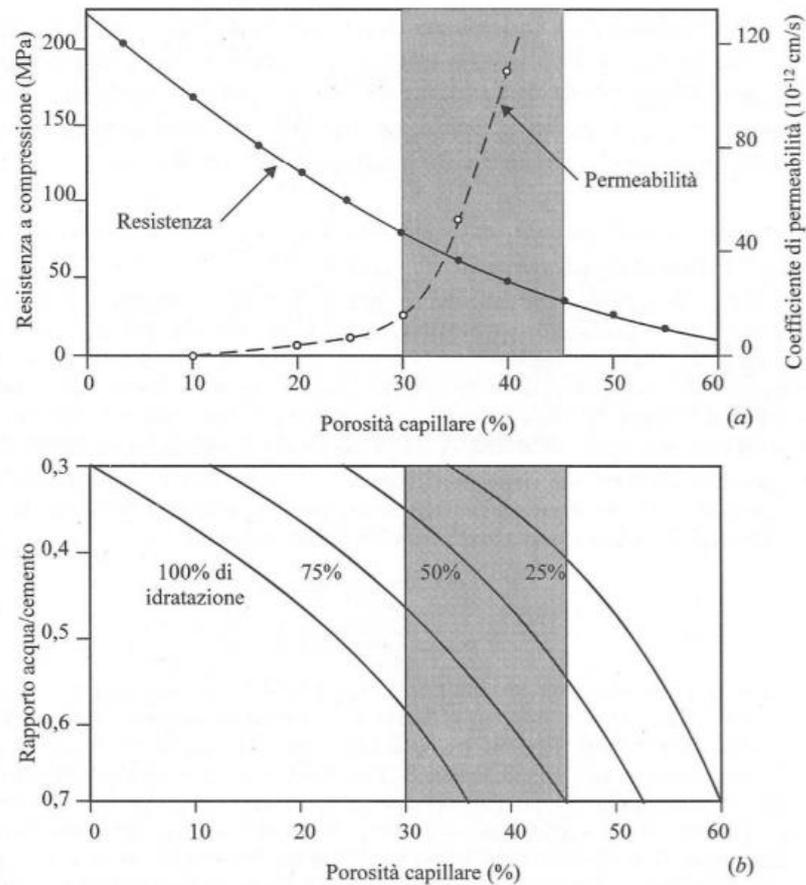


Figura 12. Influenza della porosità della pasta cementizia sulla resistenza a compressione e sulla permeabilità all'acqua: (a) effetto del rapporto tra solido e vuoti; (b) legame tra porosità, rapporto acqua/cemento e grado di idratazione

### 5.3 L'acqua

Nella realizzazione di malte e calcestruzzi il tipo di acqua che si utilizza risulta essere fondamentale, bisogna andare ad analizzare quantità e qualità della stessa. Se contiene cloruri o solfati in soluzione, in percentuali elevate, nello specifico maggiore dell'1% per i solfati e maggiore del 5% per i cloruri, la presa subisce un ritardo. Se sono presenti carbonati alcalini, la presa, invece, viene accelerata. Dunque, l'acqua ideale per gli impasti cementizi deve essere limpida, dolce, scevra da impurità di natura organica e può contenere solfati e cloruri entro i limiti di percentuale prima citati.

Una delle variabili più importanti da considerare nella preparazione della malta è il rapporto acqua cemento; infatti, un maggiore quantitativo di acqua genera minore resistenza del

campione, ma maggiore lavorabilità. Al contrario un campione che presenta un basso rapporto acqua cemento avrà maggiore resistenza, ma minore lavorabilità. È necessario, dunque, utilizzare la minore quantità di acqua in relazione alle condizioni di getto, in modo da ottenere un conglomerato indurito con migliori caratteristiche meccaniche.

Ci sono moltissimi altri fattori che devono essere tenuti in considerazione, ad esempio la presenza di zucchero, che rappresenta un elemento negativo in quanto, quest'ultimo se presente in minima quantità all'interno dell'acqua disturba il regolare svolgersi della presa. Altro fattore da considerare è la temperatura dell'acqua, se risulta essere troppo fredda rallenta il fenomeno della presa, mentre se è troppo calda l'accelera. [17]

## **5.4 Gli inerti**

Con il termine "inerti" vengono indicati quei materiali che non reagiscono con gli altri elementi presenti nella miscela; dunque, non partecipano alla reazione di idratazione del cemento. Gli inerti sono costituiti da un mix di ghiaia e sabbia, nello specifico la dimensione dell'inerte risulta la variabile a cui fare riferimento per classificare il conglomerato cementizio, esso viene definito malta se gli inerti hanno dimensioni minori di 5 mm, mentre viene definito calcestruzzo se gli inerti hanno dimensioni maggiori di 5 mm. Gli inerti possono essere costituiti da materie prime naturali, industriali o riciclate. È importante che essi siano frazionati in modo ottimale; infatti, la diversa granulometria degli inerti rende favorevole il grado di riempimento, nello specifico le particelle più fini andranno a riempire gli spazi lasciati dalle particelle più grosse. La granulometria viene valutata tramite il processo di setacciatura con vibrazione manuale o meccanica. [15]

Le ragioni per cui vengono utilizzati gli inerti sono molteplici. Dal punto di vista economico, ad esempio, si ha un enorme vantaggio in quanto bisogna considerare che il prezzo di un inerte è sicuramente inferiore a quello della pasta cementizia. Dal punto di vista tecnico, invece, aggiungendo all'impasto cementizio gli inerti si ottiene una riduzione del ritiro della pasta di cemento ed un aumento della durabilità, poiché la pasta cementizia di per sé non è

durevole, ed è facilmente aggredibile dall'ambiente, ma l'aggiunta di un materiale più durevole, come l'inerte, ne bilancia l'effetto.

L'utilizzo di materiali inerti ha importanti riscontri anche sulla resistenza meccanica, sul modulo elastico e sullo scorrimento viscoso. Chiaramente ai fini della resistenza meccanica di una malta, occorre stabilire correttamente il tipo di inerti e un'adeguata distribuzione granulometrica degli stessi.

L'unica proprietà che peggiora in seguito all'aggiunta di inerte è la lavorabilità dell'impasto fresco; difatti se viene aggiunto in modo progressivo un inerte alla pasta cementizia, quest'ultima perde gradualmente le sue proprietà reologiche che risultano più scadenti. È necessario controllare anche la composizione degli inerti, poiché possono essere presenti sostanze a base di solfati e cloruri ed alcune sostanze argillose che risultano essere indesiderate. I solfati possono reagire con gli alluminati del cemento e provocare la formazione di fessurazioni del conglomerato cementizio. Le sostanze argillose, invece, potrebbero intervenire a sfavore di una corretta adesione tra inerti e pasta di cemento.

#### ***5.4.1 Distribuzione granulometrica degli inerti***

Come precedentemente menzionato, occorre stabilire un'adeguata distribuzione granulometrica degli inerti per avere una buona malta. La resistenza meccanica di una malta prodotta seguendo un'adeguata distribuzione granulometrica è più alta di quella di una malta formata con un inerte che presenta granuli con dimensioni molto simili fra loro.

La curva granulometrica del sistema solido deve soddisfare l'equazione di Fuller e Thompson, per assicurare una distribuzione granulometrica con il minor numero di vuoti e quindi massima densità possibile.

$$P = 100 \cdot (d/D)^{1/2} \quad (5.5)$$

Dove P è la percentuale di solido (inerte più cemento), avente dimensione inferiore a d, mentre D è la dimensione massima dell'inerte, chiamata diametro massimo.

L'equazione è stata successivamente modificata da Bolomey, per migliorare la lavorabilità dell'impasto. È stata introdotta la costante A, che è un parametro che varia da 6 a 16 e viene scelto in base al tipo di inerte (tondeggianti o angolare) e alla lavorabilità che si richiede. Così con l'equazione di Bolomey è possibile scegliere la distribuzione granulometrica ottimale in relazione al tipo di inerte disponibile e alla lavorabilità richiesta. [15]

$$P = A + (100 - A) \cdot (d/D)^{1/2} \quad (5.6)$$

## 5.5 Gli additivi

Per migliorare determinate proprietà di un impasto cementizio è possibile aggiungere particolari prodotti chimici, chiamati additivi, in piccole quantità. Essi principalmente vengono suddivisi in due categorie a seconda del loro modo di agire nella miscela. Possono agire o modificando le proprietà reologiche della pasta cementizia con un'azione fisica (es. fluidificanti, superfluidificanti, aeranti e impermeabilizzanti); oppure possono agire modificando la cinetica di idratazione del cemento, tramite un'azione chimica (es. acceleranti e ritardanti).

Gli additivi acceleranti servono ad aumentare la velocità di idratazione del cemento nel periodo di presa o di indurimento. Gli acceleranti di presa accorciano il tempo di presa, mentre quelli di indurimento fanno aumentare la resistenza meccanica iniziale. Gli additivi ritardanti hanno lo scopo di rallentare il tempo di presa del cemento, in modo da mantenere la pasta cementizia più a lungo lavorabile. Un ritardo dell'idratazione del cemento, necessario per allungare il tempo di presa, porta a una resistenza meccanica bassa a brevi stagionature. Gli additivi fluidificanti aumentano la lavorabilità a parità di rapporto a/c, oppure consentono di ridurre l'acqua dell'impasto a parità di lavorabilità, motivo per cui questo tipo di additivi sono i più utilizzati. Per avere effetti ancora più significativi si ricorre all'utilizzo di superfluidificanti che migliorano le proprietà dell'impasto indurito, mantenendo un rapporto a/c molto basso. Per spiegare meglio l'azione di un superfluidificante si considera che la

riduzione del rapporto a/c, che è di 5-10% per un fluidificante, diviene del 20-40% per un superfluidificante. [15-18]

## Capitolo 6

# Materiali e Metodi

L'obiettivo principale dell'elaborato di tesi è quello di ottenere un cemento contenente aggregati provenienti da materiale di scarto derivante dai rifiuti apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE) utilizzati come parziale sostituto dell'aggregato minerale per produrre malte alleggerite, che abbiano le medesime caratteristiche di una malta base. Per ottenere tali caratteristiche nel corso delle prove sono stati aggiunti in concomitanza alla plastica altri materiali necessari per sopperire le mancanze che il materiale di scarto proveniente da RAEE provoca. Quest'ultimo una volta macinato, è stato utilizzato come sostituto all'aggregato minerale in percentuali del 15 % e del 30% in volume.

Sono stati utilizzati come materiali per ottenere i campioni desiderati: cemento *standard*, plastica proveniente da scarti di materiale, acqua deionizzata e sabbia. Durante il lavoro si è ipotizzato di inserire altri elementi capaci di raggiungere le proprietà desiderate del cemento *standard*, quali fibre di polipropilene, biochar, micro silice ( $\text{SiO}_2$ ), ossido di magnesio ( $\text{MgO}$ ) e ossido di calcio ( $\text{CaO}$ ); in proporzioni variabili e con rapporti acqua/cemento che variavano da 0,35 a 0,5. Le varie composizioni ottenute sono state versate in appositi casseri lubrificati per agevolare l'estrazione del provino, successivamente sono stati inseriti in vasche d'acqua per sette giorni, lasciati asciugare, misurati e pesati per valutare la loro densità geometrica.

Infine, i campioni ottenuti sono stati analizzati tramite prove meccaniche (prova a flessione a 3 punti e prova a compressione) e caratterizzazione ottica. Le seguenti attività sono state svolte al DISAT (dipartimento di scienza applicata e tecnologia), presso il Politecnico di Torino.

La normativa utilizzata per ottenere i campioni desiderati è la norma Europea UNI EN 196-1, che descrive i materiali che compongono la malta, le procedure necessarie per la realizzazione dei campioni e le prove da eseguire.

Nel seguente capitolo vengono, dunque, presentati i materiali utilizzati, i processi effettuati al fine di realizzare i campioni ed infine le misurazioni effettuate.

## 6.1 Cemento

Come anticipato nel capitolo precedente, la malta è ottenuta per miscelazione di uno o più leganti inorganici (cemento), acqua, inerti (sabbia) ed eventuali additivi, in opportune proporzioni. Con il termine leganti vengono indicati quei materiali che mescolati con acqua danno origine ad una pasta lavorabile che poi indurisce nel tempo. Il legante utilizzato per il seguente elaborato è un cemento Portland.

Il cemento utilizzato è l'ULTRACEM 52,5 R di Italcementi (peso specifico  $\cong 3,15 \text{ g/cm}^3$ ); si tratta di un cemento Portland tipo I ad altissima resistenza normalizzata ed a resistenza iniziale elevata. La composizione di tale cemento, conformemente alla composizione prescritta dalla norma UNI en 197-1, contiene il 95% ÷ 100% di clinker, ed eventuali costituenti secondari. Le elevate resistenze meccaniche raggiunte in breve tempo rendono il cemento perfetto per essere utilizzato in getti che necessitano scasseri e/o movimentazioni veloci. [19]

## 6.2 Acqua

L'acqua utilizzata per produrre i provini è acqua deionizzata prodotta all'interno dei laboratori del Politecnico di Torino. L'acqua ha due funzionalità: la prima è quella di idratare il cemento, ovvero si vanno ad instaurare delle reazioni chimiche e fisiche tra cemento e acqua e la pasta cementizia perde la sua plasticità e si irrigidisce, questo permette di tenere insieme gli inerti presenti. La seconda funzionalità è quella di bagnare correttamente gli inerti in modo da migliorare l'adesione tra essi e la pasta cementizia.

Come detto precedentemente, un fattore importante da considerare è la temperatura dell'acqua. Si utilizza, dunque, un'acqua con temperatura compresa fra i 14° e i 20°C.

È stata utilizzata acqua deionizzata per valutare in modo netto l'effetto degli additivi utilizzati privandoli di eventuali contaminazioni presenti nell'acqua del rubinetto. [18]

### 6.3 Inerte: Sabbia

L'inerte utilizzato per la realizzazione delle malte è la sabbia. La sabbia deve possedere una serie di requisiti, come avere granuli molto duri e non intorbidire l'acqua quando viene versata. È preferibile utilizzare sabbia proveniente da fiumi, poiché quella di cava molto spesso contiene materie terrose e deve essere lavate accuratamente con adeguati macchinari, prima di essere utilizzata. La sabbia di cava mista a terra, detta sabbia morta deve essere esclusa. Ciò che assolutamente non deve possedere una sabbia sono le materie organiche.

Nel seguente studio è stata utilizzata la sabbia CEN *Standard* (sabbia ISO *standard*), ossia una sabbia naturale, silicea. Le particelle che la compongono sono generalmente isometriche e di forma arrotondata. La sabbia è confezionata all'interno di sacchi di polietilene contenenti ciascuno  $1350 \pm 5$  g.

La composizione granulometrica determinata mediante setacciatura è conforme ai requisiti delle norme EN 196-1 e ISO 679: 2009. [20]

*Tabella 1. Materiale trattenuto nel setaccio in funzione della dimensione delle maglie del setaccio.*

<b>dimensione delle maglie del setaccio (mm)</b>	<b>Rifiuto cumulativo (%)</b>
0,08	99 ± 1
0,16	87 ± 5
0,50	67 ± 5
1,00	33 ± 5
1,60	7 ± 5
2,00	0

### 6.4 Inerte polimerico

Gli inerti utilizzati in sostituzione alla sabbia sono i rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE); un tipo particolare di rifiuti provenienti da dispositivi di uso quotidiano e costituiti da una miscela eterogenea di materiali con vari additivi e che, generalmente,

contengono tracce di composti pericolosi per la salute umana. A causa della disomogeneità composizionale e soprattutto della loro componente polimerica, questo tipo di materiali di scarto risulta molto complicato per il riciclo e il riutilizzo. [21]

In particolare, per la campagna sperimentale sono stati utilizzati inerti plastici provenienti dai rifiuti RAEE, raccolti da AMIAT, gruppo IREN. Gli inerti sono stati ottenuti dai cavi elettrici a seguito di un processo di macinazione, dove il cavo subisce un primo processo di triturazione, con conseguente riduzione di volume ed eventuale deferizzazione ed un secondo processo di granulazione, dove si ottiene un prodotto macinato composto sia da plastica che da rame. Essendo il rame un contaminante indesiderato, il macinato è stato sottoposto ad una separazione a secco del metallo dalla parte plastica tramite separatori magnetici. Il mix polimerico utilizzato per realizzare i provini studiati, viene rappresentato nella tabella 2 e nella figura 13.

