

POLITECNICO DI TORINO  
Collegio di Ingegneria Edile  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

## **Le malte di cemento con inerti polimerici**



**Relatore:**

Professore Alessandro Pasquale FANTILLI

**Candidato:**

Andrea ZEGNA  
232315

Anno accademico 2016/2017

Abstract .....	3
Capitolo 1. Introduzione.....	4
Capitolo 2. L’impatto ambientale delle malte e dei calcestruzzi a base cementizia.....	6
2.1. Calcestruzzo e malte cementizie .....	6
2.1.1. I leganti.....	6
2.1.2. L’acqua d’impasto .....	12
2.1.3. Gli inerti.....	13
2.1.4. Gli additivi.....	14
2.2. Il mercato del cemento: produzione e consumi .....	15
2.3. Consumi energetici e impatto ambientale.....	19
Capitolo 3. Strategie per la riduzione dell’impatto ambientale.....	26
3.1. Cinque regole per la riduzione delle emissioni nella filiera del cemento .....	27
3.1.1. Resource Efficiency .....	28
3.1.2. Energy Efficiency .....	34
3.1.3. Carbon sequestration and reuse .....	36
3.1.4. Product Efficiency.....	38
3.1.5. Downstream .....	44
3.2. Cenni sulla valutazione del ciclo di vita.....	46
3.2.1. Life Cycle Assessment.....	46
3.2.2. Embodied Energy .....	47
3.2.3. Certificazione Enviromental Product Declaration .....	48
Capitolo 4. Sostituzione degli inerti con materiali di rifiuto .....	49
4.1. Materiali polimerici .....	49
4.1.1. Caratteristiche meccaniche .....	51
4.2. Polipropilene .....	53
4.2.1. Riciclaggio e smaltimento materie plastiche .....	55
4.3. Gomma per pneumatici .....	59
4.3.1. Cenni storici.....	59
4.3.2. Gomma naturale e sintetica .....	60
4.3.3. Riciclaggio e smaltimento PFU .....	63
Capitolo 5. La campagna sperimentale .....	66
5.1. Preparazione degli inerti .....	66
5.1.1. Sabbia normalizzata .....	66
5.1.2. Inerti polimerici .....	67

## Indice

5.1.3. Determinazione delle frazioni granulometriche mediante setacciatura .....	68
5.2. Realizzazione dei provini in malta con inerti polimerici.....	76
5.2.1. Sostituzione degli inerti.....	76
5.2.2. Esecuzione dei getti e maturazione .....	83
5.3. Esecuzione delle prove.....	85
5.3.1. Prova a flessione .....	85
5.3.2. Prova a compressione .....	87
5.4. Risultati ottenuti.....	88
Capitolo 6. Analisi eco-meccanica.....	96
6.1. Prestazione ambientale: cenni normativi .....	96
6.2. Eco-mechanical index.....	100
6.2.1. Indice meccanico.....	101
6.2.2. Indice ecologico.....	101
6.3. Analisi eco-meccanica delle diverse tipologie di malte.....	103
6.3.1. Valutazione dell'indice ecologico EI .....	103
6.3.2. Valutazione dell'indice meccanico MI.....	105
6.3.3. Determinazione dell'indice eco-meccanico EMI e considerazioni finali.....	106
Capitolo 7. Conclusioni.....	111
Ringraziamenti .....	113
Fonti .....	114
Indice tabelle e figure.....	117
Allegato: Risultati dei provini errati .....	120

## Abstract

Il calcestruzzo è il secondo materiale più utilizzato al mondo dopo l'acqua: nel 2016 i consumi globali hanno raggiunto 3,97 miliardi di tonnellate. Durante il ciclo produttivo del cemento, a causa della reazione di calcinazione, si emette un elevato quantitativo di anidride carbonica, che contribuisce per circa il 5% alle emissioni di CO<sub>2</sub> globali. È quindi evidente che il settore delle costruzioni dia un notevole contributo all'impatto ambientale delle attività antropiche.

A fronte di ciò, è indispensabile determinare delle soluzioni atte alla riduzione dell'emissioni di anidride carbonica dovute alla filiera del cemento. È possibile pensare a dei miglioramenti del processo produttivo, utilizzando combustibili alternativi, tipologie di forni più prestanti, recuperatori di calore, ma anche sistemi che catturino la CO<sub>2</sub> emessa in modo da impiegarla in altri impianti industriali. Si può inoltre pensare a un miglioramento del prodotto finale, incrementando le prestazioni del cemento così da utilizzarne minori quantità nei manufatti, oppure sostituendo una parte dei componenti del conglomerato cementizio con prodotti di scarto o rifiuti. Nel presente studio si vanno ad analizzare le prestazioni meccaniche ed ecologiche di malte di cemento nelle quali una parte degli inerti è stata sostituita con granuli di polipropilene e di gomma provenienti dalla filiera dei rifiuti riciclati. Sono stati quindi confezionati diversi provini con tipologie di malte contenenti fibre di polipropilene, granuli di polipropilene riciclato e granuli di gomma da pneumatici a fine vita; questi sono poi stati sottoposti a prove di flessione e di compressione.

Le malte confezionate con inerti in polipropilene o in gomma mostrano un'elevata leggerezza e maggiore duttilità della frattura rispetto ai conglomerati tradizionali, consentendo una diminuzione della massa dell'interno edificio e una migliore capacità per le strutture iperstatiche nel dissipare le sollecitazioni plasticamente. Le caratteristiche di resistenza flessionale e a compressione tendono a diminuire compromettendo l'impiego di tali conglomerati per applicazioni strutturali. Per quanto riguarda l'aspetto ecologico, le emissioni di anidride carbonica tendono a diminuire con l'incremento percentuale di inerte sostituito.

## Capitolo 1. Introduzione

Uno dei principali problemi moderni è l'interazione uomo-natura e in particolar modo gli effetti degli interventi antropici sull'ambiente. Circa 800 000 anni fa, secondo quanto scoperto esaminando le bollicine d'aria intrappolate nel ghiaccio, nell'atmosfera erano presenti circa 185 ppm di anidride carbonica che è aumentata a circa 278 ppm all'inizio dell'era industriale del 1700. Da quel momento, a causa dell'operato dell'uomo, la concentrazione di CO<sub>2</sub> ha avuto un incremento più rapido, raggiungendo 336 ppm nel gennaio del 1979 e persino 403 ppm nello stesso mese del 2016. Si ritiene che a fine secolo, si raggiungeranno valori prossimi a 550 ppm [57 e 58]. Si può quindi notare un forte innalzamento del quantitativo di anidride carbonica atmosferica legato sostanzialmente alle attività antropiche che, oltre a ciò, provocano molti altri fenomeni, come l'effetto serra, la desertificazione, l'assottigliamento della fascia di ozono, l'acidificazione o l'eutrofizzazione.

Il calcestruzzo è il secondo materiale più utilizzato al mondo dopo l'acqua, con un consumo stimato di circa 1 metro cubo pro-capite annuo. Secondo alcuni studi condotti sul ciclo di vita di tale materiale si è giunti a concludere che l'85% delle emissioni di anidride carbonica sono dovute alla produzione del cemento, che contribuisce per circa il 5% alle emissioni di anidride carbonica globali [22]. L'elevato impiego del calcestruzzo è legato alle proprietà termo-meccaniche che possiede e alla sua economicità; infatti, risulta essere resistente alle sollecitazioni, duraturo, resistente al fuoco, versatile nell'utilizzo, ha un'elevata inerzia termica e richiede bassa manutenzione. A fronte di un così elevato utilizzo mondiale e dell'impatto ambientale ad esso legato, è indispensabile cercare di intervenire sul ciclo di vita dei conglomerati cementizi, riducendo il consumo di materie prime naturali e di combustibili e diminuendo le emissioni in atmosfera.

Un altro problema mondiale è la gestione dei rifiuti; si passa da Paesi virtuosi in cui si opera il riciclaggio da decenni, ad altri in cui si conferisce tutto in discariche controllate o in termovalorizzatori ad altri ancora in cui il materiale a fine vita viene stoccato malamente e finisce per essere disperso nell'ambiente.

Una possibile risoluzione alle problematiche appena citate in merito al calcestruzzo e ai rifiuti è quella di cercare di utilizzare i prodotti a fine vita all'interno dei conglomerati cementizi. È però evidente che, attualmente, non si è sempre in grado di creare un materiale di qualità con caratteristiche tali da poter essere impiegato in una costruzione. Per questo è stata proposta l'analisi eco-meccanica dai professori Alessandro P. Fantilli e Bernardino Chiaia, una tipologia di valutazione in cui si considerano unitamente le caratteristiche ecologiche e meccaniche del materiale. La presente tesi sperimentale si

## Introduzione

basa proprio sull'analisi eco-meccanica di malte cementizie nelle quali una parte di inerti è stata sostituita con polipropilene o gomma provenienti dalla filiera del riciclo.

Nel seguente elaborato, dopo una breve introduzione su cos'è un conglomerato cementizio, da cosa è costituito, quali sono le principali caratteristiche e come viene prodotto il cemento, si va a parlare del mercato mondiale di tale materiale in quanto l'impatto ambientale di un prodotto è sostanzialmente legato al grado di utilizzo dello stesso. Si sposta poi la trattazione sui consumi energetici e sull'impatto ambientale collegati alla produzione del cemento: il 90% delle emissioni di anidride carbonica sono legate al processo produttivo e si stima che per ogni tonnellata di cemento prodotta si emetta un quantitativo di CO<sub>2</sub> che va da 900 a 1100 kg. Definita l'entità del problema si procede identificando le possibili soluzioni per la riduzione dell'impatto ambientale. Si può pensare a dei miglioramenti del processo produttivo e delle modifiche al prodotto finale. Per quanto riguarda il primo aspetto si tratta dell'utilizzo di combustibili alternativi per il funzionamento dei forni, dell'impiego di materie prime secondarie, del miglioramento del sistema produttivo tramite recuperatori di calore o tipologie di forni più prestanti e della possibilità di catturare e immagazzinare l'anidride carbonica prodotta in modo da evitare l'emissione in atmosfera. Il miglioramento del prodotto finale può essere sostanzialmente attuato mediante due strategie, la prima prevede un incremento prestazionale del cemento, mentre la seconda comporta la sostituzione di una parte dei componenti del conglomerato cementizio, in particolar modo gli inerti e il cemento.

Prima di procedere alla spiegazione di ciò che è stato fatto nel corso della campagna sperimentale in laboratorio, vengono date alcune informazioni propedeutiche sui materiali polimerici e in particolar modo su polipropilene e gomma, definendone le caratteristiche chimico-fisiche e i processi di riciclaggio. Si passa quindi alla presentazione della campagna in laboratorio, descrivendo inizialmente la fase di setacciatura della sabbia e dei polimeri. Conducendo le analisi sulle malte, l'inerte che viene sostituito con i rifiuti riciclati è appunto la sabbia; poiché la procedura seguita è normalizzata, anche l'aggregato deve avere una curva granulometrica standardizzata che deve essere garantita anche durante la sostituzione, per questo è necessario operare la setacciatura. Si tratta poi della realizzazione dei provini, delle prove di flessione e compressione a cui sono sottoposti e dei risultati ottenuti in termini puramente meccanici.

Nella parte finale si verifica se nella normativa vigente sono presenti dei valori minimi ambientali da rispettare, utilizzabili come valore di riferimento per l'analisi eco-meccanica, che viene definita in via teorica prima dell'applicazione alle malte confezionate. L'analisi prevede la definizione di un indice eco-meccanico *EMI* dato dal rapporto tra un indice meccanico *MI* e uno ecologico *EI*. La valutazione di tale indice consente di determinare se il materiale abbia un basso impatto ambientale pur mantenendo elevate caratteristiche meccaniche, tali da consentirne un impiego nelle costruzioni. Per quanto riguarda la valutazione di *EI* si fa riferimento al *carbon footprint* e all'*embodied energy* di ciascuna malta; mentre per l'indice *MI* si considerano le caratteristiche di resistenza, quelle di duttilità e il peso per unità di volume.

## Capitolo 2. L'impatto ambientale delle malte e dei calcestruzzi a base cementizia

Per comprendere meglio qual è l'impatto ambientale delle malte e dei calcestruzzi a base cementizia è necessario, in prima istanza, andare a trattare da cosa sono costituiti tali prodotti e quali sono le fasi di produzione.

### **2.1. Calcestruzzo e malte cementizie**

Il calcestruzzo e le malte cementizie sono una miscela di cemento (legante), acqua di impasto e aggregati che allo stato fresco hanno una consistenza plastica. Tale massa plastica con il tempo si indurisce e, a seconda della quantità percentuale dei singoli componenti, raggiunge caratteristiche litoidi<sup>1</sup> analoghe a quelle di un conglomerato naturale. La miscela può inoltre contenere additivi e aggiunte minerali. La principale differenza tra la malta cementizia e il calcestruzzo è la dimensione granulometrica degli aggregati impiegati; per le malte si utilizzano sabbie con granulometria compresa generalmente tra 0,2 e 3 mm, mentre per i calcestruzzi si impiega anche pietrischetto, pietrisco e ghiaia<sup>2</sup> raggiungendo dimensioni di 30 mm. Di seguito si riportano gli elementi fondamentali alla caratterizzazione dei componenti di calcestruzzi e malte cementizie [2].

#### **2.1.1. I leganti**

I leganti sono prodotti inorganici che si presentano sotto forma di polvere 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.

I leganti maggiormente impiegati sono normalmente costituiti da polveri ottenute da processi di cottura e macinazione di rocce e terre naturali con materiali naturali che devono essere sottoposti unicamente a macinazione, come le pozzolane o il calcare, oppure con sottoprodotti derivanti da processi industriali, che possono presentarsi in polveri, come le ceneri volanti o le microsilici, o in granuli, come le loppe granulate d'alto forno che necessitano quindi di macinazione.

Miscelando i leganti con acqua e aggregati di varie pezzature si possono ottenere impasti di consistenza variabile, spaziando dalle malte ai calcestruzzi, utilizzabili nelle diverse applicazioni del settore delle costruzioni. L'impasto prodotto è in grado di indurire nel tempo, trasformandosi prima, durante la fase di presa, da materiale plastico-fluido a

---

<sup>1</sup> Litoide: Pietroso, simile a pietra. ([www.treccani.it](http://www.treccani.it), 20/09/2017 [32]).

<sup>2</sup> Normalmente al superamento della dimensione di 5 mm si passa da malta a calcestruzzo.

## L'impatto ambientale delle malte e dei calcestruzzi a base cementizia

struttura rigida con volume e geometria ben definita, per poi passare a un irrigidimento della massa che assume le caratteristiche tipiche di un litoide. Come già accennato, tali trasformazioni sono dovute a reazioni chimiche che coinvolgono i costituenti dei leganti, l'acqua e l'anidride carbonica presente l'aria. Tali processi avvengono a temperatura ambiente e possono essere accelerati tramite un aumento di pressione o di temperatura mediante l'impiego di autoclavi, come viene fatto per il confezionamento di elementi prefabbricati o per i blocchi di muratura autoclavati.

I leganti possono essere suddivisi in leganti aerei, per i quali il fenomeno di presa e indurimento dell'impasto avviene alla sola presenza di aria, e leganti idraulici, per i quali l'indurimento avviene se immersi in acqua. Tra i primi sono presenti i gessi e le calce aeree, mentre fanno parte dei leganti idraulici le calce idrauliche, i cementi normali ad alta resistenza e a rapido indurimento, i cementi per impieghi particolari e i cementi speciali. Di seguito verranno date alcune caratteristiche in merito ad entrambe le tipologie di leganti. Per quanto riguarda la resistenza al dilavamento, essa risulta essere scarsa nei leganti aerei ed eccellente in quelli idraulici; così come le caratteristiche meccaniche, in generale, sono migliori nelle calce idrauliche e nei cementi, anche se particolari anidriti riescono a conferire resistenze meccaniche alla compressione paragonabili o superiori a quelle tipiche dei cementi. Per quanto riguarda invece la stabilità dimensionale, i leganti aerei risentono meno delle tensioni indotte dall'impedimento al ritiro e, quindi, risultano meno tendenti alla fessurazione.

Ai fini del presente elaborato, nel seguito si farà riferimento unicamente ai leganti idraulici, tralasciando gesso e calce aerea [1 e 2].

### **2.1.1.1. La calce idraulica**

La calce idraulica, ottenuta per cottura di calcari argillosi, di marne naturali o di miscele di calcari e materiali argillosi, al contrario di quella idrata, possiede anche proprietà idrauliche date dalla presenza di ossido di calcio, silicato bicalcico ( $2CaO \cdot SiO_2$ ) e alluminato monocalcico ( $CaO \cdot Al_2O_3$ ). L'operazione di spegnimento viene eseguita con un quantitativo di acqua stechiometricamente controllato in quanto, a causa della presenza di costituenti in grado di reagire con l'acqua, è necessaria la conversione del solo ossido di calcio. Infatti, un eccesso di acqua comporterebbe l'idratazione dei silicati e degli alluminati che perderebbero le loro proprietà leganti. Per quanto riguarda le prestazioni meccaniche di tali leganti, non possono assolvere compiti strutturali primari e quindi il loro impiego rimane circoscritto alla realizzazione di intonaci e murature, anche portanti. Le calce idrauliche vengono utilizzate quindi per l'allettamento di murature perimetrali faccia a vista, paramenti di canali a contatto con acqua, intonaci esterni, risanamento di murature in pietra o in mattoni soggette alla risalita capillare, rifacimento dei giunti di allettamento ammalorati e per il consolidamento di muratura a sacco [1].

### 2.1.1.2. Il cemento Portland

Il cemento Portland, brevettato da Joseph Aspdin nel 1824<sup>3</sup>, è un legante idraulico composto normalmente da una miscela di clinker<sup>4</sup> e di gesso biidrato, o più raramente, di anidrite naturale. 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 [1].

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 ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e una soluzione solida ternaria indicata normalmente come  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Sono inoltre presenti componenti minori come  $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ , CaO e MgO, oltre agli alcali, ai fosfati, ai fluoruri e ai solfati che formano usualmente soluzioni solide con i silicati e gli alluminati di calcio. Dei quattro composti principali presenti nel cemento, solo i silicati sono in grado di produrre impasti con buona resistenza meccanica; ciò porterebbe a pensare che il cemento potrebbe essere costituito unicamente da tali composti. In realtà, vi sono motivazioni di tipo economico che comportano la presenza di  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  e di  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ : la prima è legata alla difficoltà di reperire grandi quantità di calcare e sabbia privi di  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , inoltre, tali ossidi consentono di eseguire la produzione industriale a temperature minori e quindi a condizioni più economiche [2].

La composizione del clinker può essere caratterizzata da tre equazioni che trascurano la presenza di componenti minori e fissano le percentuali dei quattro ossidi principali.

$$p_C = 2,8 p_S + 1,18 p_A + 0,65 p_F \quad [2.1]$$

L'equazione [2.1] permette di calcolare il massimo contenuto di calce che si può combinare con gli altri ossidi (di silice, di alluminio e di ferro). Il clinker contiene sempre della calce libera, cioè non combinata, nel caso in cui il limite di saturazione, dato dal rapporto tra la percentuale di calce effettivamente presente e quella sopra determinata, sia maggiore di 1. Se tale limite risulta minore di 1, può essere comunque presente della calce libera a causa dell'eterogeneità della miscela durante la cottura o del funzionamento del forno.

La seconda equazione esprime il modulo di silicio come il rapporto tra la percentuale di silice e la somma delle percentuali di ossidi di ferro e di alluminio.

$$M_S = \frac{p_S}{p_A + p_F} \quad [2.2]$$

Il valore di tale modulo è compreso tra 2 e 3, più frequentemente tra 2,4 e 2,7. Il limite inferiore è legato al fatto che è necessaria la presenza di ossidi di ferro e alluminio per diminuire la temperatura di produzione, mentre il valore massimo è dovuto al fatto che i silicati contribuiscono quasi esclusivamente alla resistenza meccanica dell'impasto.

---

<sup>3</sup> Si ritiene che il cemento Portland brevettato da Aspdin differisca dall'attuale cemento in termini mineralogici, per idraulicità e per prestazioni meccaniche.

<sup>4</sup> Prodotto della cottura di una miscela di argilla, calcare, sabbia, ceneri di pirite, ecc. a circa 1300 – 1450 °C.

L'impatto ambientale delle malte e dei calcestruzzi a base cementizia

L'ultima equazione stabilisce quale deve essere il rapporto tra gli ossidi di alluminio e quelli di ferro, detto modulo dei fondenti.

$$M_f = \frac{p_A}{p_F} \quad [2.3]$$

Normalmente,  $M_f$  varia tra 2 e 4, ma può variare molto per i cementi speciali, come quelli ferrici o quelli di tipo bianco [2].

Il cemento Portland costituito unicamente da una miscela di clinker di cemento e gesso è prodotto oggi in una modesta quantità rispetto al cemento utilizzato nel settore delle costruzioni. Infatti, sono più diffuse delle miscele di clinker di cemento Portland e di aggiunte di minerali in polveri finemente macinate, costituite da materiali pozzolanici naturali, da polveri di inerti e da sottoprodotti provenienti da lavorazioni industriali, in percentuali variabili dall'8 al 95% [1 e 2].

Le aggiunte minerali possono essere suddivise principalmente in:

- Materiali pozzolanici: materiali inorganici di natura silicea o silico-alluminosa che mescolati con acqua in presenza di calce sono in grado di indurire sia all'aria sia in acqua pur non possedendo caratteristiche di legante idraulico.
- Materiali pozzolanici a comportamento idraulico: alcuni minerali, come le loppe d'altoforno e le ceneri volanti di tipo calcico contengono rilevanti percentuali di ossido di calcio oltre ai composti vetrosi di natura silico-alluminosa e sono quindi in grado di indurirsi in acqua anche in assenza di calce.
- Materiali inerti: materiali, come il calcare, che non sono interessati da trasformazioni chimiche, ma hanno unicamente funzione di filler o riempimento.

La normativa nazionale che regola i requisiti compositivi, prestazionali e produttivi del cemento è la UNI EN 197-1 [34]; in essa, i cementi vengono suddivisi sulla base della composizione in cinque tipi ulteriormente suddivisibili in sottotipi [1 e 2].

#### **2.1.1.2.1. La produzione del cemento Portland**

Il cemento Portland si ottiene dalla macinazione del clinker prodotto per cottura di materie prime costituite prevalentemente da calcari, argille, sabbie e ceneri di pirite in forni rotanti a circa 1300 – 1450°C. Di seguito si riportano le principali fasi produttive del cemento le quali possono essere suddivise in [1 e 4]:

1. **Estrazione della materia prima:** le materie prime vengono estratte dalla cava sotto forma di blocchi di dimensioni variabili che non eccedono normalmente il metro cubo. Tali blocchi vengono poi avviati ad un frantoio che riduce le loro dimensioni portandoli ad un'appezzatura di 5 – 10cm. La frantumazione, che può variare per ogni singola unità produttiva, consiste nel sottoporre i blocchi delle materie prime a degli sforzi d'impatto, d'attrito, di taglio o di compressione. Le materie prime vengono movimentate inizialmente tramite pale gommate, mezzi cingolati, camion a benna e poi, dopo la macinazione, mediante nastri, catene, elevatori e sistemi idraulici.
2. **Preparazione della materia prima:** La seconda fase si avvia con la preomogeneizzazione, operazione che mira ad assicurare una composizione chimica costante nella miscela delle materie prime, tramite l'impiego di apparecchi a raggi gamma. Le analisi permettono di definire le correzioni necessarie per ottenere un'alimentazione ottimale del mulino di macinazione. Si procede quindi alla macinazione, fase con la quale si trasforma la materia prima in una miscela omogenea con un'adeguata finezza per assicurare le migliori condizioni della successiva cottura della farina. Durante la macinazione le materie prime vengono introdotte in un mulino e sottoposte ad azioni meccaniche (urto, compressione, attrito), così da ottenere una polvere fine, detta *farina cruda*, che viene stoccata in silos. La seconda fase termina con la depolverazione, tecnica con la quale si cerca di eliminare le emissioni di polveri durante il trasporto della farina tramite l'uso di filtri a maniche o di elettrofiltri. Questa metodologia, fondamentale per la compatibilità ambientale delle unità produttive, è applicata anche durante altre fasi del processo produttivo (cottura e macinazione del cemento).
3. **Produzione del clinker:** I moderni impianti di produzione del cemento possiedono il sistema preriscaldatore/precalcinatore (*torre a cicloni* oppure *griglia Lepol*) con lo scopo di preparare la farina dal punto di vista termico e chimico prima dell'introduzione del forno. Tale preparazione consiste nell'essiccare, nel disidratare e nel decarbonare parzialmente il materiale crudo riutilizzando una parte dell'energia calorica trasportata dai gas provenienti dal forno rotante. La farina viene poi introdotta nel forno rotante (cilindro in metallo rivestito internamente da materiale refrattario) all'interno del quale avvengono le reazioni chimiche che la trasformano in clinker. Durante la cottura, il forno ruota sul suo asse e, la collocazione in leggera pendenza, permette l'avanzamento del materiale in cottura che entra nella parte alta, mentre, allo scarico, si trovano il

## L'impatto ambientale delle malte e dei calcestruzzi a base cementizia

bruciatore e la relativa fiamma. Durante questo movimento il materiale in cottura si trasforma dal suo stato iniziale fino a quello cosiddetto *clinkerizzato* alla temperatura di 1450 °C. Terminata la cottura, si procede al raffreddatore, il quale assicura la tempra del clinker in modo che abbia struttura mineralogica e dimensioni dei cristalli appropriate. Esso permette, inoltre, di ridurre la temperatura del clinker in modo da agevolarne la movimentazione e lo stoccaggio e di recuperare aria calda per la precedente combustione.

Le trasformazioni chimiche che avvengono all'interno del forno sono funzione della temperatura:

- A circa 100°C vi è l'espulsione dell'acqua libera;
  - Tra 100 e 750°C, nella zona di preriscaldamento, vi è la perdita dell'acqua legata contenuta nei materiali argillosi;
  - Tra 750 e 1000°C si ha decarbonatazione del calcare;
  - Al raggiungimento dei 1450°C si ha la clinkerizzazione, cioè una fusione parziale della miscela con la formazione del clinker costituito da silicati di calcio.
  - Con il raffreddamento, a circa 1350°C, si ha la parziale cristallizzazione della massa fusa con la formazione degli alluminati di calcio;
  - Dall'ulteriore raffreddamento si ottengono particelle sferiche di diametro variabile tra 3 e 25mm che vengono poi macinate.
4. **Produzione e spedizione del cemento:** Il clinker uscito dal forno viene stoccato in un apposito silo che, da un lato, conferisce riserva all'impianto di macinazione del cemento in caso di fermata accidentale o programmata del forno e, dall'altro, evita al clinker il degrado chimico-fisico causato da uno stoccaggio prolungato all'aria aperta. Il clinker, integrato di correttivi, viene poi introdotto nel mulino, secondo proporzioni predeterminate, per subire l'azione meccanica di macinazione e produrre il cemento, caratterizzato da una finezza inferiore a 40µm. Il sistema di macinazione è costituito dal mulino, dal separatore (che seleziona le particelle in rapporto alle loro dimensioni), dal filtro del mulino e, in alcuni impianti, dalla pressa a rulli, che svolge un'azione di premacinazione. Il ciclo produttivo termina con la spedizione del cemento sfuso su camion oppure in sacchi.

Di seguito si riporta uno schema esplicativo del processo di produzione del cemento, partendo appunto dall'estrazione delle materie prima fino alla spedizione.

## L'impatto ambientale delle malte e dei calcestruzzi a base cementizia

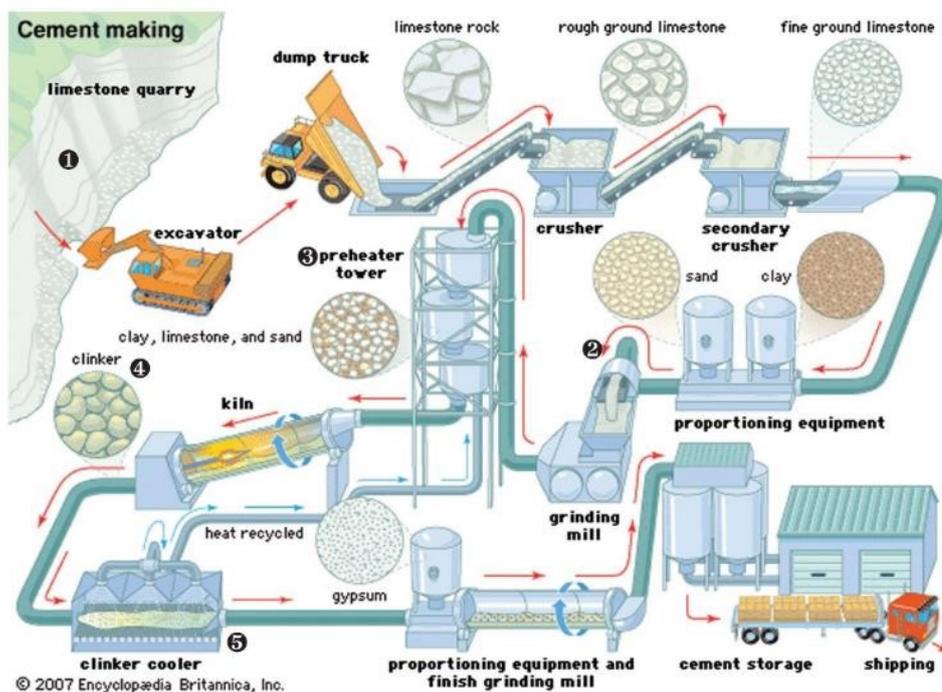


Figura 1. Ciclo produttivo del cemento. (Da [www.dsij.in](http://www.dsij.in) 27/07/2017).

### 2.1.2. L'acqua d'impasto

L'acqua di impasto ha due funzioni principali; la prima è consentire l'idratazione del cemento, determinando il fenomeno di presa e assicurando quindi una struttura legante capace di indurire e tenere insieme gli inerti presenti. La seconda funzione invece, è quella di andare a bagnare gli inerti in modo da migliorare il legame tra essi e la pasta di cemento. È necessario verificare che l'acqua non contenga elevate percentuali di sostanze estranee disciolte o sospese che potrebbero compromettere l'aderenza tra i vari costituenti della miscela, evitando anche le acque che presentano solfati e cloruri in quanto questi interferiscono con la presa e l'indurimento, riducendo la resistenza del conglomerato. Esistono quindi limiti di composizione da rispettare per evitare che vengano influenzate le caratteristiche meccaniche del prodotto finale; si ritiene che sia ideale l'acqua potabile. Un aspetto significativo è che alcune acque, come quelle marine o quelle contenenti acido cloridrico, si ritengono accettabili se impiegate nell'impasto, ma fortemente dannose se lambiscono il conglomerato indurito.

Il quantitativo di acqua impiegato è fondamentale, in quanto le caratteristiche di resistenza della malta o del calcestruzzo sono influenzate dal rapporto acqua/cemento. Un maggiore quantitativo di acqua consente una maggiore lavorabilità ma determina una minore resistenza, viceversa un minore quantitativo di acqua migliora la resistenza ma riduce la lavorabilità. È bene quindi cercare di utilizzare la minore quantità di acqua in relazione alle condizioni di getto, in modo da ottenere il conglomerato indurito con migliori caratteristiche meccaniche.

Anche la temperatura dell'acqua è importante ai fini della presa, si consiglia una temperatura compresa tra 14 e 20°C, in quanto acque più fredde rallentano la presa e acque più calde l'accelerano [2 e 3].

### **2.1.3. Gli inerti**

I materiali lapidei che sono presenti nella miscela ma non prendono parte alla reazione d'idratazione vengono definiti inerti o aggregati. Come già accennato in precedenza, la dimensione dell'inerte è discriminante per la classificazione del conglomerato cementizio: esso viene definito malta se gli inerti sono di dimensioni minore a 5 mm, mentre calcestruzzo per aggregati più grossi.

Infatti, in relazione alle dimensioni si distinguono in:

- Inerte a grana grossa: ghiaia o pietrisco con dimensioni dei granuli maggiori di 4 -5 mm;
- Inerte a grana fine: sabbia con dimensioni dei granuli minori di 4 -5 mm.

I motivi di impiego degli inerti sono molteplici; la prima ragione è puramente economica in quanto gli aggregati costano meno della pasta cementizia, ma vi sono anche ragioni tecniche. Con l'aggiunta di inerti il ritiro della pasta cementizia diminuisce proporzionalmente, così come può essere migliorata la durabilità del conglomerato a seconda del tipo di aggregato utilizzato. Queste non sono le uniche proprietà del calcestruzzo che possono essere incrementate grazie alla presenza di inerti, infatti essi influenzano anche la resistenza meccanica, il modulo elastico, lo scorrimento viscoso e la resistenza all'abrasione, ma anche la lavorabilità del conglomerato che viene peggiorata.

Gli inerti devono presentare diverse caratteristiche tra le quali vi sono:

- La forma deve essere il più possibile tondeggiate con superficie mediamente rugosa;
- Le proprietà meccaniche non devono compromettere la resistenza del conglomerato indurito, non devono quindi essere presenti elementi friabili;
- La porosità può essere variabile ma deve essere presa in considerazione per la determinazione del rapporto acqua/cemento;
- È meglio che non siano gelivi in quanto potrebbero compromettere la durabilità del conglomerato indurito;
- Devono essere privi di impurità perché queste potrebbero influenzare negativamente la resistenza e la durabilità del conglomerato indurito;
- Le proprietà termiche devono essere tali da non compromettere le caratteristiche del conglomerato indurito in funzione del suo impiego. Le miscele che vengono prodotte per resistere al fuoco è bene che presentino inerti con bassa dilatazione termica e con alta capacità termica che rallenta la trasmissione di calore.
- Devono presentare una buona distribuzione granulometrica: l'assortimento granulometrico è uno degli aspetti principali da tenere in considerazione nell'aggiunta degli aggregati alla miscela cementizia, infatti la presenza dei granuli più fini, garantisce che siano riempiti i vuoti interstiziali che si vengono

L'impatto ambientale delle malte e dei calcestruzzi a base cementizia

a formare tra i granuli più grossi in modo tale da ridurre lo spazio vuoto destinato al riempimento della pasta di cemento [2 e 3].

#### **2.1.4. Gli additivi**

Gli additivi sono prodotti che vengono impiegati durante il procedimento di miscelazione del calcestruzzo, comportando la modifica delle proprietà del conglomerato cementizio. Essi sono utilizzati quando il miglioramento di una specifica proprietà, ottenuto con un additivo, risulta più vantaggioso dal punto di vista tecnico-economico rispetto ad altre soluzioni possibili.

Essi possono agire sulla miscela in due modi:

- Modificando la cinetica di idratazione del cemento, tramite un'azione chimica (acceleranti e ritardanti);
- Modificando direttamente le proprietà reologiche della pasta cementizia, tramite un'azione fisica (fluidificanti, superfluidificanti, aeranti e impermeabilizzanti).

Gli additivi acceleranti fanno aumentare la velocità di idratazione del cemento nel periodo di presa o in quello di indurimento. I primi accorciano i tempi di presa e sono normalmente utilizzati per malte a presa rapida per riparazioni urgenti, mentre i secondi fanno aumentare la resistenza meccanica a brevi stagionature, elemento di notevole interesse per ambienti con condizioni climatiche avverse.