Tabella 2. Quantità del mix polimerico in percentuale

Componenti	Quantità (%)
PPT	17,27
PMMA	14,16
PC	11,94
POM	11,74
PC + ABS	8,82
PE	7,97
PPE + SB	7,46
PVC	6,78
PA	4,96
PBT	2,97
PET	2,47
wood	1,86
silicone	1,03
PLA	0,57

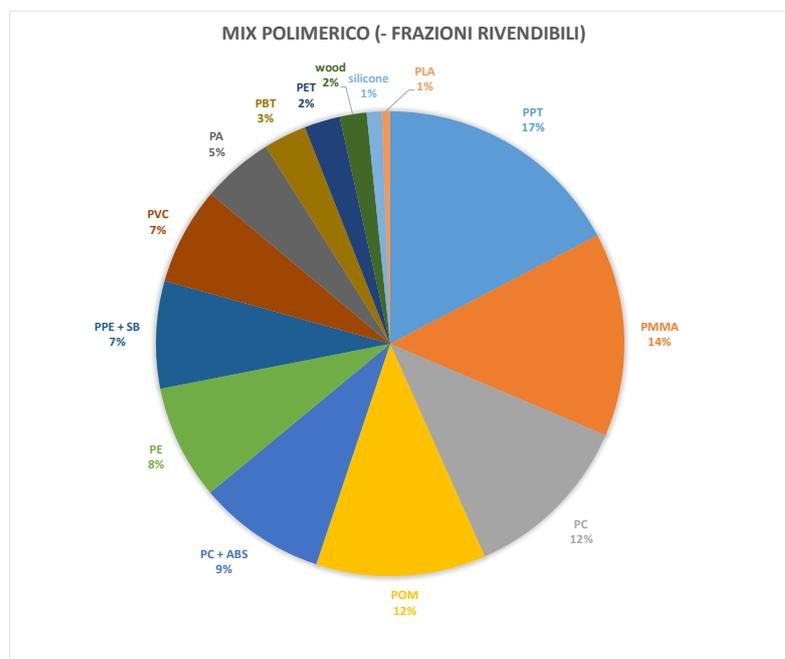


Figura 13. Percentuali dei polimeri contenuti all'interno dei RAEE

## 6.5 Confezionamento dei provini

La miscelazione e la preparazione dei campioni oggetto di studio sono state fatte seguendo le linee guida della UNI EN 1961. In totale, sono stati realizzati 21 impasti, nello specifico sono stati realizzati 4 provini prismatici (80x20x20mm) per ogni tipo di composizione. Sono stati utilizzati dei casseri in acciaio, mostrati in figura 14 con misure di 80x20x20mm, con un volume disponibile di una singola fessura pari a 32 cm<sup>3</sup> e quello dell'intero stampo è pari a 128 cm<sup>3</sup>. Le fessure, al cui interno è stato gettato l'impasto cementizio, sono state ricoperte preventivamente con un grasso lubrificante, al fine di facilitare l'operazione di rimozione dei campioni.



*Figura 14. Cassero in acciaio*

La procedura di miscelazione della malta, secondo normativa (UNI EN 196-1) consiste in vari step:

- ✓ mettere il cemento e l'acqua in un becher;
- ✓ avviare l'agitatore meccanico a bassa velocità per 30 s;
- ✓ aggiungere la sabbia gradualmente durante i successivi 30 s;
- ✓ aumentare la velocità e continuare a miscelare per altri 30 s;
- ✓ fermare l'agitatore meccanico per 90 s, durante i primi 30 s, rimuovere la malta che aderisce alle pareti del becher;
- ✓ continuare la miscelazione ad alta velocità per 60 s.

Una volta ottenuto, il composto cementizio viene versato all'interno di casseri prismatici, preventivamente lubrificati. Anche in questo caso bisogna seguire la normativa che impone il versamento di metà composto all'interno dei casseri, questi sono posizionati sopra un macchinario vibrante che sbatte il cassero con 60 colpi, successivamente si versa la malta rimanente e si sbatte il cassero con altri 60 colpi, in laboratorio questo procedimento è stato effettuato manualmente.

Dopo aver lisciato con una spatola i provini per rimuovere l'eventuale eccesso di composto cementizio, i provini vengono tenuti in condizioni di umidità >90%, a temperatura di 20°C per 24h, successivamente vengono scasserati e inseriti all'interno di una vasca, come mostrato in figura 15, per completare il tempo di maturazione (7 o 28 giorni). Nello specifico tutti i provini additivati con plastica sono stati analizzati dopo 7 giorni e sono stati confrontati con una malta base, caratterizzata anch'essa meccanicamente dopo 7 giorni.



Figura 15. Posizionamento dei provini all'interno della vasca

Di seguito sono analizzati nel dettaglio i passaggi eseguiti per ottenere i 21 impasti studiati.

### **6.5.1 Provini di malta**

Con il primo impasto sono stati realizzati 4 provini (80x20x20 mm) di malta *standard*, ovvero senza l'aggiunta di alcun tipo di additivo. Le quantità utilizzate per la realizzazione dell'impasto cementizio sono:

- 80 g di cemento CEM I 52,5 R;
- 40 g di acqua deionizzata;
- 240 g di sabbia

Nello specifico i vari componenti della miscela sono stati pesati tramite una bilancia analitica, mostrata in figura 16.



Figura 16. Bilancia analitica

Come si evince dai dati, il rapporto a/c utilizzato per la realizzazione dei provini *standard* è pari a 0,5. La procedura di confezionamento è quella prima descritta.

### **6.5.2 Provini di malta con plastica**

Come precedentemente detto, al cemento è stato additivato del mix polimerico, in diverse percentuali in volume (15-30%) in sostituzione alla sabbia, al fine di ottenere le medesime proprietà meccaniche di una malta base, o nel migliore dei casi, ottenere prestazioni maggiori. Il rapporto a/c è stato fissato a 0,5.

Le quantità utilizzate, quando la sostituzione della sabbia è del 15%, sono:

- 71,24 g di CEM I 52,5 R;
- 35,62 g di acqua deionizzata;
- 166,84 g di sabbia;
- 12,41 g di mix polimerico

Le quantità utilizzate, quando la sostituzione della sabbia è del 30%, sono:

- 71,24 g di CEM I 52,5 R;
- 35,62 g di acqua deionizzata;
- 154,43 g di sabbia;
- 24,82 g di mix polimerico

Al fine di sostituire una determinata frazione granulometrica di sabbia con il mix polimerico è necessario sottoporre a setacciatura entrambi i componenti (Fig. 17-18). È bene sottolineare che la sostituzione è stata effettuata in termini volumetrici, non in massa, considerando che il peso specifico degli inerti polimerici risulta inferiore a quello della sabbia.



*Figura 17. Setaccio con sabbia*



*Figura 18. Setaccio con plastica*

La vagliatura viene effettuata tramite dei setacci che avranno dimensioni della maglia pari a: - 2,00 mm; - 1,60 mm; - 1,00 mm; - 0,50 mm; - 0,16 mm; - 0,08 mm. I setacci sono stati impilati

come mostrato in figura 19, al vertice viene posto il setaccio con dimensione della maglia maggiore (2,00 mm), seguono dimensione della maglia decrescente e in fondo viene posizionato il setaccio con dimensione della maglia minore (0,16 mm).



*Figura 19. Setacci impilati con al vertice il setaccio con dimensione della maglia maggiore*

Per prima cosa viene versato il materiale da vagliare nel setaccio più in alto, tramite l'aiuto di una vibrazione meccanica o, come effettuato in laboratorio, una vibrazione manuale, il materiale effettua un percorso verticale rimanendo bloccato nei vagli con apertura delle maglie di dimensione minore della dimensione dell'aggregato.

Chiaramente una vibrazione meccanica renderebbe più efficiente la separazione di taglia, poiché risulta facilitato il movimento sia verticale che circolare. Il concetto che sta alla base della vagliatura è fare avanzare il materiale e quindi serve inclinazione e movimentazione, più avanza il materiale e più è facile separarlo. Questa operazione diventa leggermente più complicata quando vi sono fattori di forma delle particelle differenti, e quindi può capitare che particelle con elevata lunghezza e spessore ridotto rimangano incastrati nella maglia. Inoltre, non utilizzando l'aiuto di un vibrovaglio, difficilmente il fine e l'ultrafine riescono a passare, perché le particelle grossolane ne ostacolano il passaggio.

Il processo di vagliatura termina con la determinazione della massa di materiale rimasta in ogni singolo setaccio. Le varie frazioni granulometriche vengono conservate in sacchetti opportunamente denominati.

Nelle tabelle 3 (15% di plastica) e 4 (30% di plastica) vengono riportati il quantitativo, per ogni dimensione, da inserire all'interno dell'impasto cementizio.

*Tabella 3. Quantità di polimero e sabbia da inserire nell'impasto cementizio in funzione delle dimensioni.*

<b>Maglia setaccio (mm)</b>	<b>Frazione trattenuta (%)</b>	<b>massa polimero (g)</b>	<b>massa sabbia (g)</b>
2,00	1,70	0,21	2,84
1,60	4,52	0,56	7,54
1,00	29,56	3,67	49,32
0,50	32,22	4,00	53,76
0,16	17,93	2,23	29,91
0,08	13,85	1,72	23,11
filler	0,22	0,03	0,37

*Tabella 4. Quantità di polimero e sabbia da inserire nell'impasto cementizio in funzione delle dimensioni.*

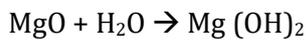
<b>Maglia setaccio (mm)</b>	<b>Frazione trattenuta (%)</b>	<b>massa polimero (g)</b>	<b>massa sabbia (g)</b>
2,00	1,70	0,42	2,63
1,60	4,52	1,12	6,98
1,00	29,56	7,34	45,65
0,50	32,22	8,00	49,76
0,16	17,93	4,45	27,69
0,08	13,85	3,44	21,39
filler	0,22	0,05	0,34

La procedura di miscelazione segue i medesimi step eseguiti per una malta *standard*, polimero e sabbia verranno preventivamente miscelati e uniti gradualmente alla miscela di cemento ed acqua. Anche in questo caso vengono realizzati 4 provini prismatici (80x20x20 mm) per ogni composizione (15% e 30%), che seguiranno le stesse condizioni di stagionatura della malta base. Una volta ottenuti i provini desiderati, sono stati studiati meccanicamente e

i risultati delle prove meccaniche hanno indotto alla ricerca delle giuste proporzioni o i giusti additivi, tali da migliorare le prestazioni meccaniche dei provini contenenti plastica. Per ogni nuova composizione sperimentata sono stati preparati 2 impasti uno contenente il 15% in volume di materiale plastico in sostituzione all'aggregato naturale e uno contenete il 30%.

### ***6.5.3 Provini di malta con plastica ed espandente***

Un agente espansivo è un prodotto che, reagendo con l'acqua ed eventualmente con gli altri prodotti presenti nell'impasto cementizio, provoca un aumento di volume. [22] Gli agenti espansivi, reagendo con l'acqua si trasformano nei corrispondenti idrossidi come mostrato dalla seguente reazione:



È stato, dunque, preparato un impasto contenente il mix plastico con l'aggiunta di un additivo espansivo, nello specifico come primo agente è stato utilizzato ossido di magnesio; quest'ultimo è stato inserito all'interno di un contenitore con la sabbia ed è stato posizionato in un giragiare per 2 giorni, come mostrato in figura 20.



*Figura 20. Giragiare*

Seguendo la normativa UNI EN 196-1, esattamente come per gli altri campioni studiati, sono stati preparati 4 provini con tale impasto cementizio, con un rapporto a/c pari a 0,5.

Le quantità utilizzate, quando la sostituzione della sabbia è del 15%, sono:

- 66, 24 g di CEM I 52,5 R;

- 35,62 g di acqua deionizzata;
- 166,84 g di sabbia;
- 12,40 g di mix polimerico;
- 5,00 g di MgO

Le quantità utilizzate, quando la sostituzione della sabbia è del 30%, sono:

- 66,24 g di CEM I 52,5 R;
- 35,62 g di acqua deionizzata;
- 154,42 g di sabbia;
- 24,82 g di mix polimerico;
- 5,00 g di MgO

#### ***6.5.4 Provini di malta con plastica e fibre di polipropilene***

Per questo impasto, sono state inserite, oltre alla plastica, le fibre in polipropilene (Fig. 21), per aumentare le proprietà meccaniche dei provini.



*Figura 21. Fibre di polipropilene*

In particolare, le proprietà chimico-fisiche delle fibre, le proprietà chimico-fisiche della matrice cementizia e l'aderenza fibra-matrice, sono i fattori determinanti per il

miglioramento delle proprietà meccaniche dei cementi fibro-rinforzati. Il più importante risulta essere l'aderenza fibra-matrice, poiché l'allungamento a rottura di tutte le fibre è di circa 2-3 ordini di grandezza superiore alla deformazione a rottura della matrice cementizia. Se un cemento fibro-rinforzato viene sottoposto a una prova a flessione, le fibre, come mostrato in figura 22, una volta che la matrice si è fessurata, nel caso in cui si trovino a cavallo della cricca, consentono la trasmissione degli sforzi esercitando una sorta di "effetto ponte" che impedisce all'elemento di collassare fragilmente, cosa che avverrebbe in assenza del rinforzo fibroso.



Figura 22. Provino fibrorinforzato sottoposto a flessione

Risulta fondamentale il rapporto di forma, definito come rapporto tra lunghezza e diametro equivalente ( $l_f/d_f$ ), dove ( $l_f$ ) è la lunghezza della fibra, cioè la distanza tra le estremità della fibra e ( $d_f$ ) il diametro equivalente ossia il diametro di un cerchio con area uguale all'area media della sezione trasversale della fibra. L'effetto ponte sarà influenzato dalla geometria della fibra, quindi forme con estremità piegata o a uncino, rendono migliore l'ancoraggio tra la fibra e la matrice. Chiaramente aumentando il numero di fibre, e disperdendo le fibre in modo uniforme, il rinforzo fibroso risulterà più efficiente. Tuttavia, occorre tener presente che quantitativi elevati di fibre producono una riduzione della fluidità dell'impasto, tanto maggiore quanto più alto è il rapporto di forma, del quale si dovrà tener conto nella progettazione della miscela. [23]

Nell'impasto con cemento, acqua, sabbia e plastica; le fibre sono state additivate di una percentuale pari al 0,5% rispetto al peso del cemento.

Le quantità utilizzate, quando la sostituzione della sabbia è del 15%, sono:

- 71,24 g di CEM I 52,5 R;
- 35,62 g di acqua deionizzata;

- 166,84 g di sabbia;
- 12,40 g di mix polimerico;
- 0,36 g di fibre in polipropilene

Le quantità utilizzate, quando la sostituzione della sabbia è del 30%, sono:

- 71,24 g di CEM I 52,5 R;
- 35,62 g di acqua deionizzata;
- 154,42 g di sabbia;
- 24,82 g di mix polimerico;
- 0,36 di fibre in polipropilene

La procedura di miscelazione e riempimento dei casseri risulta essere la medesima dei precedenti provini.

### ***6.5.5 Provini di malta con plastica e biochar***

Nel corso dell'analisi sperimentale, si è ipotizzato di inserire additivi in grado di ridurre la porosità e di conseguenza aumentare le prestazioni meccaniche. È stata, dunque, preparata una miscela di cemento, acqua, sabbia, plastica e biochar (Fig. 23).



*Figura 23. Becher contenente sabbia, plastica e biochar*

Col termine biochar si intende un materiale carbonioso ottenuto per degradazione termica (pirolisi di biomassa sia di origine animale che vegetale). In accordo con la definizione della

European Biochar Certificate, il biochar deve essere considerato come un *"materiale eterogeneo ricco di sistemi aromatici e minerali. Esso si deve ottenere per pirolisi di biomassa prodotta in modo sostenibile in condizioni controllate e con tecnologia pulita; deve avere proprietà per cui esso può essere usato per tutti gli scopi che non prevedano una rapida mineralizzazione in anidride carbonica e deve conservare delle caratteristiche che rendano possibile anche il suo uso come ammendante dei suoli"*. [24] L'applicazione del biochar nel settore dell'edilizia sta assumendo un ruolo sempre più rilevante. Precedenti sperimentazioni hanno dimostrato che le particelle ottenute in seguito al processo di pirolisi di biomasse acquisiscono notevoli proprietà meccaniche; difatti aggiungendo micro/nano particelle di biochar all'interno di paste cementizie, i prodotti finali hanno mostrato un aumento della resistenza a flessione e una maggiore energia di frattura, rendendo difficoltoso il percorso di frattura rispetto a quello di una malta senza additivi. Una delle problematiche che si possono riscontrare utilizzando il biochar negli impasti a base cementizia è la sua elevata capacità di assorbimento: le particelle di cui è composto hanno una struttura molto porosa che rende maggiore la necessità di acqua. Di conseguenza, la lavorabilità del materiale diventa più difficile essendo l'impasto più denso rispetto a quello tradizionale. Le particelle assorbono una determinata quantità d'acqua che verrà rilasciata successivamente durante la fase di idratazione, rendendo in questo modo il materiale più rigido e resistente. Bisogna quindi apportare il giusto quantitativo di biochar al fine di sfruttarne al meglio le proprietà meccaniche, senza andare ad inficiare la lavorabilità dell'impasto cementizio. [25]

Nell'impasto è stato additivato l'1% in peso del cemento, di biochar. Il rapporto a/c è stato fissato a 0,5.

Le quantità utilizzate, quando la sostituzione della sabbia è del 15%, sono:

- 71,24 g di CEM I 52,5 R;
- 35,62 g di acqua deionizzata;
- 166,84 g di sabbia;
- 12,40 g di mix polimerico;

- 0,71 g di biochar

Le quantità utilizzate, quando la sostituzione della sabbia è del 30%, sono:

- 71,24g di CEM I 52,5 R;
- 35,62 g di acqua deionizzata;
- 154,42 g di sabbia;
- 24,82 g di mix polimerico;
- 0,71 g di biochar

La procedura di miscelazione e riempimento dei casseri risulta essere la medesima dei precedenti provini.

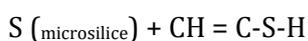
### ***6.5.6 Provini di malta con plastica e biossido di silicio***

Al fine di ridurre le porosità createsi nel campione cementizio, è stato pensato l'utilizzo di fumo di silice nell'impasto cementizio.

Nel momento in cui l'aggregato riciclato viene aggiunto all'impasto cementizio, la porosità dell'impasto aumenta istantaneamente. L'uso di biossido di silicio, principale componente del fumo di silice, diminuisce la porosità della zona di transizione interfacciale nella malta grazie alla sua capacità di riempire i pori della seguente zona con le particelle di silice che riducono la quantità di idrossido di calcio a causa della loro elevata reattività .

Il fumo di silice consiste principalmente in particelle sferiche di biossido di silicio amorfo di dimensioni più piccole di  $10^{-6}$  m ed è altamente pozzolanico; può essere usato per produrre cemento con proprietà migliorate sia allo stato fresco che indurito. [26]

L'aggiunta di fumo di silice all'interno dell'impasto cementizio genera effetti di natura chimica, fisica e microstrutturale. L'effetto chimico che si genera nella reazione tra fumo di silice e malta cementizia è quello di indurre reazione pozzolanica, espressa come:



La reazione pozzolanica provoca la riduzione di portlandite, che viene sostituita con C-S-H secondario, principale responsabile della resistenza a compressione, con conseguente miglioramento delle proprietà meccaniche. [27]

L'effetto microstrutturale, invece, è quello di ridurre la porosità della zona di transizione tra la pasta cementizia e gli aggregati minerali. In questo modo viene incrementata la resistenza a compressione e ridotta la permeabilità e la diffusività. La porosità, inoltre, diventa più omogenea, i pori più grossolani diminuiscono [28]. La resistenza meccanica a compressione, in particolare quando il fumo di silice viene inserito come aggiunta e non come sostituto al cemento subisce un incremento in funzione della percentuale presente. Il contributo all'aumento della resistenza a compressione è importante entro i primi 28 giorni di maturazione, oltre diventa poco significativo [29] [30].

A seconda del quantitativo additivato, le proprietà reologiche della pasta cementizia variano. Quando la percentuale di fumo di silice è inferiore al 5%, la quantità d'acqua necessaria si riduce e vengono migliorate le proprietà reologiche, difatti la pasta cementizia diventa meno viscosa e di conseguenza facilmente lavorabile ed inoltre la porosità presente viene ridotta. Quando la percentuale è superiore o uguale al 5% il fenomeno si inverte e si assiste ad un incremento di viscosità. [31]

L'effetto fisico più rilevante è la riduzione di *bleeding*<sup>8</sup> della pasta cementizia; infatti, il fumo di silice rende maggiormente coesivo l'impasto, grazie all'estrema finezza delle sue particelle. Tale effetto riduce notevolmente la segregazione tra solido e liquido. [32]

Il fumo di silice viene normalmente utilizzato in combinazione con un plastificante e/o un superfluidificante. Seguendo la normativa, l'impasto contenente fumo di silice, deve essere preparato con il 90% di cemento di prova più il 10% di fumo di silice per massa di legante totale. La malta contenente fumo di silice deve essere mescolata con una quantità di superfluidificante (conforme alla EN 934-2) in modo che la malta abbia una consistenza

---

<sup>8</sup> consiste nella risalita in superficie, durante il costipamento del conglomerato cementizio, di una parte dell'acqua di impasto con la formazione di uno strato d'acqua e cemento sulla superficie del conglomerato

equivalente alla malta di riferimento quando viene testata. Chimicamente il fumo di silice è costituito da  $\text{SiO}_2$ , con percentuali che variano dall'85% al 98%, e costituenti presenti in quantità trascurabili, quali ossidi di ferro, di alluminio, di calcio, di magnesio ecc. Per tale motivo, non disponendo in laboratorio di fumo di silice, per la realizzazione dei provini è stato utilizzato biossido di silicio in polvere. Utilizzando la normativa EN 934-2 conforme al fumo di silice e non al biossido di silicio, l'impasto ottenuto ha assunto una consistenza granulosa che ne impediva la lavorabilità, come mostrato in figura 24.



*Figura 24. Malta contenente biossido di silicio*

L'errore probabilmente ricadeva anche nell'aver fatto una sostituzione in peso e non in volume. È stato quindi rifatto il calcolo dei grammi di cemento e silice necessari; tuttavia, a causa delle leggere differenze fra la composizione chimica del fumo di silice e del biossido di silicio, anche in questo caso l'impasto è risultato abbastanza segregato.

Le quantità utilizzate, quando la sostituzione della sabbia è del 15%, sono:

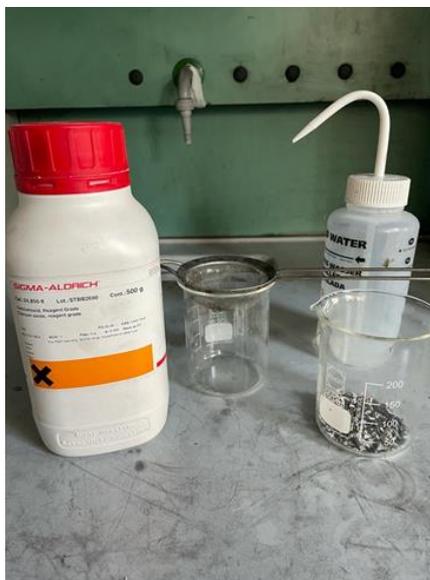
- 67,67 g di CEM I 52,5 R;
- 35,62 g di acqua deionizzata;
- 166,84 g di sabbia;
- 12,40 g di mix polimerico;
- 2,52 g di silice

Le quantità utilizzate, quando la sostituzione della sabbia è del 30%, sono:

- 67,67 di CEM I 52,5 R;
- 35,62 g di acqua deionizzata;
- 154,42 g di sabbia;
- 24,82 g di mix polimerico;
- 2,52 g di silice

### **6.5.7 Provini ricoperti di polvere di $\text{CaO}$ , $\text{MgO}$ , $\text{SiO}_2$**

Come dimostrano i dati precedenti, l'utilizzo di aggregati come biossido di silicio, ossido di calcio e ossido di magnesio tendono ad assorbire l'acqua; quindi, se inseriti in elevate quantità non migliorano le proprietà della malta, bensì ne provocano un peggioramento. L'idea è stata quindi quella di inserire questi ossidi in quantità relativamente bassa per ottenere solo benefici con la loro aggiunta, in più per permettere una migliore adesione fra cemento e plastica, quest'ultima è stata letteralmente "impanata" (Fig.25).



*Figura 25. Attrezzatura utilizzata per la realizzazione dei provini "impanati"*

Il primo step di impanatura prevede di bagnare con acqua deionizzata la plastica precedentemente pesata, posta in un colino, in modo da far defluire l'acqua in eccesso. Un secondo step prevede di versare l'ossido in questione sulla plastica bagnata e con l'aiuto di una spatola di amalgamare plastica e ossido. L'impasto ottenuto viene miscelato con cemento

ed acqua seguendo gli step precedentemente descritti per gli altri provini. Di seguito vengono riportate le masse utilizzate per la miscela; tuttavia, bisogna considerare che la quantità effettiva di acqua e di ossido risulta leggermente differente, in quanto la prima viene aggiunta anche nella fase di impanatura e la seconda è stata stimata forfettariamente senza considerare il quantitativo perso nel colino (Fig.26).



*Figura 26. Colino contenente plastica bagnata, ricoperto con ossido*

### **6.5.8 Provini ricoperti di polvere di ossido di calcio**

Le quantità utilizzate, quando la sostituzione della sabbia è del 15%, sono:

- 71,24 g di CEM I 52,5 R;
- 35,62 g di acqua deionizzata;
- 166,84 g di sabbia;
- 12,40 g di mix polimerico;
- 1,98 g di ossido di calcio

Le quantità utilizzate, quando la sostituzione della sabbia è del 30%, sono:

- 71,24 g di CEM I 52,5 R;
- 35,62 g di acqua deionizzata;
- 154,42 g di sabbia;

- 24,82 g di mix polimerico;
- 4,36 g di ossido di calcio

### ***6.5.9 Provini ricoperti di polvere di ossido di magnesio***

Le quantità utilizzate, quando la sostituzione della sabbia è del 15%, sono:

- 71,24 g di CEM I 52,5 R;
- 35,62 g di acqua deionizzata;
- 166,84 g di sabbia;
- 12,40 g di mix polimerico;
- 2,32 g di ossido di magnesio

Le quantità utilizzate, quando la sostituzione della sabbia è del 30%, sono:

- 71,24 g di CEM I 52,5 R;
- 35,62 g di acqua deionizzata;
- 154,42 g di sabbia;
- 24,82 g di mix polimerico;
- 4,23 g di ossido di magnesio

### ***6.5.10 Provini ricoperti di polvere di biossido di silicio***

Le quantità utilizzate, quando la sostituzione della sabbia è del 15%, sono:

- 71,24 g di CEM I 52,5 R;
- 35,62 g di acqua deionizzata;
- 166,84 g di sabbia;
- 12,40 g di mix polimerico;
- 2,10 g di biossido di silicio

Le quantità utilizzate, quando la sostituzione della sabbia è del 30%, sono:

- 71,24 g di CEM I 52,5 R;
- 35,62 g di acqua deionizzata;

- 154,42 g di sabbia;
- 24,82 g di mix polimerico;
- 3,34 g di biossido di silicio

### 6.5.11 *Provini con rapporto a/c 0,35*

Per migliorare le proprietà meccaniche è stato realizzato un impasto riducendo il rapporto acqua cemento, rendendolo pari a 0,35. In questo caso le quantità utilizzate, quando la sostituzione della sabbia è del 15%, sono:

- 77,09 g di CEM I 52,5 R;
- 26,98 g di acqua deionizzata;
- 180,54 g di sabbia;
- 13,43 g di mix polimerico;

Le quantità utilizzate, quando la sostituzione della sabbia è del 30%, sono:

- 77,09 g di CEM I 52,5 R;
- 26,98 g di acqua deionizzata;
- 167,11 g di sabbia;
- 26,86 g di mix polimerico;

Di seguito, nella tabella 5 vengono riportati i quantitativi utilizzati per ogni singolo impasto, dove p indica la plastica, PP le fibre di polipropilene e B il biochar.

*Tabella 5. Quantitativi in massa utilizzati per ogni singolo impasto*

Campioni	Cemento (g)	Acqua (g)	Sabbia (g)	Plastica (g)	Fibre PP (g)	Biochar (g)	MgO (g)	CaO (g)	SiO <sub>2</sub> (g)	Fluidificante (g)
M 7 gg	80,00	40,00	240,00							
M 15%p	71,24	35,62	166,84	12,41	-	-	-	-	-	-
M 30%p	71,24	35,62	154,43	24,82	-	-	-	-	-	-
M 15%p MgO	66,24	35,62	166,84	12,41	-	-	5,00	-	-	-

M 30%p MgO	66,24	35,62	154,43	24,82	-	-	5,00	-	-	-
M 15%p PP	71,24	35,62	166,84	12,41	0,36	-	-	-	-	-
M 30%p PP	71,24	35,62	154,43	24,82	0,36	-	-	-	-	-
M 15%p B	71,24	35,62	166,84	12,41	-	0,71	-	-	-	-
M 30%p B	71,24	35,62	154,43	24,82	-	0,71	-	-	-	-
M 15%p SiO <sub>2</sub>	67,67	35,62	166,84	12,41	-	-	-	-	2,52	-
M 30%p SiO <sub>2</sub>	67,67	35,62	154,43	24,82	-	-	-	-	2,52	-
M 15%p SiO <sub>2</sub> I	71,24	35,62	166,84	12,41	-	-	-	-	2,10	-
M 30%p SiO <sub>2</sub> I	71,24	35,62	154,43	24,82	-	-	-	-	3,34	-
M 15%p CaO I	71,24	35,62	166,84	12,41	-	-	-	1,98	-	-
M 30%p CaO I	71,24	35,62	154,43	24,82	-	-	-	4,23	-	-
M 15%p MgO I	71,24	35,62	166,84	12,41	-	-	2,32	-	-	-
M 30%p MgO I	71,24	35,62	154,43	24,82	-	-	4,23	-	-	-
M 15%p a/c=0,35	77,09	26,98	180,54	13,43	-	-	-	-	-	0,77
M 30%p a/c=0,35	77,09	26,98	167,11	26,86	-	-	-	-	-	0,77
M15%p SiO <sub>2</sub> +a/c=0,35	77,09	26,98	180,54	13,43	-	-	-	-	2,10	0,77
M30%p SiO <sub>2</sub> +a/c=0,35	77,09	26,98	167,11	26,86	-	-	-	-	3,34	0,77

## 6.6 Prove Meccaniche

I provini realizzati sono stati sottoposti a caratterizzazione meccanica, nello specifico sono state effettuate prove di flessione a 3 punti e prove di resistenza a compressione, con una Zwick-Line Z050. Esse sono le principali prove meccaniche per valutare la risposta meccanica di una malta. Le prove sono state effettuate per valutare l'influenza del livello di sostituzione della plastica, e quindi la concretezza dell'ipotesi fatta alla base della sperimentazione e la fattibilità di utilizzare tali rifiuti come aggregato in sostituzione parziale alla sabbia nelle malte cementizie.

### 6.6.1 Calcolo dimensioni e densità provini

Prima di procedere con le prove meccaniche, è stato necessario valutare le dimensioni geometriche dei provini e la rispettiva densità. Per far ciò gli stessi sono stati levigati tramite carta abrasiva per ottenere superfici il più possibile piane. Le dimensioni - lunghezza, larghezza e altezza (Fig. 27) - sono state valutate tramite l'utilizzo di un calibro analogico.

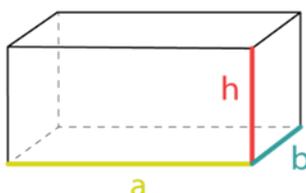


Figura 27. Lunghezza (a), larghezza (b) e altezza (h)

I provini sono stati poi pesati su una bilancia analitica. Il volume dei provini (80x20x20mm) è pari a 32 cm<sup>3</sup>. Noto quindi il volume ed il peso del singolo provino è stato possibile ricavare la densità, applicando la formula:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (6.1)$$

Note, dunque, le masse e le dimensioni caratteristiche di ogni singolo provino, riportate nella tabella 6 è stato possibile calcolare la relativa densità. Dove:  $\rho$  è la densità del provino [kg/m<sup>3</sup>],  $m$  è la massa [kg] e  $V$  è il volume del singolo provino [m<sup>3</sup>].