Gli additivi ritardanti hanno lo scopo di rallentare l'idratazione del cemento, per conservare più a lungo la lavorabilità nelle fasi di confezionamento, trasporto e messa in opera quando, ad esempio, la temperatura è molto elevata. Il ritardo nella presa comporta un abbassamento della resistenza meccanica per brevi stagionature, ma un aumento della resistenza meccanica per lunghe stagionature rispetto al calcestruzzo non additivato.

Considerando invece la seconda tipologia di azione sulla miscela cementizia si definiscono fluidificanti quegli additivi che aggiunti a un impasto cementizio, a pari lavorabilità, riducono il rapporto a/c nell'impasto di almeno il 5% o, a parità del rapporto a/c, aumentano la lavorabilità. Gli additivi superfluidificanti si distinguono dai fluidificanti da un punto di vista quantitativo per un elevato miglioramento delle prestazioni: riducono il rapporto acqua/cemento del 20% a parità di lavorabilità. A pari rapporto di acqua/cemento, l'aggiunta di un superfluidificante può trasformare un calcestruzzo asciutto, con slump di 1 - 2cm, in un calcestruzzo superfluido con un slump superiore a 22 cm. Un calcestruzzo altamente fluido non richiede compattazione ma potrebbe presentare i rischi di segregazione e di bleeding, che devono essere tenuti sotto controllo. Gli additivi aeranti sono aggiunti al conglomerato per migliorare la resistenza ai cicli di gelo – disgelo attraverso la formazione di un sistema di micro bolle d'aria omogeneamente distribuite nella pasta cementizia. Secondariamente inducono un miglioramento della lavorabilità e un aumento di coesione del calcestruzzo fresco.

## L'impatto ambientale delle malte e dei calcestruzzi a base cementizia

Gli additivi impermeabilizzanti sono prodotti idrorepellenti che proteggono il conglomerato dal passaggio di acqua quando la pressione idraulica è relativamente bassa, altrimenti sarebbe necessario l'impiego di membrane impermeabili.

Sono inoltre presenti altri tipi di additivi, detti di superficie, che sono applicati sulla superficie del manufatto; tra questi vi sono i disarmanti e gli stagionanti [2 e 3].

### 2.2. Il mercato del cemento: produzione e consumi

Terminata la fase descrittiva del conglomerato cementizio e del ciclo produttivo del cemento si può esaminare il mercato di quest'ultimo. Il mercato del cemento è strettamente legato a quello del settore delle costruzioni; nel 2016, l'attività edilizia in Italia si è stabilizzata, interrompendo la lunga fase recessiva iniziata nel 2008 con un lieve aumento degli investimenti nel settore delle costruzioni, pari a +0,3% in termini reali e si prevede che nel 2017 l'incremento sia maggiore. Per quanto riguarda le compravendite, <<il 2016 ha confermato le aspettative di aumento delle compravendite, che si sono attestate, secondo i dati dell'Agenzia delle Entrate a circa 529mila abitazioni, in linea con la stima di 520mila formulata dall'Ance nell'Osservatorio di gennaio scorso. Tale dinamica dovrebbe proseguire anche nel 2017, portando il numero di compravendite a circa 550mila>> [5]. L'andamento è visibile nel grafico sotto riportato.

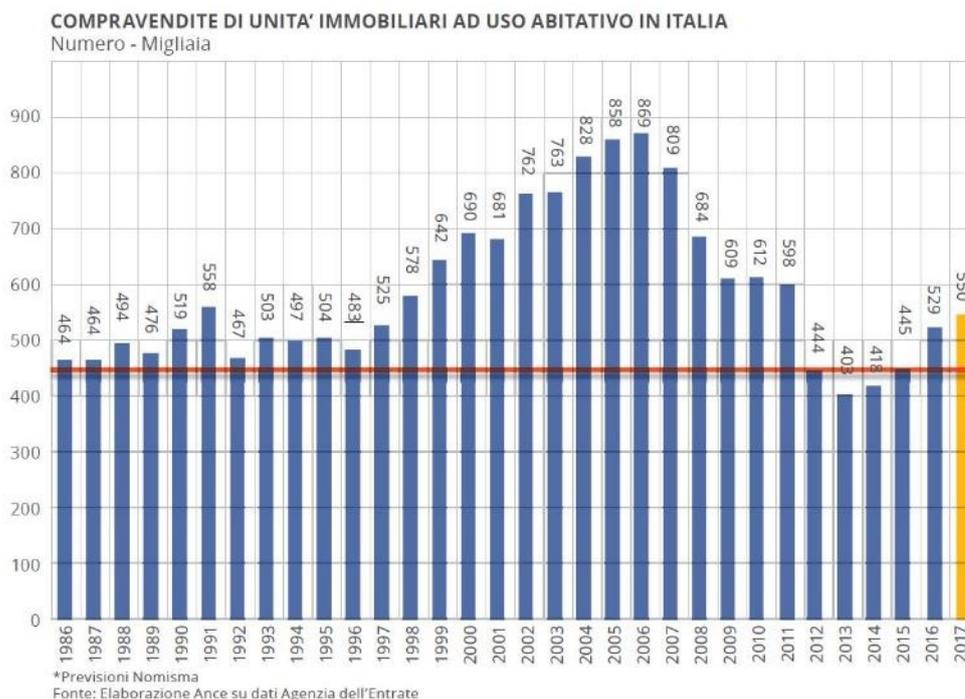


Figura 2. Compravendite immobiliari per residenziale in Italia. (Da Relazione annuale AITEC 2016).

In parallelo al mercato immobiliare c'è stato un incremento anche dei mutui se pur di solo +0.2%, valore che però interrompe l'andamento negativo degli anni precedenti. Nel primo quadrimestre del 2017 è stato registrato anche un aumento degli appalti pubblici e, a fronte dei precedenti dati, l'Ance (Associazione Nazionale Costruttori Edili) ritiene quindi

## L'impatto ambientale delle malte e dei calcestruzzi a base cementizia

che il 2017 sia un anno di ripresa del settore delle costruzioni con un aumento dello +0,8% in termini reali [5].

Introdotta brevemente la situazione del mercato del settore delle costruzioni si può procedere in modo più mirato a quello del cemento. <<Il consumi mondiali di cemento sono aumentati nel 2016 dell'1,7 per cento raggiungendo il livello di 3,97 miliardi di tonnellate, 66 milioni in più rispetto al 2015>> [5].

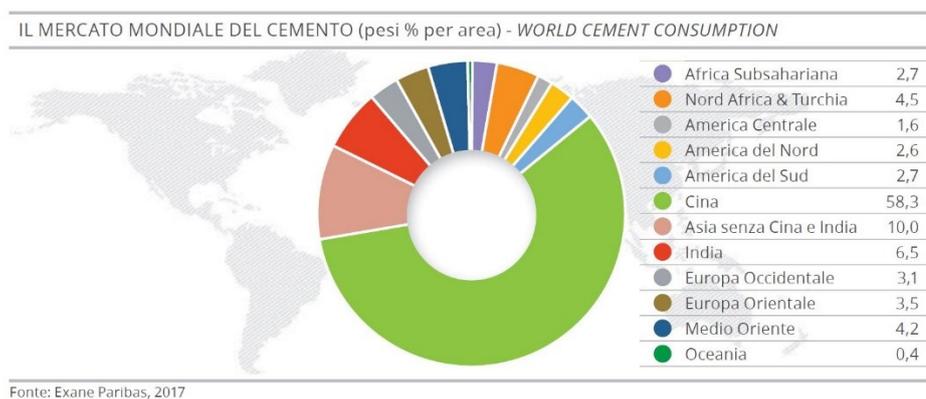


Figura 3. Incidenza percentuale per area sul mercato mondiale del cemento. (Da Relazione annuale AITEC 2016).

Il 58% di tale quota è dovuta al mercato cinese che nel 2016 ha consumato 2.311 milioni di tonnellate di cemento, seguito dal mercato indiano con 256,8 milioni di tonnellate, confermandosi il secondo mercato di riferimento in Asia e nel mondo intero. Per l'area del nord America l'andamento è stato in crescita con +1,4%, mentre nell'area latina, Brasile e Argentina sono calate rispettivamente di -12,7% e -10,8%. L'Europa occidentale ha avuto un aumento di +0,9%, con consumi nazionali pari a +7% per la Germania, -3,6% per la Spagna e -4,8% per l'Italia; il dato negativo italiano evidenzia il fatto che la ripresa del mercato delle costruzioni di cui si è parlato sopra riguarda prevalentemente edifici esistenti, con un continuo calo nelle nuove costruzioni. Per l'area euro-mediterranea si colloca al primo posto la Turchia con 70 milioni di tonnellate, mentre per il mercato nord-africano l'Egitto con 56,6 tonnellate di cemento consumato. Nel medio-oriente e in Russia, invece, si registrano dei cali pari rispettivamente a -8,3% e -11,3% rispetto all'anno precedente.

Per quanto concerne la produzione di cemento, nel 2016 in Italia è diminuita del 7,2% rispetto l'anno precedente, assestandosi a 19,3 milioni di tonnellate, con un forte decremento al sud e nelle isole, pari al 10%. Allo stesso modo sono diminuiti i consumi del 4,8% attestandosi a 18,6 milioni di tonnellate. Tali andamenti sono sempre da attribuire alla situazione del settore residenziale delle costruzioni; se gli investimenti nelle costruzioni sono saliti dello 0,3%, quelli per abitazioni ex-novo hanno subito una riduzione del 3,4% rispetto al 2015.

<<Diminuita nel 2016 anche la produzione di clinker sebbene con una contrazione minore (-4,9 per cento rispetto al 2015) pari a circa 14,8 milioni di tonnellate. Il rapporto tra clinker

## L'impatto ambientale delle malte e dei calcestruzzi a base cementizia

*e cemento è del 76 per cento. Le prospettive per il 2017 concordano per uno scenario improntato a un cauto ottimismo con i consumi che dovrebbero mantenersi sullo stesso livello del 2016 o migliorare leggermente. Il consolidamento della crescita economica del Paese, così come confermato dalla pubblicazione dei primi dati dell'anno, insieme al superamento delle difficoltà relative all'applicazione del rinnovato codice degli appalti, dovrebbero favorire l'espansione degli investimenti pubblici, cruciali per la ripartenza del settore>> [5].* Basandosi sui dati del *Ministero dello Sviluppo Economico* e di *ISTAT*, si può dedurre che il consumo di cemento pro-capite è diminuito passando da 360 kg/abitante nel 2013 a 308 kg/abitante nel 2016 dovuto a una diminuzione dei consumi nazionali, non bilanciata dalla riduzione del numero di abitanti.

Come si può notare dai dati sopra riportati, la quantità di cemento prodotta è comunque superiore a quella consumata all'interno del territorio italiano; infatti, nonostante la crisi economica che ha investito la penisola, l'Italia ha mantenuto la propria posizione come Paese esportatore. Verso l'estero sono state vendute 1,9 milioni di tonnellate di cemento e clinker, a fronte di un'importazione di 1,2 milioni di tonnellate, che ha quindi garantito l'interscambio positivo. Per quanto riguarda il clinker, invece, l'interscambio è stato equilibrato con pari quote in entrata e in uscita, anche se con un calo del 30% rispetto al 2015. Gli scambi avvengono prevalentemente con Stati del bacino mediterraneo; si registrano importazioni da Grecia, Slovenia, Croazia e Turchia e esportazioni verso Francia, Algeria, Svizzera, Spagna e Malta, che rappresentano l'80% del cemento italiano esportato.

Per quanto riguarda invece la produzione del cemento nel resto del mondo, si riportano i dati presenti in *Trends in global CO2 emissions report 2016* [15]. Nel 2015, la Cina ha rappresentato il 58% della produzione globale del cemento, seguita dall'India (6,8%), dall'Unione Europea (4,4%) e dagli Stati Uniti (2,7%). Nonostante lo Stato asiatico abbia mantenuto il proprio primato mondiale, rispetto al 2014 la produzione è diminuita del 5,7%; al contrario, gli Stati dell'UE hanno incrementato la produzione del 4,5% rispetto all'anno precedente. Secondo la USGS<sup>5</sup> la produzione mondiale di cemento è diminuita dell'1,9% nel 2015, contro un aumento del 2,5% nel 2014. È però necessario sottolineare il fatto che non vi è una correlazione diretta tra la produzione di cemento e le emissioni in quanto quest'ultime sono dovute essenzialmente al meccanismo di produzione del clinker, la cui frazione è fortemente variabile dal tipo di cemento confezionato [5, 9 e 15].

---

<sup>5</sup> US Geological Survey [15].

## L'impatto ambientale delle malte e dei calcestruzzi a base cementizia

RIPARTIZIONE PER TIPOLOGIA DI PRODOTTO - ANNI 2006-2016						
DISTRIBUTION BY TYPE - YEARS 2006-2016						
	CEM I	CEM II	CEM III	CEM IV	CEM V	%
2006	6,5	75,5	5,3	11,8	0,8	
2007	6,9	76,1	4,3	11,7	1,0	
2008	7,8	75,0	4,6	11,5	1,1	
2009	7,9	73,1	4,3	13,3	1,4	
2010	9,9	72,0	3,5	13,6	1,1	
2011	8,8	72,4	3,9	14,0	0,9	
2012	9,5	71,5	4,9	13,1	0,9	
2013	13,3	67,8	4,8	13,0	1,0	
2014	13,4	67,5	4,2	12,7	2,2	
2015	13,7	70,0	3,0	12,6	0,6	
<b>2016</b>	<b>12,0</b>	<b>70,4</b>	<b>3,1</b>	<b>11,4</b>	<b>3,1</b>	

Fonte: Elaborazioni AITEC su dati Ministero Sviluppo Economico  
Source: AITEC estimates on Ministry for Economical Development data

Figura 4. Cemento prodotto ripartito per tipologia. (Da Relazione annuale AITEC 2016).

Come si può notare dalla tabella sopra riportata, si può anche fare una valutazione sulle diverse tipologie di cemento<sup>6</sup>. Le tipologie maggiormente prodotte sono il Portland (CEM I) e il Portland di miscela (CEM II). La produzione dei cementi d'altoforno e di quelli pozzolanici si attesta, rispettivamente a 3,1% e 11,4%.

DISTRIBUZIONE DELLA PRODUZIONE DI CEMENTO PER CLASSI DI RESISTENZA - ANNI 2006-2016												
CEMENT PRODUCTION DISTRIBUTION BY STRENGTH CLASS - YEARS 2006-2016												
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	%
32,5 e altre resistenze 32,5 and other strenghts	52,0	51,0	51,3	47,7	44,0	47,4	42,8	40,9	39,3	38,7	<b>38,6</b>	
42,5 e 52,5 42,5 and 52,5	48,0	49,0	48,7	52,3	56,0	52,6	57,2	59,1	60,7	61,3	<b>61,4</b>	

Fonte: Elaborazioni AITEC su dati Ministero Sviluppo Economico  
Source: AITEC estimates on Ministry for Economical Development data

Figura 5. Cemento prodotto ripartito per classi di resistenza. (Da Relazione annuale AITEC 2016).

L'analisi della distribuzione della produzione di cemento per classi di resistenza mostra una progressiva diminuzione della classe 32,5 e un aumento di quelle ad alta e altissima resistenza (classi 42,5 e 52,5) che si portano a quota 61,4%.

AITEC esamina anche le modalità di distribuzione del cemento. Nel 2016 si riscontra un aumento della percentuale di prodotto sfuso a scapito di quello in sacchi, nonostante l'attivo mercato delle ristrutturazioni che dovrebbe valorizzare il sacco. L'autotrasporto è un elemento fondamentale nella filiera del cemento in quanto il costo può raggiungere una percentuale rilevante del prodotto consegnato, anche del 25 – 30%; per questo si ricercano partner logistici in grado di offrire qualità e affidabilità nel pieno rispetto del quadro normativo [5, 9 e 15].

<sup>6</sup> Le tipologie di cemento sono definite dalla norma EN 197-1, si possono consultare in modo sintetico al sito internet [www.aitecweb.com](http://www.aitecweb.com) [9] (02/08/2017).

### 2.3. Consumi energetici e impatto ambientale

L'industria del cemento, insieme a quella metallurgica per la produzione dell'acciaio e alle industrie chimiche di ammoniaca, metano ed etilene, sono i maggiori produttori di anidride carbonica del settore industriale.

Nel processo produttivo del cemento risultano essere di fondamentale importanza gli aspetti riguardanti i costi energetici (rappresentano oltre la metà dei costi di produzione), le emissioni e il consumo di materie prime. Il conglomerato cementizio è normalmente costituito, in massa, dal 10% di cemento e dal 90% di acqua e inerti. Il processo di estrazione delle materie prime per la produzione del clinker e degli aggregati provoca un impatto diretto sul territorio, di natura prevalentemente paesaggistica. Secondo il rapporto cave redatto da

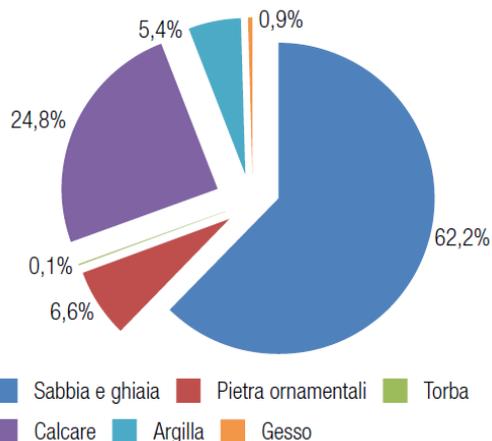


Figura 6. Ripartizione delle cave per gruppo di materiali estratti. (Da Rapporto Cave 2014 di Legambiente).

*Legambiente* nel 2014, in Italia sono attive 5592 cave, mentre quelle dismesse nelle Regioni in cui esiste un monitoraggio sono 16045<sup>7</sup>. L'estrazione di sabbia e ghiaia, nel 2012, si è attestata a circa 50 milioni di metri cubi e ha rappresentato il 62,5% di tutti i materiali cavati in Italia. Come si evince dal grafico a fianco riportato, gli inerti del calcestruzzo costituiscono il quantitativo maggiore di materiale estratto annualmente, seguiti dal calcare che viene impiegato per la produzione del cemento. Questo significa che la quantità di materie prime necessarie alla creazione di un manufatto di calcestruzzo è molto elevata e copre più dell'85% delle estrazioni da cava. La legislazione che va a governare tale settore a livello nazionale risale al 1927 con un Regio Decreto improntato verso lo sviluppo dell'economia senza prendere in considerazione gli impatti provocati sul territorio. Nel 1977, la regolamentazione è stata affidata alle Regioni che però spesso restano in difetto non redigendo dei piani cava e lasciando quindi il potere decisionale unicamente in mano al funzionario decisore, facilmente influenzabile dalla lobby dei cavaatori e dalla criminalità organizzata. Tra le Regioni che non presentano un piano cave vi sono Abruzzo, Molise, Sardegna, Friuli Venezia Giulia, Lazio, Sicilia, Calabria e Basilicata; il Piemonte invece ha solamente dei Piani di Indirizzo e rimanda l'approvazione del Piano Cave alle Provincie<sup>8</sup>. La mancanza di una gestione delle cave si nota in modo evidente durante la realizzazione di nuove infrastrutture per le quali è necessaria una grande mole di materia prima che viene spesso reperita nell'intorno della zona di costruzione dell'opera causando un forte impatto sul territorio che può anche provocare disastri

<sup>7</sup> Calabria e Friuli Venezia Giulia sono sprovviste di monitoraggio; considerando il numero di cave presenti in tale regioni si raggiungerebbe quota 17 mila.

<sup>8</sup> Dati da [17].

## L'impatto ambientale delle malte e dei calcestruzzi a base cementizia

ambientali, quali smottamenti, frane, alluvioni. È necessario sottolineare che anche le Regioni che presentano una normativa gestionale del territorio, risultano essere lontane dall'idea moderna di gestione del settore compatibile del paesaggio e dell'ambiente, in particolare per quanto riguarda le aree da escludere dalla cavazione, il recupero dei siti dismessi e la spinta al riuso di inerti provenienti da demolizioni. L'impatto della cavazione è anche di natura economica, infatti in Italia si paga in media il 3,5% del prezzo di vendita degli inerti<sup>9</sup> in canoni di concessione, che scende a pochi centesimi in Valle d'Aosta, Lazio e Puglia per diventare persino gratuito in Basilicata e Sardegna. In questo modo i cavatori hanno un guadagno di circa un miliardo confrontato ad alcune decine di milioni pagati allo Stato, con un conseguente danno alla collettività [5, 6 e 17].

Per quanto riguarda la quantità di energia utilizzata e le emissioni prodotte, il processo di estrazione delle materie prime, il confezionamento del conglomerato e il trasporto dello stesso in cantiere necessitano di una scarsa quantità di energia ed emettono una mole discreta di anidride carbonica; la maggiore quota di emissioni e consumo di energia riguarda la produzione del cemento. Il ciclo produttivo di tale legante incide sull'ambiente tramite emissioni dirette e indirette di gas che contribuiscono all'effetto serra. Infatti il riscaldamento del calcare per la produzione dell'ossido di calcio, rilascia direttamente CO<sub>2</sub>:



Il processo chimico viene denominato *calcinazione*: mediante la somministrazione di calore al carbonato di calcio solido, questo si trasforma in ossido di calcio solido e anidride carbonica gassosa. Tale reazione rappresenta circa il 50% di tutte le emissioni prodotte dalla produzione di cemento e nel 2015 ha contribuito per circa il 4% alle emissioni globali. Mentre l'impiego dei combustibili fossili per riscaldare il forno provoca emissioni indirette di CO<sub>2</sub>. Si utilizzano normalmente carbone, gas naturale o petrolio; si riporta a titolo esemplificativo la reazione di combustione del metano, nella quale si può notare che il fenomeno di combustione trasforma il combustibile e il comburente in anidride carbonica e acqua:



Questo rappresenta circa il 40% delle emissioni di cemento, contribuendo anch'esse per circa il 4% alle emissioni globali di CO<sub>2</sub>. Infine, l'elettricità utilizzata per alimentare i macchinari e l'energia per il trasporto finale del cemento rappresenta un'altra fonte di emissioni indirette, pari a circa il 5-10% delle emissioni del settore. Si riporta un grafico a torta riassuntivo di quanto detto.

---

<sup>9</sup> Dati da [17].

## L'impatto ambientale delle malte e dei calcestruzzi a base cementizia

Percentuale di CO<sub>2</sub> emessa durante la produzione del cemento

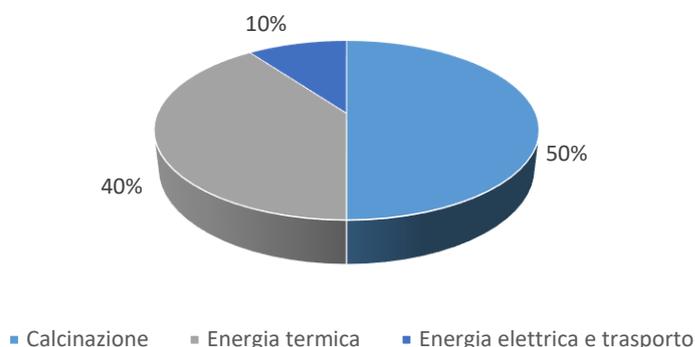


Figura 7. Anidride carbonica emessa durante la produzione del cemento.

Secondo *US EPA*<sup>10</sup> per ogni tonnellata di cemento Portland prodotto si emettono dai 900 ai 1100 kg di CO<sub>2</sub>, *Portland Cement Association* invece ritiene che se ne emettano circa 927 kg. Per tali enti si stima che per ogni tonnellata di cemento prodotto siano necessari dai 60 ai 130 kg di combustibili e circa 110 kWh di energia elettrica. Come già accennato, la quantità di cemento nella miscela del conglomerato cementizio è molto contenuta, variabile tra il 7 e il 15% della massa del calcestruzzo, equivalente a un valore medio di 250 kg a metro cubo. Considerando che ogni metro cubo di calcestruzzo ha una massa media di 2400 kg e che ai 250 kg di cemento corrispondono circa 225 kg di anidride carbonica, il contenuto di ECO<sub>2</sub>, definito come *Embodied Carbon diOxide*, del calcestruzzo è variabile tra 5 - 13% del proprio peso, cioè circa 220 – 240 kg per ogni metro cubo di conglomerato.

Secondo i dati di *AITEC*, le emissioni di CO<sub>2</sub> (kg/t<sub>clinker</sub>) durante il processo produttivo sono rimaste pressoché costanti a 0,68 t<sub>CO2</sub>/t<sub>cemento</sub> nel triennio 2013-2015. Si ritiene che tale risultato sia anche dovuto all'impiego di combustibili solidi secondari (CSS), cioè i combustibili contenenti biomassa che hanno permesso al settore di non produrre nel corso dei tre anni circa 768000 tonnellate di anidride carbonica. In Italia, il recupero di energia dall'utilizzo di biomassa espresso in percentuale rispetto all'energia termica totale per la produzione del clinker, nonostante la forte reticenza da parte della cittadinanza per l'impiego dei CSS, è passato da 4,4% nel 2013 a 5,5% nel 2015; mentre la sostituzione calorica è variata dall'11% al 15% nei tre anni, grazie alla chiusura degli impianti meno performanti e all'utilizzo di combustibili alternativi [5 – 21].

Nel 2016 l'utilizzo di combustibili solidi alternativi non è stato comunque soddisfacente rispetto all'anno precedente, infatti il fabbisogno di energia termica è stato soddisfatto in misura preponderante mediante l'utilizzo di combustibili solidi quali il carbone, che soddisfa circa l'81% del fabbisogno energetico dell'intera industria. Di seguito si riporta l'andamento del consumo di combustibili suddivisi nelle tipologia principali; come si può

<sup>10</sup> United States Environmental Protection Agency.

## L'impatto ambientale delle malte e dei calcestruzzi a base cementizia

cogliere, l'utilizzo di carbone è diminuito dal 2007 al 2016 a favore di altri combustibili che però restano ancora marginali.

ANDAMENTO DEI CONSUMI DI COMBUSTIBILI BEHAVIOUR OF FUEL CONSUMPTION				
	Carbone <i>Coal</i>	O.c.d. <i>HFO</i>	Metano <i>Natural gas</i>	Altri <i>Other</i>
	%			
2005	87,4	4,8	1,4	6,4
2006	89,1	4,0	1,1	5,8
2007	89,2	3,5	1,4	5,9
2008	88,8	3,9	1,3	6,0
2009	87,7	3,7	1,2	7,4
2010	87,2	3,5	1,2	8,1
2011	87,5	3,0	1,2	8,3
2012	85,2	2,9	1,3	10,6
2013	84,6	3,1	1,1	11,2
2014	82,0	3,6	1,1	13,3
2015	81,8	2,1	1,2	14,9
<b>2016</b>	<b>81,4</b>	<b>1,1</b>	<b>1,1</b>	<b>16,5</b>

Dati relativi alle aziende associate AITEC 2016 / Data from 2016 AITEC member companies

Figura 8. Variazione nell'impiego delle diverse tipologie di combustibili. (Da Relazione annuale 2016 di AITEC).

I consumi di energia elettrica rilevati nel 2016 sono risultati in calo di circa il 7% rispetto al 2015, attestandosi a valori vicini ai 2,3 GWh. L'efficienza degli impianti produttivi italiani indica un fabbisogno medio di 117 KWh per tonnellata di cemento prodotto, un valore in miglioramento rispetto a quello registrato nel 2015 (122KWh), ma comunque al di sopra del valore medio mondiale riportato precedentemente pari a 110 KWh per tonnellata. ENEA, per la redazione delle Guide Operative atte a promuovere l'individuazione e la definizione di progetti a consuntivo<sup>11</sup> per particolari settori industriali quale quello cementiero, ha stimato le percentuali di energia elettrica consumata nelle diverse fasi del ciclo produttivo del cemento. Si ritiene quindi che circa il 28% dell'energia è destinata alla macinazione del crudo, il 22% alla cottura del clinker, il 38% alla macinazione del cotto e circa il 12% è impiegata per altri usi di servizio come il funzionamento dei ventilatori e il riscaldamento del combustibile.

Dati meno confortanti riguardano il consumo di materie prime e il tasso di sostituzione delle materie naturali con scarti industriali. Il consumo di materie prime è sceso di circa 4

<sup>11</sup> L'accesso ai Titoli di Efficienza Energetica (TEE: titoli negoziabili che certificano il conseguimento di risparmi energetici negli usi finali di energia) è articolato su tre diversi metodi di valutazione: standardizzato, analitico e consuntivo. Il metodo consuntivo richiede al proponente di pronunciarsi sul quadro al contorno tecnologico, normativo e di mercato. Poiché tale operazione non è immediata, le istituzioni, in accordo con il soggetto valutatore, hanno promosso la stesura di riferimenti condivisi così da rendere più spedita la compilazione della proposta. In Italia, il soggetto incaricato della stesura è ENEA.

## L'impatto ambientale delle malte e dei calcestruzzi a base cementizia

milioni di tonnellate dal 2013 al 2014, attestandosi a circa 25 milioni e variando leggermente nel 2015. Il tasso di sostituzione invece è salito da 6,4% a 6,6%, per poi decrescere nuovamente nel 2015 a 6,2%. Come si vedrà meglio nel capitolo che segue, la sostituzione delle materie prime è uno dei possibili metodi applicabili per la riduzione dell'impatto ambientale della filiera del cemento.

Di seguito si riporta una tabella di sintesi estratta dalla Relazione annuale AITEC 2016 riguardante i consumi energetici durante la produzione del cemento e la loro variazione percentuale rispetto l'annualità precedente.

<b>CONSUMI ENERGETICI - ANNO 2016</b> <i>ENERGY CONSUMPTION - YEAR 2016</i>			
			% Var./ change 2015 / 2016
Energia elettrica / <i>Electrical power</i>	Mwh	2.253.991	-7,0
Metano / <i>Natural Gas</i>	m <sup>3</sup>	14.673.626	-21,2
Carbone / <i>Coal</i>	t	1.340.700	-6,3
Olio combustibile denso / <i>Heavy fuel oil</i>	t	14.851	-52,7
Combustibili non convenzionali* / <i>Non-conventional fuels*</i>	t	334.021	2,9

\* Dati relativi alle aziende associate AITEC 2016 / *Data from 2016 AITEC member companies*

Figura 9. Consumi energetici anno 2016 per la produzione del cemento. (Da Relazione annuale AITEC 2016).

Come accennato in precedenza, la correlazione tra il cemento prodotto e le emissioni di anidride carbonica non è diretta a causa del quantitativo di clinker presente. Negli ultimi decenni è aumentata la quota di cemento miscelato prodotto rispetto a quello Portland con una conseguente riduzione della frazione di clinker dal 95% al 60 – 80%. Ciò ha comportato una diminuzione del 20% delle emissioni di CO<sub>2</sub> per tonnellata di cemento prodotta, rispetto agli anni '80. Nel caso della Cina, la frazione di clinker media è diminuita nel tempo, passando da circa 76% nel 2000, al 72% nel 2005, al 63% nel 2010 fino a circa al 60% nel 2015, comportando un decremento annuale di 250 milioni di tonnellate di emissioni di CO<sub>2</sub> rispetto al caso di riferimento della produzione di cemento Portland (95% di clinker). Non è solo importante la frazione di clinker presente; vi sono infatti specifiche tipologie di cemento, quale quello bianco, caratterizzato dalla purezza delle materie prime e dallo specifico processo produttivo. In particolare, le materie prime impiegate sono caolino o calcari bianchi mineralogicamente puri; il combustibile è nafta o metano per evitare inquinamento; il raffreddamento del clinker è eseguito in modo rapido mediante tempra e la sua macinazione è realizzata con molini a sfere d'acciaio speciale ad alta durezza. A fronte di tali accortezze nella produzione, il consumo energetico è circa il 70% più alto rispetto a quello richiesto per il cemento grigio [5 – 21].

## L'impatto ambientale delle malte e dei calcestruzzi a base cementizia

Country	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Change 2015-2014 (Mt)	Change 2015-2014 (%)	2015 share in total
China	599	665	665	709	778	733	-44.3	-5.7%	51.1%
India	83	88	99	102	93	99	5.3	5.6%	6.9%
European Union	79	76	66	64	65	68	2.9	4.4%	4.8%
United States	31	32	35	36	39	39	0.1	0.3%	2.7%
Turkey	29	28	30	34	34	37	2.7	8.0%	2.5%
Russian Federation	22	25	26	28	29	29	0.2	0.7%	2.0%
Indonesia	18	20	23	24	25	28	3.0	12.1%	2.0%
Iran	27	28	30	29	28	28	-0.4	-1.5%	1.9%
Vietnam	25	26	24	25	26	26	0.2	0.8%	1.8%
Japan	25	25	26	27	27	26	-1.4	-5.0%	1.8%
Egypt	20	19	26	23	23	26	2.8	12.2%	1.8%
Other countries	329	335	335	344	353	364	11.4	3.2%	25.0%
<b>Global total</b>	<b>1,208</b>	<b>1,291</b>	<b>1,319</b>	<b>1,383</b>	<b>1,455</b>	<b>1,435</b>	<b>-20.4</b>	<b>-1.4%</b>	<b>100%</b>

Figura 10. Classifica delle emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte nel 2015 espresse in milioni di tonnellate. (Da Trends in global CO<sub>2</sub> emissions report 2016).

A fronte di tali considerazioni, la classifica mondiale riguardante le emissioni di anidride carbonica dovute alla produzione del cemento sono differenti dal ranking riguardante le tonnellate di cemento prodotto. Come si evince dalla tabella sotto riportata, la Cina ha rappresentato il 51% delle emissioni di CO<sub>2</sub> nel 2015, seguita dall'India (6,9%), dagli Stati Uniti (2,7%), dalla Turchia (2,5%) e dalla Federazione russa (2%). L'UE, invece, rappresenta il 4,8% del totale globale.

Concludendo l'analisi sulle emissioni di anidride carbonica, si vuole soffermarsi brevemente sull'impatto globale di ogni singolo Stato per quanto riguarda l'utilizzo di combustibili fossili e la produzione del cemento. La precedente tabella invece andava a considerare unicamente la CO<sub>2</sub> prodotta dalla reazione chimica di calcinazione e non quella dovuta alla cottura delle materie prime. Come si può notare dal grafico sotto riportato, il maggiore produttore è sempre la Cina; il suo contributo mondiale è aumentato rapidamente dall'ultimo decennio dello scorso secolo al 2015, portandosi da poco più di 2000 milioni di tonnellate annue a circa 11000 milioni di tonnellate. Tale Stato è seguito dagli Stati Uniti e poi dall'Unione Europea, per la quale dal 1990 le emissioni sono scese progressivamente.