Infine, per uniformare il risultato per ogni formulazione è stata calcolato prima il peso medio e successivamente la densità media (Tab. 6)

Tabella 6. Calcolo di volume, peso e densità media di ogni impasto cementizio

Campioni		a	b	h	V [cm <sup>3</sup> ]	m[g]	$\rho$ [kg/cm <sup>3</sup> ]	$\rho$ media [kg/cm <sup>3</sup> ]
M 28gg	1	80,50	20,20	21,00	34,14	76,08	2,23	
	2	80,50	20,50	20,70	34,16	75,30	2,20	2,22
	3	80,50	20,00	20,70	33,33	74,25	2,23	
	4	80,50	20,30	20,50	33,50	74,27	2,22	
M 7gg	1	80,50	20,70	20,50	34,16	74,86	2,19	
	2	80,50	20,00	20,30	32,68	71,88	2,20	2,20
	3	80,20	20,50	20,50	33,70	74,15	2,20	

## 6 - Materiali e Metodi

	4	80,50	20,40	20,60	33,83	74,73	2,21	
M 15%p	1	80,10	20,10	20,20	32,52	65,25	2,01	2,02
	2	80,30	20,40	20,70	33,91	67,63	1,99	
	3	80,30	20,30	21,50	35,05	70,87	2,02	
	4	80,30	20,20	21,00	34,06	69,46	2,04	
M 30%p	1	80,30	20,00	21,30	34,21	63,22	1,85	1,83
	2	80,50	20,10	20,60	33,33	61,97	1,86	
	3	80,50	20,30	21,60	35,30	64,16	1,82	
	4	80,50	20,50	21,90	36,14	65,36	1,81	
M 15%p MgO	1	80,10	20,50	21,00	34,48	69,05	2,00	1,99
	2	80,00	20,10	21,00	33,77	68,88	2,04	
	3	80,10	20,50	21,30	34,98	68,41	1,96	
	4	80,20	20,50	21,80	34,20	67,10	1,96	
M 30%p MgO	1	80,30	20,40	22,00	36,03	67,18	1,86	1,86
	2	80,40	20,50	21,50	35,44	65,70	1,86	
	3	80,30	20,20	21,10	34,23	63,82	1,87	
	4	80,40	20,40	21,30	34,94	64,51	1,85	
M 15%p PP	1	80,50	20,20	20,90	33,99	67,72	1,99	1,97
	2	80,30	20,70	21,50	35,74	68,47	1,92	
	3	80,40	20,30	21,40	34,93	69,49	1,99	
	4	80,30	20,40	20,70	33,91	67,41	1,99	
M 30%p PP	1	80,40	20,70	22,00	36,61	67,30	1,84	1,84
	2	80,50	20,40	21,50	35,31	65,50	1,86	
	3	80,50	20,40	21,00	34,49	63,68	1,85	
	4	80,50	20,50	21,50	35,48	65,20	1,84	
M 15%p B	1	80,20	20,30	19,50	31,75	66,56	2,10	2,11
	2	80,20	20,30	20,00	32,56	68,57	2,11	
	3	80,10	20,30	19,50	31,71	67,15	2,12	
	4	80,30	20,30	20,10	32,76	69,63	2,13	
M 30%p B	1	80,60	20,30	20,50	33,54	66,45	1,98	2,00
	2	80,40	20,20	20,50	33,29	67,69	2,03	

## 6 - Materiali e Metodi

	3	80,50	20,30	20,50	33,50	67,21	2,01	
	4	80,30	20,10	20,70	33,41	66,32	1,99	
M 15%p SiO <sub>2</sub>	1	80,40	20,50	20,10	33,13	65,37	1,97	1,96
	2	80,50	20,30	20,10	32,85	63,82	1,94	
	3	80,40	20,90	20,40	34,28	69,01	2,01	
	4	80,30	20,30	20,10	32,76	62,40	1,90	
M 30%p SiO <sub>2</sub>	1	80,00	20,20	20,00	32,32	59,56	1,84	1,91
	2	79,90	20,00	19,50	31,16	60,42	1,94	
	3	79,90	20,10	20,30	32,60	64,53	1,98	
	4	80,00	20,10	20,60	33,12	62,78	1,89	
M 15%p SiO <sub>2</sub> I	1	80,50	20,20	20,30	33,01	68,04	2,06	2,07
	2	80,40	20,10	20,20	32,64	68,05	2,09	
	3	80,20	20,30	19,50	31,75	66,15	2,08	
	4	80,20	20,20	19,80	32,08	65,43	2,04	
M 30%p SiO <sub>2</sub> I	1	80,50	20,20	21,20	34,47	63,14	1,83	1,90
	2	80,40	20,30	20,90	34,11	65,24	1,91	
	3	80,40	20,20	21,00	34,11	65,21	1,91	
	4	80,50	20,20	21,20	34,47	66,38	1,93	
M 15%p CaO I	1	80,30	20,30	20,00	32,60	67,28	2,06	2,06
	2	80,20	20,20	19,20	31,10	64,24	2,07	
	3	80,30	20,30	19,60	31,95	64,69	2,03	
	4	80,20	20,20	19,80	32,08	66,74	2,08	
M 30%p CaO I	1	80,40	20,20	20,80	33,78	64,83	1,92	1,90
	2	80,20	20,10	20,80	33,53	63,03	1,88	
	3	80,30	20,30	20,50	33,42	62,82	1,88	
	4	80,40	20,20	20,00	32,48	62,78	1,93	
M 15%p MgO I	1	80,20	20,20	19,80	32,08	66,80	2,08	2,06
	2	80,10	20,30	20,40	33,17	67,85	2,05	
	3	80,30	20,20	19,70	31,95	65,00	2,03	
	4	80,30	20,30	19,70	32,11	66,66	2,08	
M 30%p MgO I	1	80,30	20,30	20,60	33,58	65,32	1,95	1,95

	2	80,30	20,30	20,70	33,74	64,71	1,92	
	3	80,40	20,20	20,80	33,78	66,75	1,98	
	4	80,40	20,20	20,60	33,46	65,46	1,96	
M 15%p a/c=0,35	1	80,30	20,20	19,00	30,82	70,56	2,29	2,22
	2	80,30	20,20	20,00	32,44	70,92	2,19	
	3	80,30	20,00	20,50	32,92	73,07	2,22	
	4	80,30	20,20	20,00	32,44	71,18	2,19	
M 30%p a/c=0,35	1	80,20	20,60	20,20	33,37	69,10	2,07	2,07
	2	80,30	20,20	20,30	32,93	67,85	2,06	
	3	80,30	20,20	20,40	33,09	68,30	2,06	
	4	80,30	20,10	20,50	33,09	68,79	2,08	
M15%p SiO <sub>2</sub> +a/c=0,35	1	80,20	20,10	20,00	32,24	65,45	2,03	2,07
	2	80,30	20,20	20,30	32,93	68,68	2,09	
	3	80,30	20,10	20,70	33,41	69,77	2,09	
	4	80,30	20,10	20,50	33,09	68,30	2,06	
M30%p SiO <sub>2</sub> +a/c=0,35	1	80,40	20,30	21,00	34,27	65,88	1,92	1,92
	2	80,20	20,10	20,30	32,72	61,65	1,88	
	3	80,40	20,10	21,30	34,42	66,81	1,94	
	4	80,40	20,20	21,10	34,27	67,31	1,96	

### 6.6.2 Prova a flessione a 3 punti

La prova a flessione a 3 punti consente di valutare la resistenza a flessione del provino prismatico, sottoponendo la superficie inferiore a carico di trazione e la superficie superiore a carico di compressione. Nella parte centrale non è applicato alcuno sforzo di trazione o compressione.

La resistenza a flessione è definita dalla formula:

$$R_F = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (6.2)$$

Dove:

P è il carico a rottura,

$h$  è lo spessore del provino,

$L$  è distanza tra gli appoggi inferiori,

$b$  è la larghezza del provino.

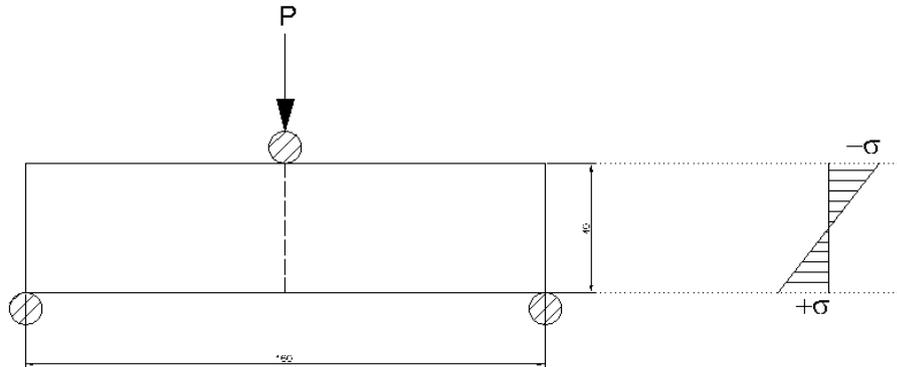


Figura 28. Prova a flessione a 3 punti

La prova di flessione (Fig.28) è stata eseguita presso il laboratorio del dipartimento DISEG del Politecnico di Torino. I campioni sono stati studiati dopo 7 giorni di stagionatura. L'analisi è stata eseguita con una macchina Zwick-Line Z050 a colonna singola con un carico massimo della cella di 1 kN, con un precarico di 5 N e una velocità di prova di 0,01 mm/min. La velocità di carico scelta è molto più bassa rispetto a quella *standard* di 50 N/s, poiché un carico molto veloce contro un materiale poco resistente, come quello analizzato, avrebbe portato a risultati inesatti.

Al fine di effettuare la prova a flessione a 3 punti correttamente, è stato necessario inserire dei rulli di sostegno inferiori, in acciaio, distanziati 65 mm tra loro ed un rullo superiore, posizionato esattamente in mezzera del provino. Quest'ultimo è stato posizionato ponendo le facce lisce del provino a contatto con i rulli, come mostrato in figura 29.

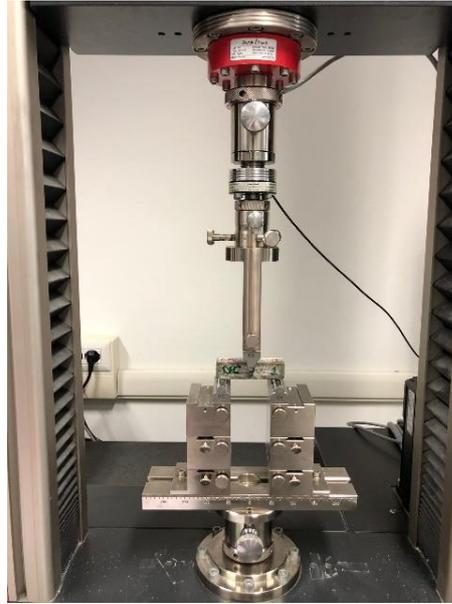


Figura 29. posizionamento del provino nella Zwick-Line Z050 per la prova a flessione

### 6.6.3 Prova a compressione

La prova a compressione permette di determinare il legame tensione-deformazione della malta, dal quale si ricava il valore della sua resistenza a compressione. La prova viene effettuata imponendo degli spostamenti crescenti e misurando le forze corrispondenti. La resistenza a compressione viene calcolata con la formula seguente:

$$R_c = \frac{P}{A} \quad (6.3)$$

Dove:

P è il carico massimo [N]

A è la sezione resistente [mm<sup>2</sup>]

La prova a compressione è una prova distruttiva, che porta dunque alla rottura del provino. Le modalità di rottura variano in funzione della forma del provino. Per tale prova sono stati utilizzate le due metà provenienti dalla precedente prova a flessione. La prova a compressione viene svolta su provini cubici, motivo per cui una delle due metà del provino ottenute dalle precedenti prove di flessione è stata utilizzata per valutare la resistenza a compressione.

In questo caso le tensioni tangenziali che nascono per attrito tra provino e piastra del macchinario di prova portano ad una rottura a doppia piramide, meglio conosciuta come rottura a clessidra, come mostrato in figura 30. [33]

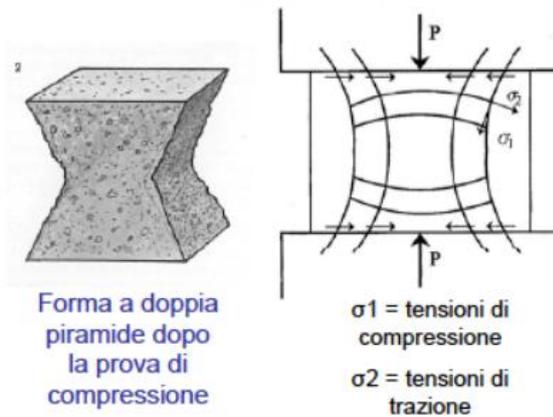
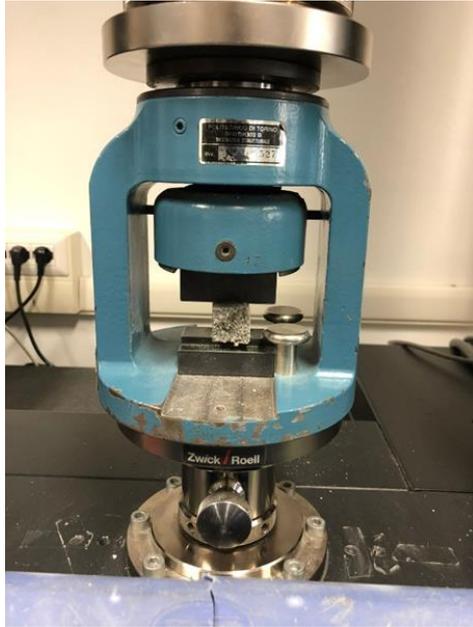


Figura 30. Forma a clessidra del provino dopo la prova a compressione e tensioni agenti

Le prove di compressione sono state eseguite, seguendo la normativa UNI EN 1015-11:2007, presso il laboratorio del dipartimento DISEG del Politecnico di Torino. L'analisi è stata eseguita con una macchina Zwick-Line Z050, la medesima della prova a flessione, ma con un carico di cella di 50 kN, un precarico di 30 N e una velocità di prova di 0,5 mm/min. Il provino è stato posizionato in modo tale che le facce lisce fossero a contatto con i fermi della macchina ed è stato centrato manualmente per permettere una corretta riuscita della prova (Fig.31).



*Figura 31. Posizionamento del provino nella Zwick-Line Z050 per prova a compressione*

Per la gestione di entrambe le prove (flessione e compressione) è stato utilizzato il software TestXpert II. I risultati ottenuti, di resistenza a flessione e compressione, sono stati ricavati come media di quattro misurazioni effettuate sui quattro provini inerenti ad un solo impasto cementizio.

#### **6.6.4 Caratterizzazione ottica**

Al fine di interpretare meglio i risultati ottenuti, è stata svolta un'indagine microstrutturale con l'aiuto di uno stereomicroscopio Leica EZ4 W, mostrato in figura 32.

Tale indagine ha permesso di valutare l'adesione interfacciale tra l'aggregato plastico e il cemento nella malta.



*Figura 32. stereomicroscopio Leica EZ4 W*

Per osservare correttamente i provini è stato necessario tagliare al centro i campioni, tramite l'utilizzo di un disco diamantato all'interno di una macchina da taglio (BRILLANT 220), mostrata in figura 33, e accuratamente lucidati meccanicamente con carta al carburo di silicio di grana 400.



*Figura 33. Macchina da taglio (BRILLANT 220)*

## Capitolo 7

# Risultati

### 7.1 Analisi dei risultati

Nel presente studio sono stati caratterizzati meccanicamente solamente campioni con tempo di maturazione di 7 giorni, nonostante da normativa si riscontrino proprietà migliori con tempi di maturazione di 28 giorni. Il motivo di tale scelta è legato ad un fattore di tempistiche. Difatti, per poter effettuare un numero maggiore di prove e di impasti differenti, un tempo di maturazione di 28 giorni avrebbe comportato uno studio lungo e con pochi risultati. I provini additivati con plastica, quindi, sono stati caratterizzati meccanicamente dopo 7 giorni di maturazione. In questo modo è stato possibile studiare più campioni con l'intento di trovare quello che raggiungesse le proprietà meccaniche ottimali.

Il tempo di maturazione e di conseguenza la resistenza di un campione dipende dal rapporto a/c, dall'idratazione, dalle condizioni ambientali e dal *mix design*.

#### 7.1.1 Risultati prova a flessione

I dati acquisiti durante la prova di flessione a 3 punti, effettuata sui provini prismatici, hanno permesso di determinare i grafici forza-spostamento; dove la forza (*standard force*), ovvero il carico applicato nella sezione di mezzeria, viene misurata in Newton, mentre lo spostamento (*deformation*) viene misurato in millimetri. Viene rappresentato un unico grafico (Fig.34 e Fig.35) a titolo esemplificativo che mette insieme le curve caratteristiche di ogni tipologia di malta.