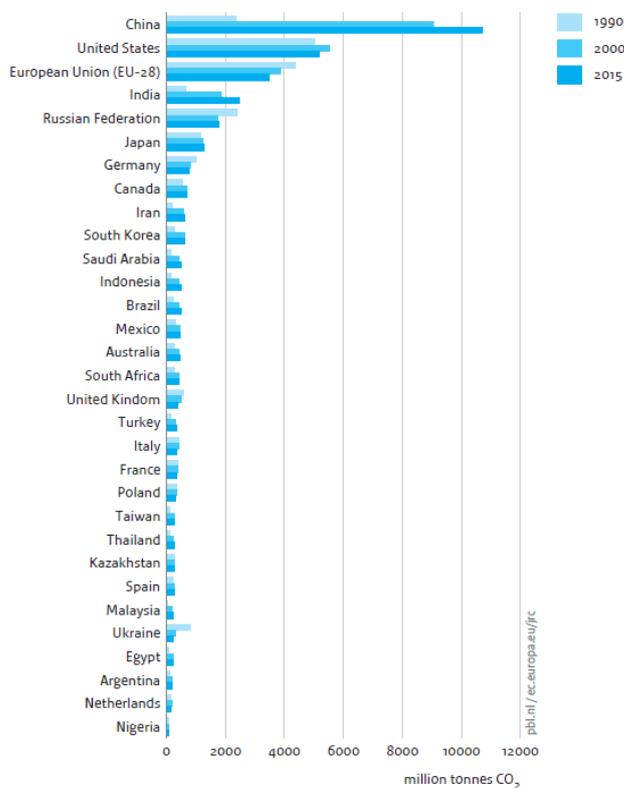


Figura 11. Quantità di CO<sub>2</sub> emessa dall'utilizzo di combustibile fossili e dalla produzione di cemento. (Da Trends in global CO<sub>2</sub> emissions report 2016).

## L'impatto ambientale delle malte e dei calcestruzzi a base cementizia

Analizzando, invece, le tonnellate di CO<sub>2</sub> emesse pro-capite si collocano in testa gli Stati Uniti, che però come Russia, Giappone e Unione Europea hanno diminuito le emissioni dal 1990 al 2015. Si può notare un forte incremento della Cina e un leggero aumento dell'India che si colloca comunque al di sotto del valore medio mondiale. Tale valore è di notevole importanza per poter evidenziare la disomogeneità di produzione di emissioni nel globo; infatti, dei cinque maggiori produttori, nel 2015, solo l'India si attesta sotto il valore medio, mentre gli altri Stati sono ampiamente al di sopra [5 – 21].

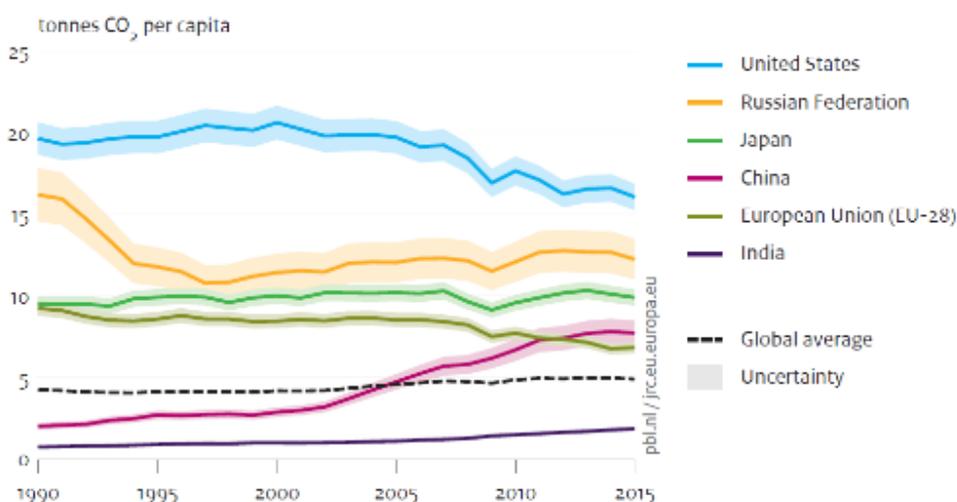


Figura 12. Quantità di CO<sub>2</sub> pro-capite emessa dall'utilizzo di combustibile fossili e dalla produzione di cemento. (Da Trends in global CO<sub>2</sub> emissions report 2016).

### Capitolo 3. Strategie per la riduzione dell'impatto ambientale

Nel corso dei secoli il rapporto dell'uomo con l'ambiente è cambiato in modo radicale, passando da un perfetto equilibrio con la natura nell'era preistorica fino al deturpamento con la seconda rivoluzione industriale di fine Ottocento – inizio Novecento. In tale periodo, infatti, è aumentata l'offerta di beni di consumo, cioè l'utilizzo di massa di beni quali le automobili, il petrolio e suoi derivati, il telefono e la macchina da scrivere. Sono quindi sorti i grandi magazzini per la distribuzione di massa, le grandi industrie automobilistiche, meccaniche e chimiche, incrementando progressivamente i settori in grado di dare maggiore profitto e trascurando quelli socialmente più utili e meno inquinanti. Ciò che viene definito inquinamento ambientale fonda le sue radici in quel periodo e si è accresciuto fino a oggi, portando a disastrose conseguenze se non rimediate nel futuro prossimo, come grandi cambiamenti climatici, carestie, desertificazioni e maggiore aggressività delle radiazioni solari. A fronte di tale situazione, negli ultimi decenni si sono cercate delle soluzioni e delle strategie per andare a ridurre l'impatto e quindi l'inquinamento ambientale dell'operato dell'uomo.

Naturalmente il problema non è legato unicamente ai trasporti o alle industrie ma anche agli edifici; a tal proposito, *European Concrete Platform*<sup>12</sup> introduce il concetto di struttura eco-efficiente in calcestruzzo, intendendo un manufatto progettato e costruito per la destinazione d'uso pensata, il cui impatto ambientale totale, durante tutto il ciclo di vita, è minimizzato. Il calcestruzzo impiegato per tale opera dovrebbe essere costituito da una miscela con basso impatto ambientale, deve essere prodotto con tecniche moderne, materie prime da riciclo e fonti di energia alternative e il contenuto di cemento utilizzato deve essere il minimo necessario per soddisfare i requisiti prestazionali e di durabilità. Si va quindi a sottolineare i tre campi principali in cui intervenire per ridurre l'inquinamento ambientale: la natura del materiale utilizzato, la sua produzione e l'impiego dello stesso per creare un edificio. La riduzione dell'impatto ambientale della filiera del cemento non compete unicamente al produttore, ma anche alle aziende correlate, che utilizzano il conglomerato cementizio come materia prima per altri prodotti, e i progettisti che devono impiegare in modo opportuno il materiale per creare una costruzione efficiente [18 e 19].

---

<sup>12</sup> ECP è un'associazione europea senza fini di lucro il cui obiettivo è studiare e promuovere i vantaggi del calcestruzzo per la costruzione, offrendo soluzioni per lo sviluppo e la costruzione sostenibile.

### **3.1. Cinque regole per la riduzione delle emissioni nella filiera del cemento**

*European Concrete Platform* promuove una serie di regole per andare a ridurre le emissioni di anidride carbonica legate al cemento entro il 2050. Si prevede che tra il 2011 e il 2050 la popolazione mondiale aumenti da 7,0 miliardi a 9,3 con un incremento dei centri urbani e una richiesta energetica maggiore dell'80% rispetto al valore del 2011, ma allo stesso tempo si pensa che nel campo delle costruzioni l'innovazione porti alla trasformazione degli edifici da consumatori di energia a produttori. Si prevede quindi un aumento della popolazione e una crescita economica in un ambiente in cui le risorse risultano già essere limitate e si avvertono i sintomi del cambiamento climatico. Per fronteggiare tale problema, il calcestruzzo può essere uno dei principali candidati nella realizzazione di alcune soluzioni, quali [18 e 19]:

- Nuove tipologie di trasporto per minimizzare gli effetti ambientali e la congestione;
- Edifici innovativi altamente efficienti sull'aspetto energetico;
- Edifici estesi in altezza per ridurre il consumo di suolo;
- Progetti per catturare la potenza del vento, delle maree o l'energia solare su grande scala;
- Infrastrutture per la protezione da un eventuale aumento del livello del mare.

Per la riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> legate alla produzione del cemento non vi è un'unica tecnologia, investimento o processo ma un insieme di tali elementi. Dal 1990 al 2010, la quantità di anidride carbonica prodotta in Europa dall'industria cementiera è passata da 719 kg/t<sub>cemento</sub> a 660 kg/t<sub>cemento</sub><sup>13</sup> mediante diverse misure, quali:

- Sostituzione dei forni a umido con impianti dotati di tecnologia a secco;
- Riduzione del consumo di energia elettrica grazie al miglioramento delle tecnologie di macinazione;
- Miglioramento dell'efficienza energetica del processo di produzione;
- Ottimizzazione e modernizzazione degli impianti esistenti mediante l'installazione di sistemi automatici, sistemi di controllo del processo e attrezzature ausiliarie;
- Incremento dell'uso di materiali combustibili alternativi;
- Utilizzo di materiali di scarto come materie prime, al fine di ridurre la quantità di calcare necessaria alla produzione;
- Sostituzione del clinker con altri materiali, quali le pozzolane o scarti di lavorazioni industriali.

A fronte di ciò che è stato fatto nel passato, ECP propone delle nuove regole<sup>14</sup> con le quali si pensa di ridurre il *cement carbon footprint* del 32%, valore che può essere incrementato

---

<sup>13</sup> Il dato riguardante le emissioni di CO<sub>2</sub> per tonnellata di cemento è molto variabile a seconda della fonte; come è stato riportato nel precedente paragrafo AITEC ritiene se ne producano circa 680 kg, *Portland Cement Association* 927 kg, *US EPA* da 900 a 1100 kg.

<sup>14</sup> ECP va a mettere insieme interventi concepiti da diversi autori.

## Strategie per la riduzione dell'impatto ambientale

potenzialmente fino all'80% mediante nuove tecnologie e una politica europea incentivante. Le proposte per la riduzione dell'impatto ambientale sono le seguenti:

1. Resource efficiency;
2. Energy efficiency;
3. Carbon sequestration and reuse;
4. Product efficiency;
5. Downstream.

Delle cinque, tre riguardano direttamente il processo produttivo del cemento, mentre le ultime due non si riferiscono in modo specifico alla produzione di tale materiale, ma alle sue caratteristiche e alla sua applicazione nelle costruzioni [18 e 19].

### **3.1.1. Resource Efficiency**

#### **3.1.1.1. Combustibili alternativi**

Come già accennato nel precedente capitolo, i combustibili alternativi e in particolar modo i prodotti di scarto sono sempre più utilizzati nella produzione del cemento. Infatti, l'unicità del processo e le esigenze energetiche dell'industria cementizia consentono l'impiego di miscele di combustibili che non sarebbero adatte ad altre tipologie di industrie. È stato stimato che entro il 2050 il 40% dell'energia del forno potrebbe provenire da fonti tradizionali, quali carbone (30%) e petcoke (10%), mentre il 60% dell'energia necessaria potrebbe essere fornita da combustibili alternativi, dei quali il 40% potrebbe essere la biomassa. Si ritiene che si possa raggiungere il 20% di sostituzione calorica elevabile anche al 50%, a cui corrisponde un risparmio di due milioni di tonnellate di combustibili fossili e circa il 25% di emissioni di anidride carbonica del settore. La conseguenza diretta di riduzione delle emissioni di anidride carbonica è accompagnata anche da alcuni effetti indiretti. Infatti, l'utilizzo di materiali combustibili alternativi è elemento fondamentale nella gestione dei rifiuti che consente alle industrie cementiere di trarne un vantaggio economico riducendo i costi di approvvigionamento dell'energia e quelli legati all'ottemperanza del Protocollo di Kyoto e alla pubblica amministrazione per lo smaltimento di tali materiali senza doverli incenerire in appositi impianti oppure doverli conferire in discarica. I materiali conferiti in discarica o inceneriti contribuiscono comunque alle emissioni di gas serra senza però fare parte di un processo industriale, sfruttandoli in impianti cementieri si evitano le emissioni nocive di decomposizione. I rifiuti impiegati possono essere di natura diversificata e provenire da diverse fonti, normalmente vengono utilizzati combustibili solidi secondari con significativo potere calorifico, materie prime alternative con composizione mineralogica adatta alla produzione del cemento e materiali che hanno idonei contenuti energetici e componenti mineralogici. È fondamentale che essi rispettino degli standard per garantire stabilità del processo produttivo, qualità del cemento e rispetto dell'ambiente. Infatti tali rifiuti devono essere compatibili con il processo produttivo e con la qualità del prodotto finale, essi devono essere di qualità e tracciabili. <<Il pretrattamento dei residui è parte integrante delle operazioni di recupero. Questa stretta collaborazione con gli operatori del

## Strategie per la riduzione dell'impatto ambientale

settore del trattamento dei rifiuti fa sì che si creino flussi di rifiuti selezionati, idonei ad essere impiegati specificatamente nelle cementerie» [8]. Tra i rifiuti che meglio si prestano al co-processing vi sono i fanghi di depurazione (anche se non hanno un elevato potere calorifico) ottenuti come sottoprodotto dal trattamento dalle acque reflue. Essi sono normalmente smaltiti in discarica o in agricoltura, ma si è preoccupati dei residui organici che rendono l'impiego nel settore agricolo discutibile; l'utilizzo nel processo di produzione del cemento è quindi una buona soluzione che riesce a eliminare i residui organici presenti e consente la gestione del surplus di fanghi che mette in difficoltà i normali processi di smaltimento. Due Stati europei che già nel 2011 erano di esempio nell'impiego dei fanghi di depurazione sono Olanda e Spagna. Dal marzo 2000, l'impianto di cemento ENCI, in Olanda, lavora insieme al Comitato di Purificazione di Limburg al fine di sviluppare delle metodologie che consentano di utilizzare i fanghi provenienti dai loro impianti di trattamento delle acque. In Catalogna invece, già nel 2005 è stato raggiunto un accordo tra il settore cementiero, l'amministrazione catalana, i sindacati e i consigli locali per avviare un processo di monitoraggio ambientale per l'utilizzo dei fanghi di depurazione provenienti dalla zona di Barcellona come combustibile alternativo, con l'obiettivo di impiegare più di 60000 tonnellate di fanghi secchi ogni anno. I fanghi non sono però l'unico materiale utilizzabile, come si può notare nel grafico che segue, nel triennio considerato è aumentato l'impiego di CDR (combustibile derivato da rifiuti), di materiali plastici e gomme per pneumatici, diminuendo fortemente l'utilizzo di oli, solventi, farine e grassi animali [6 – 10, 19].

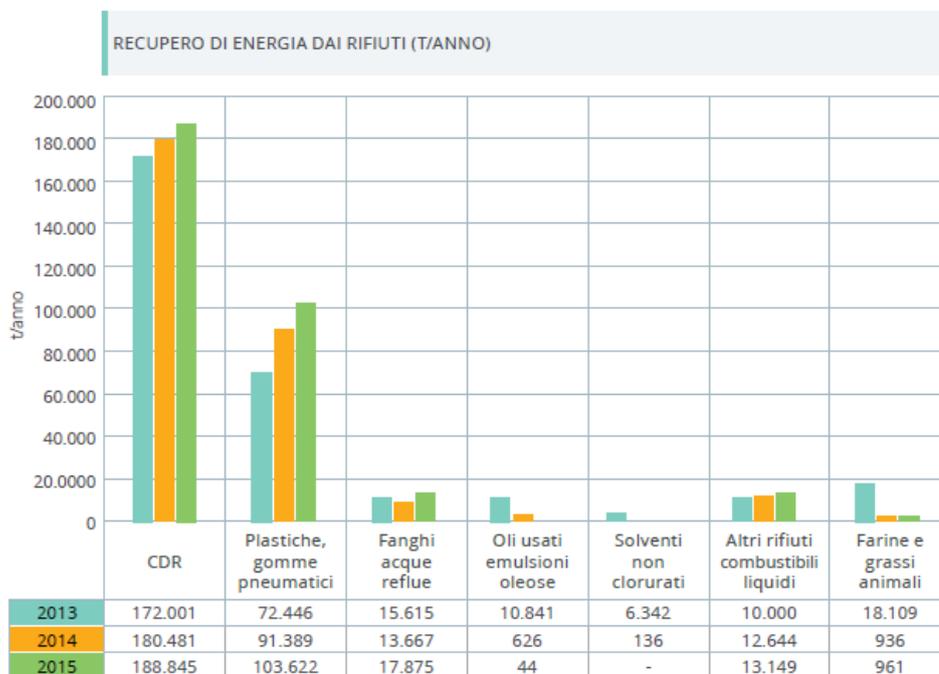


Figura 13. Recupero di energia dai rifiuti in Italia. (Da Rapporto di sostenibilità AITEC 2015).

## Strategie per la riduzione dell'impatto ambientale

Grazie all'impegno dei CSS, alla chiusura degli impianti meno performanti e alle politiche di investimento nelle tecnologie di abbattimento sono diminuite anche le emissioni in atmosfera dell'ordine dell'11% per l'ossido di azoto, del 24% per l'ossido di zolfo e del 25% per le polveri.

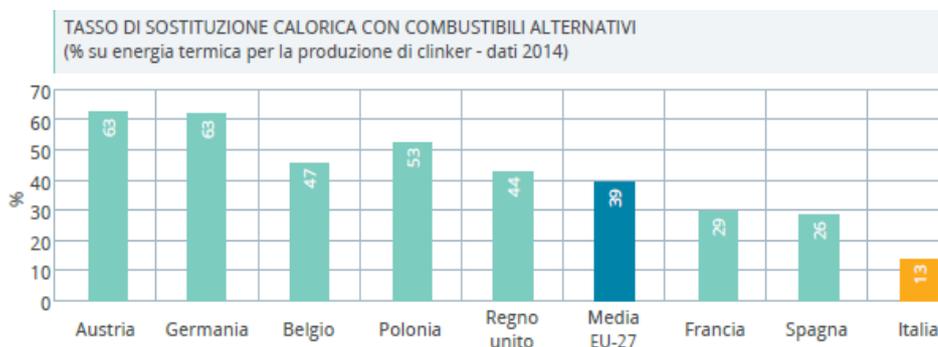


Figura 14. Tasso di sostituzione calorica con CSS. (Rapporto di sostenibilità AITEC 2015).

L'Italia risulta essere lenta nell'utilizzo di combustibili alternativi e, come si può notare dal precedente grafico, altamente al di sotto della media europea, questo perché le procedure di autorizzazione per gli impianti sono spesso lente e le comunità locali sono oppostive. Al contrario di come si può comunemente pensare, i fumi della combustione non vengono liberati in aria, ma sono inglobati nel clinker e pertanto non vengono generati residui solidi di processo. In un inceneritore per rifiuti circa il 20% - 25% in peso dei rifiuti in ingresso viene trasformato in ceneri e scorie che devono essere gestiti in quanto rifiuti; all'interno dei forni rotanti invece le ceneri contribuiscono alla formazione della struttura mineralogica del clinker in quanto possiedono composizione chimica analoga. Inoltre, l'utilizzo di combustibili alternativi nel settore cementiero necessita di autorizzazioni integrate ambientali A.I.A. rilasciate dalla Provincia o dalla Regione che impongono limiti sulle emissioni e prescrizioni più stringenti rispetto ai combustibili fossili, quindi al contrario di come si può pensare, le emissioni prodotte da impianti a combustibili alternativi risultano essere meno inquinanti e più controllate, infatti l'Unione Europea ritiene che l'utilizzo di CSS nelle cementerie in certe condizioni sia un BAT, cioè un *Best Available Technique* per la gestione<sup>15</sup> dei rifiuti [6 – 10, 19].

Secondo quanto indicato dalla Guida Operativa redatta da ENEA, tra le misure di miglioramento del processo non è solo la scelta dei combustibili di cui si è già parlato, ma anche il controllo del processo. Si raccomanda un'ottimizzazione nella gestione del forno, cercando di comprendere sistemi di controllo automatici computerizzati e sistemi gravimetrici per l'alimentazione del combustibile solido [21].

<sup>15</sup> Il co-processing è un recupero e valorizzazione del rifiuto che non è assoggettabile a un riciclaggio o recupero economicamente ed ecologicamente più vantaggioso.

### **3.1.1.2. Sostituzione delle materie prime e creazione di nuovi cementi**

Oltre a intervenire sulla tipologia di combustibile si può operare sulle materie prime impiegate nel processo, come il calcare, materiale di base per la produzione del cemento. Il 60% dell'anidride carbonica prodotta è dovuta alla trasformazione del calcare in calce; si può intervenire andando a sostituire una parte di tale materiale con altri alternativi che contengano calcio, silice, allumina e ferro, come i rifiuti e i sottoprodotti industriali oppure le ceneri provenienti dai altri processi industriali. Alcuni prodotti di scarto possiedono sia un adatto contenuto mineralogico sia un valore calorifico recuperabile; tra di questi vi sono i fanghi di depurazione che hanno un potere calorifico relativamente basso, ma durante la combustione producono delle ceneri che possono essere impiegate per la produzione del clinker. Almeno il 3-4% (circa 14,5 milioni di tonnellate annue) delle materie prime utilizzate per la produzione del cemento in Europa sono materiali alternativi o ceneri di combustione, ma anche rifiuti in calcestruzzo opportunamente macinati e trattati. Il loro utilizzo comporta una riduzione del materiale prelevato in cava, andando quindi a diminuire l'impatto ambientale e paesaggistico. Il problema legato alle materie prime alternative è la presenza di alte concentrazioni di silice, allumina, magnesio o zolfo oppure di composti organici volatili (VOC) che possono compromettere le trasformazioni chimiche nel forno. Alle materie prime alternative sono anche legati alcuni costi, quali quelli dovuti alla macinazione che migliora le fasi produttive successive e gli oneri di immagazzinamento. In ogni caso, anche se le materie prime alternative possono essere una soluzione valida per la riduzione dell'impatto ambientale, il cemento dipende sempre da prodotti naturali che devono essere prelevati dalle cave, per questo è fondamentale una politica europea di gestione dei siti presenti e di quelli futuri in modo da evitare una depredazione del territorio. Secondo quanto riportato nel *Rapporto Cave 2014* di *Legambiente* [17], in Italia sono forti le condizioni di illegalità, di devastazione del territorio, di speculazione ai danni di beni comuni. È necessario modificare la legislazione vigente in modo da rafforzare la tutela del territorio e la legalità, andando ad aumentare i canoni di concessione e riducendo il prelievo da cava a favore del recupero degli inerti o dell'utilizzo di materie prime alternative. In molte aree del territorio si è fermi a una gestione delle cave tipica del dopoguerra favorendo la speculazione; è quindi necessario andare ad eliminare l'eccessiva discrezionalità di chi concede i permessi e il peso degli interessi delle ecomafie. Bisogna chiarire quali sono le aree in cui è vietato estrarre materiale e quelle vincolate dai pareri delle amministrazioni, si devono definire i criteri di recupero delle aree dismesse, le modalità di richiesta delle autorizzazioni, le compensazioni ambientali minime e le procedure di coltivazione (utilizzo di quinte di mascheramento alberate o piani a bassa pendenza per nascondere il fronte di cava). Per quanto riguarda i canoni irrisori sarebbe opportuno aumentarli almeno quanto quelli inglesi che sono pari al 20% del prezzo di vendita in modo da dare giustizia e tutela ai beni comuni<sup>16</sup>; infatti l'assenza di canoni o valori troppo bassi incentiva la devastazione del

---

<sup>16</sup> Un aumento dei canoni dovrebbe comportare una rinuncia da parte dei cavaatori di una parte di guadagno e non un aumento del prezzo di vendita.

## Strategie per la riduzione dell'impatto ambientale

territorio senza promuovere il recupero degli inerti dalle demolizioni. Quest'ultimo aspetto può essere incentivato, come è già stato fatto in altri Paesi europei come Inghilterra e Danimarca, mediante una forte tassazione dei rifiuti destinati alla discarica cosicché la collettività sia spinta a recuperare e riutilizzare il materiale di risulta dalle demolizioni. Si deve creare una moderna filiera in cui le imprese edili vadano a gestire il processo di demolizione selettiva degli inerti provenienti dalle costruzioni al fine di riciclarli e non di conferirli in discarica. Nel 2012, 80 milioni di metri cubi di inerti sono stati estratti da cave e in parallelo sono stati prodotti 45 milioni di tonnellate di rifiuti da demolizione; ciò comporta l'estrema necessità di allargare e incentivare il mercato degli aggregati riciclati che, grazie alle tecnologie innovative, possiedono caratteristiche paragonabili a quelle dei materiali naturali. Va in questa direzione la Direttiva europea 2008/98, con la quale si vuole che il recupero dei materiali inerti raggiunga quota 70% (in Italia si è sotto il 10%) entro il 2020 [18 e 19].

Il cemento Portland ordinario è costituito dal 95% di clinker e dal 5% di gesso e il rapporto medio clinker-cemento per l'Unione Europea è circa 73,7%. La normativa europea che classifica i diversi tipi di cemento, identificandone 27 differenti con una percentuale di clinker che varia dal 5% al 95% è la UNI EN 197-1<sup>17</sup>; la grande variabilità della quantità di clinker fa sì che vi siano diversi tipi di cemento, adatti a molteplici applicazioni. Come già accennato precedentemente, è possibile produrre diverse tipologie di cemento mediante l'impiego di materiali pozzolanici, calcare macinato, ceneri silicee, loppa granulata d'altoforno o altri materiali di scarto e sottoprodotti industriali. Diversi tipi di cemento hanno però proprietà diverse, tra cui il tempo di indurimento, la resistenza agli ambienti marini o chimicamente aggressivi, il rilascio di calore, il colore, la viscosità e la lavorabilità: caratteristiche che dipendono dall'applicazione desiderata del conglomerato cementizio. È quindi necessario garantire durante la fase di sostituzione che le caratteristiche meccaniche del prodotto finale siano quelle desiderate, rispettando i minimi normativi: l'elemento fondamentale è infatti la stabilità delle strutture e la sicurezza della collettività. Per questo, come verrà esplicitato in seguito, è necessario andare a fare una valutazione mediata tra le prestazioni desiderate e l'impatto ambientale dal cemento o conglomerato cementizio utilizzato. Eseguire una stima sulla quantità di materiale sostituito nella composizione del cemento in futuro è complesso, in quanto dipende dalla qualità del prodotto finale richiesta e dal mercato locale; in ogni caso si ritiene che tale via sarà sempre più adottata al fine di limitare l'impatto ambientale. Nonostante ciò, ECP ritiene che il rapporto clinker-cemento possa essere ridotto al 70% con un conseguente risparmio del 4% di CO<sub>2</sub> [18 e 19].

La ricerca riguardante la creazione di nuovi tipi di cemento è molto attiva in Europa, infatti, in diversi Paesi dell'UE sono presenti centri di ricerca su larga scala che cercano di sviluppare nuovi cementi a basso impatto ambientale. Il problema è però legato alla convalida delle proprietà di tali materiali e alla produzione industrializzata, aspetti per cui non si conoscono le tempistiche con i quali tali cementi potranno essere commercializzati

---

<sup>17</sup> Normativa già citata nel capitolo 2.1.1.2 *Il cemento Portland*.

## Strategie per la riduzione dell'impatto ambientale

e le riduzioni di emissioni ad essi legate. L'inserimento di un nuovo prodotto all'interno del mercato delle costruzioni risulta essere spesso difficoltoso a causa degli standard richiesti, della chiusura del mercato e della diffidenza dei consumatori.

Tra i materiali contenuti nei nuovi tipi di cemento, che presentano proprietà compromettenti, vi sono:

- Utilizzo di silicati di magnesio sostituiti al calcare;
- Utilizzo di solfo-alluminati di calcio come leganti;
- Impiego di miscele di carbonati e idrossidi di calcio e magnesio;
- Impiego di autoclavi e speciali tecniche di macinazione che consentono una riduzione del calore necessario e delle emissioni prodotte;
- Utilizzo di roccia dolomitica a rapida calcinazione in vapore surriscaldato;
- Impiego di geopolimeri creati da sottoprodotti provenienti dal settore energetico e dall'industria dell'acciaio;

Oltre ai precedenti problemi citati, legati all'approvazione dell'utilizzo dei nuovi cementi nelle costruzioni, ve ne sono altri correlati alla disponibilità delle materie prime alternative che in alcuni territori sono scarse o non adatte e quindi dovrebbero essere spedite per lunghe distanze oppure essere trattate prima dell'uso. Un altro aspetto è la durabilità del prodotto finale; il cemento tradizionale ha una durabilità nel tempo molto alta e comprovata, è quindi necessario effettuare dei test a lungo termine per valutare quella dei nuovi cementi [16, 18 e 19].

### **3.1.1.3. Efficienza dei trasporti**

Altro aspetto legato alla materia prima utilizzata, se pur di minore impatto rispetto alla processo di clinkerizzazione, è il trasporto dei materiali. Nonostante il cemento sia un materiale prodotto e utilizzato localmente, viene anche trasportato per lunghe distanze via mare, fiume o terra. Per questo, si cerca costantemente di ridurre le emissioni legate al trasporto pesante andando a migliorare l'efficienza del trasporto stesso e combinando quello terrestre con quello in acqua. Riducendo il trasporto su gomma del 50% a favore di quello su rotaia e marittimo o fluviale, si stima che anche le emissioni possano essere dimezzate [19].

### **3.1.2. Energy Efficiency**

Il secondo aspetto da considerare è l'energia consumata durante il processo produttivo del cemento, in particolar modo quella elettrica e quella termica. L'energia elettrica, come è stato riportato nel precedente capitolo, è richiesta in fasi differenti, quali la frantumazione delle materie prime, la cottura del clinker, la macinazione del cemento dopo la cottura e il trasporto di gas e materiali.

La riduzione dei consumi elettrici può essere operata mediante la dismissione degli impianti più vecchi e meno efficienti, andando a premiare gli impianti più recenti con continue modernizzazioni. Quest'ultime sono molteplici e inseribili in diverse fasi del processo, a titolo esemplificativo se ne riportano alcune: tecniche di macinazione avanzate, processi di recupero di calore, moderne tecnologie di raffreddamento e azionamenti a velocità variabile. Vi sono però due problematiche che comportano un aumento dell'energia elettrica necessaria all'impianto; infatti, le tecnologie volte alla riduzione del fabbisogno termico comportano un incremento di quello elettrico, così come le sempre più stringenti normative sulle emissioni in atmosfera richiedono un maggiore quantitativo di energia per la separazione delle polveri o il contenimento di inquinanti. Un altro fattore che influenza la quantità di energia elettrica consumata è il livello prestazionale richiesto, infatti maggiore è la resistenza richiesta più finemente deve essere macinato. A fronte di tali aspetti, si evince che l'elemento fondamentale per la riduzione dell'impatto ambientale in merito all'impiego dell'energia elettrica nel processo di produzione non sia la riduzione del consumo, se pur importante, ma il miglioramento del processo produttivo dell'energia stessa, che deve sempre più derivare da fonti rinnovabili [19].

Il processo di clinkerizzazione avviene tramite il riscaldamento del calcare a circa 1450°C e richiede quindi una discreta quantità di energia termica che comporta circa il 35% delle emissioni di anidride carbonica dell'intero processo. Rispetto agli anni '60 i consumi degli impianti sono diminuiti grazie allo smaltimento delle centrali umide, all'impiego di tecnologie più moderne e alla concentrazione della produzioni in pochi grandi impianti. Nel 2010 secondo i dati riportati nel documento di ECP, l'efficienza energetica era dell'ordine di 3730 MJ/t<sub>clinker</sub>. Tale valore può essere ridotto a circa 3,3 MJ/t<sub>clinker</sub> tramite l'impiego di combustibili alternativi e il miglioramento dei forni utilizzati entro il 2050 [19]. Nella Guida Operativa ENEA [21] vengono riportati alcuni interventi che portano a un miglioramento dell'efficienza energetica nel ciclo produttivo:

- Installazione di un sistema integrato di preriscaldamento a 4 – 6 cicloni con uno di precalcinazione;
- Impiego di bruciatori multicanale;
- Recupero di energia termica dal raffreddamento del clinker uscito dal forno;
- Recupero di calore dai gas provenienti dalla combustione, molto comune in Cina;
- Installazione di inverter sui ventilatori delle griglie di raffreddamento del clinker;

## Strategie per la riduzione dell'impatto ambientale

- Impiego di molini con rulli di macinazione ad alta pressione;
- Installazione di inverter sui motori elettrici dell'impianto di macinazione.

Secondo ECP, l'impiego di forni prefabbricati con precalcinazione consente di ottenere una capacità produttiva più elevata e una migliore efficienza energetica. Essi consumano il 33% in meno di energia termica rispetto ai tradizionali forni a secco senza torri di preriscaldamento e l'85% in meno rispetto ai forni a umido. Attualmente, la tecnologia di ultima generazione è il processo a secco con preriscaldamento multistadio e precalcinazione, la cui efficienza energetica può essere sensibilmente ridotta impiegando combustibili alternativi di qualità scadente (alta umidità o basso potere calorifico) [19].

### **3.1.3. Carbon sequestration and reuse**

Anche pensando di utilizzare un impianto produttivo ideale, altamente efficiente, non è possibile ridurre la quota di anidride carbonica prodotta durante la reazione chimica di trasformazione del carbonato di calcio in ossido di calcio. Sono attualmente studiati e sviluppati dei sistemi che permettano la cattura del carbonio prodotto, definiti CCS (Carbon Capture and Storage), che sarebbero in grado di catturare il 90% delle emissioni di CO<sub>2</sub>. Tale prodotto potrebbe essere trasportato e impiegato come materia prima in altri processi industriali, oppure iniettato e stoccato nel suolo terrestre. La metodologia presenta però alcuni problemi; essa potrebbe far aumentare il costo di produzione del cemento dal 25% al 100% e richiede un maggiore quantitativo di energia elettrica, senza considerare che vi devono essere aree di stoccaggio e sistemi di trasporto idonei. Per ottenere la riduzione dell'80% delle emissioni di CO<sub>2</sub> entro il 2050, considerando tutte le altre misure e senza alcuna altra tecnologia innovativa, è necessario che l'85% del clinker sia prodotto utilizzando un sistema CCS [19]. Un'alternativa possibile, ritenuta più convincente e veloce rispetto al CCS da parte dell'opposizione, è quella di impiegare l'anidride carbonica prodotta per coltivare alghe utilizzate poi come combustibile. Gli impianti per la produzione del cemento sono ideali per l'applicazione di tale tecnologia innovativa. La CO<sub>2</sub>, che deve essere separata da altri fumi o gas, può essere convogliata all'interno di reattori in cui sono presenti alghe a rapida crescita; esse vengono poi raccolte, asciugate ed essiccate in modo da poter essere impiegate come combustibile per il forno rotante dello stabilimento. In alternativa, le alghe prodotte possono essere trasformate in biocarburanti, bioplastiche o composti come antiossidanti, lipidi e proteine, come è stato fatto da *MBD Energy*, società australiana specializzata nella produzione di biocarburanti. L'impianto situato a Melbourne di circa 5000 metri quadrati di superficie è dotato di una tecnologia che permette di convogliare l'anidride carbonica, tramite una canna fumaria, all'interno di bioreattori contenenti alghe che vengono così nutrite insieme a liquami e deiezioni animali. Le alghe impiegate, che sono in grado di raddoppiare di volume in 48h, una volta giunte a maturazione vengono prelevate e pressate così da ottenere un olio utilizzato per la produzione di biocarburante e materiale plastico. Il prodotto di scarto viene poi convertito in farina destinata all'alimentazione animale o alla produzione di biomasse [19 e 20].