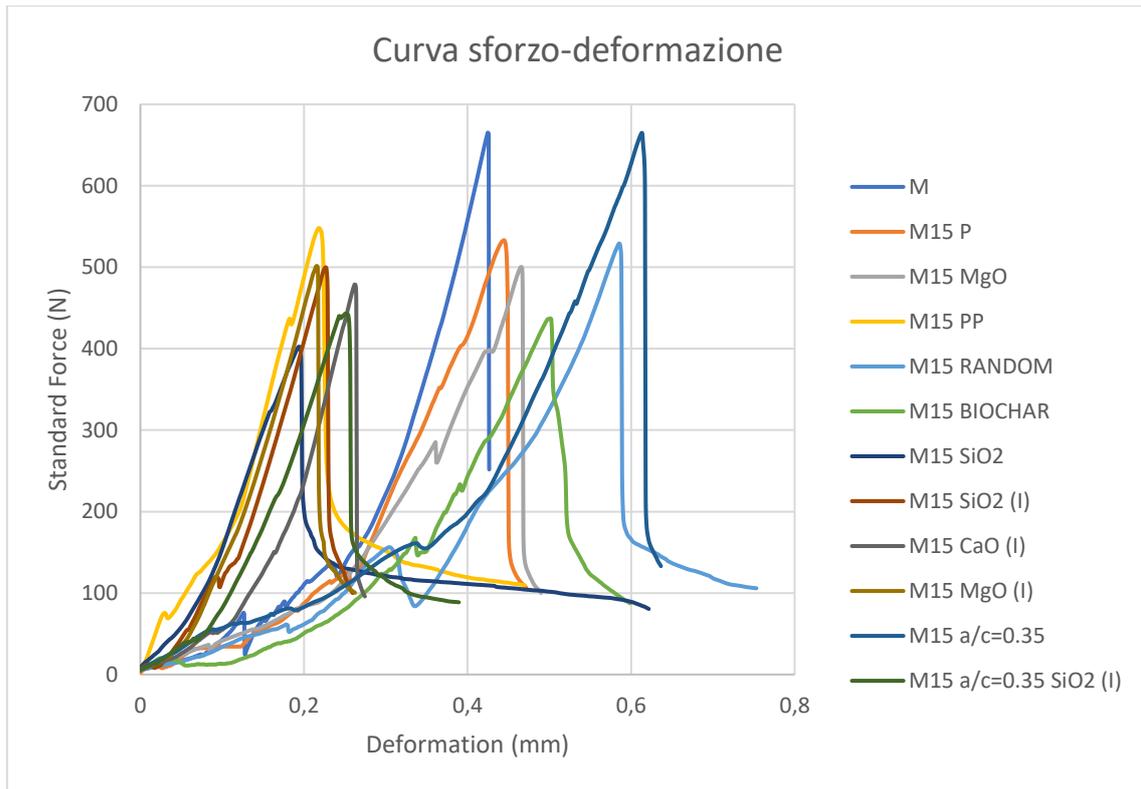


Figura 34. Curva sforzo-deformazione per provini additivati con il 15% di plastica

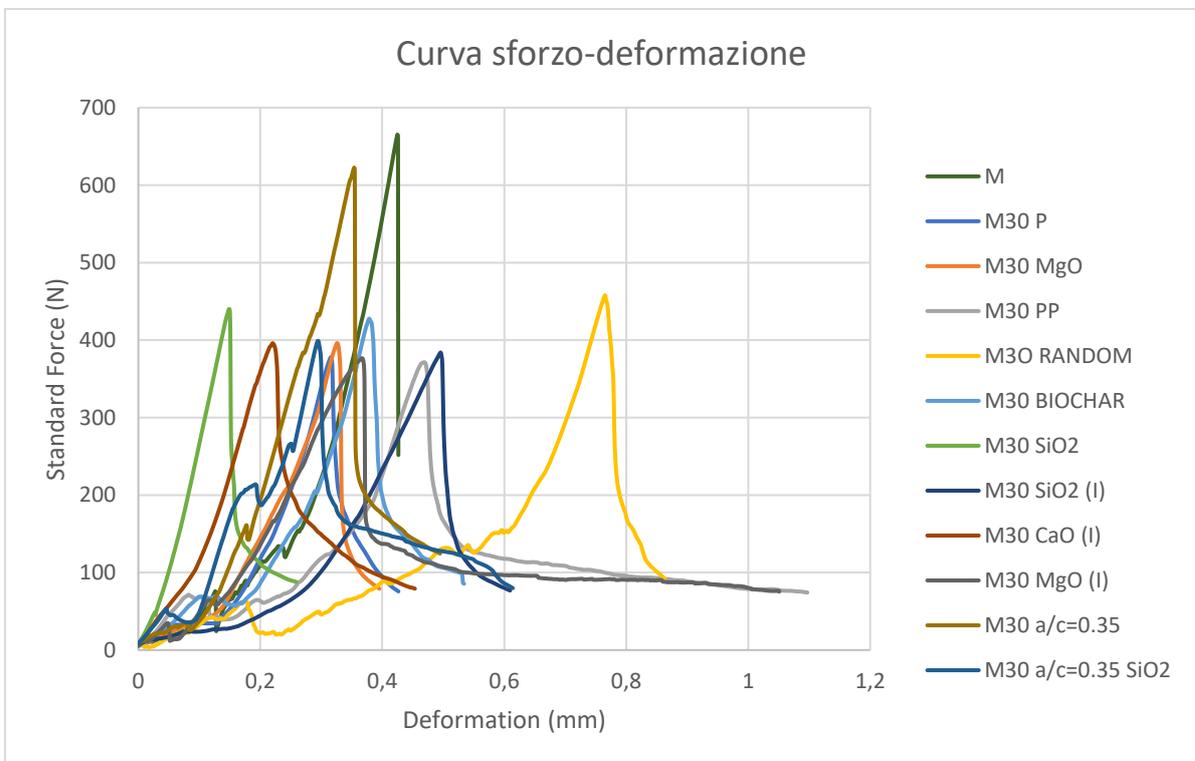


Figura 35. Curva sforzo-deformazione per provini additivati con il 30% di plastica

Dai valori di forza e spostamento è stato possibile ricavare il valore del carico nella mezzeria del provino, ovvero il carico massimo, riportato nelle tabelle 7 e 8.

Tabella 7. Carico massimo (MPa) di provini contenenti il 15% in volume di plastica con differenti additivi

<b>campioni con il 15% di plastica</b>	<b>max stress (MPa)</b>
M 7gg	7,30
M 15%plastica	5,68
M 15%plastica+MgO	4,90
M 15%plastica+fibre PP	5,49
M 15%plastica random	5,81
M 15% plastica+biochar	5,36
M 15%plastica+SiO <sub>2</sub>	4,74
M 15%plastica+SiO <sub>2</sub> (I)	5,65
M 15%plastica+CaO (I)	5,88
M 15%plastica+MgO (I)	5,49
M 15%plastica a/c=0,35	7,52
M 15%plastica+SiO <sub>2</sub> a/c=0,35 (I)	5,65

Tabella 8. Carico massimo (MPa) di provini contenenti il 30% in volume di plastica con differenti additivi

<b>Campioni con il 30% di plastica</b>	<b>max stress (Mpa)</b>
M 7gg	7,30
M 30%plastica	4,09
M 30%plastica+MgO	4,01
M 30%plastica+fibre PP	4,19
M 30%plastica random	4,81
M 30% plastica+biochar	5,05
M 30%plastica+SiO <sub>2</sub>	4,39
M 30%plastica+SiO <sub>2</sub> (I)	4,29
M 30%plastica+CaO (I)	4,81
M 30%plastica+MgO (I)	4,29
M 30%plastica a/c=0,35	6,76
M 30%plastica+SiO <sub>2</sub> a/c=0,35 (I)	4,53

Segue un confronto grafico tra i diversi provini in relazione al carico massimo nella figura 36 e nella figura 37, rispettivamente per provini addizionati con il 15% ed il 30% di plastica in sostituzione all'aggregato naturale.

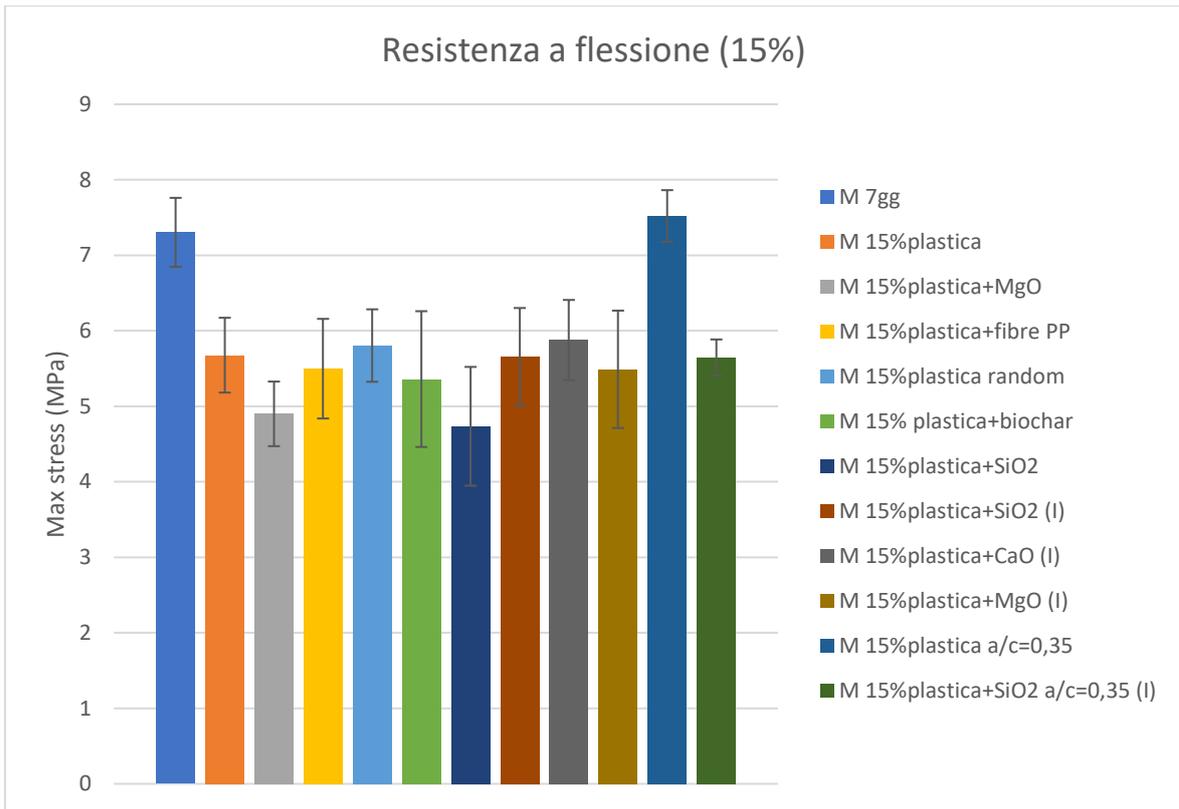


Figura 36. Confronto dei valori di resistenza a flessione di provini additivati con il 15% in volume di plastica

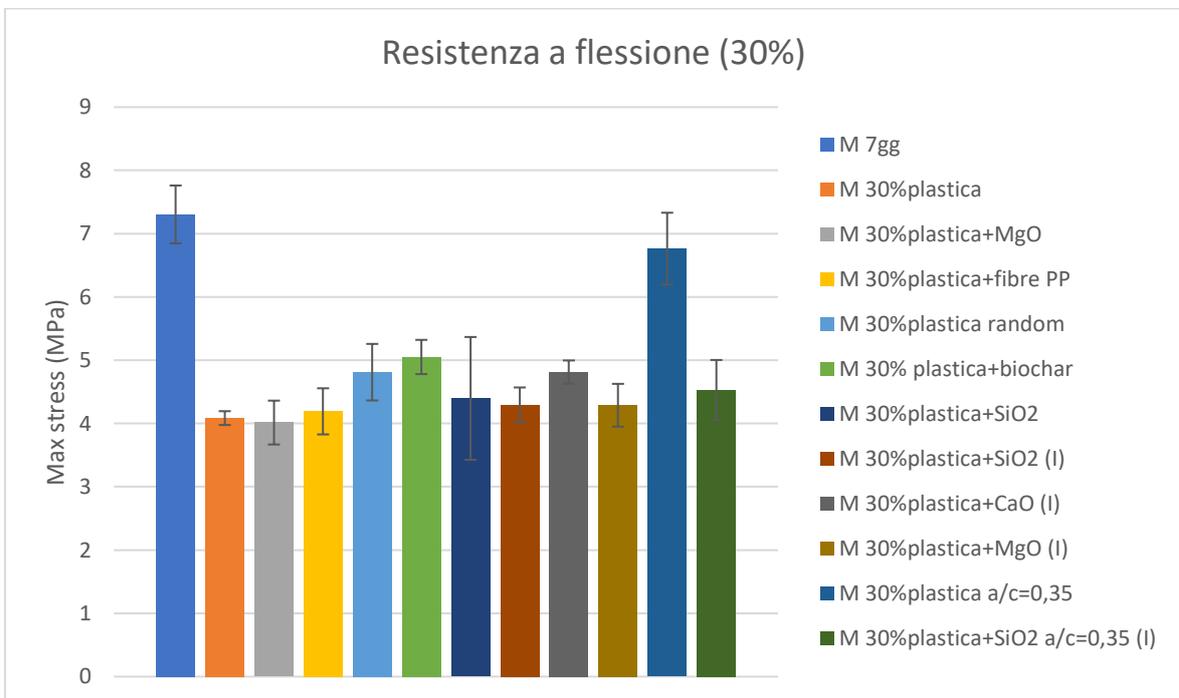


Figura 37. Confronto dei valori di resistenza a flessione di provini additivati con il 30% in volume di plastica

Dai grafici si evince che l'aggiunta di sola plastica in parziale sostituzione all'aggregato fine provoca una diminuzione della resistenza a flessione. Nello specifico, la riduzione della resistenza a flessione per una sostituzione del 15% è di circa il 20%, mentre per una sostituzione del 30% raggiunge valori molto più alti, circa il 44%.

Di contro, i migliori risultati, ovvero quelli che si avvicinano di più alle proprietà di resistenza a flessione di una malta *standard* con tempo di stagionatura 7 giorni, vengono ottenuti con una sostituzione di plastica del 15%, quando il rapporto acqua/cemento viene ridotto ad un valore di 0,35. Difatti, a parità di cemento è più resistente un cemento contenente minor quantità d'acqua. L'aggiunta di altri additivi, quali biochar, ossido di calcio, ossido di magnesio, biossido di silicio e fibre di polipropilene, non ha portato a risultati soddisfacenti, ma ha comunque aumentato seppur di poco la resistenza a flessione del campione additivato con plastica.

### **7.1.2 Risultati prova a compressione**

I dati acquisiti durante la prova a compressione, effettuata su provini cubici, hanno permesso di determinare i grafici forza-deformazione; dove la forza (*standard force*), ovvero il carico applicato dal macchinario, viene misurato in Newton, mentre lo spostamento (*deformation*) viene misurato in millimetri.

L'andamento tipico di una curva sforzo deformazione di un campione cementizio sottoposto a compressione è di tipo non lineare. Nello specifico, si distinguono tre tratti. Il tratto iniziale, fino ad un carico pari al 40% di quello di rottura, presenta un andamento elastico lineare, poiché nella fase iniziale l'incremento di carico non influisce sulle microfessure che vi sono all'interno della malta. Il tratto intermedio, con carico compreso tra il 40% e l'85% del carico di rottura, mostra un andamento non lineare, poiché l'incremento del carico determina la propagazione delle cricche e la riduzione della rigidità. Nell'ultimo tratto, con carico maggiore dell'85% del carico di rottura, si assiste alla rottura del provino; in questa fase le

cricche si propagano sotto carico costante. Segue poi un tratto decrescente in cui la forza resistente si riduce con il crescere della deformazione. [33]

Dai valori di forza e spostamento è stato possibile ricavare il valore del carico di rottura, riportato nelle tabelle 9 e 10. Noto quest'ultimo è stato fatto un confronto fra i vari campioni.

*Tabella 9. Carico di rottura (MPa) di provini contenenti il 15% in volume di plastica con differenti additivi*

<b>campioni con il 15% di plastica</b>	<b>Compression stress (MPa)</b>
M 7gg	37,93
M 15%plastica	24,23
M 15%plastica+MgO	19,83
M 15%plastica+fibre PP	23,52
M 15%plastica random	29,94
M 15% plastica+biochar	31,46
M 15%plastica+SiO <sub>2</sub>	26,35
M 15%plastica+SiO <sub>2</sub> (I)	31,15
M 15%plastica+CaO (I)	30,83
M 15%plastica+MgO (I)	28,73
M 15%plastica a/c=0,35	36,41
M 15%plastica+SiO <sub>2</sub> a/c=0,35 (I)	26,38

*Tabella 10. Carico di rottura (MPa) di provini contenenti il 30% in volume di plastica con differenti additivi*

<b>Campioni con il 30% di plastica</b>	<b>Compression stress (MPa)</b>
M 7gg	37,93
M 30%plastica	19,26
M 30%plastica+MgO	14,81
M 30%plastica+fibre PP	15,90
M 30%plastica random	20,82
M 30% plastica+biochar	27,51
M 30%plastica+SiO <sub>2</sub>	31,39
M 30%plastica+SiO <sub>2</sub> (I)	21,45
M 30%plastica+CaO (I)	21,62
M 30%plastica+MgO (I)	22,03
M 30%plastica a/c=0,35	34,13
M 30%plastica+SiO <sub>2</sub> a/c=0,35 (I)	19,61

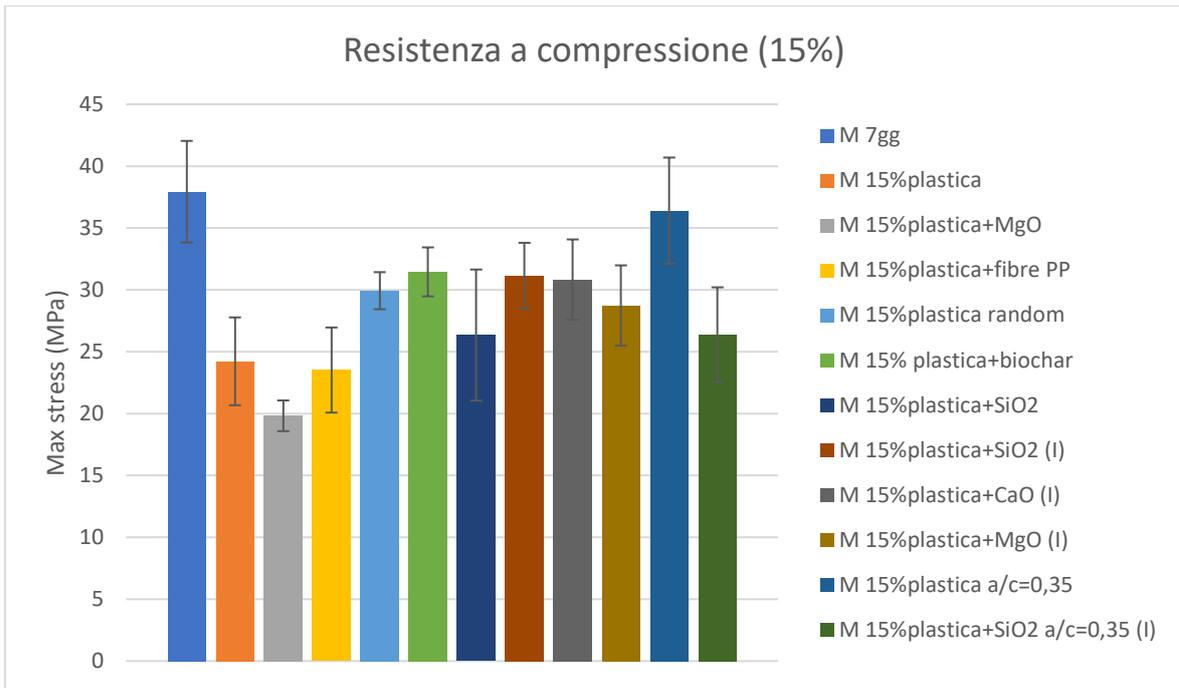


Figura 38. Confronto dei valori di resistenza a compressione di provini additivati con il 15% in volume di plastica

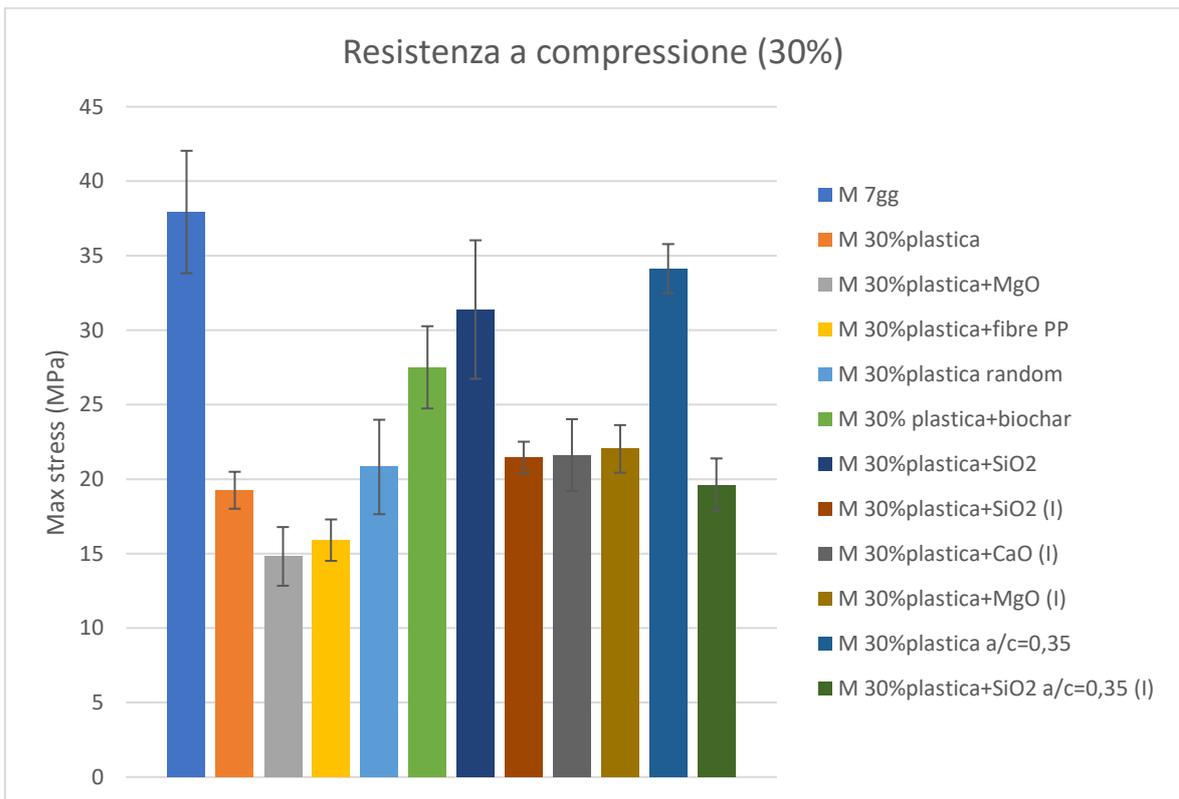


Figura 39. Confronto dei valori di resistenza a compressione di provini additivati con il 30% in volume di plastica

Come evidenziato dai grafici (Fig.38-39), è possibile riscontrare che l'aggiunta di plastica provoca anche nel caso della resistenza a compressione, una diminuzione della stessa. La riduzione della resistenza a compressione per provini contenenti il 15% in volume di sabbia sostituita con rifiuti plastici, ha presentato un calo del 36%. Per i provini aventi una sostituzione del 30% si è raggiunto un calo quasi del 50%.

Per i provini additivati con il 15% in volume di plastica, l'aggiunta di additivi come MgO, CaO, SiO<sub>2</sub>, biochar e fibre di PP ha fornito risultati simili alla malta contenente solo rifiuti plastici. I risultati migliori sono stati ottenuti, così come per la flessione, con una riduzione del rapporto acqua/cemento. Per i provini additivati con il 30% in volume di plastica, ottimi risultati sono stati raggiunti con l'aggiunta di SiO<sub>2</sub>.

Un potenziamento della resistenza a compressione in una miscela cementizia che contiene SiO<sub>2</sub> è possibile a causa degli effetti chimici e fisici forniti dal SiO<sub>2</sub>. Di solito, l'effetto chimico è in gran parte dovuto alla reazione pozzolanica tra l'idrossido di calcio prodotto dall'idratazione del cemento Portland e la silice amorfa presente in SiO<sub>2</sub> che produce un calcio-silicato-idrato secondario. L'effetto fisico (riempitivo) è dovuto all'impallaggio denso della malta a causa delle particelle fini di polvere di SiO<sub>2</sub>. Le particelle di SiO<sub>2</sub> di solito riempiono gli spazi tra i grani di cemento; questo è il motivo principale per cui i provini con biossido di silicio presentano una resistenza a compressione maggiore rispetto ad altre miscele. [34]

L'additivazione del mix polimerico, dunque, in diverse percentuali in volume (15-30%) in sostituzione alla sabbia, come preventivato ha portato a dei peggioramenti in termini di resistenza a flessione e compressione. Tale peggioramento è imputabile a due differenti fattori:

- la differenza di proprietà meccaniche e fisiche tra l'aggregato naturale e il sostituto plastico,
- le differenti interazioni chimiche che gli aggregati naturali o i sostituti plastici hanno con il cemento.

La plastica come precedentemente trattato nel paragrafo 4.3 del capitolo 4, presenta modulo di Young di pochi GPa, al contrario della sabbia che ha un modulo di Young di diverse decine di GPa e risulta avere una resistenza meccanica molto più bassa. In più, il suo coefficiente di espansione termica è molto più alto (circa un ordine di grandezza), rispetto alla sabbia. La sabbia, inoltre, quando viene utilizzata negli impasti per malte *standard* interagisce bene chimicamente con la superficie del cemento; questo avviene perché entrambi sono polari e ciò permette una buona adesione superficiale, che si traduce in buone prestazioni meccaniche grazie ad un'interfaccia molto più forte.

La composizione chimica dei rifiuti plastici, invece, differisce ampiamente da quella degli aggregati naturali, poiché la plastica è composta da composti organici che hanno una polarità molto più bassa e quindi non possono generare legami idrogeno con il cemento. Di conseguenza, la bassa adesione dell'interfaccia tra cemento e plastica si traduce in una perdita di proprietà meccaniche. [35]

Dai risultati ottenuti calcolando la densità di ogni impasto, si desume come la sostituzione degli aggregati naturali con aggregati plastici porta ad una riduzione della densità della malta. Il motivo di questa riduzione è riconducibile al peso inferiore che caratterizza l'aggregato plastico rispetto all'inerte naturale. Difatti, all'aumentare della percentuale di plastica additivata, a causa della bassa densità della plastica, diminuisce il peso unitario delle miscele cementizie. La densità di una malta è funzione della quantità e della densità dell'aggregato, del contenuto d'acqua e cemento ed anche della quantità di aria che rimane intrappolata durante il processo di *mix design*.

Inoltre, aumentando il quantitativo di plastica inserito nell'impasto, aumenta anche il contenuto di aria, che, come detto, riduce la densità della miscela cementizia. [36]

## 7.2 Analisi dei risultati tramite stereomicroscopia

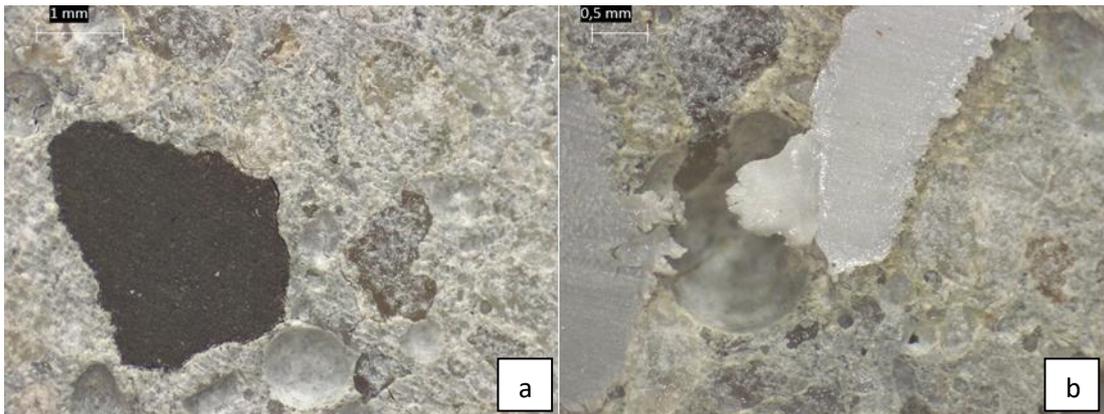


Figura 40. Immagini ottenute con stereomicroscopio Leica EZ4 W di a) provino con il 15% in volume di plastica, fattore di scala 1 mm, b) provino con il 30% in volume di plastica, fattore di scala 0,5 mm

Tramite le immagini ottenute con il microscopio ottico a differenti ingrandimenti è stato possibile osservare meglio quanto appena descritto. Per bassi contenuti di plastica (Fig. 40a), si osservano delle crepe fra additivi di natura plastica e matrice cementizia, queste sono dovute alle diverse proprietà fisiche, che provocano una scarsa resistenza interfacciale fra i due componenti.

Per alti contenuti di plastica (Fig. 40b), invece, vi è un aumento del contenuto d'aria. Questo incremento può essere dovuto alla natura non polare degli aggregati plastici e alla loro capacità di intrappolare aria all'interno della loro struttura superficiale frastagliata. Difatti, nel momento in cui si aggiunge l'aggregato plastico alla pasta cementizia, la plastica, essendo non polare, respinge l'acqua ed attira verso di sé l'aria.

Tale porosità può essere frutto anche del fatto che gli aggregati plastici a causa della loro natura idrofoba tendono ad aggregarsi fra loro, provocando una bassa adesione interfacciale con il cemento. L'effettiva presenza di grandi porosità per malte additivate con percentuali elevate di plastica (30%), è confermata dal calcolo della densità. Nel paragrafo 6.6.1 del capitolo 6, è possibile notare come per alte sostituzioni plastiche la densità diminuisce ulteriormente per via della formazione di pori aggiuntivi. [35]

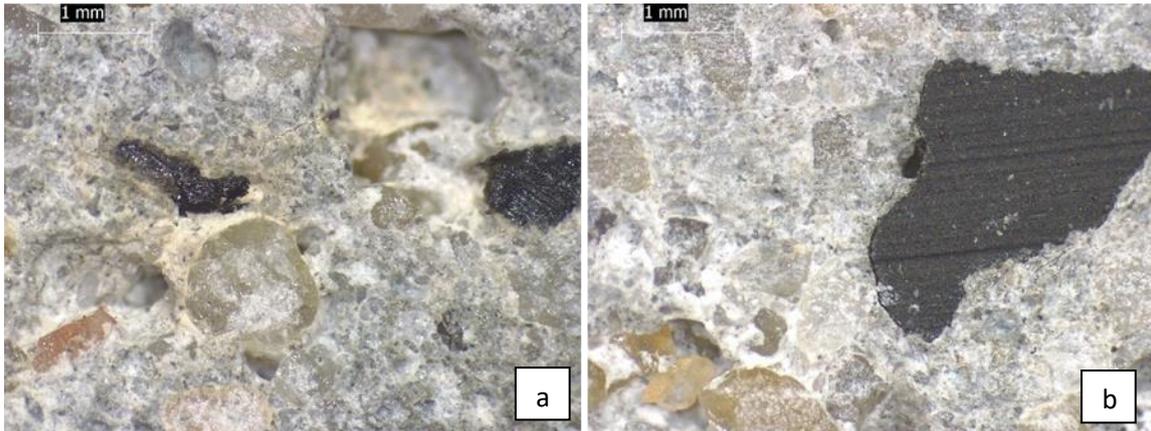


Figura 41. Immagini ottenute con stereomicroscopio Leica EZ4 W di a) provino con il 15% in volume di plastica additivato con MgO, fattore di scala 1 mm, b) provino con il 30% in volume di plastica additivato con MgO, fattore di scala 1 mm

Per ovviare a tali problemi, è stato inserito nella miscela un agente espandente (MgO), che provoca un rigonfiamento della matrice cementizia impedendo alle particelle del mix polimerico di muoversi.