I processi di acquisizione dell'anidride carbonica in uscita dal forno possono essere molteplici, quali l'assorbimento chimico, l'utilizzo di membrane oppure l'introduzione della CO<sub>2</sub> nel ciclo del carbonato. Quest'ultimo metodo si tratta di un processo di assorbimento in cui l'ossido di calcio viene messo a contatto con i gas residui della combustione in modo da produrre carbonato di calcio (processo inverso alla carbonatazione già citata più volte). Un metodo alternativo all'estrazione dell'anidride carbonica dai gas della combustione è quello di bruciare ossigeno in modo da ottenere CO<sub>2</sub> pressoché pura; tale metodologia è però ancora in fase di studio in quanto si va a variare l'atmosfera all'interno del forno e non ci è certi che il clinker prodotto non ne risenta. Come già accennato, l'anidride carbonica catturata può essere stoccata nel

## Strategie per la riduzione dell'impatto ambientale

sottosuolo o utilizzata per alimentare alghe, ma anche impiegata in altri processi industriali come:

- Creazione di materiali da costruzione che, mediante catalizzatori enzimatici, convertono la CO<sub>2</sub> in carbonati o bicarbonati;
- Produzione di polimeri definiti bio-plastica;
- Produzione di solventi;
- Sintesi di metanolo.

È necessario andare a sottolineare i limiti e le problematiche legate all'utilizzo del CCS. L'aspetto fondamentale è il capitale richiesto per la costruzione di nuovi impianti che incorporino tale tecnologia, per la modifica di quelli esistenti e per il mantenimento in esercizio. Attualmente, la produzione di cemento in un impianto dotato della tecnologia di cattura del carbonio non sembra essere vantaggiosa rispetto alla produzione tradizionale. I costi per l'introduzione di tale tecnologia sarebbero dell'ordine di alcune centinaia di milioni di euro e le spese di gestione risulterebbero essere quasi il doppio rispetto a un impianto convenzionale in quanto è anche necessario sostenere la compressione, lo stoccaggio e il trasporto dell'anidride carbonica. Un altro problema è legato al trasporto; l'assenza di una rete di condutture dedicata al trasferimento dell'anidride carbonica fa sì che si prediliga l'utilizzo di cisterne stradali o ferroviarie che, con l'impiego del CCS, tenterebbero a essere maggiormente adoperate con un conseguente aumento dell'impatto ambientale. Vi è anche il problema della conservazione; infatti lo stoccaggio definitivo dell'anidride carbonica nella crosta terrestre può comportare alcune problematiche a lungo periodo, che sono attualmente in fase di analisi mediante una valutazione di impatto ambientale sulla falda acquifera, sulle condizioni geologiche e sulla sismicità dell'area. L'ultima problematica che si cita nel presente testo è l'aumento dell'energia necessaria in un impianto con tecnologia CCS, che per quella elettrica può diventare anche il doppio [19 e 20].

### 3.1.4. Product Efficiency

Oltre agli interventi attuabili al processo produttivo e quindi all'impianto, è possibile aumentare le prestazioni ambientali cercando di agire sul cemento e sul modo in cui viene impiegato nel conglomerato cementizio. A tale scopo si va a:

- Utilizzare materiali ad alte prestazioni per ottimizzare l'uso del cemento per tonnellata di calcestruzzo;
- Migliorare l'approvvigionamento locale degli aggregati;
- Ottimizzare gli additivi e la composizione del calcestruzzo nella sua fase di miscelazione.

Nel seguito si riportano le principali metodologie per la riduzione dell'impatto ambientale del conglomerato cementizio mediante un'azione sul materiale [19].

#### 3.1.4.1. Material performance strategy

L'aspetto su cui si fonda tale strategia è quello di migliorare le caratteristiche meccaniche del cemento e poi quindi del conglomerato prodotto al fine di diminuirne la quantità impiegata in opera. Aumentando la resistenza del calcestruzzo confezionato incrementano le emissioni di CO<sub>2</sub> a metro cubo di conglomerato cementizio prodotto, ma è possibile diminuire la quantità di calcestruzzo necessario alla costruzione dell'elemento strutturale. La dimensione minima determinata con un approccio strutturale non è però sempre possibile raggiungerla in quanto ci si deve interfacciare anche con gli aspetti relativi all'acustica, alla termofisica o all'antincendio, che possono portare a dimensioni minime superiori [19].

G. Habert e N. Roussel hanno condotto alcuni studi riguardanti appunto le strategie ambientali *material performance strategy* e *material substitution strategy*, i cui risultati sono stati riportati nell'articolo *Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives* [22].

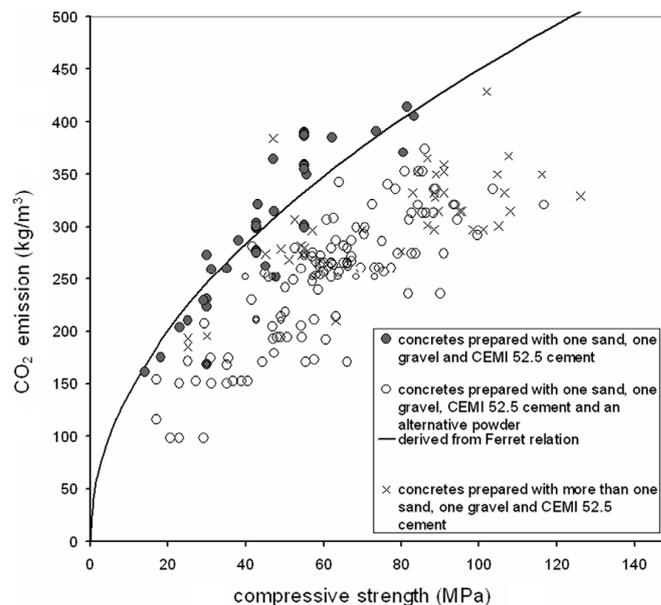


Figura 15. Diagramma resistenza/emissioni di anidride carbonica per diversi tipi di cementi. (Da *Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives*).

## Strategie per la riduzione dell'impatto ambientale

Per quanto riguarda la prima strategia, hanno provato a quantificare la riduzione del volume del conglomerato cementizio a fronte di un miglioramento delle caratteristiche meccaniche.

Come si evince dal precedente grafico, un incremento della resistenza comporta anche un aumento delle emissioni di CO<sub>2</sub> a metro cubo di materiale prodotto. Ai fini della creazione del grafico, Habert e Roussel hanno supposto che si producano 0,7 t<sub>CO2</sub>/t<sub>cemento CEM I</sub>; per le aggiunte minerali e gli aggregati si suppone invece che non diano contributi in termini di anidride carbonica. Come già accennato in precedenza, per aumentare la resistenza si tende normalmente a incrementare il quantitativo di cemento, fino al valore di 70 MPa in cui la resistenza a compressione diventa funzione della qualità dello scheletro granulare.

Considerando la relazione Ferret, secondo la quale la resistenza meccanica è proporzionale al quadrato della quantità di cemento in metri cubi, ne scaturisce che tale resistenza è anche funzione dell'anidride carbonica prodotta per ogni metro cubo di cemento:

$$f_c \approx (CO_2^{m^3})^2 \quad [3.1]$$

Da grafico sopra riportato si possono notare tre tipologie di conglomerati:

- Calcestruzzo comune costituito da un solo tipo di ghiaia, sabbia e cemento CEM I; esso presenta maggiori emissioni di CO<sub>2</sub>.
- Calcestruzzo in cui vi è un maggior numero di classi granulometriche; ciò consente un aumento della resistenza meccanica a un dato livello di emissione di CO<sub>2</sub> o una diminuzione delle emissioni per una determinata resistenza.
- Calcestruzzo con una parte di clinker puro sostituito con una polvere minerale alternativa che permette la diminuzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> a cubo di calcestruzzo; tale decremento dipende dalla natura e quantità della polvere.

Nel seguito dell'analisi scientifica vengono presentati alcuni esempi di strutture per verificare se la diminuzione di volume riesca a compensare l'aumento di anidride carbonica legata alla produzione di cemento con migliori prestazioni. È stata studiata una trave tipica dell'edilizia residenziale, per la quale il carico esterno è minore del peso proprio dell'elemento strutturale. La sollecitazione massima è inversamente proporzionale allo spessore e quindi al volume; da tale considerazione si può valutare il rapporto tra le emissioni di CO<sub>2</sub> totali coinvolte nella costruzione dell'elemento e quelle dovute al confezionamento di un metro cubo di calcestruzzo. Considerando la relazione di Ferret (3.1), si conclude che con un aumento della resistenza del materiale e una diminuzione del volume, l'anidride carbonica totale decrementa quando quella prodotta al metro cubo di calcestruzzo incrementa. Viene poi presentato il caso di un elemento orizzontale tipico dei fasci da ponte, nei quali il carico esterno è maggiore del peso proprio. Per questa tipologia strutturale, la produzione di CO<sub>2</sub> totale non è funzione della resistenza meccanica e quindi un incremento delle prestazioni meccaniche non ha effetti

dal punto di vista ambientale. L'ultimo esempio è quello di un elemento strutturale verticale cilindrico soggetto a uno sforzo di compressione. Per una data altezza, la sollecitazione massima è inversamente proporzionale al volume e quindi alla produzione di CO<sub>2</sub> totale. Per tale tipologia di elementi, l'incremento prestazionale ha risvolti positivi sull'ambiente anche se bisogna prendere in considerazione la possibile instabilità per carico di punta che comporta la necessità di una dimensione minima. Si può inoltre ipotizzare che il modulo elastico sia proporzionale alla resistenza a compressione; a fronte di ciò un aumento prestazionale non migliora la resistenza al buckling ma non comporta nemmeno un aumento delle emissioni di anidride carbonica.

A fronte di tali considerazioni, si può concludere che raddoppiando la resistenza del calcestruzzo si raggiunge una riduzione delle emissioni di anidride carbonica dell'ordine del 30%, incrementabile anche al 50% nel caso in cui si utilizzino calcestruzzi a prestazioni molto elevate (resistenze pari a circa 120 MPa).

### **3.1.4.2. Material substitution strategy**

Al posto di intervenire sulle prestazioni meccaniche, si può agire sui materiali che compongono il conglomerato cementizio, sostituendo totalmente o parzialmente il clinker con polveri minerali, utilizzando inerti non convenzionali e impiegando additivi, come è già stato accennato nel capitolo 3.1.1.2. *Sostituzione delle materie prime e creazione di nuovi cementi.*

#### **3.1.4.2.1. Sostituzione degli aggregati**

Tale tecnica consiste nella sostituzione parziale o totale degli aggregati naturali e artificiali con materiali da riciclo in modo da contenere i consumi energetici, le emissioni in atmosfera e lo sfruttamento del territorio.

Uno dei possibili materiali da impiegare è il calcestruzzo riciclato proveniente da demolizioni che altrimenti dovrebbe essere conferito in discarica, che potrebbe sostituire circa il 20 – 30% degli aggregati. Tale prodotto è un materiale a basso costo, il cui impiego è positivo dai punti di vista economico e ambientale nel momento in cui è ricavato e utilizzato a livello locale, con distanze di consegna minori di 40 km. La normativa nazionale limita l'impiego di tale prodotto per gli elementi strutturali, mentre in altri Paesi in cui è ampiamente utilizzato con percentuali di sostituzione prossime al 100%. Oltre al calcestruzzo riciclato è possibile impiegare vetro, mattoni frantumati e rocce di scarto dall'estrazione mineraria; tali prodotti però peggiorano le caratteristiche meccaniche del prodotto finale che è meglio utilizzare in ambienti non aggressivi e per usi non strutturali.

## Strategie per la riduzione dell'impatto ambientale

Origine del materiale da riciclo	Classe del calcestruzzo	% di impiego
Demolizioni ed edifici (macerie)	=C8/10	Fino al 100%
Demolizioni di solo calcestruzzo e C.A.	≤ C30/37	≤30%
	≤ C20/25	Fino al 60%
Riutilizzo di calcestruzzo interno negli stabilimenti di prefabbricazione qualificati da qualsiasi classe	≤ C45/55	Fino al 15%
Da calcestruzzi > C45/55	Stessa classe del calcestruzzo di origine	Fino al 5%

Figura 16. Percentuale di impiego aggregati riciclati. (Da tabella 11.2.III NTC-2008).

Al capitolo 11.2.9.2 delle NTC – 2008 [23] si vanno a definire le caratteristiche che devono avere gli aggregati per un uso industrializzato. Si tratta anche di aggregati riciclati rimandando alla norma UNI EN 12620 [24] e riportando la precedente tabella nella quale vengono date le percentuali di impiego in funzione delle classi di calcestruzzo e della provenienza del materiale.

Come viene riportato nei capitoli a seguire, la presente tesi di ricerca va ad analizzare la possibilità di sostituire una parte della sabbia presente nella malte cementizie con rifiuti riciclati, in particolar modo impiegando pellets di polipropilene e di gomma da pneumatici a fine vita.

Oltre a intervenire sugli inerti, la normativa contempla la possibilità di effettuare aggiunte all'impasto di:

- Cenere volante: polvere sottile vetrosa ottenuta dalla filtrazione dei prodotti della combustione nelle centrali termoelettriche. Può essere impiegata come aggregato fine o in sostituzione a una parte di cemento, migliorando, ad esempio, il calore d'idratazione, la permeabilità e la resistenza alla carbonatazione;
- Loppa granulata d'altoforno: ottenuta tramite rapido raffreddamento di scorie provenienti dalla fusione in altoforno di minerali di ferro. Utilizzata nei cementi di miscela riduce il calore d'idratazione prodotto;
- Fumi di silice: proveniente dalla riduzione del quarzo ad elevata purezza con carbone in forni ad arco elettrico. Simile alla pozzolana, incrementa la resistenza e la durabilità del calcestruzzo, aumentando in particolar modo la resistenza alle aggressioni chimiche e all'umidità.

L'utilizzo di questi sottoprodotti industriali rappresenta un'opzione intelligente per impiegare materiali che, altrimenti, sarebbero destinati ad essere conferiti in discarica. Inoltre il loro utilizzo diminuisce l'impiego di clinker con il conseguente decremento dell'estrazione da cava, del consumo di combustibili e delle emissioni di anidride carbonica [11, 12, 16 e 19].

#### **3.1.4.2.2. Aggiunta di additivi**

Circa l'80% del calcestruzzo preconfezionato e prefabbricato viene modificato con l'aggiunta di additivi, in quantità comprese tra 0,2 e 2% in peso.

I principali vantaggi legati all'utilizzo di additivi si possono riassumere in:

- Riduzione della *Embodied Carbon diOxide* e del contenuto d'acqua;
- Migliore utilizzo del cemento;
- Aumento della fluidità e riduzione quindi delle esigenze energetiche e dell'inquinamento acustico per la vibratura;
- Riduzione della permeabilità;
- Miglioramento della resistenza agli ambienti aggressivi e al gelo-disgelo;
- Incremento della durabilità e delle prestazioni fisico-meccaniche che si traduce in un migliore ciclo di vita dell'opera e in un minore impatto ambientale;
- Prevenzione delle fessurazioni da ritiro.

Come accennato nel *Capitolo 2*, tra i diversi additivi vi sono i superfluidificanti; essi rappresentano circa l'80% del consumo nazionale. Oltre alle motivazioni tecnico-economiche, hanno un ruolo sempre più importante nel campo della sostenibilità in quanto:

- Riducono il contenuto d'acqua, migliorando al contempo le prestazioni nelle prime fasi dopo il getto, durante la maturazione e incrementando le caratteristiche di durabilità;
- Consentono un più largo impiego di cementi da miscela (a basso contenuto di clinker) e quindi una riduzione dell'impatto ambientale;
- Consentono l'utilizzo di aggiunte nell'impasto del conglomerato con prodotto di scarto;
- Migliorano l'efficacia dei componenti cementizi facendo sì che servano minori quantitativi di cemento e acqua a metro cubo a parità di prestazioni.

È stato citato più volte il contenuto d'acqua presente nella miscela; essa ricopre un ruolo fondamentale nel campo della sostenibilità in quanto la disponibilità di acqua potabile a livello mondiale è sempre più scarsa. L'acqua costituisce il 20% in volume della miscela del conglomerato cementizio per un quantitativo dell'ordine di centinaia di litri al metro cubo che può essere ridotto a 30 l/m<sup>3</sup> con l'impiego di additivi riduttori d'acqua. Grazie a tali additivi, il consumo annuo mondiale di acqua per il calcestruzzo pari a circa 2,3 miliardi di metri cubi potrebbe essere ridotto di circa 350 milioni di metri cubi [11, 12 e 19].

#### **3.1.4.2.3. Modifica della composizione del cemento**

Tale strategia, utilizzata da anni, prevede la sostituzione di una parte di clinker con aggiunte minerali che, a seconda delle caratteristiche chimico-fisiche, assumono la funzione di riempitivo, riducendo la porosità e migliorando modulo elastico e resistenza meccanica, o di legante per formare idrati stabili. I cementi che vengono prodotti con questo metodo sono classificati nella norma UNI EN 197-1 [34] già citata nel capitolo 2.1.1.2. *Il cemento Portland*, qui se ne riporta la classificazione [1, 2 e 25]:

## Strategie per la riduzione dell'impatto ambientale

- **CEM I:** cemento Portland con percentuale di clinker pari ad almeno il 95% e il 5% di altri materiali atti a facilitare la macinazione del clinker e catalizzare la reazione di idratazione del cemento;
- **CEM II:** cemento Portland costituito da almeno il 65% di clinker e con denominazioni variabili a seconda della quantità e tipologia delle aggiunte minerali (19 sottotipi), ad esempio sigla S per loppa d'altoforno, D per fumi di silice, P per pozzolana, V e W per ceneri volanti, T per scisto calcinato, L e LL per calcare e M per il Portland composito;
- **CEM III:** cemento d'altoforno con percentuale di loppa d'altoforno variabile tra 36 e 95%, presenta 3 sottotipi;
- **CEM IV:** cemento pozzolanico con possibilità di 2 sottotipi per percentuali di materiale pozzolanico variabili tra 11 e 55%;
- **CEM V:** cemento composito costituito da clinker di cemento Portland (20 – 64%), loppa d'altoforno, pozzolane naturali, pozzolane industriali, ceneri volanti silicee; ne sono previsti 2 sottotipi.

Gli studi condotti da Habert e Roussel [22] non vanno a valutare la fattibilità della strategia in questione, ma sono volti all'associazione dei costi ambientali con i requisiti prestazionali legati alla progettazione del mix di conglomerato cementizio. In tali analisi vengono considerati due esempi. Nel primo caso è stata presa in esame la temperatura ottimale che consente l'attivazione dei materiali argillosi presenti in una sostituzione pozzolanica. Ne è scaturito che utilizzando materiali con temperatura di attivazione più bassa si riducono le emissioni di anidride carbonica legate al riscaldamento. Nel secondo esempio è stato analizzato il rapporto tra la percentuale di sostituzione e le emissioni di CO<sub>2</sub> supplementari dovute al processo di sostituzione stesso. Da tale valutazione si evince che la sostituzione del cemento con alternative minerali è una potente strategia per la riduzione dell'impatto ambientale, ma a seconda del tipo e della percentuale di sostituzione, esistono valori ottimali e altri per cui le proprietà meccaniche decadono fortemente. Ciò dimostra che la sola strategia di material substitution non riesce a rispondere alla necessità di ridurre l'impatto ambientale e di soddisfare i requisiti prestazionali, per questo una possibile alternativa è la combinazione di tale metodo con la strategia che prevede un incremento delle prestazioni dei materiali così da colmare le carenze.

### **3.1.5. Downstream**

Un altro aspetto di cui si occupa il settore delle costruzioni per andare a ridurre l'impatto ambientale del cemento è il rapporto di tale legante idraulico con gli altri materiali con cui è normalmente miscelato per la realizzazione di malte, intonaci, calcestruzzo o altro. Grazie alle nuove soluzioni nel campo delle costruzioni e alle innovazioni tecnologiche, è possibile edificare opere con un consumo di energia ed emissioni di anidride carbonica molto più contenuti rispetto a vent'anni fa. È possibile prolungare la vita utile degli edifici e renderli più efficienti dal punto di vista energetico, cercando di volgere a un futuro cambio di destinazione del manufatto oppure a una decostruzione dell'opera con reimpiego dei materiali e non a una demolizione con conferimento dei prodotti di risulta in discarica.

Oggi, al fine di evitare i costi di demolizione e ridurre l'impatto ambientale, si cerca di lasciare la struttura in calcestruzzo invariata, andando a modificare la parte interna e la facciata. Questo è possibile unicamente se il progetto originale dell'edificio è flessibile in modo da consentire l'adattamento e il cambio di destinazione d'uso durante la vita del manufatto.

Per quanto riguarda invece il ricorso alla demolizione e il conferimento in discarica, quotidianamente in Europa si producono circa 200 milioni di tonnellate di rifiuti provenienti dal campo delle costruzioni. Il calcestruzzo che costituisce una struttura ben concepita e progettata può essere reimpiegato o riciclato, andando così a ridurre l'impatto ambientale. Per questo, anche per le opere in calcestruzzo, si tende a utilizzare strutture prefabbricate progettate per essere assemblate e smantellate con facilità. Se si ricorre al riciclaggio, il calcestruzzo può essere impiegato come riempimento (particolarmente adatto a tale scopo perché è più economico, ha migliori proprietà di compattazione e densità rispetto al materiale vergine) oppure come inerte per la produzione di nuovo conglomerato cementizio.

A volte si parla del tempo di ritorno del calcestruzzo, intendendo la capacità del materiale di riassorbire, durante il suo arco di vita in opera, la CO<sub>2</sub> che è stata emessa per la produzione. Questo perché il conglomerato cementizio è soggetto alla carbonatazione, reazione chimica con la quale la parte più superficiale reagisce con l'anidride carbonica presente nell'aria. Si può quindi pensare di andare a frantumare il calcestruzzo proveniente da una decostruzione per aumentarne la superficie e quindi l'assorbimento di CO<sub>2</sub> prima del suo utilizzo come riempitivo. Si può dimostrare, mediante degli studi, che il 5 - 20% dell'anidride carbonica emessa durante il processo di fabbricazione del cemento è riassorbita durante il ciclo di vita del calcestruzzo e un ulteriore 5 - 10% può essere ripreso durante la vita secondaria o riciclata.

Il calcestruzzo può anche essere impiegato per andare a ridurre il consumo energetico degli edifici, i quali contribuiscono a circa il 35% delle emissioni di gas serra dell'Unione Europea. Il pregio del conglomerato cementizio è l'elevata inerzia termica, che combinata con le caratteristiche di altri materiali può portare a notevoli risparmi energetici. Sono stati inoltre condotti degli studi per il settore dei trasporti, il quale rappresenta circa il

## Strategie per la riduzione dell'impatto ambientale

20% delle emissioni di gas serra mondiali; i pavimenti in calcestruzzo possono ridurre il consumo di carburante di autocarri pesanti fino al 6% riducendo la resistenza al rotolamento tra la strada e il camion e grazie alla colorazione chiara rispetto alle pavimentazioni bituminose, consentono una minore illuminazione notturna e riducono l'effetto isola calda intorno ai centri abitati [16 e 19].

### **3.2. Cenni sulla valutazione del ciclo di vita**

#### **3.2.1. Life Cycle Assessment**

Per occuparsi correttamente del carico ambientale ed energetico dei processi produttivi, in questo caso quello del cemento, è necessario analizzare tutte le fasi del ciclo di vita: dal materiale grezzo al suo impiego fino a fine vita. <<La valutazione ambientale del ciclo di vita è un metodo che valuta gli impatti ambientali di un prodotto, di un processo o di un servizio durante tutti il suo ciclo di vita, attraverso la quantificazione dei flussi di materia ed energia in ingresso (consumi) e in uscita (emissioni) nelle fasi di estrazione delle materie prime, trasporto, produzione, distribuzione, uso e dismissione>> [26].

La valutazione mediante *Life Cycle Assessment* è normalmente volta al confronto tra due prodotti alternativi oppure alla determinazione degli interventi da mettere in atto per migliorare il ciclo di vita di uno specifico prodotto. A seconda delle finalità dello studio, la valutazione si suddivide in base al grado di approfondimento in *concettuale*, *semplificata* e *dettagliata*. Lo studio tramite LCA è governato dalla norma UNI EN ISO 14040:2006 e si può suddividere nella seguente struttura:

- Definizione degli scopi e degli obiettivi: tra i diversi elementi si definiscono l'unità funzionale (intesa come unità di misura dell'intera valutazione) e i confini del sistema entro cui condurre le analisi;
- Redazione di un inventario in cui vengono riportati gli input e gli output di tutti i flussi fisici che attraversano il sistema considerato;
- Valutazione dell'impatto ambientale degli elementi precedentemente determinati mediante la traduzione dei flussi fisici in grandezze con operazioni di classificazione e caratterizzazione;
- Interpretazione dei risultati individuando le criticità ambientali, le possibili alternative e confrontando diversi prodotti o sistemi di prodotti.

In edilizia, la certificazione del livello di sostenibilità basata su LCA può essere eseguita con il *Protocollo ITACA* o con il sistema *LEED* [26 – 27].

La valutazione mediante LCA è l'elemento fondamentale del *Conceptual Design*, approccio progettuale nel quale non si considera unicamente costo, qualità e tempo di realizzazione, ma anche le risorse impiegate, le emissioni e l'impatto sulla biodiversità, ponendo alla base del processo il concetto di interoperabilità. Nel seguente diagramma qualitativo viene riportato il ruolo del *Conceptual Design* sul ciclo di vita del manufatto, evidenziando la potenziale influenza di ciascuna fase sull'impatto ambientale: scelte errate in fase di progettazione non sono recuperabili durante la fase di utilizzazione dell'opera. L'impiego della tecnologia nella fase di costruzione consente un recupero parziale sull'impatto ambientale, che resta pressoché costante fino al processo di riciclaggio [16].

## Strategie per la riduzione dell'impatto ambientale

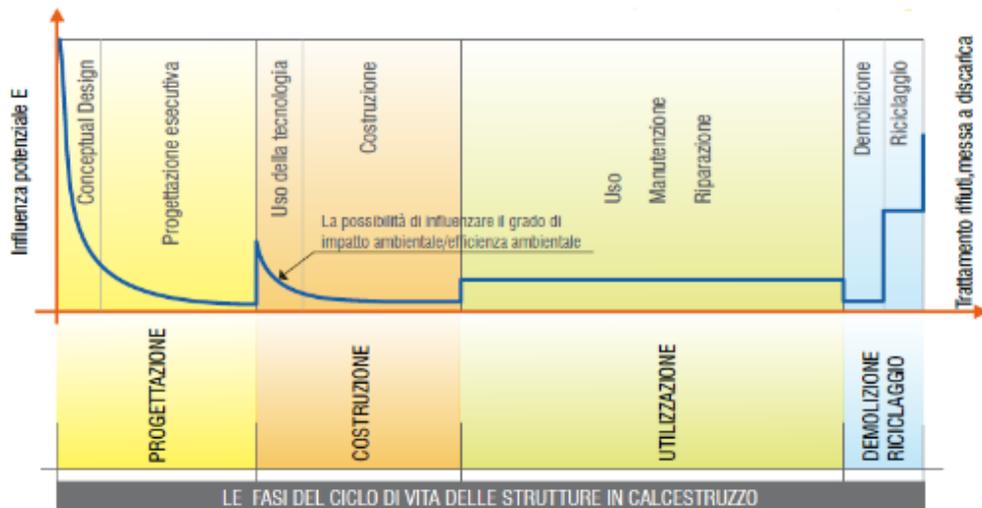


Figura 17. Influenza sull'impatto ambientale delle scelte prese durante le diverse fasi del ciclo di vita delle strutture in calcestruzzo. (Da Spunti di riflessione sulla sostenibilità del ciclo di vita delle infrastrutture in calcestruzzo).

Per quanto concerne le costruzioni in calcestruzzo, la valutazione del ciclo di vita riguarda nello specifico le seguenti fasi [16]:

- Estrazione delle materie prime per la miscela;
- Produzione del calcestruzzo;
- Miscelazione, trasporto ed esecuzione del getto di calcestruzzo;
- Manutenzione in opera;
- Demolizione o decostruzione e fine vita.

### 3.2.2. Embodied Energy

L'Embodied Energy o energia grigia, citata più volte nel presente testo, è definita come la quantità di energia impiegata per produrre, trasportare e smaltire un prodotto o per assicurare un servizio. Essa non è l'energia disponibile in un materiale, bensì la richiesta energetica cumulativa del prodotto. Si considera l'energia necessaria all'estrazione e alla lavorazione delle materie prime, quella richiesta per il trasporto dei sottoprodotti e dei prodotti finiti fino al sito di assemblaggio o costruzione e quella relativa allo smaltimento o riciclaggio, includendo eventualmente quella associata alla manutenzione [26].

Si distinguono due tipi di energia grigia:

- Energia grigia iniziale: relativa appunto alla produzione, trasporto e smaltimento che è ulteriormente suddivisibile in diretta e indiretta;
- Energia grigia periodica o per manutenzione: essa dipende da diversi fattori tra cui il tipo di edificio, la durabilità dei materiali, i sistemi installati nel manufatto, la qualità degli interventi di manutenzione o il comportamento degli utilizzatori.

### ***3.2.3. Certificazione Environmental Product Declaration***

EPD è una dichiarazione ambientale, cioè un documento che fornisce dati quantitativi in merito al profilo ambientale di un prodotto valutato con il metodo LCA. AITEC ha promosso un'iniziativa associativa, avviata nel 2015, per quantificare l'impatto ambientale della produzione del cemento grigio in Italia attraverso la valutazione LCA e seguendo le regole del Sistema Internazionale EPD fino al 2018. Lo studio è stato condotto su un campione rappresentativo costituito da aziende associate ad AITEC e ha incluso anche gli impianti di macinazione in modo da considerare anche l'impatto ambientale prodotto dal clinker. Il certificato EPD, ottenuto sviluppando le procedure previste dalla normativa e concordate con ICMQ, è stato pubblicato sul sito di Environdec. Esso non è da ritenersi un punto di arrivo in quanto si vuole confermare l'attestazione rilasciata annualmente raccogliendo i dati necessari a ribadire gli indicatori ambientali. L'ottenimento di un EPD per l'industria del cemento consente alle imprese del settore di avere un parametro di confronto che fornisca loro indicazioni sull'impatto ambientale dei prodotti [5, 6 e 11].

## Capitolo 4. Sostituzione degli inerti con materiali di rifiuto

Nel presente capitolo si vanno a dare dei cenni introduttivi per una migliore comprensione di ciò che è stato svolto nella campagna sperimentale e nella successiva elaborazione dei risultati. La sperimentazione svolta si è basata sulla strategia *Aggregate substitution strategy* applicata alle malte cementizie, andando a sostituire una porzione di sabbia che costituisce il conglomerato cementizio con polipropilene riciclato o con PFU<sup>18</sup>. Di seguito si vanno a descrivere i materiali impiegati.

### 4.1. Materiali polimerici

I polimeri sono sostanze organiche naturali o sintetiche costituite da un insieme di molecole di dimensioni e peso molecolare elevati, ciascuna delle quali è formata a sua volta da piccole unità funzionali legate tra loro, dette monomeri. Le macromolecole possono essere catene lineari, ramificate, a legami incrociati o tridimensionali<sup>19</sup> di monomeri ripetuti per un numero di volte pari al grado di polimerizzazione<sup>20</sup>. Per quanto riguarda i legami presenti, se ne identificano due tipologie; all'interno della catena sono covalenti, cioè legami primari e forti, mentre tra le catene vi possono essere legami covalenti per i polimeri termoindurenti oppure secondari, quali Van der Waals o idrogeno, per i polimeri termoplastici.

La struttura portante di un polimero è normalmente costituita da una catena di atomi di carbonio:

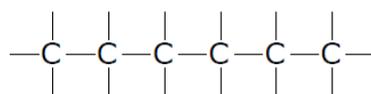


Figura 18. Struttura portante di un polimero. (Da slide *Scienza e tecnologia dei materiali*, prof. Federico Smeacetto).

Ad essi possono essere legati singoli atomi o molecole che caratterizzano le diverse tipologie di polimeri. A causa delle dimensioni e della complessità delle molecole, i polimeri sono spesso dei solidi non completamente cristallini (presenza di una struttura atomica ordinata), nella cui massa sono presenti porzioni amorfe. La cristallinità è influenzata dalla velocità di raffreddamento durante la solidificazione, dalla composizione chimica, è sfavorita dalla presenza di monomeri con strutture chimiche complesse, e dalla

<sup>18</sup> Pneumatici fuori uso.

<sup>19</sup> La resistenza meccanica del polimero aumenta con il numero di legami tra le catene e la complessità della molecola; una catena tridimensionale ha proprietà meccaniche migliori di una lineare.

<sup>20</sup> Influisce sullo stato fisico del polimero, sulla temperatura di rammollimento e sulla rigidità.

## Sostituzione degli inerti con materiali di rifiuto

struttura delle catene, in quanto ramificazioni laterali ostacolano la cristallizzazione. È stato citato il concetto di cristallinità poiché essa influenza le proprietà fisiche, infatti maggiore è il grado di cristallinità più elevata è la densità, la stabilità termica, la rigidità e la resistenza meccanica, ma anche la relazione tra la variazione di volume e l'aumento di temperatura [29 e 30].

I polimeri possono essere suddivisi in [29 e 40]:

- **Termoplastici:** Rammolliscono con il calore e solidificano con il raffreddamento, mantenendo la forma in cui sono stati modellati. Tali materiali possono essere nuovamente riscaldati e rimodellati in nuove forme più volte, senza cambiamenti significativi delle loro proprietà. Essi sono costituiti da macromolecole di dimensioni limitate, lineari o ramificate, con legami secondari tra le catene. Allo stato solido, possono essere in forma amorfa oppure semicristallina e vengono lavorati per stampaggio a temperature più basse rispetto agli altri polimeri, caratteristica che consente una maggiore velocità di produzione.
- **Termoindurenti:** Rispetto ai precedenti, sono lavorabili a caldo una sola volta; se riscaldati nuovamente si degradano e si decompongono. Nonostante il termine termoindurente implichi la presenza di calore per dare forma al materiale, sono presenti alcune plastiche termoindurenti che induriscono, o reticolano, anche attraverso una reazione chimica a temperatura ambiente. Tra le catene vi sono legami di tipo covalente che rendono la struttura più rigida e ne aumentano la resistenza meccanica rispetto ai polimeri termoplastici.
- **Elastomeri:** Con tale termine si indicano le sostanze naturali o sintetiche che hanno la capacità di subire grosse deformazioni elastiche senza entrare in campo plastico. Essi infatti possono essere allungati diverse volte riassumendo la propria dimensione iniziale alla cessazione del carico che ha provocato la deformazione. Anche gli elastomeri possono essere suddivisi in termoplastici e termoindurenti. I secondi sono i più diffusi e vengono prodotti mediante il processo di vulcanizzazione che prevede l'utilizzo di reagenti chimici e variazione di temperatura e di pressione. Ciò comporta una modificazione della struttura molecolare che impedisce un eventuale rimodellamento scaldandoli. I termoplastici sono generalmente co-polimeri di stirene e butadiene, poliolefine e co-poliesteri. Presentano buone proprietà elastiche anche se non sono sottoposti alla vulcanizzazione e possono essere rimodellati più volte fondendoli.

#### 4.1.1. Caratteristiche meccaniche

Uno degli aspetti fondamentali nella trattazione dei polimeri è la valutazione delle proprietà meccaniche, per questo vengono dati alcuni cenni generali.

La maggior parte di tali caratteristiche sono influenzate dalla temperatura, della velocità di deformazione e dalle condizioni chimiche dell'ambiente circostante, per questo rispetto alle prove eseguite sui metalli è necessario apportare alcune modifiche sulla forma dei provini e sulle metodologie di prova. Nel diagramma che segue sono rappresentate tre tipologie di curve sforzo-deformazione, una per i polimeri a comportamento fragile, una per quelli duttili e una per gli elastomeri.

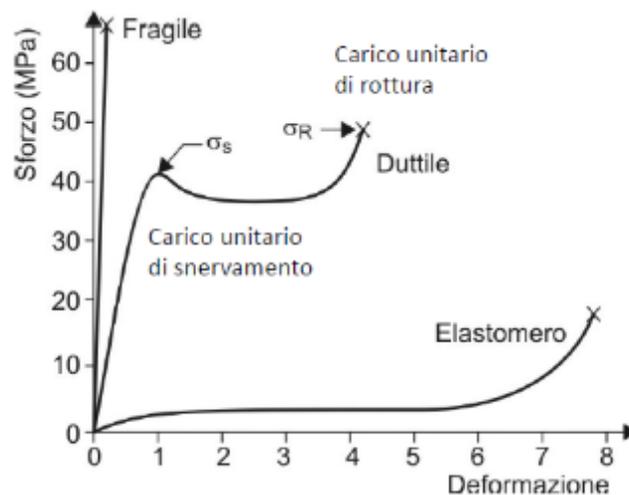


Figura 19. Diagramma sforzo-deformazione dei polimeri. (Da slide Scienza e tecnologia dei materiali, prof. Federico Smeacetto).

Per quanto concerne i polimeri con comportamento duttile, il carico unitario di snervamento si identifica con il termine del tratto di curva di tipo elastico, il carico unitario di rottura per il quale avviene la rottura a trazione può essere maggiore o minore di  $\sigma_s$ , per questo quando si parla di rottura si intende sempre la rottura per trazione del polimero.

Come si può intuire analizzando i diversi andamenti della curva sforzo-deformazione, le caratteristiche meccaniche sono molto variabili. Il modulo elastico ha valori compresi normalmente tra 7 MPa per i polimeri elastici e 4 GPa per quelli più rigidi; i valori massimi della resistenza a trazione sono dell'ordine di 100 MPa e gli allungamenti possono raggiungere anche il 1000%. Le caratteristiche meccaniche sono fortemente influenzate dalla temperatura: un suo aumento comporta una diminuzione del modulo elastico e del carico di rottura e un incremento della duttilità. Per quanto riguarda la velocità di deformazione, essa ha lo stesso effetto della temperatura, il materiale diventa più morbido e duttile. Tali caratteristiche non sono le uniche a influenzare le proprietà meccaniche; maggiore è il peso molecolare, tanto più alta è la resistenza a trazione. Anche il grado di cristallinità condiziona le proprietà meccaniche in quanto nelle zone cristalline vi sono molti legami secondari che invece scarseggiano nelle regioni amorfe a causa dell'elevato disordine, a fronte di ciò il modulo di trazione, la generale resistenza del

## Sostituzione degli inerti con materiali di rifiuto

polimero e la sua fragilità tendono ad aumentare con l'incremento del grado di cristallinità.

I polimeri semicristallini, a causa proprio della presenza di regioni cristalline inserite nella massa amorfa, sono soggetti al fenomeno dell'allungamento in campo elastico; si verifica un allungamento dei legami covalenti e un leggero scorrimento delle molecole al quale si oppongono però i legami secondari. Il modulo elastico si può ritenere sia una composizione di quello della struttura cristallina e di quello della parte amorfa. La presenza delle due strutture è ancora più influente per la deformazione plastica; con l'aumentare della sollecitazione le catene della regione amorfa scivolano tra di loro e si allineano nella direzione dello sforzo. In concomitanza con l'allungamento delle parti amorfe si verifica uno scivolamento delle lamelle, che tendono progressivamente a ruotare nella direzione della sollecitazione e a dividersi in blocchi cristallini che si separano rimanendo attaccati tramite le catene della regione amorfa. Nella fase finale vi è un completo allineamento di blocchi e catene nella direzione dell'asse di trazione, fino al raggiungimento della rottura che può avvenire anche per livelli di deformazione bassi. Il processo appena descritto è quasi completamente reversibile: se si fa cessare la sollecitazione e si riscalda il provino al suo punto di fusione, questo riacquista la struttura iniziale.

Un altro aspetto importante che si cita in merito al comportamento meccanico dei polimeri è la viscoelasticità. Essa è la proprietà posseduta dai polimeri amorfi, quale il silicone, per i quali a basse temperature si comportano come il vetro, resistendo unicamente in campo elastico, a temperature intermedie invece si presentano come un solido gommoso e a temperature più alte risultano essere simili al liquido viscoso. Per tali materiali, a basse temperature, la deformazione elastica è istantanea, cioè indipendente dal tempo, e può essere totalmente recuperata al cessare della sollecitazione. In condizioni viscoso, invece, la risposta elastica è dipendente dal tempo ed è irreversibile e irrecuperabile. Durante il comportamento gommoso si ha una deformazione elastica istantanea seguita da una deformazione viscosa dipendente dal tempo. Associati al concetto di viscoelasticità vi sono quelli di *creep* e di *rilassamento*, il primo è il fenomeno per cui vi è un aumento di deformazione sotto a un carico costante, il secondo invece è una decremento della sollecitazione necessaria a mantenere una certa deformazione.

Per quanto riguarda gli elastomeri, essi hanno la capacità di raggiungere grandi deformazioni, mantenendosi sempre in campo elastico, per poi riportarsi velocemente alla forma iniziale. Il modulo di elasticità è abbastanza piccolo e varia con la deformazione in quanto la curva sforzo-deformazione è non lineare. In assenza di sollecitazione, tali solidi risultano essere amorfi con le catene molecolari fortemente ritorte, annodate e attorcigliate; l'applicazione di un carico si traduce in un parziale districamento, raddrizzamento e stiramento con un progressivo allineamento in direzione dello sforzo. A causa della disposizione delle catene molecolari, molto disordinate e contorte, se il materiale subisce uno stiramento aumenta la sua temperatura; inoltre, se gli viene fornito calore il modulo di elasticità diventa più alto. Come è stato citato in precedenza, gli elastomeri sono spesso soggetti alla vulcanizzazione, processo chimico che permette la

creazione di legami incrociati tra le catene fondamentali per avere il forte comportamento elastico, infatti tali legami impediscono lo scorrimento e favoriscono il ritorcimento delle catene. Gli elastomeri per mantenere le caratteristiche fin qui enunciate, devono trovarsi a una temperatura maggiore di quella di transizione vetrosa, altrimenti diventano fragili [29 e 30].

#### 4.2. Polipropilene

Realizzato nel 1953 dal premio Nobel Giulio Natta per la Montedison, è il primo polimero prodotto industrialmente nel mondo. <<I primi impieghi sono limitati ad usi non tecnici, ma la lavorazione ad alta temperatura e l'impiego di catalizzatori ad elevata resa ne aumentano le prestazioni, abbassano i costi di produzione e ne derivano prodotti con caratteristiche superiori alle resine propileniche tradizionali>> [31]. Il polipropilene, che rientra nella classificazione commerciale di *plastica*, è un polimero termoplastico con struttura parzialmente cristallina, simile al polietilene, ma con minore densità, temperatura di rammollimento più alta e maggiormente soggetto all'ossidazione.

Come si evince dalla figura riportata a fianco, vi è stata la sostituzione di un atomo di idrogeno con un gruppo metilico che limita la rotazione delle catene conferendo una buona resistenza meccanica e rigidità. Tale materiale ha inoltre un'elevata cristallinità che gli

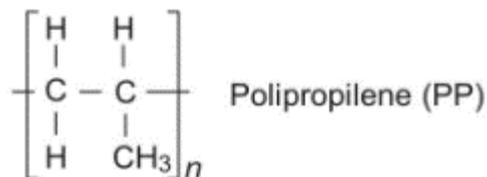


Figura 20. Monomero del polipropilene. (Da slide Scienza e tecnologia dei materiali, prof. Federico Smeacetto).

conferisce maggiore resistenza al calore rispetto al polietilene, il cui monomero presenta quattro atomi di idrogeno e nessun gruppo funzionale.

Ha quindi una buona rigidità, è scarsamente deformabile e resiste bene alla trazione, ai carichi, all'impatto e all'abrasione; in particolare la resistenza a trazione è circa 25 – 35 MPa. Si comporta da isolante elettrico come il polietilene e tende a ossidare ad alte temperature e diventa fragile per valori prossimi a 0°C, per questo è consigliabile impiegarlo a temperature comprese tra 0°C e 110°C (quest'ultimo valore può essere superato per tipi di PP stabilizzati e rinforzati). Condivide con il polietilene anche il comportamento al fuoco in quanto brucia producendo una fiamma bluastrea e sgocciolamento, ma presentando basso sviluppo di fumi, velocità di innesco, di propagazione della fiamma, basso tempo di combustione e sviluppo di fumi oscuranti.

Il cloruro di polivinile, il PTFE, l'ETFE, il polietilene e il polipropilene risultano essere particolarmente resistenti all'attacco di acidi e di alcali, ma sono soggetti a un lento processo di degradazione, definito invecchiamento, causato dalle radiazioni solari, da quelle ultraviolette, dal calore e dall'ossigeno. Il polipropilene in particolar modo, possiede una buona resistenza alle soluzioni acquose di sali inorganici, alle soluzioni di acidi e alcali, di alcool, di olii, di lavaggio e alle condizioni atmosferiche, ma è soggetto all'attacco chimico di idrocarburi alifatici e aromatici, che provocano grossi rigonfiamenti nel materiale, e non resiste agli agenti fortemente ossidanti. Come accennato in precedenza, dalla sua invenzione a oggi vi è stato un miglioramento della fase produttiva

## Sostituzione degli inerti con materiali di rifiuto

nella quale vengono impiegate alte temperature e cariche elettriche. Tali elementi permettono la produzione di pezzi sottili che presentano comunque alta resistenza alla flessione e buona durabilità, consentendone un utilizzo anche in campo tecnico. Il polipropilene viene prodotto e utilizzato come omo-polimero o co-polimero, caricato o rinforzato a seconda delle caratteristiche desiderate. Il caricamento, atto a migliorare la rigidità, la stabilità dimensionale (anche alle alte temperature), le proprietà a caldo e per fini estetici e le proprietà isolanti, può essere realizzato con minerali di alto pregio, elastomeri o, eventualmente, con resine ABS. Se si vogliono ottenere anche ottime proprietà elettriche il processo di carica viene eseguito con elastomeri termoplastici poliolefinici. Per quanto riguarda invece la possibilità di rinforzarlo, si impiegano normalmente fibre di vetro che conferiscono al materiale maggiore rigidità, stabilità dimensionale, resistenza al creep anche ad alte temperature, riducendo il ritiro in fase di lavorazione ed eventuali dilatazioni termiche. Grazie alle proprietà termoplastiche, può essere lavorato a iniezione, estrusione o termoformatura; inoltre, la superficie può essere stampata, verniciata, marcata a caldo o metallizzata. L'elevata resistenza ai prodotti chimici provoca una scarsa capacità all'incollaggio, mentre può essere saldato per attrito, a gas o a caldo, ma non a ultrasuoni.

Per quanto riguarda le caratteristiche espressivo-sensoriali, *<<si presenta come un materiale inodore, insapore, incolore, anche se può essere facilmente colorato con coprenti ad elevata lucentezza superficiale e può apparire da traslucido a opaco>>* [31]. È adatto per impieghi nei settori alimentare e farmaceutico in quanto risulta essere innocuo dal punto di vista fisiologico. Oltre a tali settori, tale polimero è utilizzato per la produzione di oggetti di uso quotidiano che necessitano di una buona resistenza meccanica, indeformabilità e resistenza alla fiamma, come bottiglie sterilizzabili, pellicole d'imballaggio, involucri di televisori, valigie, matrici per composti rinforzati con fibre di vetro, fibre di abbigliamento o tappeti, tubazioni per riscaldamento a pannelli radianti, lavabi, ma anche parti interne di elettrodomestici e auto [30 e 31].

#### **4.2.1. Riciclaggio e smaltimento materie plastiche**

Non è biodegradabile, ma la potenzialità di riciclaggio è molto elevata; di seguito si riporta brevemente il processo che trasforma i rifiuti plastici in nuove materie prime, esso può essere di tipo meccanico oppure chimico.

##### **4.2.1.1. Riciclaggio meccanico**

Il primo consiste in un accurato sminuzzamento dei materiali sottoposti al processo di riciclaggio in modo da ottenere scaglie o granuli da utilizzare per nuovi prodotti. In questa tipologia di riciclaggio, la qualità del prodotto finale è fortemente influenzata dalla qualità della selezione e pulizia dei rifiuti. Esso si suddivide nelle seguenti fasi principali [35 – 37]:

1. **Raccolta:** Il processo inizia con la raccolta delle materie plastiche in centri appositi in cui le tonnellate di rottami polimerici vengono imballati e trasportati in impianti di trasformazione. I prodotti collezionati possono essere di forme e provenienze differenti suddivisibili principalmente in rifiuti domestici e rifiuti industriali; i primi sono già stati utilizzati per la propria funzione e quindi si presume contengano una maggiore quantità di contaminazioni, mentre i prodotti provenienti da siti industriali possono essere rifiuti oppure sotto-prodotti e scarti, in quest'ultimo caso la quantità di contaminazioni è minore.
2. **Selezione e cernita:** La selezione può essere operata in due diverse fasi, la prima di tipo meccanico che suddivide il materiale in funzione della dimensione, mentre durante la seconda, operata con lettori ottici, si opera una selezione basata sulla tipologia di polimero; da ciò si ottiene un ordinamento dei vari elementi per dimensione, contenuto di resina e colore. Questo processo è svolto essenzialmente per garantire elevati standard di qualità e avviare il processo di eliminazione delle contaminazioni che terminerà con il lavaggio. In origine, la cernita era operata in modo manuale, facendo transitare il materiale su nastri trasportatori che veniva selezionato a mano dal personale. Grazie alle innovazioni tecnologiche, l'85% degli impianti moderni utilizza invece una selezione automatica grazie a specifici macchinari, detti detettori ottici. Essi funzionano mediante onde elettromagnetiche, le quali vengono inviate sui materiali presenti sul nastro. A seconda del tipo di polimero l'onda riflessa ha ampiezza e lunghezza d'onda differente; grazie a ciò il macchinario riesce a creare una mappatura dei diversi polimeri che vengono separati convogliandoli tramite ugelli ad aria compressa. Con questa tipologia di macchinari automatici, l'intervento umano è limitato alla compensazione di possibili errori del software.
3. **Triturazione:** Dopo la selezione delle materie plastiche, il passo successivo è quello di tritarle in piccoli pezzi in modo da avere un'appezzatura omogenea se pur grossolana. Il mercato presenta una vasta gamma di mulini che consentono di macinare pressoché tutti i tipi di manufatti, dal film, alle bottiglie, a pezzi stampati di grosse dimensioni. Dopo la frantumazione, il materiale risulta essere non solo di dimensioni omogenee, ma anche di volume notevolmente ridotto in quanto si tratta spesso corpi cavi, come flaconi o bottiglie. Affinché la presente fase proceda

## Sostituzione degli inerti con materiali di rifiuto

in modo ottimale è necessario che il macchinario trituratore sia alimentato in modo costante; questo è facilmente possibile per gli elementi flessibili come film o teloni, mentre può essere difficoltoso per i grossi rifiuti rigidi che faticano ad essere trascinati dai mulini.

4. **Pulizia:** Nel caso in cui siano presenti delle parti che possono essere dannose per la macinazione, si opera il lavaggio del materiale triturato in modo da eliminare le contaminazioni. Sono stati sviluppati diversi sistemi di lavaggio in funzione delle caratteristiche del polimero e la provenienza del materiale da riciclare. Il più diffuso prevede l'utilizzo di una o due vasche irrorate di acqua corrente nelle quali viene fatto passare il polimero triturato. Il metodo è adatto per le plastiche con peso specifico minore dell'acqua così che questi vengano trascinati via dalla corrente ed eventuali parti metalliche, terra o altri polimeri più pesanti restino sul fondo della vasca. I materiali con densità maggiore di quella dell'acqua vengono fatti transitare su un nastro trasportatore e lavati mediante getto d'acqua. <<Per alcuni prodotti, come ad esempio parti di bottiglia o manufatti stampati, per i quali vengono utilizzate etichette adesive, si ricorre al trattamento del materiale con soluzioni basiche al fine di consentirne la separazione dell'etichetta e della colla>> [37]. Dopo il lavaggio, il triturato è sottoposto a calore moderato per asciugarlo.
5. **Produzione di pellet:** La produzione del granulato pronto per essere impiegati come materia prima secondaria avviene attraverso la macinazione e l'essiccamento. Durante la fase di macinazione, il triturato lavato viene convogliato in un mulino per ridurne l'appezzatura. Per tale operazione è necessario che i prodotti non rigidi, come le pellicole o i film, siano preventivamente essiccati; inoltre è importante che non vi siano contaminazioni metalliche che potrebbero mandare in crisi il mulino. Dopo la macinazione, il granulato può essere sottoposto a un eventuale ulteriore lavaggio, seguito da pressatura, centrifugazione ed essiccamento a mezzo di essiccatori verticali a zig-zag o centrifughi in modo da ottenere un residuo di acqua pari a 2 – 3%. Il materiali viene riposto in silos pronto per essere inviato ai clienti oppure per un eventuale procedura di estrusione. In questo caso il granulato prelevato dal silos viene convogliato in un estrusore munito di una piastra forata i cui fori hanno diametro di 2 – 4 mm. La compressione porta alla fusione del polimero con la formazione di fili estrusi che, dopo il raffreddamento, possono essere tagliati con una taglierina trasversale o con coltelli rotanti.
6. **Confezionamento:** Il prodotto finito sotto forma di pellets o di fili estrusi, viene stoccato secondo le esigenze del cliente, normalmente, in octabins da 1000 kg, in big bags o in sacchi da 25 kg.

#### **4.2.1.2. Riciclaggio chimico**

Il processo di riciclaggio chimico, se pur meno comune, è già applicato in ambito industriale ed è volto alla disgregazione dei legami chimici presenti nel polimero in modo da ottenere i monomeri che lo compongono. Tale metodo, applicato ai materiali plastici, ha come scopo principale la produzione di combustibili alternativi a quelli fossili al fine di ridurre le emissioni di anidride carbonica in atmosfera. Le tipologie di polimeri che meglio si prestano al riciclaggio chimico sono il PET, le poliammidi e i poliuretani; essi possono essere sottoposti a [35 – 37]:

- **Pirolisi:** consiste nel riscaldamento sottovuoto che porta alla scomposizione delle molecole in una miscela di idrocarburi liquidi e gassosi. Il processo chimico in questione può avvenire a bassa temperatura (450 – 550 °C) o ad alta temperatura (650 – 850 °C), e il prodotto ottenuto può essere miscelato al petrolio grezzo;
- **Idrogenazione:** trattamento di degradazione a base di idrogeno e calore, in cui i polimeri si trasformano in idrocarburi liquidi. Le materie plastiche da riciclare possono essere sottoposte a condizioni analoghe a quelle che avvengono durante il cracking del petrolio così da ottenere gas olefinici dai quali si può produrre nuovamente PE, PP, PVC o gomma sintetica;
- **Gassificazione:** riscaldamento della plastica a temperature comprese tra 800 e 1600°C in assenza di aria, così da creare una miscela di idrogeno e ossido di carbonio utilizzabile come combustibile nelle centrali, o per produrre prodotti chimici, quale il metanolo;
- **Chemiolisi, Glicolisi, Metanolisi, Ammonolisi:** processi di depolimerizzazione che trasformano il polimero nei monomeri costituenti attraverso l'ausilio di reagenti chimici.

#### **4.2.1.3. Riciclaggio omogeneo ed eterogeneo**

Attraverso una selezione e cernita nelle diverse tipologie polimeriche nelle prime fasi del processo di riciclaggio è possibile ottenere una materia prima secondaria di elevata qualità con caratteristiche fisico-chimiche simili a quelle del prodotto originale. Durante il riciclaggio omogeneo è quindi necessario sincerarsi che non siano presenti altri polimeri, inerti, cariche o additivi che possono compromettere la qualità del processo. Oltre alla modalità di separazione citata precedentemente, denominata setacciatura tramite soffio d'aria, vi sono altre metodologie, quali:

- Separazione magnetica;
- Separazione per flottazione;
- Separazione per densità;
- Separazione per galleggiamento;
- Separazione per proprietà aerodinamiche;
- Separazione elettrostatica.

Se invece non si opera alcuna selezione, si produce una plastica riciclata eterogenea, di minore qualità, impiegabile per panchine, attrezzature dei parchi gioco, recinzioni, gazebo, tavoli e sedie o cartellonistica stradale. Durante il riciclo eterogeneo si lavora PE, PP, PS,

## Sostituzione degli inerti con materiali di rifiuto

PVC, PET, mentre inerti, imballaggi e metallo si cerca di rimuoverli attraverso una separazione morfologica e dimensionale seguita da una cernita magnetica in quanto possono causare problemi alle fasi di lavorazione successive, compromettendo il funzionamento dei macchinari. Rispetto a quanto descritto in precedenza il processo si snellisce procedendo con le fasi di triturazione, densificazione e infine estrusione, che a seconda del prodotto finale desiderato possono essere eseguite tutte o solo alcune. Il principale problema legato a questo tipo di riciclaggio è la temperatura di fusione che è diversa per ciascun polimero; ciò esclude la possibilità di utilizzare il granulato come materia prima secondaria per la realizzazione di forme complesse o con spessori ridotti [35 – 37].

### **4.2.1.4. Termovalorizzazione**

L'alternativa al riciclaggio è l'impiego di termovalorizzatori per la produzione di energia, l'utilizzo nei forni dei cementifici o la produzione di energia termoelettrica. Si cerca normalmente di seguire tale via unicamente per i residui per processo di recupero non impiegabili come materia prima secondaria. L'impiego delle plastiche come combustibili è possibile in quanto hanno una resa maggiore anche della nafta e possono essere mescolate con i rifiuti solidi urbani. Grazie alle innovative tecnologie di contenimento delle emissioni nocive, spesso il termovalorizzazione è economicamente ed ecologicamente più conveniente delle altre tipologie di smaltimento. Gli impianti di trattamento sono costituiti normalmente da:

- Area per la preparazione dei rifiuti;
- Forno in cui avviene la combustione;
- Recuperatore di calore;
- Dispositivi di controllo e abbattimento delle emissioni in atmosfera;
- Apparecchi di stabilizzazione delle ceneri e dei residui solidi della combustione.

Vi sono diverse tipologie di forni; quelli a griglia sono utilizzati prevalentemente nella combustione dei rifiuti solidi e si suddividono in forni a griglia fissa o a griglia mobile. I primi hanno una potenzialità ridotta di circa qualche tonnellata di rifiuti al giorno, mentre quelli a griglia mobile sono più efficienti per la termovalorizzazione di RSU con recupero di calore. <<Gli impianti di questo tipo possono bruciare da 4 a 30 t/h di rifiuti e produrre per ciascuna tonnellata di rifiuti 450 kWh di energia elettrica e, se utilizzabile, 1.000 kWh di calore a bassa temperatura>> [37].

Per quanto riguarda i fumi prodotti dalla combustione, al fine di eliminare la presenza di composti organici in uscita dall'impianto, essi vengono fatti passare in una camera di post-combustione in cui si completa la combustione. Attraversata tale camera, i fumi vengono convogliati verso il recuperatore di calore che consente la produzione di energia termica. Nella fase finale, i fumi vengono fatti circolare in sistemi di depurazione per l'abbattimento delle diverse tipologie di sostanze inquinanti.

In media, dall'impianti di termovalorizzazione dei rifiuti vengono prodotte delle scorie pari al 10 – 12 % del volume dei rifiuti bruciati e pari al 15 – 20% in peso; per quanto riguarda la cenere, se ne produce circa il 5% in peso [35 – 37].

### **4.3. Gomma per pneumatici**

Lo smaltimento dei pneumatici fuori uso crea uno dei maggiori problemi ambientali a livello mondiale, si effettuano quindi studi sulla possibilità di impiegarli in altri cicli produttivi al posto di conferirli in discarica. Una delle possibili soluzioni, trattata nel presente testo, è quella di macinarli in granulato e utilizzarli come inerti nei conglomerati cementizi. Nel seguito si vanno a dare alcuni cenni descrittivi sui pneumatici e la gomma che li compone per poi passare al processo di riciclaggio.

#### **4.3.1. Cenni storici**

Si può attribuire la scoperta della gomma alle civiltà Maya e Azteca nell'epoca precolombiana; tali popolazioni raccoglievano la linfa dell'albero *Havea Brasiliensis* e la riscaldavano ottenendo una sostanza impermeabile ed elastica con la quale costruivano piccoli oggetti di culto o di svago. Per molto tempo però le proprietà e le possibili applicazioni di tale materiale, già note dalle popolazioni indigene e descritte da Cristoforo Colombo, restarono ignorate. Nel 1747, l'interesse scientifico verso la gomma si riaccese grazie a Charles Marie de la Condamine che consegnò all'Accademia delle Scienze di Parigi rotoli di gomma grezza corredati da informazioni sulla provenienza, sulle proprietà e sui possibili usi.

Da tale momento gli studi su tale materiale portarono a notevoli risultati; venne creata la gomma da cancellare (il termine *natural rubber* prende il nome dal verbo inglese *to rub* = cancellare), si brevettò un metodo per impermeabilizzare gli abiti, si migliorarono le tecniche di lavorazione permettendo la produzione di svariati oggetti, nel 1805 venne formulato il concetto di elasticità e così via. Nel 1839, l'inventore statunitense Charles Goodyear, basandosi sugli studi di F. Ludersdorf e N. Hayward, scoprì il processo di *vulcanizzazione*, ovvero la capacità del lattice di gomma di unirsi allo zolfo ad alta temperatura così da trasformarsi in un nuovo prodotto con migliori proprietà meccaniche e fisiche del caucciù. Circa vent'anni dopo grazie al processo di distillazione si riuscì a isolare l'isoprene dalla gomma naturale, del quale venne poi determinata la struttura chimica consentendo la produzione di altre sostanze con proprietà e comportamento elastico simili alla gomma. Alla fine dell'Ottocento si avvia quindi la produzione industriale dei polimeri in Europa e negli Stati Uniti al fine di ottenere macromolecole per applicazioni su larga scala e a minor costo rispetto ai prodotti naturali.

È intorno al 1864 che si colloca l'invenzione del pneumatico a opera di John Dunlop, un veterinario che progettò il primo pneumatico (brevettato nel 1888) per la costruzione di una bicicletta per il figlio. Due anni più tardi Welch brevettò il pneumatico staccabile dalla ruota. In questi anni stava prendendo piede anche l'industria dei mezzi a motore con una conseguente richiesta di gomma.

Come le scoperte di fine Ottocento sulla gomma naturale, il Novecento è interamente volto allo studio e alla produzione della gomma sintetica [38 e 40].

#### 4.3.2. Gomma naturale e sintetica

Il caucciù, denominato *cis*-1,4-poliisoprene, è un polimero dell'isoprene  $C_5H_8$ , anche chiamato 2-metil-1,3-butadiene, idrocarburo insaturo appartenente alla categoria dei dieni coniugati. A temperatura ambiente si presenta come un liquido incolore ( $T_{fusione} = -146^\circ C$  e  $T_{ebollizione} = 34^\circ C$ ) miscibile con solventi organici, ma non con acqua. Per quanto la nomenclatura IUPAC del caucciù, il prefisso *-cis* indica la presenza di un gruppo

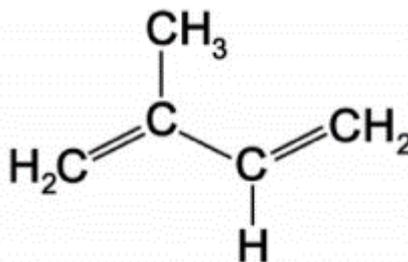


Figura 21. Struttura chimica dell'isoprene. (Da [www.chimicamo.org](http://www.chimicamo.org) 21/09/2017).

metilico e di un atomo di idrogeno dalla stessa parte del doppio legame; mentre 1,4 indica che l'unità monomerica del polimero si lega al primo e al quarto atomo di carbonio.

Il 94% della gomma naturale è appunto composta da poliisoprene, al quale si aggiungono acidi grassi, proteine e altre sostanze con la funzione di stabilizzanti. Le proprietà meccaniche del caucciù sono scarse in quanto riscaldandolo le forze attrattive tra le catene polimeriche si minimizzano per effetto dell'agitazione termica e il materiale diventa quindi soffice. Tale fenomeno è risolvibile tramite il processo di vulcanizzazione che aggiunge ponti solfuro tra le catene, conferendo al materiale migliori proprietà meccaniche.

L'isoprene può essere anche sintetizzato attraverso una co-polimerizzazione ad alte temperature in presenza di catalizzatori di butadiene e mono-olefina. La più comune gomma artificiale, con la quale si realizzano gli pneumatici, è quella prodotta dalla sintesi di stirene  $C_6H_5CH=CH_2$  e butadiene  $CH_2=CH-CH=CH_2$ , detta *Buna S*, *GRS* o *SBR*. Da tale sintesi, si separa il co-polimero mediante emulsione per acidificazione, come viene fatto per il lattice della gomma naturale. Attraverso la vulcanizzazione e l'aggiunta di nerofumo l'SBR può essere rinforzato e reso più resistente, come avviene per il caucciù.

Un altro tipo di gomma producibile con un procedimento simile è il *Buna N* o *GRN*, che si prepara con la co-polimerizzazione di butadiene e acrilonitrile  $CH_2=CH-C\equiv N$ . La *gomma butile* o *GRI*, invece si produce per reazione dell'isobutene con il butadiene. Anche il polibutadiene, nelle sue differenti forme isomeriche, è impiegato per la realizzazione di pneumatici. Polimerizzando il cloroprene in presenza di catalizzatori Ziegler-Natta si ottiene una gomma porosa, elastica, resistente allo schiacciamento, al taglio, all'invecchiamento e al calore e inerte verso molti agenti chimici, detta neoprene [38 e 41].

##### 4.3.2.1. Processo di vulcanizzazione

Come accennato in precedenza, la vulcanizzazione permette la creazione di legami incrociati tra le catene polimeriche, mediante l'aggiunta di atomi di zolfo. Tale processo va a rompere i legami doppi tra gli atomi di carbonio trasformandoli in legami singoli. Normalmente la gomma risulta essere soffice, appiccicosa e poco resistente all'abrasione; con la vulcanizzazione si va a migliorare il modulo di elasticità, la resistenza alla trazione e alla degradazione per ossidazione. In particolare, il valore del modulo di elasticità è

direttamente proporzionale al numero di legami incrociati che sono stati creati con i ponti di zolfo; per avere una gomma molto elastica è necessario che vi siano pochi legami incrociati e che siano molto distanziati.

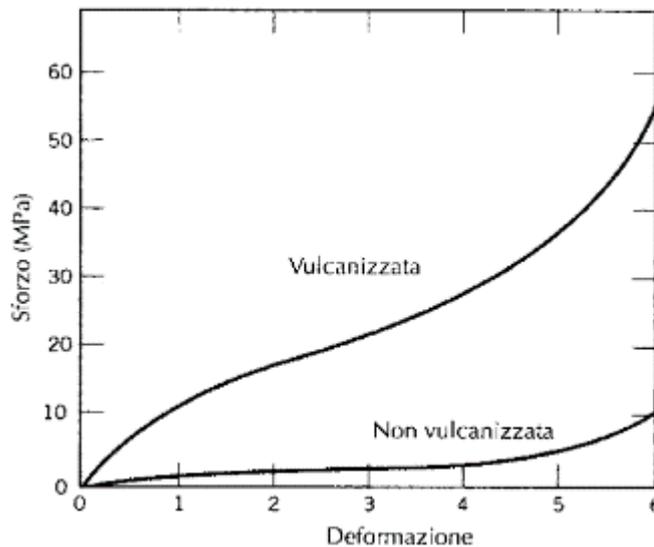


Figura 22. Diagramma sforzo-deformazione per gomma vulcanizzata e non vulcanizzata. (Da Scienza e Ingegneria dei materiali).

Come si evince dalla figura sopra riportata, la curva sforzo-deformazione dopo il trattamento risulta avere un andamento più verticale, il che significa che a parità di sollecitazione la gomma si deforma di meno rispetto a quella non vulcanizzata. Incrementando il contenuto di zolfo la gomma diventa più dura, ma ne risente l'estensibilità.

Per molte applicazioni, quale ad esempio la produzione di pneumatici, il processo di vulcanizzazione non è sufficiente a garantire delle caratteristiche meccaniche soddisfacenti, per questo si ricorre all'impiego di additivi, come il nerofumo già citato [29].

#### 4.3.2.2. Il pneumatico

Il pneumatico è stato inventato da Thomson nel 1846 ed è stato riproposto da John Boyd Dunlop nel 1888. Esso viene normalmente montato sulle ruote dei mezzi di trasporto destinati all'utilizzo su strada per garantire l'aderenza con il suolo e smorzare le asperità del terreno. Sono presenti in commercio molteplici tipologie e misure in base alla tipologia di mezzo per cui è pensato: biciclette, autovetture, trattori, autocarri, macchine operatrici, mezzi aeronautici e così via. Essi vengono impiegati anche nel settore delle competizioni motoristiche, in cui lo studio sulle tipologie di mescola e sulle migliori tecnologie realizzative è estremizzato. Si identificano due tipologie principali di pneumatici:

- **Tube Type:** il pneumatico è costituito da una copertura esterna e da una camera d'aria racchiusa nella prima. La copertura è necessaria per trasmettere e ricevere gli attriti radenti e volventi che si generano durante il movimento, mentre la camera d'aria è gonfiata con aria compressa al fine di ottenere un effetto di

## Sostituzione degli inerti con materiali di rifiuto

adattamento e sospensione del veicolo dal suolo. Negli ultimi anni questa tipologia non è più utilizzata per le autovetture e le motociclette, la si può ancora trovare per le biciclette.

- **Tubeless:** come indica il termine stesso, non è presente la camera d'aria interna che in questo caso coincide con la copertura esterna se montata su un cerchione appropriato.

Per concludere la trattazione sui pneumatici si vanno a descrivere brevemente gli elementi che lo costituiscono:

- **Battistrada:** porzione del pneumatico realizzata in gomma a diretto contatto con il suolo; tale elemento assicura la trazione, è resistente all'usura e protegge la carcassa. Il disegno del battistrada e la sua profondità sono fondamentali per la

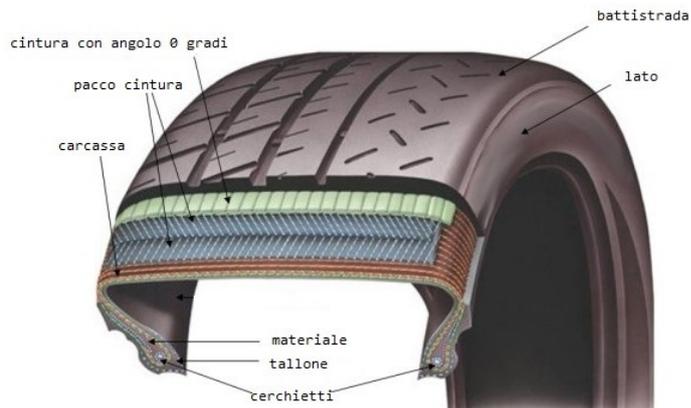


Figura 23. Struttura di un pneumatico. (Da [www.oponeo.it](http://www.oponeo.it) 21/09/2017).