Purtroppo, anche in questo caso, i risultati ottenuti non sono stati soddisfacenti, bensì hanno portato ad un ulteriore peggioramento delle proprietà meccaniche, ciò probabilmente è accaduto poiché l'ossido di magnesio non ha avuto il tempo necessario per reagire con l'acqua, formando il suo idrossido. Le immagini (Fig.41), con medesimo ingrandimento, mostrano difatti la scarsa adesione fra plastica e matrice cementizia e la presenza di porosità. È stato proposto, allora, di inserire fibre di polipropilene per aumentare la resistenza a flessione del provino, poiché, come trattato nel paragrafo 6.5.4 del capitolo 6, esse, una volta che il provino raggiunge il carico massimo di rottura, diventano le principali responsabili della resistenza. Le resistenze a flessione e a compressione hanno mostrato dei miglioramenti rispetto all'impasto con agente espandente e simili a quelli con solo plastica. Attraverso la microscopia è stata osservata la presenza di porosità e di crepe all'interfaccia tra plastica e matrice cementizia, questa è una chiara indicazione della scarsa adesione, dovuta alle differenti proprietà fisiche dei due componenti (Fig.42).

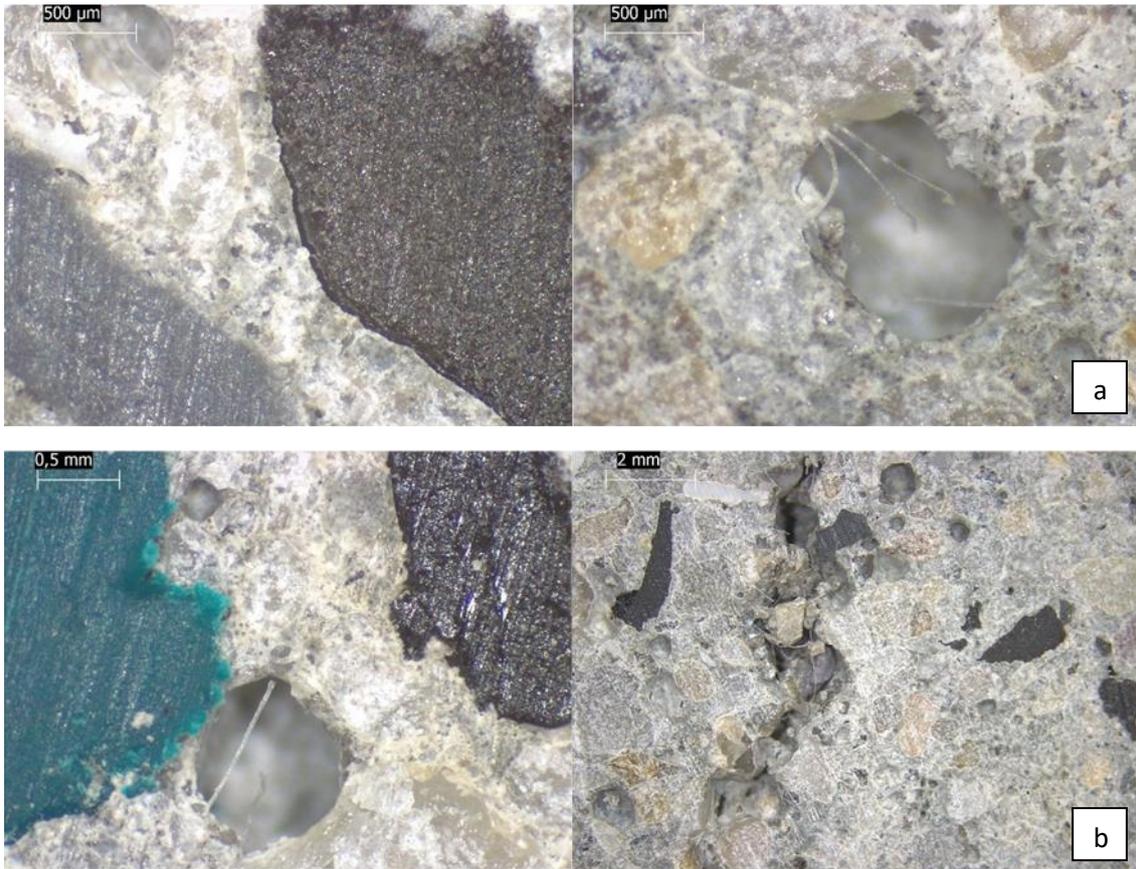


Figura 42. Immagini ottenute con stereomicroscopio Leica EZ4 W di a) provino con il 15% in volume di plastica additivato con fibre di PP, fattore di scala 500 µm, b) provino con il 30% in volume di plastica additivato con fibre di PP, fattore di scala 0,5 mm e 2mm

Successivamente, nonostante da normativa fosse necessario inserire plastica e sabbia con una determinata distribuzione granulometrica, è stato ipotizzato di utilizzare una distribuzione randomica della granulometria, ciò ha portato a medesimi o addirittura migliori risultati dei provini ottenuti con granulometria fissata. I provini a seguire sono stati realizzati seguendo questa logica.

In seguito, l'impasto cementizio è stato additivato con biochar, che avrebbe dovuto ridurre le porosità e migliorare le prestazioni meccaniche del provino.

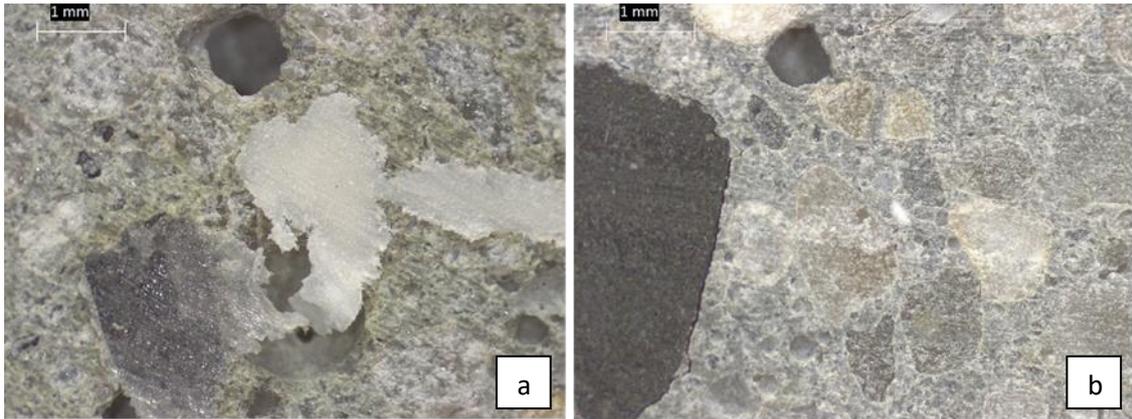


Figura 43. Immagini ottenute con stereomicroscopio Leica EZ4 W di a) provino con il 15% in volume di plastica additivato con biochar, fattore di scala 1mm, b) provino con il 30% in volume di plastica additivato con biochar, fattore di scala 1mm

Come è possibile osservare dalle immagini, (Fig.43) effettivamente la porosità si è ridotta, ma non del tutto. Nonostante ciò, i risultati a flessione dei provini con biochar, sia in percentuale del 15% che del 30%, hanno mostrato elevati miglioramenti in termini di resistenza a compressione e comportamenti simili alla malta con plastica senza additivi.

La sperimentazione è evoluta ipotizzando l'inserimento di biossido di silicio. Svartati testi in letteratura asseriscono come l'uso di fumo di silice, che si stabilizza fra i granuli di cemento, ottimizzi la cosiddetta zona di transizione interfacciale, ovvero interfaccia pasta-aggregato e restituisce alla malta migliori prestazioni in termini meccanici e in termini di resistenza alle aggressioni chimiche (M. Colleparidi).

I dati riscontrati con l'aggiunta di  $\text{SiO}_2$  hanno mostrato dei miglioramenti in termini di resistenza a compressione, poiché le particelle di  $\text{SiO}_2$  riempiendo gli spazi tra i grani di cemento hanno ridotto la porosità dell'impasto. Tuttavia, sono stati riscontrati dei peggioramenti in termini di resistenza a flessione, questo è avvenuto in quanto l'utilizzo di additivi in polvere come biossido di silicio, ossido di calcio e ossido di magnesio tendono ad assorbire l'acqua. Di conseguenza se usati in quantità elevate provocano un peggioramento delle proprietà della malta, dovuto ad una non perfetta idratazione.

Come descritto nel paragrafo del *mix design*, è stato quindi ipotizzato di utilizzare gli ossidi appena citati in piccole quantità al fine di ottenere solo benefici attraverso la loro aggiunta. Inoltre, per ottenere una migliore adesione, la plastica è stata sottoposta a un processo di

“panatura”, nello specifico è stata spruzzata con dell’acqua e poi ricoperta da polvere di ossido.

Tramite la microscopia è stato possibile osservare in che modo hanno agito gli ossidi nella matrice cementizia.

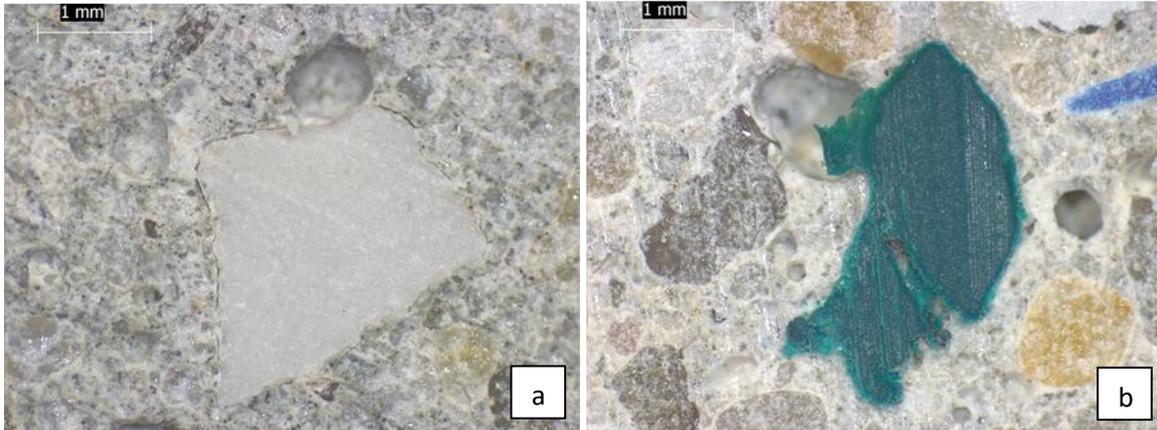


Figura 44. Immagini ottenute con stereomicroscopio Leica EZ4 W di a) provino con il 15% in volume di plastica additivato con  $\text{SiO}_2$ , fattore di scala 1mm, b) provino con il 30% in volume di plastica additivato con  $\text{SiO}_2$ , fattore di scala 1mm.

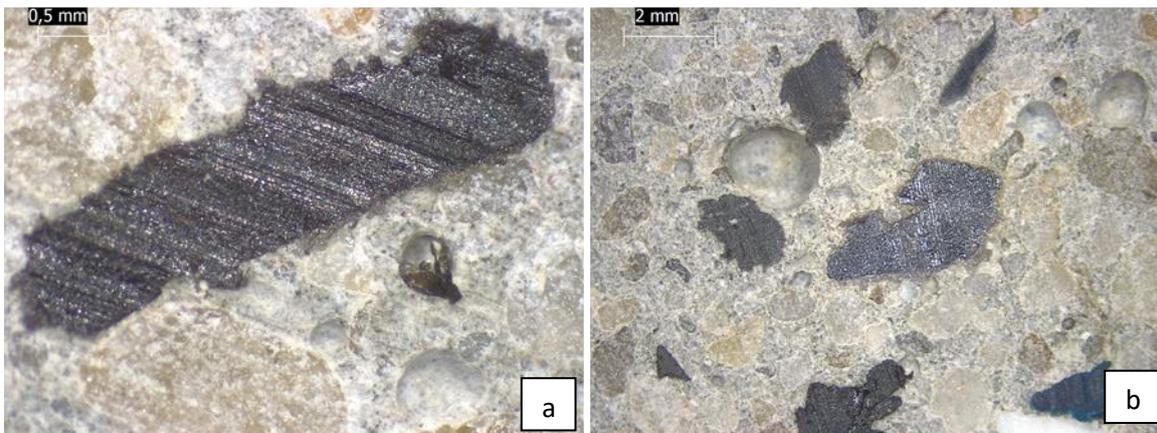


Figura 45. Immagini ottenute con stereomicroscopio Leica EZ4 W di a) provino con il 15% in volume di plastica additivato con  $\text{CaO}$ , fattore di scala 0,5 mm, b) provino con il 30% in volume di plastica additivato con  $\text{CaO}$ , fattore di scala 2mm.

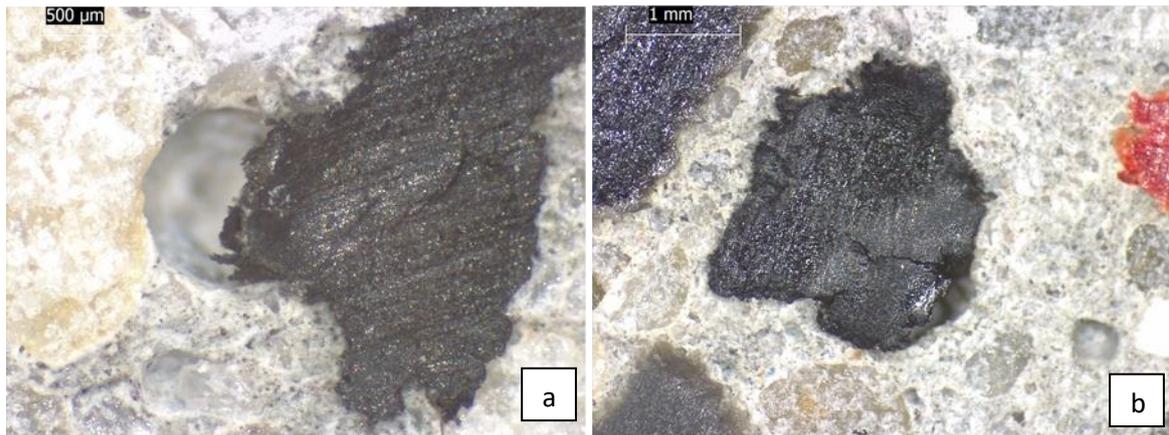


Figura 46. Immagini ottenute con stereomicroscopio Leica EZ4 W di a) provino con il 15% in volume di plastica additivato con MgO, fattore di scala 500  $\mu\text{m}$ , b) provino con il 30% in volume di plastica additivato con MgO, fattore di scala 1mm.

Partendo dall'assunzione per cui la resistenza meccanica a compressione di un cemento dipende, a parità di temperatura, dal rapporto acqua/cemento, la composizione successiva è stata realizzata stabilendo un rapporto più basso, pari a 0,35. Riducendo l'a/c si compensa la caduta di resistenza provocata dalle bolle d'aria. È stato inoltre introdotto un additivo superfluidificante in misura del 1% sul peso del cemento. Tale additivo mantiene basso il rapporto a/c consentendo una migliore lavorabilità della malta ed inoltre consente un innalzamento dei valori di resistenza a compressione.

Difatti, dalle prove effettuate sono stati ottenuti eccellenti risultati riducendo l'a/c. La significativa riduzione dei pori è osservabile tramite le immagini ottenute dalla stereomicroscopia a differenti ingrandimenti. In particolare, è possibile fare un confronto fra la composizione additivata con il 15% di plastica e quella con il 30%, mostrate in figura 47.