- tenuta di strada, in particolar modo su fondi viscosi come l'asfalto bagnato. I canali presenti servono per drenare l'acqua e consentire una maggiore presa sulla superficie di rotolamento.
- **Pacco cintura o cinture:** elemento costituito da strati multipli di corde o fili d'acciaio, nylon, poliestere o rayon interposto tra la carcassa e il battistrada. I fili, disposti nella cintura con un'angolazione pari a  $0^\circ$  o di  $15-25^\circ$  rispetto alla mediana del pneumatico e incrociati tra loro, aumentano la resistenza dello pneumatico garantendo protezione contro urti o forature e migliorando la distribuzione delle sollecitazioni.
- **Fianco o spalla:** elemento laterale dello pneumatico che deve essere flessibile verticalmente per assorbire e minimizzare il trasferimento delle irregolarità del terreno al veicolo e rigido orizzontalmente per trasferire al terreno i carichi dovuti a sottosterzo, frenata o accelerazioni.
- **Carcassa:** parte strutturale dello pneumatico sulla quale è vulcanizzato il battistrada. Essa consente la trasmissione delle forze tra il terreno e il cerchione, garantendo la resistenza alla pressione dell'aria di gonfiamento. Tale elemento è costituito principalmente da fili di nylon, affiancati a formare una tela; lo spessore dei fili e quindi la quantità degli stessi sulla superficie influenza la resistenza, la rigidità e lo scorrimento. Le tele, incrociate tra loro, possono essere disposte diagonalmente formando un angolo di  $30-40^\circ$  con la mediana dello pneumatico oppure radialmente formando un angolo di  $90^\circ$ .

## Sostituzione degli inerti con materiali di rifiuto

- **Cerchietti:** fasce di acciaio presenti nel tallone che mantengono lo pneumatico saldo e in posizione sul cerchione, evitando un possibile sfilamento.
- **Riempimento:** elemento posto nella zona del tallone e del fianco, normalmente costituito da gomma, che consente il passaggio graduale dalla zona rigida del tallone a quella più morbida della spalla.
- **Rivestimento interno:** strato di gomma inserito all'interno degli pneumatici tubeless atto a evitare perdite d'aria.
- **Tallone o incavo del tallone:** elemento costituito da uno strato di tela gommata atto a impedire l'usura allo sfregamento tra pneumatico e bordo del cerchione e a garantire l'attrito necessario a evitare la rotazione del pneumatico sul cerchione.

La composizione della gomma che costituisce uno pneumatico, denominata mescola, è diversa a seconda dell'utilizzo dello stesso. Ad esempio tra quelli destinati a un'autovettura e quello per autocarro vi è differenza in termini di dimensioni, quantità di fibre in acciaio e tessili, porzioni di gomma naturale e sintetica impiegata e additivi utilizzati [40 e 42].

### **4.3.3. Riciclaggio e smaltimento PFU**

Come viene fatto per le materie plastiche precedentemente descritte, il processo di riciclaggio è atto a ridurre lo pneumatico dismesso in granuli che possono essere reimpiegati nella mescola per produrre nuovi manufatti. Il trattamento degli pneumatici fuori uso PFU può avvenire tramite [39]:

- Triturazione meccanica;
- Processi criogenici;
- Processi elettrotermici.

#### **4.3.3.1. Triturazione meccanica**

1. **Rimozione del tallone:** gli pneumatici da autocarro sono dotati di due anelli di sezione variabile da 12 a 20 mm che sostengono il tallone; in questa fase essi vengono separati dallo pneumatico senza rottura.
2. **Triturazione:** mediante diversi trituratori, tutti i pneumatici di autovetture, mezzi leggeri e autocarri vengono ridotti in pezzature variabili da 70x70 mm fino a 100x100 mm. Per evitare il riscaldamento dei mulini e l'impastamento della gomma rammollita alle pale, è necessario che la velocità di triturazione sia contenuta.
3. **Granulazione:** per un'ulteriore riduzione delle dimensioni, il pezzame proveniente dalla triturazione viene avviato alla fase di granulazione. Durante questa fase avviene anche una prima separazione delle parti in gomma da quelle in acciaio e tessili.
4. **Micronizzazione:** la gomma proveniente dalla granulazione viene suddivisa secondo la propria dimensione e pulita da eventuali impurità e contaminazioni tramite nastri magnetici di diversa natura. È possibile aggiungere all'impianto

alcuni mulini polverizzatori che consentono un'ulteriore riduzione della pezzatura dei granuli. Terminata questa fase, il materiale viene stoccato in differenti big-bag. Eseguite le precedenti operazioni, il prodotto è pronto per essere riutilizzato nelle sue più diverse applicazioni. Il polverino di gomma ottenuto può essere utilizzato per fabbricare oggetti in gomma che non richiedono elevate prestazioni oppure per realizzare bitumi modificati.

### **4.3.3.2. Processi criogenici**

La triturazione criogenica prevede l'impiego di azoto liquido con il quale si raffredda la gomma in modo tale che assuma una struttura cristallina fragile e sia più facilmente macinabile in un prodotto più fine della macinazione meccanica. Si inizia con una fase di triturazione meccanica grossolana, seguita da uno sbriciolamento criogenico e da una polverizzazione finale in un mulino a dischi o a martelli. Le caratteristiche merceologiche del prodotto sono superiori rispetto alla triturazione meccanica, ciò consente sbocchi commerciali più ampi e prezzi di vendita più elevati.

### **4.3.3.3. Processi elettrotermici**

Con i metodi elettrotermici, il pneumatico viene ridotto in pezzatura grossolana ed introdotto in un forno verticale ad induzione elettromagnetica. Il forno a induzione riscalda la parte metallica dello pneumatico a temperature di circa 700°C molto rapidamente; a tale temperatura la gomma carbonizza e il metallo si stacca dalla stessa. Alla base del forno vengono raccolti separatamente il materiale metallico, la gomma inalterata e la gomma carbonizzata. La gomma, preventivamente triturata, viene riportata ad una struttura chimica simile a quella dell'elastomero di partenza attraverso processi di devulcanizzazione (effettuata in autoclave mediante processi termochimici, sfruttando l'azione congiunta di temperatura, pressione ed additivi chimici) e rigenerazione, così da consentirne l'aggiunta alle normali mescole.

### **4.3.3.4. Termodistruzione**

L'alternativa al riciclaggio, che non prevede però il conferimento in discarica, è la distruzione della gomma mediante la combustione, come è stato detto per i materiali plastici. La termodistruzione può essere eseguita in impianti con recupero di calore, in processi di co-combustione in forni industriali o tramite pirolisi.

Gli impianti per la termodistruzione con recupero di energia, per la combustione dei PFU o di altri rifiuti in gomma, assicurano un trattamento tecnologicamente valido ed efficiente garantendo i parametri ambientali richiesti dalla legge tramite l'impiego del forno a tamburo rotante, che consente l'alimentazione di interi pneumatici, o del forno a letto fluido, in cui gli pneumatici devono essere preventivamente triturati. I costi impiantistici sono molto elevati, ma l'attività ha la possibilità di remunerarsi attraverso la vendita di energia termica ed elettrica prodotte. Gli pneumatici sono utilizzati in modo efficace come supplemento ai tradizionali combustibili per la produzione di energia. Il riciclaggio energetico, in cui non si va a valorizzare il materiale ma l'energia che esso può produrre, offre alcuni vantaggi ambientali:

## Sostituzione degli inerti con materiali di rifiuto

- Le emissioni inquinanti prodotte non sono maggiori di quelle dei combustibili tradizionali;
- Permette lo smaltimento dello pneumatico, particolarmente resistente ai più tenaci cicli di trattamento;
- Porta alla riduzione del consumo di combustibili fossili.

Gli pneumatici possono essere anche impiegati come combustibili alternativi nel settore industriale: nelle industrie cementiere, nell'industria cartaria e in quella metallurgica. Nei cementifici, tale rifiuto contribuisce al risparmio energetico e al recupero del materiale in quanto i contenuti ferrosi e gli inerti della mescola vengono poi inglobati nel clinker prodotto.

L'ultima alternativa proposta è la pirolisi: degradazione termica in atmosfera inerte durante la quale gli pneumatici subiscono un cracking termico intorno a 500 – 600°C, andando a scindersi in una parte solida, una liquida e una gassosa (parzialmente condensabile). La porzione relativa tra i vari stati fisici dipende dalla temperatura, dalla pressione, dal tempo in cui i rifiuti vengono lasciati nel reattore e dalla temperatura a cui viene operata la condensazione. Quest'ultima operazione permette l'ottenimento di una frazione liquida, costituita principalmente da idrocarburi, e una gassosa non più condensabile, ma combustibile. Il residuo carbonioso viene impiegato come combustibile, o sottoposto ulteriormente a gassificazione per la produzione di gas combustibile [39].

## Capitolo 5. La campagna sperimentale

Nel presente capitolo si riporta la procedura sperimentale seguita e i risultati ottenuti in merito all'analisi delle caratteristiche chimico-fisiche condotta sulle malte cementizie con inerti polimerici presso il laboratorio *MastrLab* del Politecnico di Torino. La strategia su cui si basa la campagna sperimentale, come già detto in precedenza, è l'*aggregate substitution strategy*, secondo la quale si vanno a sostituire completamente o in parte gli inerti presenti nel conglomerato cementizio con materiali da riciclo. Nel caso in questione sono stati utilizzati inerti in polipropilene e in gomma proveniente dagli pneumatici fuori uso. La materia plastica è stata fornita dall'azienda *Manifattura Filippo Russo* di Lessona in provincia di Biella, che si occupa prevalentemente del riciclaggio di materie plastiche provenienti da diversi campi industriali, riassumibili in industria tessile, biomedica, elettronica, alimentare e dell'automobile. La gomma, invece, è stata fornita dal *Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica*, il quale l'aveva precedentemente ricevuta da azienda operante nel settore del riciclaggio.

### **5.1. Preparazione degli inerti**

Per le prove su malte si fa riferimento alla norma europea UNI EN 196-1 [43]. In tale documento, come verrà descritto meglio nel seguito della trattazione, oltre alle procedure da adottare per la creazione dei provini e a quelle per l'esecuzione delle prove meccaniche, vengono descritti i materiali e la strumentazione da impiegare. Le materie prime che costituiscono una malta cementizia sono acqua, cemento (legante) e sabbia (inerte). Per poter sostituire quest'ultimo componente del conglomerato con un materiale da riciclo è necessario verificare che la granulometria dei prodotti riciclati sia confrontabile con quella della sabbia impiegata.

#### **5.1.1. Sabbia normalizzata**

Le caratteristiche chimico-fisiche dei materiali costituenti la malta sono riportate nel capitolo 5 della norma di riferimento; nel presente testo si vanno a riportare alcuni elementi fondamentali riguardanti la sabbia. Per ogni ciclo di prove, in cui vengono analizzati tre provini prismatici, si utilizza un sacchetto di sabbia normalizzata CEN di massa  $1350 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ , la cui distribuzione granulometrica è fissata dalla normativa e riportata in seguito.

## La campagna sperimentale

Tabella 1. Distribuzione granulometrica della sabbia normalizzata CEN.

Dimensione della maglia quadrata del setaccio [mm]	Trattenuto parziale [%]	Trattenuto cumulativo da UNI EN 196-1:2005 [%]
2,00	0%	0%
1,60	7% ± 5%	7% ± 5%
1,00	26% ± 5%	33% ± 5%
0,50	34% ± 5%	67% ± 5%
0,16	20% ± 5%	87% ± 5%
0,08	12% ± 1%	99% ± 1%
RESIDUO	1% ± 1%	-

La normativa riporta la dimensione della maglia dei setacci impiegati per la valutazione e il valore percentuale di trattenuto cumulativo riferito a ogni setaccio. Tale valore indica quanto materiale si ferma nel setaccio rispetto al quantitativo versato sul setaccio stesso; si consideri ad esempio il setaccio con maglia da 0,50 mm, la quantità di sabbia in massa che si ferma sul setaccio è il 67% di quella che viene versata sullo stesso. Per una migliore comprensione di quale sia la distribuzione granulometrica dell'intero sacchetto è meglio fare riferimento al trattenuto parziale che indica la quantità percentuale di sabbia che si è fermata su un determinato setaccio rispetto al totale considerato. Le formule che consentono il calcolo dei trattenuti sono presentate nel seguito, durante la descrizione della setacciatura.

### 5.1.2. Inerti polimerici

Il problema principale è legato alla dimensione granulometrica massima della sabbia, pari a 2,00 mm, infatti i granuli derivanti dai processi di riciclaggio sono normalmente più grandi. La dimensione del prodotto finito in uscita dal mulino di macinazione del processo di riciclaggio è determinata da un vaglio: il macinato viene fatto cadere sul setaccio, quello che riesce ad attraversarlo viene rimosso e stoccato, mentre il materiale che si accumula nel vaglio viene prelevato e sottoposto nuovamente alla macinazione. Nel caso della presente campagna sperimentale i materiali sono stati macinati con i seguenti vagli:

- Polipropilene: vaglio da 3,00 mm;
- Gomma da PFU: vaglio da 4,00 mm.

È stato quindi necessario comprendere se, a causa degli attriti granuli-granuli e granuli-mulino, fossero presenti e in quale quantità frazioni granulometriche più piccole rispetto alla dimensione della maglia del setaccio.

Il secondo problema è legato alle caratteristiche chimico-fisiche dei materiali polimerici utilizzati. Essi devono avere una temperatura di fusione tale da non rammollirsi durante il processo di macinazione, altrimenti impastano il mulino compromettendo la buona riuscita del riciclaggio. Tale fenomeno dipende dal tipo di polimero impiegato e principalmente dalla dimensione dei grani: quando i grani sono molti piccoli, tendono a impastarsi con maggiore facilità. Inoltre, devono essere resistenti agli ambienti alcalini, in

## La campagna sperimentale

quanto il cemento a contatto con l'acqua scatena una reazione chimica che trasforma l'ambiente da condizioni di pH neutro in condizioni di pH basico. A fronte delle pubblicazioni presenti in merito all'impiego della gomma nei calcestruzzi non si è ritenuto necessario approfondire la trattazione sul problema riguardante la natura del polimero. Per la scelta del materiale plastico, invece, ci si è affidati alle conoscenze del titolare della manifattura che, in base alle esigenze sperimentali, ha proposto l'impiego del polipropilene PP, in quanto ha un punto di fusione abbastanza alto da scongiurare l'impastamento all'interno della macchina e caratteristiche chimiche adatte agli ambienti alcalini.

### 5.1.3. Determinazione delle frazioni granulometriche mediante setacciatura

Per poter sostituire una determinata frazione granulometrica di sabbia con il polipropilene o la gomma è necessario andare a vagliare i materiali, utilizzando setacci con dimensione della maglia pari a quella riportata dalla norma. Sono stati quindi impiegati i seguenti setacci:

- 4,00 mm;
- 3,00 mm;
- 2,00 mm;
- 1,60 mm;
- 1,00 mm;
- 0,50 mm;
- 0,16 mm;
- 0,08 mm.

Il setaccio da 4,00 mm è stato utilizzato unicamente per la gomma, mentre quello da 3,00 mm è stato impiegato sia per la gomma sia per il polipropilene, a causa della dimensione del vaglio del mulino.

La procedura di setacciatura consta principalmente in tre fasi, due delle quali vengono ripetute in modo iterativo:

1. Determinare la massa del materiale iniziale;
2. Sistemare i setacci in pila in modo tale che quello con la maglia di dimensione maggiore si trovi alla sommità e quello con la dimensione minore alla base, come riportato nella *figura 24*;
3. Rovesciare il materiale nel setaccio a maglia più larga;
4. Setacciare con movimento manuale o vibrazione meccanica;
5. Determinare la massa del materiale rimasto nel setaccio;
6. Rimuovere la massa accumulata e conservarla;
7. Ripetere l'operazione dal punto 4 per ogni setaccio e per la base.

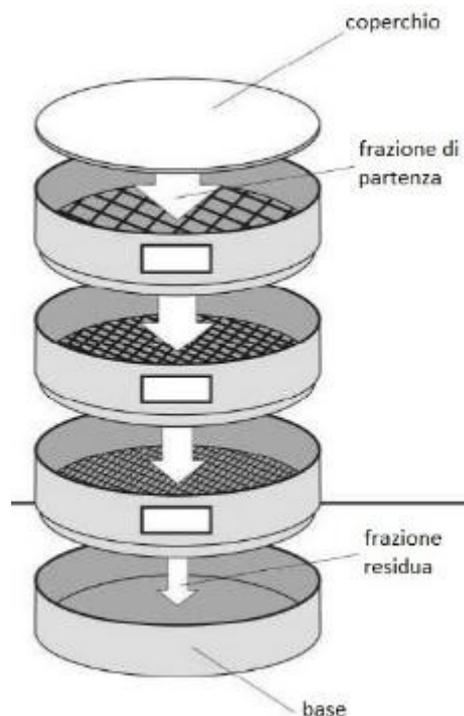


Figura 24. Batteria di setacci.

## La campagna sperimentale

In via teorica si può affermare che la somma delle masse trattenute da ciascun setaccio sia pari alla massa iniziale di materiale sottoposto alla setacciatura; ciò normalmente non accade, vi è uno scarto legato al fatto che una parte di materiale si intrappola nelle maglie del setaccio e una parte viene perso durante i travasi tra contenitori. Dalla setacciatura è possibile valutare i trattenuti parziale e cumulativo; il primo, come già accennato, esprime la percentuale di inerte che resta in ciascun setaccio rispetto alla massa totale esaminata:

$$T_i[\%] = 100 \cdot \frac{P_i}{\sum_{i=1}^N P_i} \quad [5.1]$$

In cui:  $i = i$ -esimo setaccio;

$P_i$  = massa di trattenuto dell' $i$ -esimo setaccio;

$N$  = numero di setacci.

Il trattenuto cumulativo indica la percentuale di materiale trattenuto rispetto al passante del setaccio sovrastante:

$$TC_i[\%] = 100 \cdot \frac{\sum_{j=1}^N P_j}{\sum_{i=1}^N P_i} \quad [5.2]$$

In cui:  $i = i$ -esimo setaccio;

$j = j$ -esimo setaccio;

$P_i$  = massa di trattenuto dell' $i$ -esimo setaccio;

$P_j$  = massa di trattenuto dell' $j$ -esimo setaccio (quello sovrastante);

$N$  = numero di setacci.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti per sabbia, polipropilene e gomma; la setacciatura dei diversi materiali è fondamentale per la comprensione di quali siano le frazioni granulometriche preponderanti all'interno di un sacchetto di sabbia normalizzata e se il quantitativo di inerte polimerico corrispondente sia sufficiente per realizzare la sostituzione.

## La campagna sperimentale

### 5.1.3.1. Sabbia normalizzata

Come già accennato, le frazioni granulometriche teoriche del sacchetto di sabbia normato sono note. La setacciatura della sabbia è stata eseguita per verificare che le frazioni riportate sulla norma corrispondessero a quelle reali, ma soprattutto per ottenere le differenti parti di sabbia necessarie alla successiva sostituzione con gli inerti polimerici.

Tabella 2. Setacciatura sabbia (eseguita il 27/02/2017).

Massa iniziale [g]		Massa a fine setacciatura [g]		Incertezza [g]		
1350		1345		±1		
Maglia setaccio [mm]	Massa trattenuta [g]	Incertezza [g]	Massa passante [g]	Trattenuto parziale [%]	Trattenuto cumulativo [%]	Trattenuto cumulativo NORMATIVA [%]
2,00	28	±1	1322	2,07%	2,07%	0,00%
1,60	64	±1	1258	4,74%	6,81%	7,00%
1,00	404	±1	854	<b>29,93%</b>	36,74%	33,00%
0,50	444	±1	410	<b>32,89%</b>	69,63%	67,00%
0,16	265	±1	145	<b>19,63%</b>	89,26%	87,00%
0,08	138	±1	7	10,22%	99,48%	99,00%
< 0,08	2	±1	-	0,15%	99,63%	-
Percentuale di massa a fine setacciatura rispetto a quella iniziale				99,63%		
Percentuale di massa persa				0,37%		

Tabella 3. Setacciatura sabbia (eseguita il 21/03/2017).

Massa iniziale [g]		Massa a fine setacciatura [g]		Incertezza [g]		
1350		1342		±1		
Maglia setaccio [mm]	Massa trattenuta [g]	Incertezza [g]	Massa passante [g]	Trattenuto parziale [%]	Trattenuto cumulativo [%]	Trattenuto cumulativo NORMATIVA [%]
2,00	19	±1	1331	1,41%	1,41%	0,00%
1,60	56	±1	1275	4,15%	5,56%	7,00%
1,00	270	±1	1005	<b>20,00%</b>	25,56%	33,00%
0,50	507	±1	498	<b>37,56%</b>	63,11%	67,00%
0,16	272	±1	226	<b>20,15%</b>	83,26%	87,00%
0,08	214	±1	12	15,85%	99,11%	99,00%
< 0,08	4	±1	-	0,30%	99,41%	-
Percentuale di massa a fine setacciatura rispetto a quella iniziale				99,41%		
Percentuale di massa persa				0,59%		

## La campagna sperimentale

Il primo elemento riscontrabile dai dati riportati, è la percentuale di massa persa durante la setacciatura, che risulta essere inferiore all'1% e quindi si ritiene accettabile. Per quanto riguarda invece i valori di trattenuto cumulativo, essi sono abbastanza vicini a quelli teorici; rientrano tutti all'interno degli scarti percentuali riportati sulla norma, tranne il quantitativo del setaccio con maglia 1,00 mm della seconda giornata di setacciatura, che si differenzia più del 5% rispetto al valore atteso.

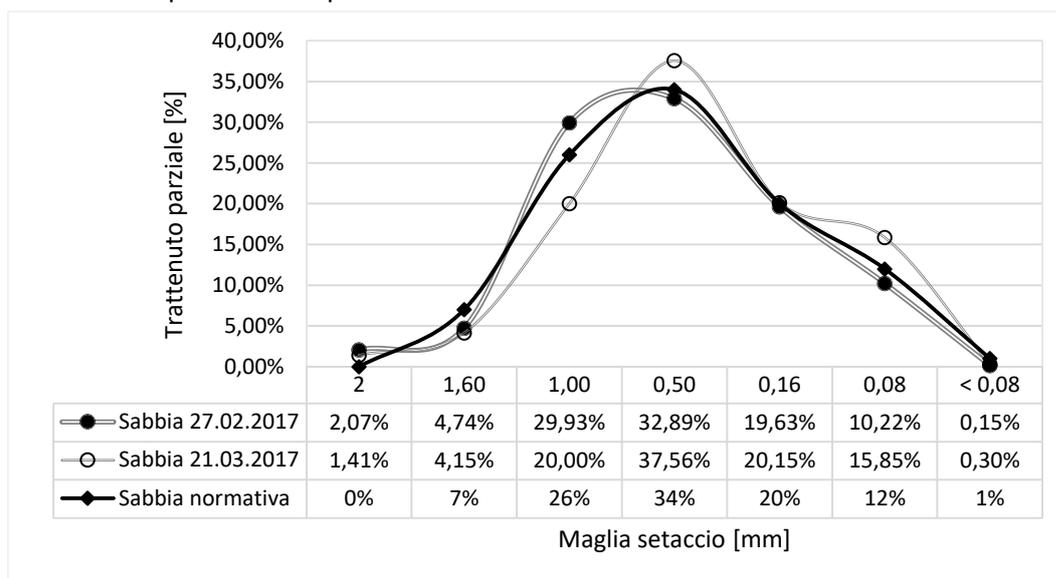


Figura 25. Curva granulometrica del trattenuto parziale per la sabbia.

Come si evince dal grafico riportato e dalle precedenti tabelle, i sacchetti di sabbia normalizzata presentano un picco percentuale di trattenuto parziale in corrispondenza del setaccio con maglia 0,50 mm. Per avere quindi risultati apprezzabili in termini di caratteristiche chimico-fisiche dei provini modificati con l'aggiunta di inerti polimerici, si è deciso di operare prevalentemente sulle frazioni granulometriche di maggiore incidenza, comprese tra i setacci 1,00 mm e 0,16 mm.

### 5.1.3.2. Polipropilene

La setacciatura del materiale plastico è stata eseguita in modo analogo a quella della sabbia per verificare se il quantitativo di materiale presente nelle diverse frazioni granulometriche fosse sufficiente a operare una sostituzione di aggregati. È stato necessario gestire i seguenti problemi:

- A causa del peso specifico più basso e della forma allungata dei grani, la setacciatura è stata più complessa in quanto il polipropilene tendeva a costipare il setaccio in cui veniva versato.
- I granuli sono stati prodotti con le lame del mulino di macinazione a fine vita, con una conseguente qualità del taglio scarsa. A causa di ciò, all'interno del volume prodotto vi era un'elevata quantità di frazione fine, a carattere polverulento. Tale polvere risulta essere elettrostatica e tendeva ad attaccarsi alle pareti e alle griglie dei setacci metallici.

## La campagna sperimentale

Si riportano di seguito i dati ottenuti, come è già stato detto è presente un ulteriore setaccio da 3,00 mm.

Tabella 4. Setacciatura polipropilene (eseguita il 27/02/2017).

Massa iniziale [g]		Massa a fine setacciatura [g]		Incertezza [g]	
1000		989		±1	
Maglia setaccio [mm]	Massa trattenuta [g]	Incertezza [g]	Massa passante [g]	Trattenuto parziale [%]	Trattenuto cumulativo [%]
3,00	23	±1	977	2,30%	2,30%
2,00	421	±1	556	42,10%	44,40%
1,60	36	±1	520	3,60%	48,00%
1,00	294	±1	226	<b>29,40%</b>	77,40%
0,50	187	±1	39	<b>18,70%</b>	96,10%
0,16	23	±1	16	2,30%	98,40%
0,08	2	±1	14	0,20%	98,60%
< 0,08	3	±1	-	0,30%	98,90%
Percentuale di massa a fine setacciatura rispetto a quella iniziale				98,90%	
Percentuale di massa persa				1,10%	

Tabella 5. Setacciatura polipropilene (eseguita il 21/03/2017).

Massa iniziale [g]		Massa a fine setacciatura [g]		Incertezza [g]	
2700		2681		±1	
Maglia setaccio [mm]	Massa trattenuta [g]	Incertezza [g]	Massa passante [g]	Trattenuto parziale [%]	Trattenuto cumulativo [%]
3,00	175	±1	2525	6,48%	6,48%
2,00	1316	±1	1209	48,74%	55,22%
1,60	26	±1	1183	0,96%	56,19%
1,00	640	±1	543	<b>23,70%</b>	79,89%
0,50	495	±1	48	<b>18,33%</b>	98,22%
0,16	28	±1	20	1,04%	99,26%
0,08	1	±1	19	0,04%	99,30%
< 0,08	0	±1	-	0,00%	99,30%
Percentuale di massa a fine setacciatura rispetto a quella iniziale				99,30%	
Percentuale di massa persa				0,70%	

Per quanto riguarda la percentuale di massa persa durante l'operazione di vagliatura, nella prima giornata il valore è maggiore dell'1% e si ritiene sia legato alla poca dimestichezza con il materiale e alle problematiche citate in precedenza. Durante la seconda giornata, invece, è stato perso circa lo 0,70% della massa iniziale.

## La campagna sperimentale

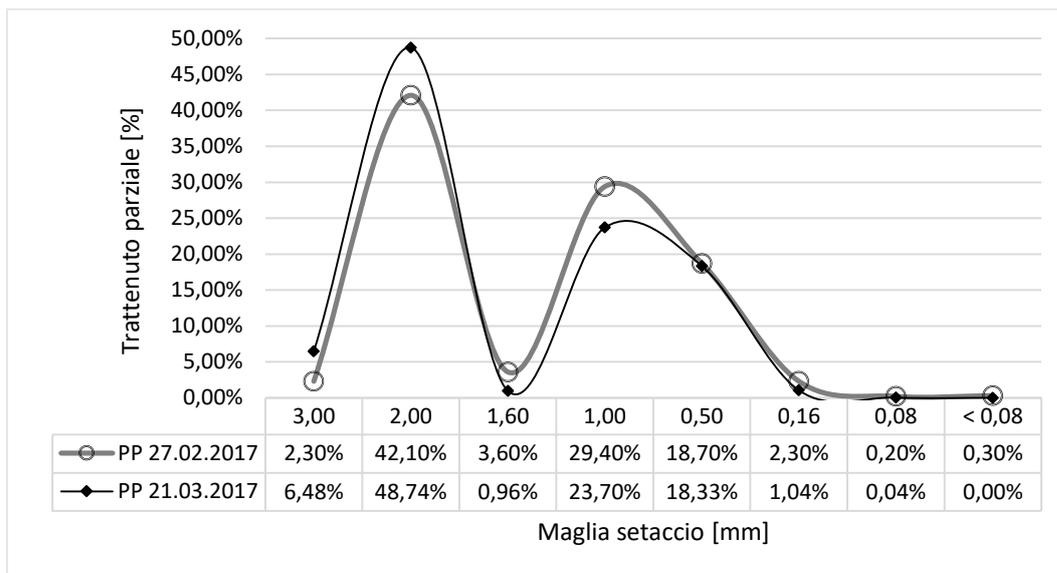


Figura 26. Curva granulometrica del trattenuto parziale per il polipropilene.

Analizzando le curve granulometriche riportate nel precedente grafico si può notare:

- Presenza di un picco di quantitativo in corrispondenza del setaccio con maglia 2,00 mm: il vaglio utilizzato durante la macinazione era di 3,00 mm, la macchina continua la lavorazione fino a quando è presente un trattenuto nel vaglio, comportando quindi un accumulo di materiale appena a valle dello stesso.
- Presenza di un valore minimo nel setaccio con maglia da 1,60 mm.
- Presenza di un secondo picco in corrispondenza del setaccio con maglia da 1,00 mm: tale risultato è particolarmente importante per la presente sperimentazione in quanto circa il 50% del polipropilene setacciato si colloca nell'intervallo 1,60 – 0,50 mm ed è quindi ipoteticamente sostituibile con le rispettive frazioni di sabbia.
- Al di sotto di 0,16 mm il quantitativo in massa di materiale è molto basso e la sua presenza è legata prevalentemente al fatto che le lame del mulino fossero usurate.

A fronte di tali considerazioni, si ritiene possibile la sostituzione di alcune frazioni di sabbia con il polipropilene.

### 5.1.3.3. Gomma PFU

Anche in questo caso la setacciatura è stata eseguita per verificare la possibilità di operare una sostituzione di inerti. Non sono stati riscontrati però i problemi enunciati per il polipropilene: i granuli non erano particolarmente allungati e il materiale non è risultato essere elettrostatico. È stato impiegato anche il setaccio da 4,00 mm.

Tabella 6. Setacciatura gomma da PFU (eseguita il 13/07/2017).

Massa iniziale [g]		Massa a fine setacciatura [g]		Incertezza [g]	
24900		24849		±1	
Maglia setaccio [mm]	Massa trattenuta [g]	Incertezza [g]	Massa passante [g]	Trattenuto parziale [%]	Trattenuto cumulativo [%]
4,00	690		24210	2,77%	2,77%
3,00	14567	±1	9643	58,50%	61,27%
2,00	5696	±1	3947	22,88%	84,15%
1,60	1954	±1	1993	7,85%	92,00%
1,00	1647	±1	346	6,61%	98,61%
0,50	276	±1	70	1,11%	99,72%
< 0,50	19	±1	-	0,08%	99,80%
Percentuale di massa a fine setacciatura rispetto a quella iniziale				99,80%	
Percentuale di massa persa				0,20%	

Come è riportato nella tabella, il quantitativo di gomma setacciato è molto elevato, nonostante ciò ne sono stati persi poco più di 50 g, valore ritenuto accettabile.

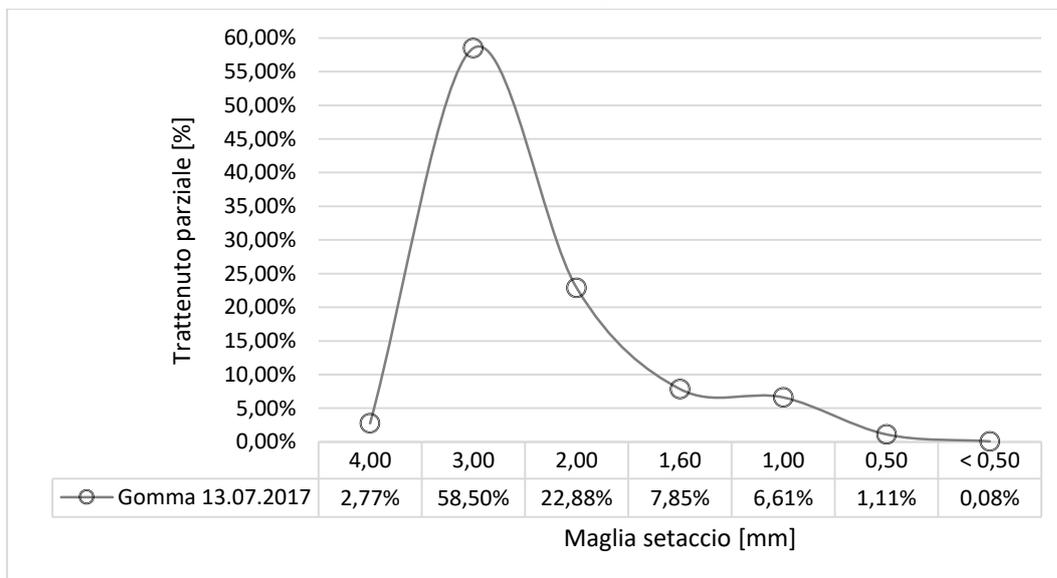


Figura 27. Curva granulometrica del trattenuto parziale per la gomma da PFU.

Rispetto ai casi precedenti, la distribuzione granulometrica è fortemente spostata verso una dimensione dei granuli maggiore di quella della sabbia, circa l'84% della gomma si è

## La campagna sperimentale

fermata nei setacci con maglia compresa tra 4,00 mm e 2,00 mm. Solo il restante 16% si è distribuito sui setacci di maglia pari a 1,60 mm o inferiore, senza contare che dopo le prime fasi di vagliatura si è deciso di rimuovere i setacci di maglia 0,16 mm e 0,08 mm in quanto pochi grammi di materiale superavano il vaglio da 0,50 mm.

Nonostante questa forte differenza tra la curva granulometrica della sabbia e quella della gomma, si è proceduto comunque alla sostituzione di alcune frazioni di aggregati grazie all'elevata quantità di massa setacciata. Qui si evidenzia la prima problematica nell'utilizzo della gomma da PFU macinata con un vaglio da 4,00 mm per il confezionamento delle malte cementizie; per una produzione su larga scala è più conveniente l'impiego di tale polimero nel calcestruzzo in quanto le frazioni granulometriche utilizzabili in una malta sono molto ridotte.

## 5.2. Realizzazione dei provini in malta con inerti polimerici

Durante la campagna sperimentale sono stati confezionati i seguenti provini:

Tabella 7. Provini realizzati durante la campagna sperimentale.

Inerte impiegato	Frazioni sostituite	Percentuale di inerte sostituito	Data confezionamento	Data prove
Polipropilene	1,00 - 0,50 mm	- <sup>21</sup>	14/03/2017	11/04/2017
Sabbia	-	-	14/03/2017	11/04/2017
Polipropilene	1,00 - 0,50 mm	57,56%	28/03/2017	26/04/2017
Sabbia	-	-	28/03/2017	26/04/2017
Polipropilene	1,00 mm	27,08%	23/05/2017	23/06/2017
Polipropilene	1,60 – 1,00 – 0,50 – 0,16 mm	77,21%	23/05/2017	23/06/2017
Aggiunta di fibre di PP	-	-	23/05/2017	23/06/2017
Gomma da PFU	1,00 mm	29,92%	13/07/2017	04/09/2017
Gomma da PFU	1,00 - 0,50 mm	58,83%	13/07/2017	04/09/2017
Sabbia	-	-	13/07/2017	04/09/2017

### 5.2.1. Sostituzione degli inerti

Secondo quanto ottenuto dalle distribuzioni granulometriche riportate nel precedente paragrafo si è deciso di operare in prima istanza sulle frazioni corrispondenti ai setacci con maglia da 1,00 mm e 0,50 mm, sostituendo la sabbia con polipropilene.

Durante la prima sostituzione è stato commesso l'errore di eseguirla in massa e non in volume. A causa del basso peso specifico della plastica rispetto a quello della sabbia, il volume finale di materiale da inserire nell'impasto della malta è risultato essere molto elevato. All'interno del sacchetto di sabbia di 1350 g sono stati sostituiti 110 g di frazione da 1,0 mm e 257 g di frazione da 0,5 mm. Nonostante tale errore, sono poi stati eseguiti i getti e i provini sono stati sottoposti alle prove di flessione e compressione; poiché i risultati sono poco significativi non sono riportati nel presente documento, ma allegati al fondo.

A causa del differente peso specifico di polipropilene e gomma rispetto alla sabbia, è quindi necessaria la sostituzione in volume. Di seguito si riporta la procedura adottata facendo riferimento al polipropilene; per la gomma si è proceduto in modo analogo.

È necessario premettere che il peso specifico valutato viene definito *apparente* in quanto non è quello proprio del materiale costituito da un unico corpo compatto, ma considera



Figura 28. Cilindro utilizzato per il calcolo del peso specifico.

<sup>21</sup> Questi provini sono stati realizzati operando una sostituzione degli inerti in massa e non in volume.

## La campagna sperimentale

anche il volume dei vuoti tra i grani. Ciò fa sì che il peso per unità di volume sia differente a seconda del grado di compattazione.

Per la determinazione del peso specifico è necessario fare riferimento a un volumetto noto; durante le giornate in laboratorio sono stati impiegati due diversi cilindri metallici le cui caratteristiche geometriche sono riportate nella tabella seguente.

Tabella 8. Caratteristiche geometriche dei volumetti per il calcolo del peso specifico.

Anello cilindrico	Diametro [cm]	Altezza [cm]	Area [cm <sup>2</sup> ]	Volume [cm <sup>3</sup> ]
1	5,30	3,00	22,05	66,15
2	3,10	3,85	7,54	29,04

Determinato il volume dell'anello cilindrico utilizzato è stata seguita la seguente procedura:

1. Posizionare il volume noto sulla bilancia ed eseguire la tara;
2. Versare all'interno del volume il materiale del quale si vuole determinare il peso specifico, cercando di compattarlo leggermente con un pestello;
3. Verificare che il materiale riempi completamente il volume;
4. Annotarsi la massa del materiale contenuto nel volume e determinare il peso specifico come rapporto tra la massa e il volume;
5. Eseguire i precedenti punti per ogni frazione di sabbia e di polipropilene. Determinare il volume di materiale da sostituire all'interno della malta cementizia tramite la seguente formula:

$$volume_{frazione\ sabbia} = \frac{massa_{frazione\ sabbia}}{densità_{sabbia}} \quad [5.3]$$

6. Determinare la massa di plastica corrispondente a tale volume di sabbia:

$$massa_{frazione\ PP} = volume_{frazione\ sabbia} \cdot densità_{PP} \quad [5.4]$$

Di seguito si riportano i calcoli eseguiti per i provini realizzati con il polipropilene il giorno 28/03/2017:

Tabella 9. Procedura per il calcolo della massa di polipropilene da sostituire alla sabbia per la frazione 1,00 mm.

SABBIA 1,00 mm	POLIPROPILENE 1,00 mm
$\rho = \frac{102,0\ g}{66,152\ cm^3} = 1,542\ \frac{g}{cm^3}$	$\rho = \frac{18,7\ g}{66,152\ cm^3} = 0,283\ \frac{g}{cm^3}$
$V = \frac{270\ g}{1,542\ \frac{g}{cm^3}} = 175,10\ cm^3$	$m = 175,10\ cm^3 \cdot 0,283\ \frac{g}{cm^3} = 49,50\ g$

## La campagna sperimentale

Tabella 10. Procedura per il calcolo della massa di polipropilene da sostituire alla sabbia per la frazione 0,50 mm.

SABBIA 0,50 mm	POLIPROPILENE 0,50 mm
$\rho = \frac{101,2 \text{ g}}{66,152 \text{ cm}^3} = 1,530 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	$\rho = \frac{13,6 \text{ g}}{66,152 \text{ cm}^3} = 0,206 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
$V = \frac{507 \text{ g}}{1,530 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 331, \text{cm}^3$	$m = 331, \text{cm}^3 \cdot 0,206 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 68,13 \text{ g}$

Nella seguente tabella è stata calcolata la percentuale di sabbia sostituita intervenendo sulle frazioni corrispondenti ai setacci con maglia da 1,00 mm e 0,50 mm, tale valore risulta essere pari a circa 58%.

Tabella 11. Calcolo percentuale di inerte sostituito con polipropilene (getto eseguito il 28/03/2017).

SABBIA							
Massa iniziale [g]		Massa a fine setacciatura [g]		Incertezza [g]		Volumetto [cm <sup>3</sup> ]	
1350		1342		±1		66,152	
Maglia setaccio [mm]	Massa trattenuta [g]	Incertezza [g]	Massa passante [g]	Trattenuto parziale [%]	Massa volumetto [g]	Densità apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	Volume da sostituire [cm <sup>3</sup> ]
> 1,60	75	±1	1275	5,56%	-	-	-
1,00	270	±1	1005	20,00%	102,0	1,54	175,11
0,50	507	±2	498	37,56%	101,2	1,53	331,41
< 0,50	490	±1	515	36,30%	-	-	-
Percentuale di massa a fine setacciatura rispetto a quella iniziale				99,41%			
Percentuale di massa persa				0,59%			
POLIPROPILENE							
Frazioni sostituite	Sabbia sostituita [%]	Volume plastica da inserire [cm <sup>3</sup> ]		Massa volumetto [g]	Densità apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	Massa plastica da inserire [g]	
1,00	<b>20,00%</b>	175,11		18,7	0,28	49,50	
0,50	<b>37,56%</b>	331,41		13,6	0,21	68,13	
	<b>57,56%</b>						

## La campagna sperimentale

Per comprendere meglio quale fosse l'effetto della sostituzione di una parte di sabbia con i granuli di polipropilene si è deciso di confezionare altri provini con un minore e un maggiore quantitativo di materiale polimerico. Nelle tabelle che seguono si riportano i calcoli eseguiti, le frazioni granulometriche coinvolte e la percentuale di inerte interessato. In un caso è stato sostituito circa il 27% di sabbia, mentre nel secondo caso ci si è spinti fino al 77%.

Tabella 12. Calcolo percentuale di inerte sostituito con polipropilene (getto eseguito il 23/05/2017).

SABBIA							
Massa iniziale [g]		Massa a fine setacciatura [g]		Incertezza [g]		Volumetto [cm <sup>3</sup> ]	
1348		1348		±1		29,044	
Maglia setaccio [mm]	Massa trattenuta [g]	Incertezza [g]	Massa passante [g]	Trattenuto parziale [%]	Massa volumetto [g]	Densità apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	Volume da sostituire [cm <sup>3</sup> ]
> 1,60	89	±1	1259	6,60%	-	-	-
1,00	365	±1	894	27,08%	49	1,69	216,35
< 1,00	894	±1	0	66,32%	-	-	-
Percentuale di massa a fine setacciatura rispetto a quella iniziale				100%			
Percentuale di massa persa				0,00%			
POLIPROPILENE							
Frazioni sostituite	Sabbia sostituita [%]	Volume plastica da inserire [cm <sup>3</sup> ]		Massa volumetto [g]	Densità apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	Massa plastica da inserire [g]	
1,00	<b>27,08%</b>	216,35		12	0,41	89,39	

## La campagna sperimentale

Per la realizzazione dei provini a cui fa riferimento la tabella che segue, si è cercato di sostituire la massima quantità di sabbia possibile, volendo raggiungere il 90%. Ciò non è stato però possibile poiché il quantitativo di polipropilene disponibile non era sufficiente. In particolar modo, le frazioni da 1,60 – 1,00 – 0,50 mm sono state sostituite nella loro interezza, mentre per quella da 0,16 mm è stato possibile operare unicamente una sostituzione parziale. Per questo, al posto di calcolare la massa di plastica corrispondente a un determinato volume di sabbia è stato eseguito il procedimento inverso: nota la massa del polipropilene a disposizione è stato valutato il volume e poi la massa di sabbia da sostituire. Da tale calcolo è risultato che 121,16 g di sabbia sono stati impiegati come inerte, mentre 111,84 g sono stati sostituiti con il polipropilene.

Tabella 13. Calcolo percentuale di inerte sostituito con polipropilene (getto eseguito il 23/05/2017).

SABBIA							
Massa iniziale [g]		Massa a fine setacciatura [g]		Incertezza [g]		Volumetto [cm <sup>3</sup> ]	
1348		1345		±1		29,044	
Maglia setaccio [mm]	Massa trattenuta [g]	Incertezza [g]	Massa passante [g]	Trattenuto parziale [%]	Massa volumetto [g]	Densità apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	Volume da sostituire [cm <sup>3</sup> ]
> 2,00	1	±1	1347	0,07%	-	-	-
1,60	98	±1	1249	7,27%	48	1,653	59,30
1,00	364	±1	885	27,00%	49	1,687	215,76
0,50	467	±1	418	34,64%	50	1,722	271,27
0,16	121,16	±1	185	8,99%	-	-	-
0,16	111,84	±1		8,30%	43	1,481	75,54
0,08	180	±1	5	13,35%	-	-	-
< 0,08	2	±1	3	0,15%	-	-	-
Percentuale di massa a fine setacciatura rispetto a quella iniziale				99,78%			
Percentuale di massa persa				0,22%			
POLIPROPILENE							
Frazioni sostituite	Sabbia sostituita [%]	Volume plastica da inserire [cm <sup>3</sup> ]		Massa volumetto [g]	Densità apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	Massa plastica da inserire [g]	
1,60	7,27%	59,30		16	0,551	32,67	
1,00	27,00%	215,76		12	0,413	89,14	
0,50	34,64%	271,27		10	0,344	93,40	
0,16	8,30%	75,54		10	0,344	26,01	
	<b>77,21%</b>						

## La campagna sperimentale

Per quanto riguarda la gomma da PFU, si è cercato di procedere come per il polipropilene, in modo da poter effettuare un confronto tra i risultati ottenuti in termine di caratteristiche chimico-fisiche. Si è quindi deciso di realizzare diversi provini con percentuali di sabbia sostituita pari a circa il 30%, il 60% e il 90%. Nei primi due casi ciò è stato possibile in quanto il quantitativo di materiale polimerico era sufficiente; la sostituzione del 90% non è invece stato possibile eseguirla.

Tabella 14. Calcolo percentuale di inerte sostituito con gomma da PFU (getto eseguito il 13/07/2017).

SABBIA							
Massa iniziale [g]		Massa a fine setacciatura [g]		Incertezza [g]		Volumetto [cm <sup>3</sup> ]	
1347		1346		±1		29,044	
Maglia setaccio [mm]	Massa trattenuta [g]	Incertezza [g]	Massa passante [g]	Trattenuto parziale [%]	Massa volumetto [g]	Densità apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	Volume da sostituire [cm <sup>3</sup> ]
> 1,60	72	±1	1275	5,35%	-	-	-
1,00	403	±1	872	29,92%	49	1,69	238,87
< 1,00	871	±1	0	64,66%	-	-	-
Percentuale di massa a fine setacciatura rispetto a quella iniziale				99,93%			
Percentuale di massa persa				0,07%			
GOMMA DA PFU							
Frazioni sostituite	Sabbia sostituita [%]	Volume plastica da inserire [cm <sup>3</sup> ]		Massa volumetto [g]	Densità apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	Massa plastica da inserire [g]	
1,00	<b>29,92%</b>	238,87		13,5	0,46	111,03	

## La campagna sperimentale

Tabella 15. Calcolo percentuale di inerte sostituito con gomma da PFU (getto eseguito il 13/07/2017).

SABBIA							
Massa iniziale [g]		Massa a fine setacciatura [g]		Incertezza [g]		Volumetto [cm <sup>3</sup> ]	
1348		1347		±1		29,044	
Maglia setaccio [mm]	Massa trattenuta [g]	Incertezza [g]	Massa passante [g]	Trattenuto parziale [%]	Massa volumetto [g]	Densità apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	Volume da sostituire [cm <sup>3</sup> ]
> 1,60	68	±1	1280	5,04%	-	-	-
1,00	314	±1	966	23,29%	49	1,69	186,12
0,50	479	±2	487	35,53%	50	1,72	278,24
< 0,50	486	±1	0	36,05%	-	-	-
Percentuale di massa a fine setacciatura rispetto a quella iniziale				99,93%			
Percentuale di massa persa				0,07%			
GOMMA DA PFU							
Frazioni sostituite	Sabbia sostituita [%]	Volume plastica da inserire [cm <sup>3</sup> ]		Massa volumetto [g]	Densità apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	Massa plastica da inserire [g]	
1,00	<b>23,29%</b>	186,12		13,5	0,46	86,51	
0,50	<b>35,53%</b>	278,24		11,7	0,40	112,09	
	<b>58,83%</b>						

Come riportato nella *tabella 7*, sono stati realizzati anche provini alla cui malta non è stata apportata alcuna modifica in modo da poterli utilizzare come confronto. Sono stati inoltre realizzati dei provini con 10 g di fibre di polipropilene da 12 mm prodotte da *Mapei*<sup>22</sup>, in modo da verificare se le caratteristiche meccaniche delle malte con inerti polimerici fossero paragonabili a quelli dei conglomerati cementizi fibrorinforzati.

<sup>22</sup> La scheda tecnica di *Mapefibre NS12* è presente sul sito [www.mapei.com](http://www.mapei.com) (24/09/2017).

### **5.2.2. Esecuzione dei getti e maturazione**

Per l'esecuzione dei getti si fa riferimento alla norma già citata UNI EN 196-1 [43]. L'elenco dei provini realizzati è riportato nella tabella 7; per ogni tipologia di malta sono stati gettati tre provini prismatici. Per quanto riguarda l'errore commesso in merito alla sostituzione degli inerti in massa e non in volume, in tale occasione a causa dell'elevato quantitativo di impasto creato sono stati confezionati otto provini e non tre.

La procedura adottata per il confezionamento è la seguente:

1. Pesatura dei componenti della malta:  
450 g di cemento CEM II/A-LL 42,5 R;  
225 g di acqua;  
1350 g di sabbia o quantitativo equivalente di inerte composto da sabbia e polimeri.
2. Versare il cemento e l'acqua nel recipiente dell'impastatrice meccanica;
3. Appena il cemento e l'acqua entrano in contatto avviare l'impastatrice a velocità lenta per 30 secondi;
4. Passati i 30 secondi procedere versando gradualmente la sabbia per altri 30 secondi;
5. Aumentare la velocità ad alta per 30 secondi;
6. Fermare l'impastatrice per 90 secondi; in questo arco di tempo raschiare le pareti del recipiente per 30 secondi e poi lasciare riposare per i restanti 60 secondi;
7. Riavviare l'impastatrice per 60 secondi a velocità alta;

Terminata la preparazione della malta si procede alla scasseratura; la malta viene versata in due fasi in casseri metallici che creano tre provini di dimensioni 40 mm x 40 mm x 160 mm. La procedura per versare la malta nei casseri è la seguente:



*Figura 29. Provini appena gettati nel cassero metallico.*

1. Preparare i casseri posizionandoli sul macchinario atto alla vibratura e lubrificarli con olio per scasseratura;
2. Versare la malta nei tre spazi riempiendoli per metà;
3. Avviare il macchinario per la vibratura che sbatte il cassero con 60 colpi;
4. Versare la parte restante di malta e procedere nuovamente con 60 colpi;
5. Lisciare la superficie dei provini;
6. Lasciare i provini nel cassero per 24 ore alla temperatura di 20°C e umidità al 90%.

Dopo il confezionamento e la scasseratura i provini sono stati lasciati maturare in acqua per un tempo minimo di 28 giorni.

## La campagna sperimentale

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva delle quantità in massa dei diversi componenti delle malte realizzate; essa servirà come base per la valutazione dell'indice ecologico dell'analisi eco-meccanica.

*Tabella 16. Costituenti le malte realizzate.*

ID	Cemento [g]	Acqua [g]	Sabbia [g]	PP [g]	Gomma [g]	Fibre PP [g]
PP_ERR	450	225	983	367	-	-
M_1	450	225	1350	-	-	-
PP_58%	450	225	565	117,6	-	-
M_2	450	225	1350	-	-	-
PP_27%	450	225	983	89,4	-	-
PP_77%	450	225	304,2	241,2	-	-
FIBRE	450	225	1350	-	-	10
GOMMA_30%	450	225	943	-	111,0	-
GOMMA_59%	450	225	554	-	198,6	-
M_3	450	225	1350	-	-	-

### 5.3. Esecuzione delle prove

I provini lasciati a maturare per un tempo maggiore a 28 giorni sono stati sottoposti a prove di flessione su tre punti e a prove di compressione. Tra le due tipologie si sono ottenuti risultati di maggiore rilievo per quanto riguarda la flessione. Infatti, come si potrà notare meglio in seguito, il comportamento dei provini con polipropilene o gomma è più duttile rispetto ai provini di malta normale.

#### 5.3.1. Prova a flessione

Al capitolo 4.7 della norma UNI EN 196-1 [43] sono riportati gli elementi necessari all'esecuzione della prova a flessione su tre punti. Per quanto concerne l'aspetto geometrico, il provino viene posto tra due appoggi inferiori distanziati 100 mm tra loro, le estremità del provino lungo 160 mm devono trovarsi a 30 mm dagli appoggi, in modo tale che il tutto sia centrato. Nella parte superiore, invece, vi è un unico appoggio posizionato in mezzeria al provino. La prova viene controllata in forza, impostando un valore di carico pari a 50 N/s.

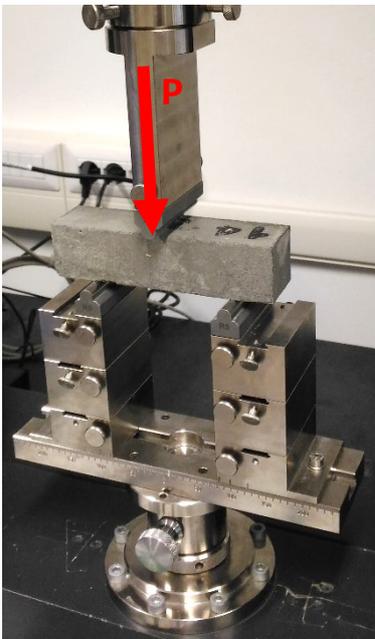


Figura 30. Strumentazione per la prova a flessione su tre punti.

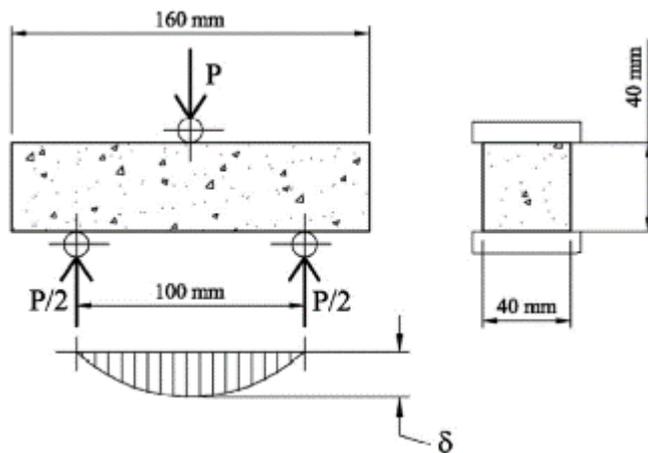


Figura 31. Schema statico della flessione su tre punti (Da The use of wool as fiber-reinforcement in cement-based mortar).

Di seguito si riportano le immagini scattate durante le prove a flessione per le diverse tipologie di malta.

## La campagna sperimentale

Tabella 17. Rottura a flessione.

Tipologia malta	Vista laterale dopo la prova a flessione	Vista della superficie di frattura
Malta normale		
Malta normale con fibre di polipropilene		
Malta con polipropilene al 27,08%		
Malta con polipropilene al 57,56%		
Malta con polipropilene al 77,21%		
Malta con gomma al 29,92%		
Malta con gomma al 28,83%		

### **5.3.2. Prova a compressione**

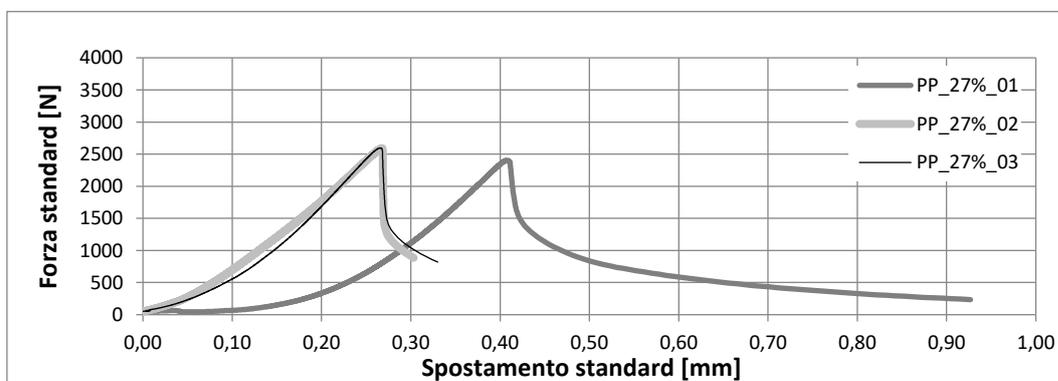
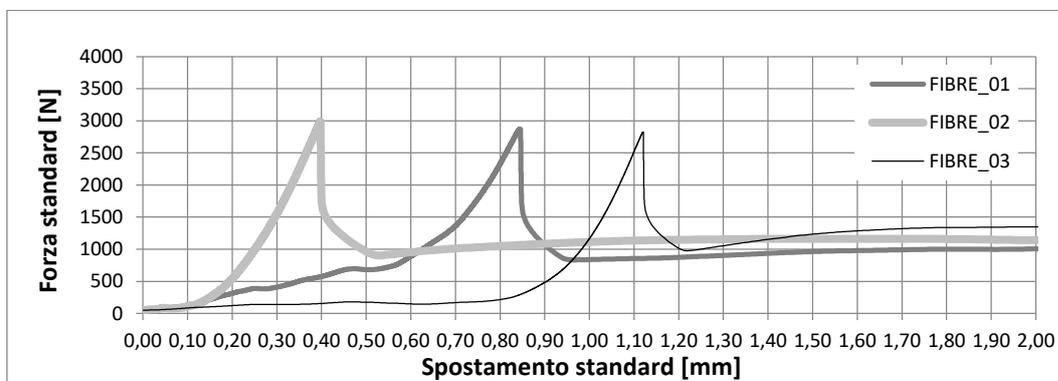
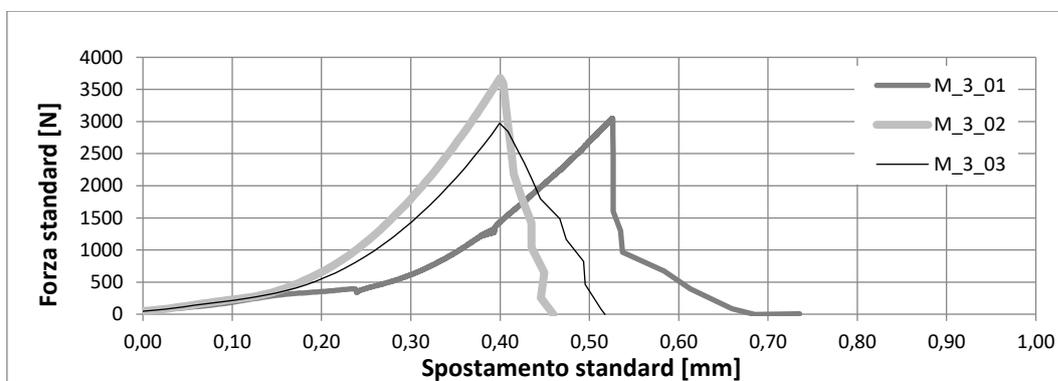
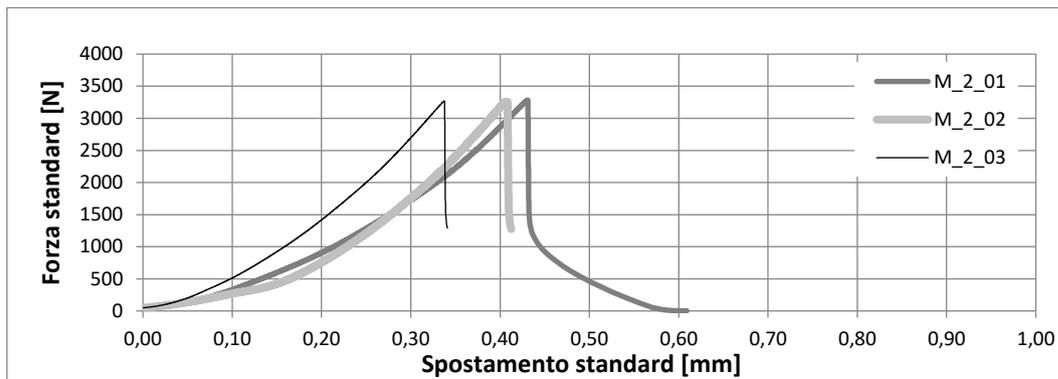
Una volta eseguita la prova a flessione, durante la quale il provino tende a dividersi in due parti, si procede alla prova di compressione dei due elementi che si sono venuti a creare. Per l'esecuzione della prova si utilizza un supporto metallico che trasferisce il carico della macchina di prova al provino esaminato. Tale supporto si utilizza per poter sottoporre a compressione unicamente la parte centrale del provino, corrispondente a un'area pari a 40 x 40 mm. Anche questa prova viene eseguita in controllo di carico con una velocità di sollecitazione pari a 2400 N/s. Nel primo ciclo di prove è stato utilizzato tale carico, mentre nel secondo ciclo si è deciso di scendere a 1000 N/s in quanto i provini si rompevano troppo rapidamente e i risultati non erano soddisfacenti.



*Figura 32. Supporto metallico utilizzato per la prova a compressione.*

### 5.4. Risultati ottenuti

Per quanto concerne la prova flessionale, è possibile ottenere i diagrammi carico – spostamento (P- $\delta$ ), riportati nel seguito.



## La campagna sperimentale

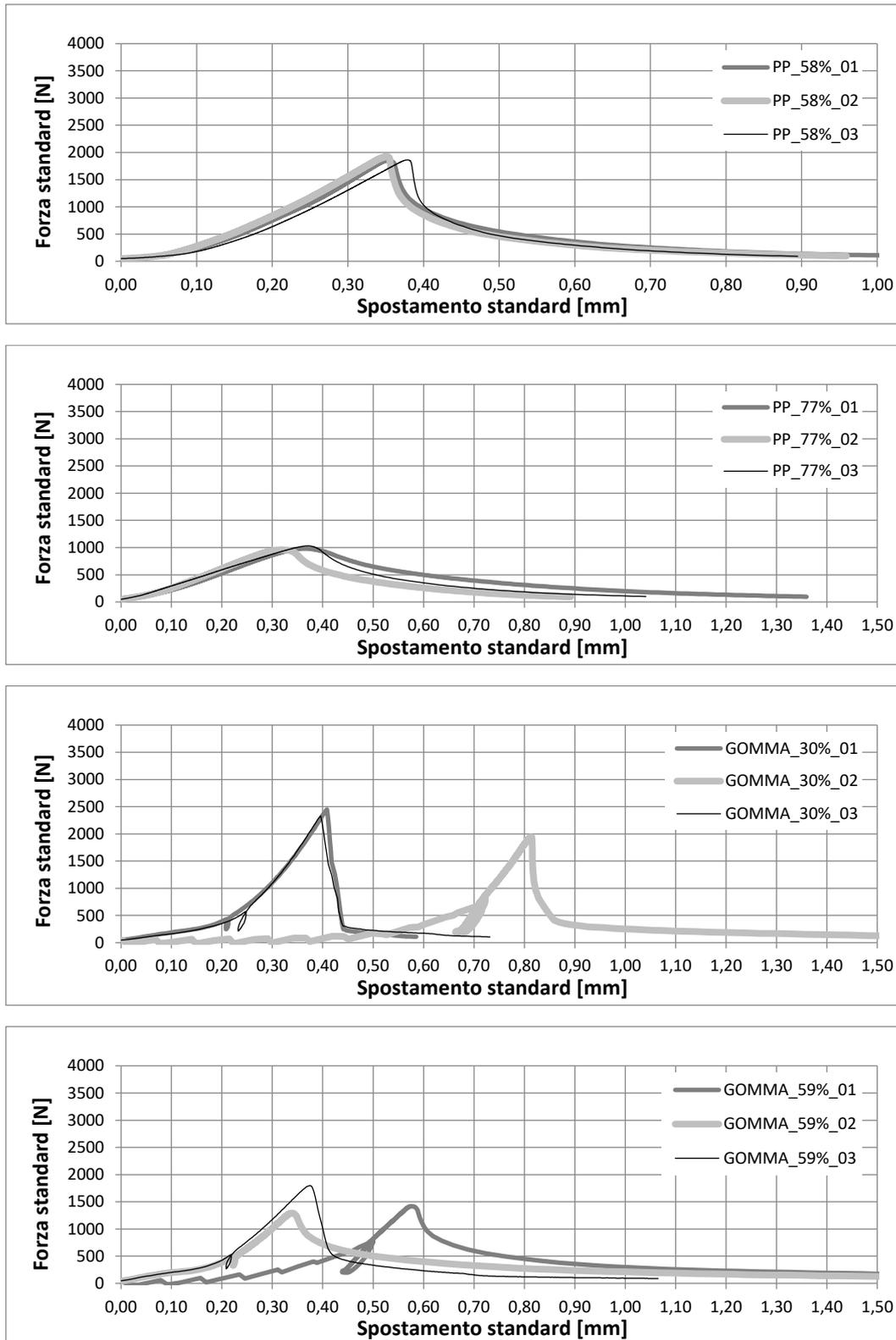


Figura 33. Diagrammi carico-spostamento ( $P-\delta$ ) per i provini esaminati.

## La campagna sperimentale

Durante il ramo post-picco, la rigidezza flessionale non può essere valutata, nonostante ciò tali grafici vengono impiegati per determinare il carico massimo a rottura  $P_{MAX}$  e il corrispondente spostamento  $\delta_p$ . Noti tali parametri e le dimensioni dei provini è possibile calcolare la resistenza flessionale  $\sigma_F$ , anche detta modulo di rottura [47]:

$$\sigma_F = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_{MAX} \cdot l}{b \cdot h^2} \quad [5.5]$$

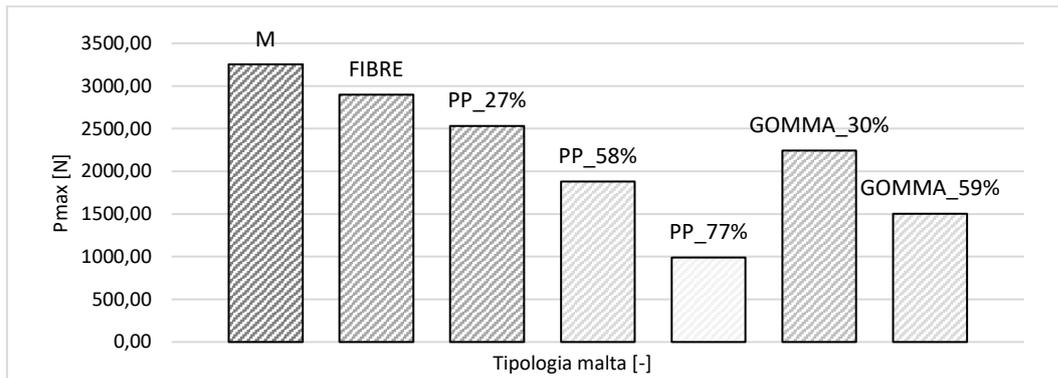


Figura 34. Valor medio del carico massimo a rottura per flessione per tipologia di malta.

Come si evince dalla figura 33, aumentando la quantità di inerte sostituito diminuisce il carico massimo che la malta riesce a sopportare prima di raggiungere la rottura.

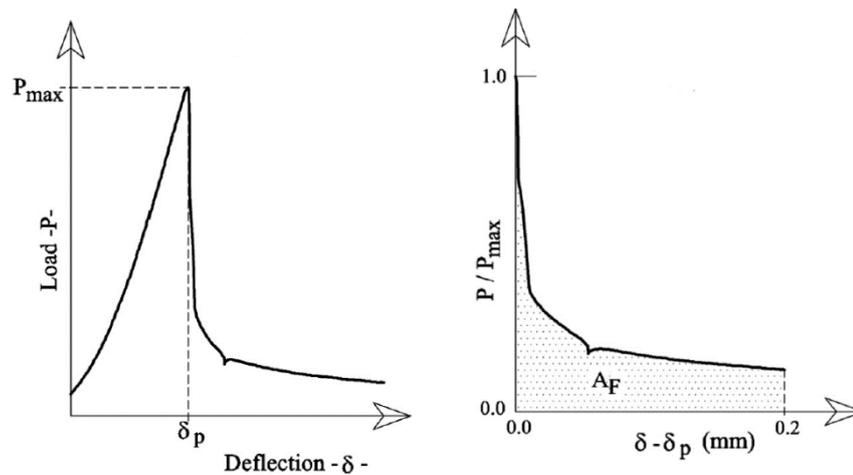


Figura 35. Analisi del ramo post-picco (Da The use of wool as fiber-reinforcement in cement-based mortar).