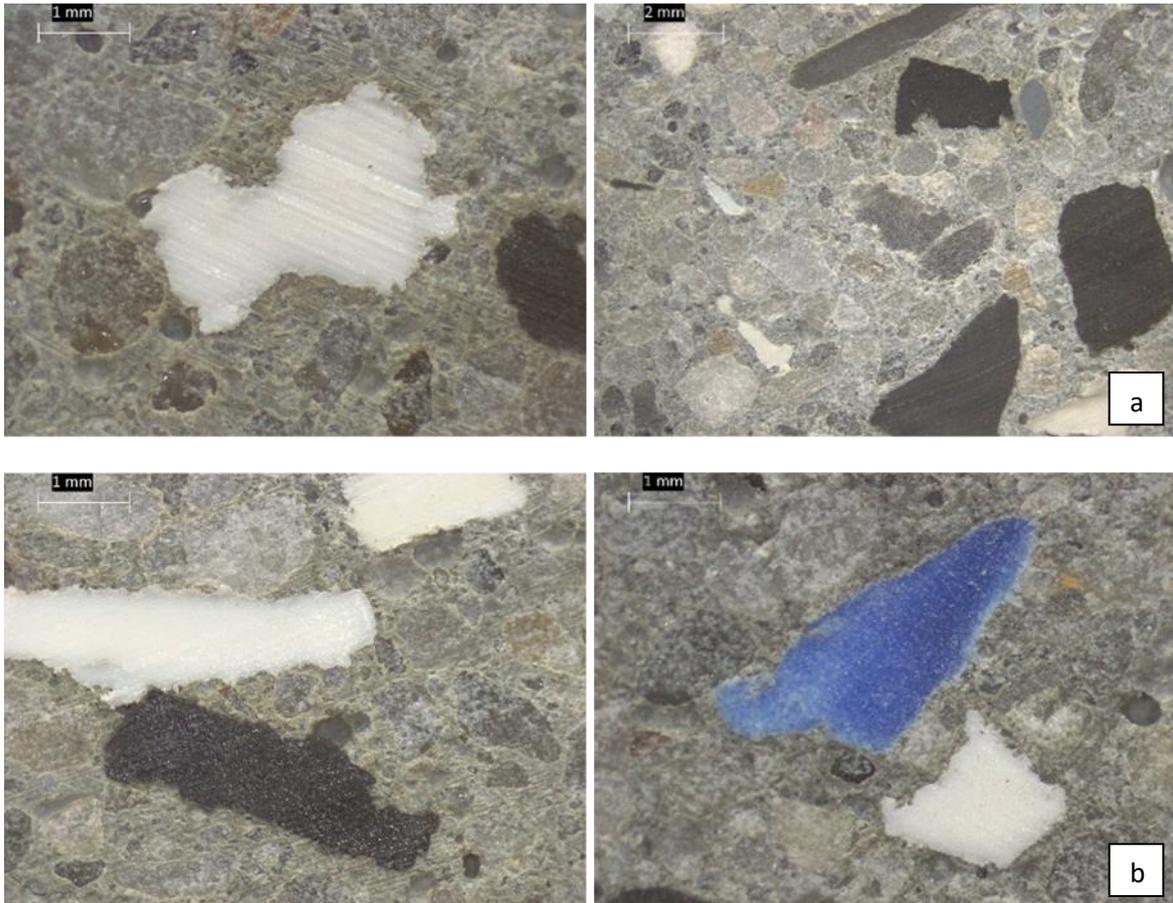


Figura 47. Immagini ottenute con stereomicroscopio Leica EZ4 W di a) provino con il 15% in volume di plastica con a/c pari a 0,35, fattore di scala 1 mm e 2mm b) provino con il 30% in volume di plastica con a/c pari a 0,35, fattore di scala 1mm.

Come si evince dalle immagini, un riempimento della matrice con solo il 15% di plastica e un rapporto acqua/cemento di 0,35 presenta un'elevata riduzione di porosità, confermando la teoria che afferma che al diminuire del rapporto in massa tra acqua e cemento, la porosità capillare diminuisce. È possibile osservare anche una maggiore aderenza del mix polimerico con la matrice cementizia. Con un'ulteriore aggiunta di plastica (30%) la porosità sembra leggermente aumentare, ma rimane efficace l'adesione tra i due componenti.

Di conseguenza, è possibile asserire che il provino additivato con il 15% in volume di plastica in sostituzione all'aggregato fine, con rapporto acqua/cemento pari a 0,35, ha mostrato i risultati migliori in termini di resistenza a flessione e a compressione, rispettivamente 7,52 MPa e 36,41 MPa. È stato allora pensato di combinare l'effetto dovuto alla riduzione del rapporto a/c con quello del biossido di silicio che aveva mostrato dei buoni risultati in termini di resistenza a compressione. Il biossido di silicio è stato inserito all'interno

dell'impasto cementizio tramite il processo di "panatura" ampiamente descritto. I risultati dovuti alla combinazione di questi due effetti, che avrebbero dovuto ridurre le porosità e aumentare l'interazione interfacciale fra plastica e matrice cementizia, sono stati insoddisfacenti. Difatti, effettuando un'analisi visiva tramite le immagini ottenute con microscopia (Fig.48) a differenti ingrandimenti si rilevano porosità più grandi e di forma tondeggianti, probabilmente dovute alla presenza di aria e ad una scarsa adesione tra cemento e plastica.

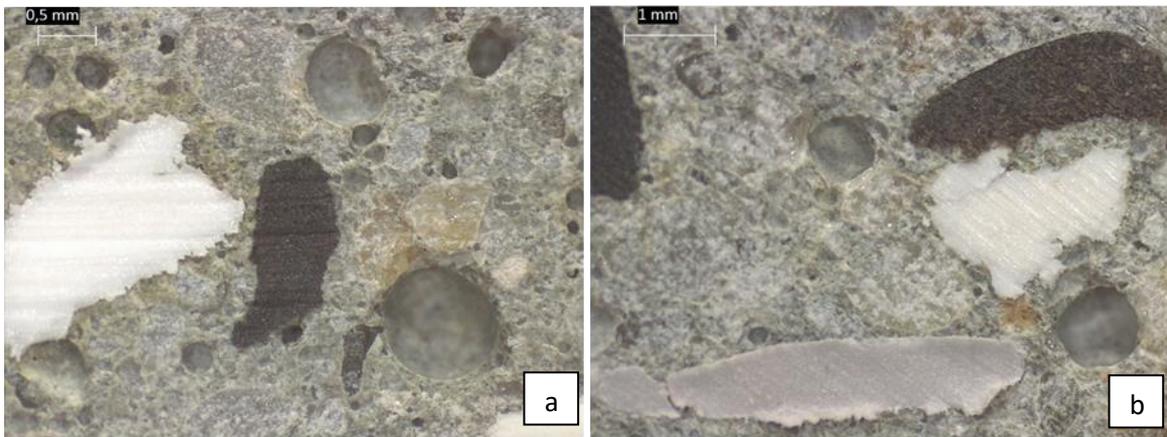


Figura 48. Immagini ottenute con stereomicroscopio Leica EZ4 W di a) provino con il 15% in volume di plastica additivato con  $\text{SiO}_2$  e con  $a/c$  pari a 0,35, fattore di scala 0,5 mm b) provino con il 30% in volume di plastica additivato con  $\text{SiO}_2$  e con  $a/c$  pari a 0,35, fattore di scala 1mm.

## Capitolo 8

# Conclusioni

In questo lavoro è stato dimostrato come sia possibile utilizzare rifiuti plastici per produrre aggregati leggeri, da inserire in sostituzione parziale all'aggregato fine nelle malte.

Utilizzando un rifiuto plastico, si va incontro a innumerevoli problemi di natura fisico-chimica, che si è cercato di limitare con aggiunta di specifici additivi. L'inconveniente maggiore che si riscontra, utilizzando aggregati di natura plastica, è la loro scarsa bagnabilità e di conseguenza scarsa interazione con la matrice cementizia, a causa della loro idrofobicità.

La scarsa bagnabilità - unita alle basse proprietà che contraddistinguono l'aggregato plastico, alla differente forma e distribuzione granulometrica rispetto alla sabbia - determina una scarsa adesione fra la componente artificiale e quella naturale e rappresenta la causa principale del decremento delle proprietà meccaniche.

Un'adesione ridotta fra aggregato plastico e matrice cementizia genera porosità aggiuntive, provocando una notevole riduzione della resistenza anche con percentuali relativamente basse di plastica.

Al fine di risolvere i problemi derivanti dalla scarsa resistenza meccanica e migliorare le proprietà delle malte trattate, permettendo così un uso più diffuso di questi materiali nell'edilizia, sono stati realizzati diversi impasti. I risultati migliori sono stati ottenuti riducendo il rapporto acqua cemento (pari a 0,35) e additivando la malta con basse percentuali di plastica (15%).

In conclusione, è possibile affermare che le malte con inerti di natura plastica presentano caratteristiche meccaniche inferiori a una malta *standard*, in termini di resistenza a compressione e a flessione, rendendo impossibile il loro utilizzo in applicazioni strutturali. Tuttavia, ciò non toglie la possibilità di utilizzarli nel settore delle costruzioni per strutture che non richiedono grandi resistenze meccaniche, quali massetti o sottofondi.

Inoltre, l'utilizzo della plastica come aggregato riduce la necessità di sfruttare risorse naturali, e provoca una diminuzione della densità della malta.

A causa delle proprietà meccaniche non eccelse, questi materiali hanno trovato scarso impiego nel settore edile. Il problema, però, non risiede soltanto nelle proprietà meccaniche, ma occorre anche considerare l'inserimento nel mercato edilizio di nuovi materiali.

Altro fattore da tenere in considerazione è il costo di produzione relativo alla lavorazione degli scarti plastici da riciclare: quelli utilizzati nella campagna sperimentale derivano dai rifiuti RAEE raccolti da AMIAT e sono stati forniti con pezzatura di elevata variazione granulometrica (dall'ultra fine fino a >2mm), rispetto a quella necessaria per la produzione della malta ( $\leq 2\text{mm}$ ).

Per tale motivo, è stato necessario effettuare un processo di setacciatura, per rimuovere i granuli plastici con dimensioni superiori ai 2 mm e ottenere la granulometria richiesta dalla normativa. Nel contesto delle costruzioni la macinazione e la separazione delle varie frazioni granulometriche comporta un costo di processo ancora difficile da superare.

Nell'attuale contesto - in cui vi è la piena consapevolezza che le risorse naturali non sono infinite - è necessario attuare dei cambiamenti per consentire la sostenibilità dei cicli produttivi e del loro impatto sull'ambiente.

L'analisi degli effetti del trattamento delle malte con additivi plastici - concentrata esclusivamente sulle proprietà meccaniche - non ha, tuttavia, preso in considerazione altre proprietà (quali durezza, proprietà termiche ed acustiche), che potrebbero rivelarsi migliorate.

Questo studio vuole essere un ulteriore contributo ed uno stimolo alla ricerca di nuove soluzioni, per armonizzare le esigenze dell'industria edile, rendendo più efficiente l'innovazione tecnologica, con l'impiego di prodotti che presentano il minor impatto ambientale.

L'auspicio è quello di trovare, con la sperimentazione, la giusta composizione della malta in relazione alle specifiche modalità d'impiego.

# Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Professore Matteo Pavese per la fiducia riposta in me e per avermi dato l'opportunità di partecipare agli studi di questa tesi. Ringrazio Luca per i consigli, gli insegnamenti, la disponibilità e le risate di questi mesi; e Daniel per aver trascorso con me interminabili pomeriggi a testare provini, grazie ai quali ho scoperto un amico su cui poter contare.

Il ringraziamento più grande va alla mia "cresi" family per avermi sostenuta e non avermi mai fatto sentire in difetto, vi voglio bene, siete la mia forza.

Infine, grazie a mia nonna, per essere la mia confidente e una giovane ragazza di 82 anni.

# Bibliografia

- [1] Redazione ANSA, *Giornata Ambiente: Earth overshoot day 2022 è il 28 luglio*, 05 giugno 2022
- [2] L. Brenna, *Cos'è l'Overshoot Day e perché siamo in debito con la Terra*, 20 luglio 2017
- [3] F. Invernardi, *Calcestruzzo, plastica riciclata e raggi gamma: il futuro delle costruzioni secondo il mit*, 27 ottobre 2017
- [4] A.Prota, *L'economia circolare: un'opportunità per ripensare le costruzioni*, Università degli Studi di Napoli Federico II
- [5] BibLus-BIM, *Progettazione integrata: BIM e progettazione strutturale*, 2019
- [6] C. Chaine; A. Hursthouse, B. McLean, I. McLellan, B. McMahon, J. McNulty, J. Miller, E. Viza, *Recycling Plastics from WEEE: A Review of the Environmental and Human Health Challenges Associated with Brominated Flame Retardants*, International journal of environmental research and public health, 2022-01-11, Vol.19 (2), p.766
- [7] Centro di coordinamento RAEE, *Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche*
- [8] O. Shittu, I. Williams, P. Shaw, *Global E-waste management: Can WEEE make a difference? A review of e-waste trends, legislation, contemporary issues and future challenges*, Waste management (Elmsford), 2021-02-01, Vol.120, p.549-563
- [9] R. Wang, Z. Xu, *Recycling of non-metallic fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE): A review*, Waste management (Elmsford), 2014-08, Vol.34 (8), p.1455-1469]
- [10] B. Coppola, L. Courard, F. Michel, L. Incarnato, L. Di Maio, *Investigation on the use of foamed plastic waste as natural aggregates replacement in lightweight mortar*, Composites. Part B, Engineering, 2016-08-15, Vol.99, p.75-83
- [11][https://www.unisalento.it/documents/20152/218139/9\\_2014\\_Polimeri+parte2.pdf/7aabe505-bf08-ca6b-602a-35304287d4f7?version=1.0](https://www.unisalento.it/documents/20152/218139/9_2014_Polimeri+parte2.pdf/7aabe505-bf08-ca6b-602a-35304287d4f7?version=1.0)

- [12] M. Sangermano, slide Polimeri, Scienza e tecnologia dei materiali polimerici A.A. 2018/2019 (Corso di studi in Ingegneria Dei Materiali, Politecnico di Torino).
- [13] Arch. A. Magliocco, slide Il riciclo: la gomma, Principi di Eco-design A.A. 2005/2006 (Corso di studi in disegno industriale).
- [14] Cement Chemistry 2<sup>nd</sup> edition, H.F.W. Taylor. Thomas Telford edition, 1997;
- [15] M. Collepari, *Materiali cementizi*. Hoepli Editore, 1991.
- [16] Engineering concrete, *Porosità e permeabilità del calcestruzzo*
- [17] E. Bandelloni, *Elementi di architettura tecnica*. Cleup, 1991.
- [18] LVH-APA, *Manuale del calcestruzzo*, Provincia autonoma di Bolzano – Alto Adige
- [19] Italcementi, “*Technical Data Sheet i.tech ULTRACEM 52,5 R*,” 2019
- [20] <https://www.standard-sand.com/sables-cen-en-196-1/>
- [21] A. Merlo, L. Lavagna, D. Suarez-Riera, M. Pavese, *Mechanical properties of mortar containing waste plastic (PVC) as aggregate partial replacement*, Case Studies in Construction Materials, 2020-12, Vol.13, p.e00467
- [22] M. Collepari, S. Monosi, *Progressi nella tecnologia delle male da restauro a ritiro compensato*
- [23] L. Coppola, A. Buoso, *il calcestruzzo fibrorinforzato: risultati di una campagna sperimentale su spritz-beton rinforzati con fibre in acciaio, vetro e polipropilene*, Università degli Studi di Bergamo, Dipartimento di Ingegneria
- [24] <https://it.wikipedia.org/wiki/Biochar>
- [25] Yasmine Ravagli, *Il Bio-char per l'architettura sostenibile Produzione di malta a base cementizia con aggiunta di micro/nano particelle derivanti da gassificazione di biomassa*, tesi di laurea magistrale
- [26] EN, N. (2005). Silica Fume for Concrete—Part 1: Definitions, Requirements and Conformity Criteria.
- [27] H. Justenes, “*Accelerated hardening of mortars with idraulic binders of silica fume/lime*”, Nordic Concr. Res., 17, 2/1995, pp. 30-41.

- [28] P. Mehta, O. E. Gjrv, "*Properties of Portland Cement Concrete Containing Fly Ash and Condensed Silica Fume*," Cement and Concrete Research, V. 12, No. 5, pp. 587-595.
- [29] V. Malhotra; V. Ramachandran; R. Feldman; P. Atcin, *Condensed Silica Fume in Concrete*, CRC Press, Inc., Boca Raton, Fla., 221 pp;
- [30] G. G. Carette, V. M. Malhotra, "*Early-Age Strength Development of Concrete Incorporating Fly Ash and Condensed Silica Fume*," Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Other Mineral By-Products in Concrete, Proceedings of the First CANMET/ACI International Conference, SP-79, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 765-784.
- [31] O. Wallevik, "*Practical description of the rheology of fresh concrete*", Symp. Workability and Workability Retention.
- [32] E. Sellevold, "*The Function of Condensed Silica Fume in High Strength Concrete*," Proceedings, Symposium on Utilization of High Strength Concrete, Trondheim, Norway, ISBN. 1987.
- [33] A. Ghersi, *Il cemento armato* (seconda edizione), Dario Flaccovio Editore, 2010.
- [34] O. Damdelen, *Investigation of 30% recycled coarse aggregate content in sustainable concrete mixes*, Construction & building materials, 2018-09-30, Vol.184, p.408-418.
- [35] A. Merlo, L. Lavagna, D. Suarez-Riera, M. Pavese, *Recycling of WEEE Plastics Waste in Mortar: The Effects on Mechanical Properties*, Recycling (Basel), 2021-10-22, Vol.6 (4), p.70
- [36] S. Sgobba, G. Marano, D. Similimeo, A. Fiore *Valutazione della Rc di calcestruzzi con aggregati in gomma da riciclo di pneumatici*