Noti il carico massimo e il corrispondente spostamento è possibile creare il diagramma  $P/P_{MAX} - \delta - \delta_p$  per ciascuna malta; tale diagramma viene limitato a  $\delta - \delta_p = 0,2$  mm. Per fare una valutazione sulla duttilità del materiale è possibile calcolare l'area sottesa al ramo di post-picco,  $A_F$ . È inoltre possibile determinare il lavoro di frattura  $G_F$  [47]:

$$G_F = \sigma_F \cdot A_F \quad [5.6]$$

## La campagna sperimentale

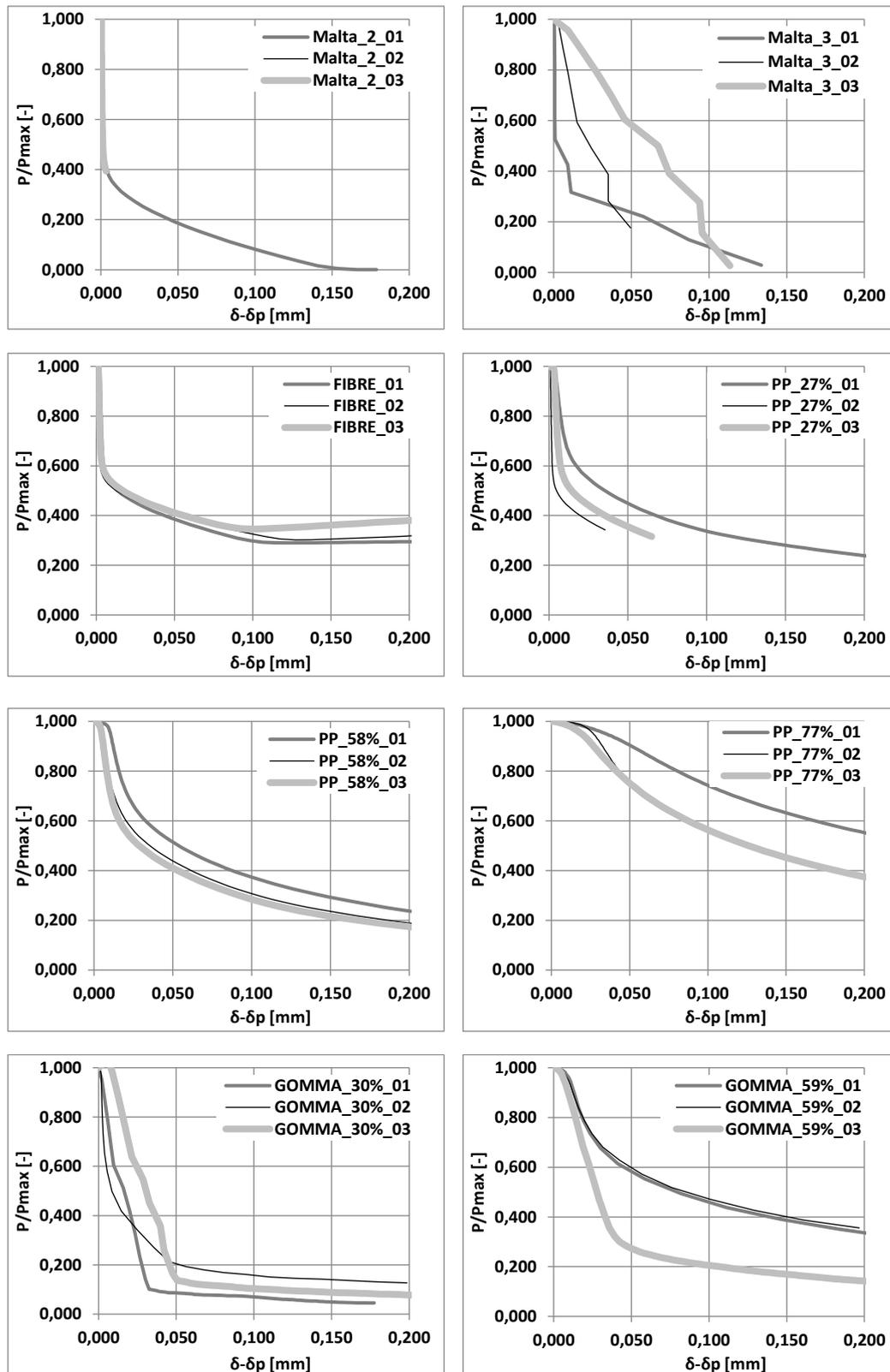


Figura 36. Grafico  $P/P_{max}$  -  $\delta-\delta_p$  per ogni tipologia di malta.

## La campagna sperimentale

Tabella 18. Densità, carico massimo, spostamento al carico massimo, resistenza flessionale, area sottesa al ramo post-picco e lavoro di frattura per ogni provino esaminato.

ID provino	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$P_{max}$ [N]	$\delta_p$ [mm]	$\sigma_F$ [MPa]	$A_F$ [mm]	$G_F$ [N/mm]
M_2_01	2,29	3283	0,43	7,51	0,02	0,17
M_2_02	2,27	3260	0,41	7,50	0,00	0,03
M_2_03	2,25	3271	0,34	7,46	0,00	0,01
M_3_01	2,24	3047	0,53	6,83	0,03	0,18
M_3_02	2,24	3680	0,40	8,47	0,03	0,21
M_3_03	2,24	2974	0,40	6,83	0,06	0,42
FIBRE_01	2,21	2871	0,84	6,46	0,07	0,46
FIBRE_02	2,22	2992	0,40	6,76	0,07	0,50
FIBRE_03	2,21	2826	1,12	6,40	0,08	0,52
PP_27%_01	2,01	2403	0,41	5,40	0,08	0,43
PP_27%_02	2,03	2592	0,27	5,97	0,02	0,09
PP_27%_03	2,02	2595	0,26	5,87	0,03	0,18
PP_58%_01	1,79	1851	0,35	4,34	0,09	0,38
PP_58%_02	1,76	1924	0,35	4,58	0,07	0,34
PP_58%_03	1,79	1863	0,38	4,38	0,07	0,31
PP_77%_01	1,47	980	0,37	2,26	0,15	0,35
PP_77%_02	1,48	959	0,32	2,21	0,12	0,27
PP_77%_03	1,48	1033	0,37	2,39	0,12	0,30
GOMMA_30%_01	2,00	2449	0,41	5,60	0,03	0,15
GOMMA_30%_02	1,97	1945	0,81	4,40	0,04	0,18
GOMMA_30%_03	2,00	2333	0,39	5,31	0,05	0,24
GOMMA_59%_01	1,77	1420	0,58	3,19	0,11	0,35
GOMMA_59%_02	1,78	1292	0,34	2,95	0,10	0,31
GOMMA_59%_03	1,77	1799	0,37	4,11	0,06	0,24

Confrontando i diagrammi che seguono, riferiti ad  $A_F$ ,  $G_F$  e alla densità, si può notare che per i provini con inerti in polipropilene o in gomma, all'aumentare della percentuale di polimero presente nella malta, aumenti anche la duttilità del materiale che diventa al contempo più leggero. Analizzando in particolar modo l'energia di frattura, si può notare un andamento completamente diverso rispetto a quello del carico massimo e dell'area sottesa alla curva post-picco, in quanto i due parametri vengono considerati insieme e si vanno a premiare le malte con maggiore resistenza e maggiore duttilità. Tale parametro è molto elevato per i provini con le fibre in polipropilene che hanno un elevato carico a rottura, garantendo comunque un buon grado di duttilità. Per quanto riguarda invece le composizioni cementizie in cui sono stati sostituiti gli inerti, si ottengono risultati migliori con il polipropilene rispetto alla gomma e per percentuali di sostituzione prossime al 50 – 60%. Sulla base di tali considerazioni si procederà all'analisi eco-meccanica delle malte confezionate.

## La campagna sperimentale

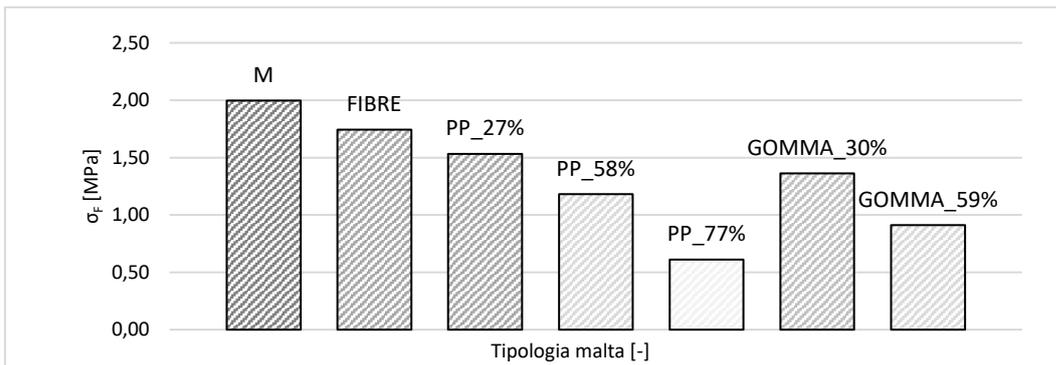


Figura 37. Valor medio della resistenza flessionale per tipologia di malta.

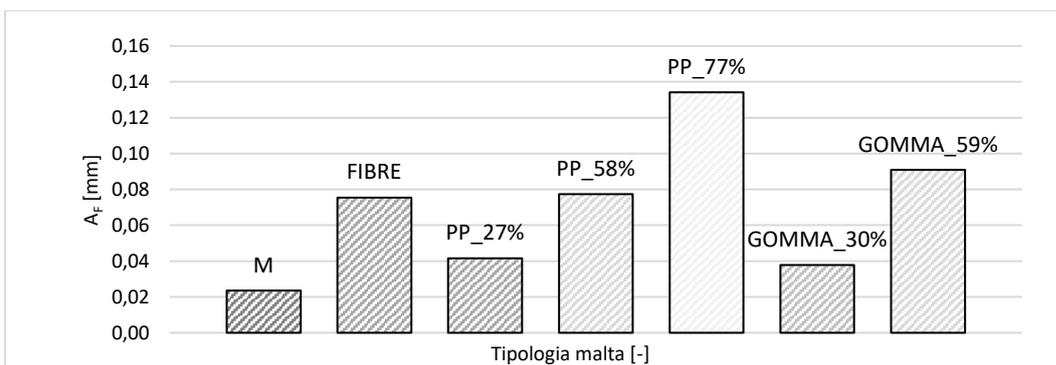


Figura 38. Valor medio dell'area sottesa alla curva per tipologia di malta.

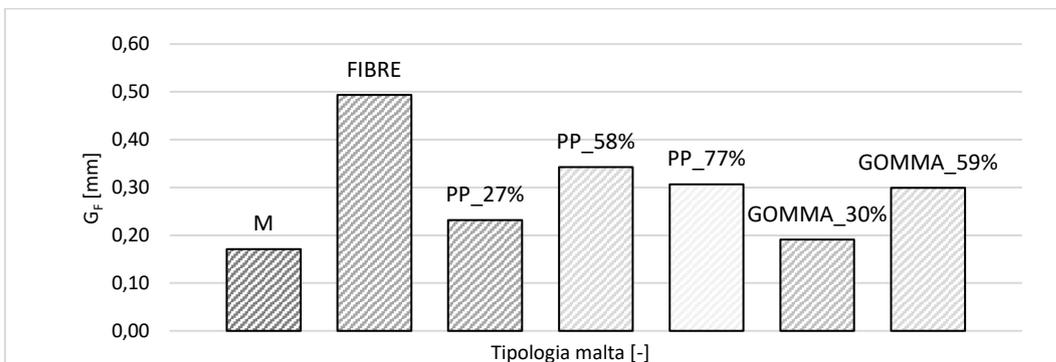


Figura 39. Valor medio del lavoro di frattura per tipologia di malta.

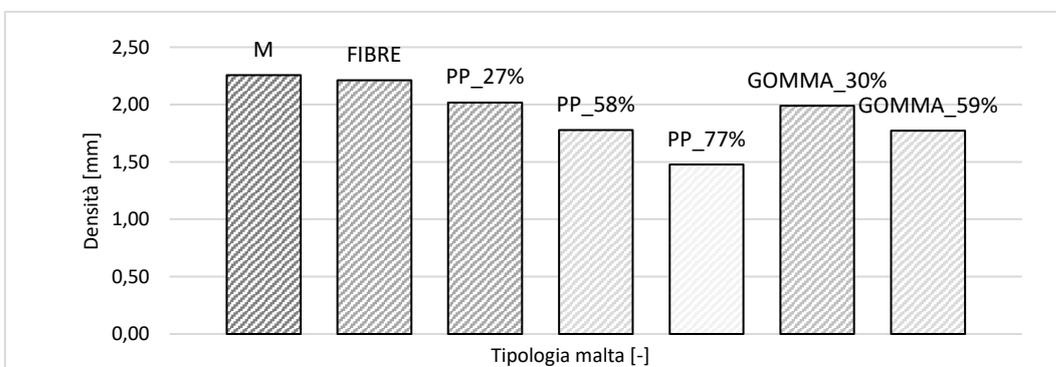


Figura 40. Valor medio della densità per tipologia di malta.

## La campagna sperimentale

Per quanto riguarda le prove a compressione, di seguito si riportano i grafici carico – spostamento ( $P - \delta$ ) per ciascuna malta.

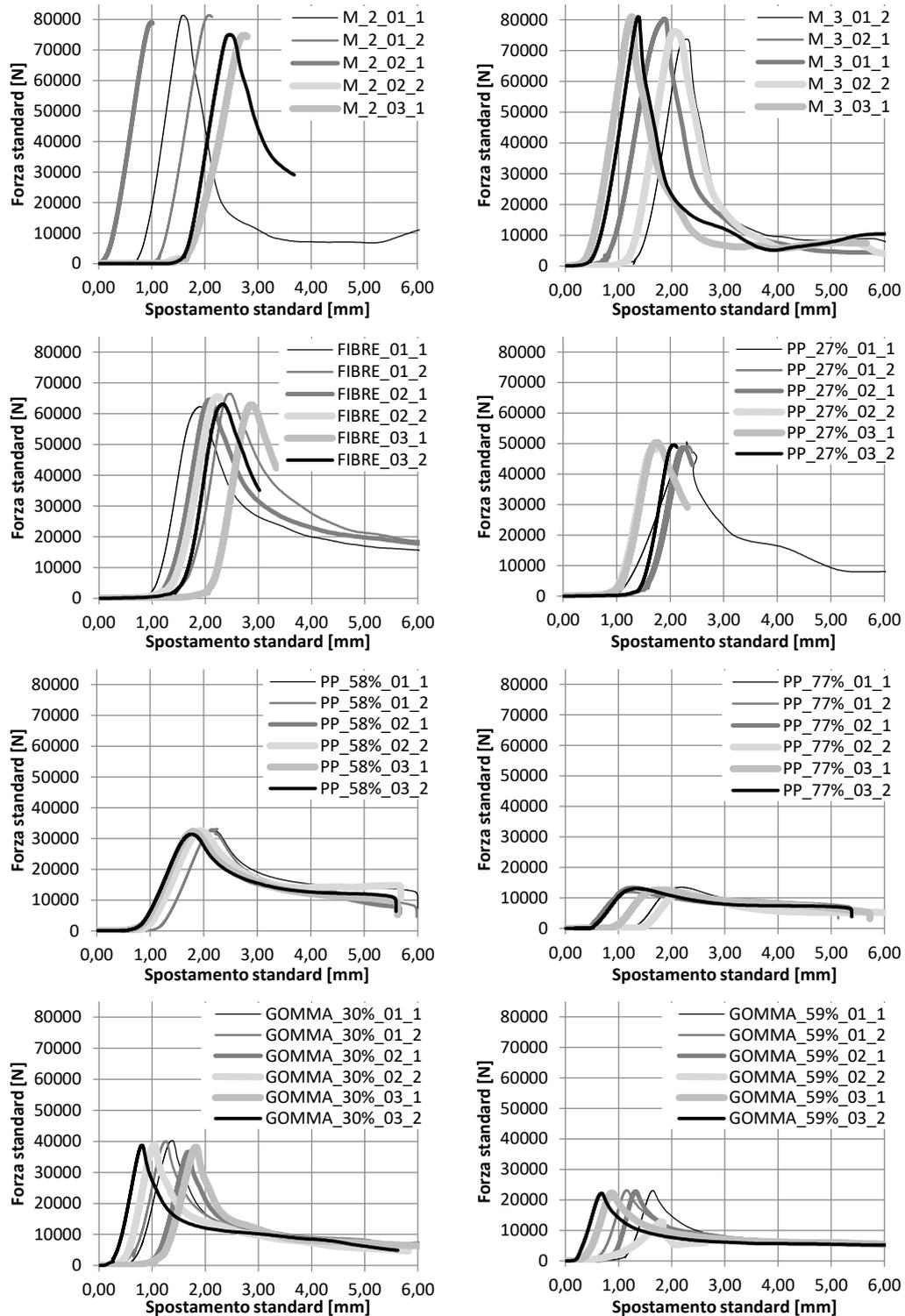


Figura 41. Diagrammi carico-spostamento a compressione ( $P-\delta$ ) per ogni tipologia di malta.

## La campagna sperimentale

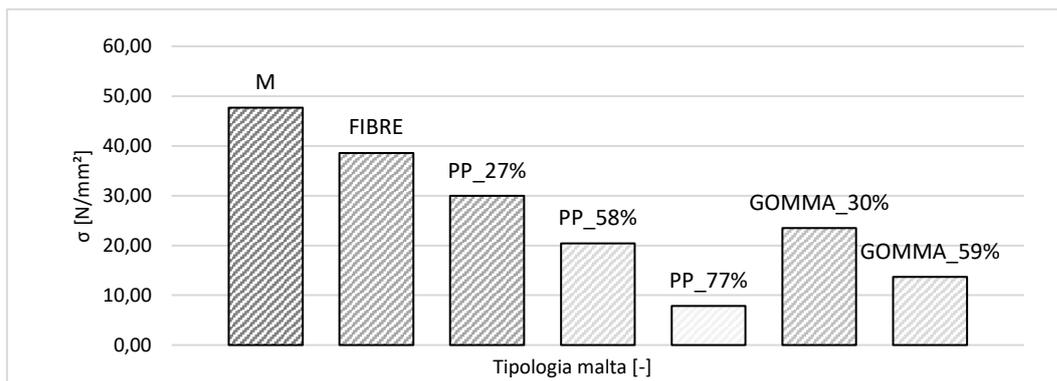


Figura 42. Valor medio della resistenza a compressione per tipologia di malta.

Si riportano inoltre le variazioni percentuali dei parametri meccanici fin qui considerati rispetto ai valori della malta tradizionale presi come riferimento. La sola analisi sulle caratteristiche meccaniche nel loro insieme non è però sufficiente, è necessario definire quale finalità (unità funzionale) deve avere la malta che si va a confezionare, ad esempio deve essere molto leggera, molto duttile o molto resistente, e l'impatto ambientale che si provoca impiegandola. A fronte di ciò, nel prossimo capitolo si opera appunto un'analisi eco-meccanica delle malte, considerando di volta in volta un parametro meccanico e la sostenibilità ambientale.

Tabella 19. Variazioni percentuali delle caratteristiche meccaniche delle diverse tipologie di malte rispetto alla malta tradizionale, presa come riferimento.

Tipologia malta	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$A_F$ [mm]	$G_F$ [N/mm]	$\sigma_F$ [MPa]	$\sigma$ [MPa]
M	2,26	0,02	0,17	2,00	47,69
FIBRE	-2%	+220%	+188%	-13%	-19%
PP_27%	-10%	+76%	+35%	-23%	-37%
PP_58%	-21%	+227%	+100%	-41%	-57%
PP_77%	-34%	+468%	+79%	-69%	-84%
GOMMA_30%	-12%	+60%	+11%	-32%	-51%
GOMMA_59%	-21%	+285%	+75%	-54%	-71%

## Capitolo 6. Analisi eco-meccanica

Nel presente capitolo si vanno a considerare gli aspetti legati alle proprietà meccaniche e quelli di impatto ambientale in modo combinato e non separati l'uno dall'altro. Prima di operare questo tipo di analisi, definita eco-meccanica, si vogliono dare alcuni cenni sulla normativa ambientale vigente e poi definire in via teorica il metodo di studio impiegato.

### **6.1. Prestazione ambientale: cenni normativi**

Come verrà spiegato in seguito, l'analisi eco-meccanica considera dei valori di riferimento in merito alle caratteristiche meccaniche e a quelle ambientali da impiegare per il confronto con le proprietà delle malte confezionate. Si vuole quindi comprendere se la normativa europea e in particolar modo quella nazionale diano dei valori minimi o massimi da rispettare per quanto riguarda le prestazioni ambientali dei materiali.

A livello europeo è nota la Direttiva 31/2010 riferita all'energia nel settore delle costruzioni, aspetto che non coinvolge direttamente il tema affrontato in quanto non si tratta nello specifico dei materiali ma dell'edificio nel suo insieme. Essa impone che dal 1° gennaio 2019 tutti i nuovi edifici pubblici dell'Unione Europea e dal 1° gennaio 2021 tutti quelli nuovi privati, debbano essere degli *edifici a energia quasi zero*: non devono richiedere apporti energetici per riscaldamento e raffrescamento e, nel caso in cui necessitino di contributi, questi devono provenire da fonti rinnovabili. Ciò comporta una radicale modifica nella progettazione, nel cantiere e nella gestione dell'edificio, con una particolare attenzione verso l'impiantistica e i materiali impiegati. La Direttiva 2008/98/CE tratta appunto il riutilizzo e il riciclaggio dei materiali, imponendo per il 2020 che il 70% dei materiali impiegati provenga dalla filiera del riciclo e che i Paesi membri dell'UE provvedano ad accompagnare la direttiva con specifici provvedimenti e target. Sono stati inoltre introdotti dei criteri riguardanti le gare per l'acquisto di beni e servizi da parte della pubblica amministrazione, denominati Green Public Procurement (GPP), in modo da incentivare il raggiungimento degli obiettivi ambientali e la valutazione del ciclo di vita di materiali e interventi. Altro aspetto importante trattato a livello europeo con il Regolamento UE 305/2011 riguarda l'etichettatura e la marchiatura dei prodotti naturali o provenienti da riciclo. Tra le etichette più comuni vi è *ECOLABEL*, marchio di qualità ecologica dell'Unione Europea che contraddistingue prodotti e servizi che garantiscono elevati livelli prestazionali con un ridotto impatto ambientale durante l'intero ciclo di vita. Essa è un'etichetta ecologica volontaria basata su un sistema di criteri selettivi, definito su base scientifica, che tiene conto degli impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita, della riutilizzabilità o riciclabilità, della quantità di imballaggi e del contenuto di materiale riciclato; è sottoposta a certificazione da parte di un organismo indipendente.

A livello nazionale, la direttiva del 2008 è stata recepita con il Decreto Legislativo n°205 del 3 dicembre 2010 con il quale si vanno a modificare le regole del D.Lgs. 152/2006 sul tema dei rifiuti. Tra le novità vi sono l'introduzione dei concetti di sottoprodotto, materia prima secondaria ed *end of waste* e l'emanazione di disposizioni in merito alla gestione dei rifiuti, alla responsabilità del produttore e alla tracciabilità. Resta comunque carente di una parte rivolta alla spinta all'utilizzo di materiali e aggregati riciclati. Attraverso la Legge 221/2015 e il nuovo Codice contratti, D.Lgs. 50/2016 e il suo correttivo D.Lgs. 56/2017, sono stati disposti degli obblighi per le stazioni appaltanti in materia di sostenibilità energetica e ambientale, introducendo i criteri ambientali minimi CAM. Le stazioni appaltanti hanno l'obbligo di inserire nei bandi di gara le specifiche tecniche e le clausole contrattuali contenute nei CAM. I criteri ambientali minimi vengono emessi come decreto dal Ministero dell'Ambiente, del Territorio e del Mare e sono suddivisi per categorie merceologiche, le quali comprendono, ad esempio, arredi, edilizia, gestione dei rifiuti, elettronica, prodotti tessili, calzature e cancelleria. I documenti contenenti i CAM sono normalmente costituiti da due parti, nella prima vengono fornite le indicazioni generali alla stazione appaltante al fine di indirizzare l'ente verso una razionalizzazione dei consumi e degli acquisti. Nella seconda parte si presentano i criteri ambientali e sociali mediante considerazioni di tipo ambientale fatte per ciascuna fase della gara in modo da qualificare in senso ambientale le forniture e gli affidamenti durante tutto il ciclo di vita del prodotto o servizio. I criteri ambientali vengono definiti mediante un'analisi di mercato e attingendo a quelli già proposti in sede europea e alle normative che impongono determinati standard ambientali come la Direttiva ERP (Energy Related Products). Oltre a definire le caratteristiche ambientali, si riportano anche le informazioni e la documentazione da allegare in sede di gara, i mezzi di prova richiesti e tutte le modalità da attuare per la verifica del soddisfacimento dei criteri. Attraverso i criteri ambientali minimi si vogliono superare le discriminazioni e le barriere presenti nei capitolati verso i prodotti riciclati legate alla paura delle responsabilità amministrative e penali derivanti da un uso improprio dei materiali.

Per quanto riguarda appunto l'edilizia, i criteri ambientali minimi sono contenuti nel Decreto 24 dicembre 2015<sup>23</sup>: *L'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici e per la gestione dei cantieri della pubblica amministrazione*. In tale documento, al paragrafo 2.4 vengono definite le specifiche tecniche dei componenti edilizi. Viene definito il grado di disassemblabilità dell'edificio, imponendo che almeno il 50% in peso degli elementi che costituiscono il fabbricato possano essere sottoposti a demolizione selettiva al fine del riutilizzo e del riciclo a fine vita dell'opera e di tale percentuale, almeno il 15% deve essere costituito da materiali non strutturali. Sono anche riportati i criteri specifici dei componenti edilizi, come calcestruzzi, laterizi e prodotti in legno, dei quali vengono specificate anche le quantità minime da riciclare. Si riporta quanto detto per i calcestruzzi: *<<I calcestruzzi usati per il progetto devono essere prodotti con un contenuto minimo di materiale riciclato*

---

<sup>23</sup> Aggiornamento del 28 gennaio 2017.

*(secco) di almeno il 5% sul peso del prodotto (inteso come somma delle singole componenti). Al fine del calcolo della massa di materiale riciclato va considerata la quantità che rimane effettivamente nel prodotto finale>> [44]. Per i laterizi è previsto un contenuto minimo di materia riciclata pari ad almeno il 10% in peso per le murature e i solai, mentre per coperture, pavimenti e muratura faccia vista è previsto il 5% in peso. Per i materiali isolanti, il contenuto minimo di materiale riciclato in peso è definito in base alla tipologia e forma del prodotto. Per i rivestimenti, i pavimenti interni ed esterni, le pitture e le vernici si rimanda ai riferimenti ecologici e prestazionali del marchio europeo di qualità ecologica *ECOLABEL*. È previsto inoltre l'obbligo di un piano di gestione dei rifiuti prodotti in fase di progetto, in cui almeno il 70% dei materiali sia avviato a recupero.*

I criteri fin qui riportati vengono definiti di base o minimi; se la pubblica amministrazione include nel bando di gara tali caratteristiche, l'appalto può essere ritenuto sostenibile dal punto di vista ambientale. Sono inoltre presenti dei criteri premianti che devono essere utilizzati nel momento in cui si aggiudica la gara con il criterio dell'offerta economicamente più vantaggiosa, in modo da aiutare la scelta del vincitore.

Secondo quanto riportato dal rapporto di Legambiente, in alcune aree del Paese sono stati introdotti dei criteri locali (obblighi, linee guida o incentivi) al fine di promuovere l'utilizzo di materiali riciclati nelle costruzioni. La Provincia Autonoma di Trento ha approvato un capitolato tecnico per l'utilizzo di riciclati nei lavori di manutenzione pubblica e ha introdotto un piano di smaltimento dei rifiuti inerti in modo da dare priorità al riuso e al riciclo. La Regione Toscana, invece, nel 2014 ha emanato una legge regionale la quale prevede incentivi economici mediante la riduzione degli oneri di urbanizzazione fino al 70% in base ai livelli di risparmio energetico, qualità eco-compatibile del materiale e delle tecnologie impiegate. Anche la Regione Veneto promuove l'utilizzo di materiali ecologicamente compatibili, sulla base di requisiti minimi di valutazione riguardanti la riciclabilità globale, la natura delle materie prime rinnovabili e il consumo energetico richiesto per l'estrazione, produzione, distribuzione e smaltimento. È stato obbligato o promosso l'impiego di materiali locali, naturali o riciclabili, attraverso i regolamenti edilizi comunali in almeno 293 Comuni. Si cita il Comune di Schio (VI), in cui è previsto che per gli edifici di nuova costruzione vengano utilizzati rivestimenti, isolanti e finiture tali da garantire, durante la demolizione, che almeno l'80% dell'involucro possa essere riciclato. A Bologna invece si incentiva con ampliamenti di cubatura il recupero e riutilizzo dei materiali inerti provenienti da opere di costruzione e demolizione. *<<Con un rapporto almeno del 15% tra il volume di inerti provenienti da impianti di recupero (o di riutilizzo in sito) ed il volume totale degli inerti, si ottiene un ampliamento pari al 10% del volume utile; con un rapporto che supera il 35% si può ottenere un ampliamento del 20% del volume totale>> [46].*

Il principale problema dei CAM è che riguardano unicamente l'edilizia pubblica, è necessario definire un piano d'azione e di monitoraggio di tutto il settore delle costruzioni, cercando di fissare degli obiettivi sempre più ambiziosi per i diversi tipi di materiali. Tra gli obiettivi futuri dei CAM, oltre a estenderli all'edilizia privata, vi è l'introduzione (il

Ministero sta lavorando per la redazione del decreto) di criteri per quanto riguarda le infrastrutture, in particolar modo quelle stradali ma anche le ferroviarie. Si deve far crescere una moderna filiera delle costruzioni nella quale siano le imprese a gestire il processo di demolizione selettiva cercando di tendere al riciclo e non al conferimento in discarica. In Italia non si conosce con certezza il numero dei rifiuti prodotti dalle attività di costruzione e demolizione, è quindi necessario che venga incrementato il controllo e il monitoraggio dei rifiuti, andando anche a debellare i fenomeni di illegalità legati alle discariche abusive. L'Italia è fortemente in ritardo rispetto agli altri membri dell'UE per quanto riguarda l'introduzione di politiche di riciclo che coinvolgano in particolar modo gli inerti da demolizioni. Infatti, ogni anno ne vengono prodotti quasi 40 milioni di tonnellate che terminano la propria vita in discarica in quanto la capacità di recupero media è del 10%. In Olanda invece, il 90% dei materiali è recuperato, in Belgio l'87% e in Germania l'86,3%. È necessario stravolgere completamente la filosofia costruttiva del dopo guerra in cui gli edifici nascevano unicamente con l'idea di avere un involucro in cui contenere persone o cose, senza curarsi della sostenibilità e della durabilità delle opere. Il riciclo può quindi aprire il settore delle costruzioni a un nuovo scenario sostenibile in cui si metta al centro il progetto, il rapporto con il territorio e la qualità e formazione del lavoro [44 – 46].

### 6.2. Eco-mechanical index

Con l'accrescersi di una sensibilità da parte della popolazione verso la sostenibilità delle costruzioni durante tutto il ciclo di vita, negli ultimi anni sono state ampiamente studiate le performance ambientali delle malte cementizie e dei calcestruzzi, non valutandole però unitamente alle prestazioni meccaniche. Attuando le strategie di riduzione dell'impatto ambientale proposte nel terzo capitolo del presente testo, si rende necessaria un'analisi in cui si combinano gli aspetti ambientali con quelli meccanici, questo perché l'impiego di un materiale da riciclo o con basso impatto ambientale può provocare una riduzione delle prestazioni meccaniche o comunque avere risvolti tali da compromettere l'impiego del conglomerato nella costruzione; è opportuno valutare se è possibile raggiungere un compromesso tra i due aspetti. Nasce quindi la necessità di definire un indice che connetta le proprietà meccaniche a quelle ecologiche in quanto, normalmente, il miglioramento di una provoca il peggioramento dell'altra. Tale indice eco-meccanico  $EMI^{24}$  è dato dal rapporto degli indici meccanico  $MI$  ed ecologico  $EI$  [48 – 53]:

$$EMI = \frac{MI}{EI} \quad [6.1]$$

La sua valutazione può essere condotta esaminando il valore dell'indice ottenuto oppure definendo dei benchmarks o valori di riferimento relativi agli indici ecologico e meccanico, i quali possono essere prescrizioni normative, specifiche richieste di capitolato oppure le caratteristiche di un conglomerato cementizio tradizionale. La valutazione tramite i benchmarks prevede l'utilizzo di un diagramma adimensionale avente sugli assi l'indice meccanico normalizzato con il valore minimo di riferimento  $MI_{inf}$  e l'inverso dell'indice ecologico normalizzato con il valore massimo di riferimento  $EI_{sup}$ .

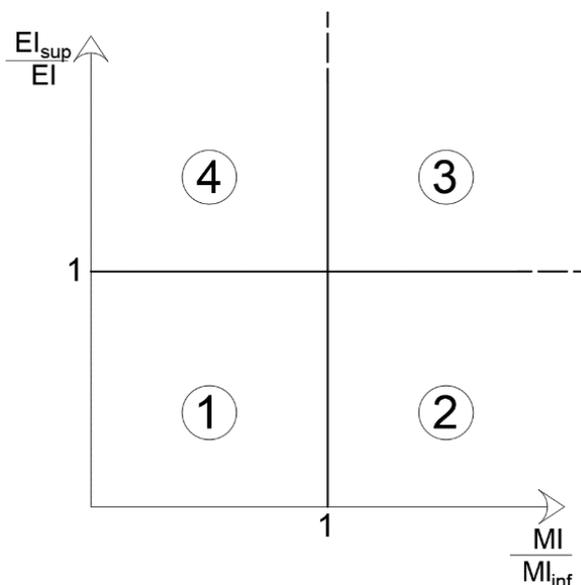


Figura 43. Diagramma dell'indice EMI per l'analisi eco-meccanica.

<sup>24</sup> L'analisi utilizzata, definita eco-meccanica, che si basa sull'indice EMI è stata proposta dai Professori Alessandro P. Fantilli e Bernardino Chiaia.

In tale diagramma vengono identificate quattro regioni delimitate dai due asintoti, verticale e orizzontale, corrispondenti ai benchmarks meccanico ed ecologico:

- Zona 1. Caratteristiche meccaniche ed ecologiche scadenti;
- Zona 2. Caratteristiche meccaniche elevate e proprietà ecologiche scadenti;
- Zona 3. Proprietà meccaniche ed ecologiche più elevate del riferimento;
- Zona 4. Caratteristiche ecologiche elevate ma proprietà meccaniche scadenti.

Durante la scelta del conglomerato migliore dal punto di vista meccanico ed ecologico, si prende quello che ricade nel terzo quadrante; se all'interno di esso sono presenti diverse malte o calcestruzzi, si sceglie quello il cui punto ha coordinate più lontane dall'intersezione degli asintoti, cioè dal punto [1;1]. Si considerano quindi accettabili solo quei conglomerati ricadenti nella Zona 3, essendo gli unici ad avere entrambi gli indici migliori di quelli di riferimento. Una volta esaminati gli aspetti meccanici ed ecologici sarà necessario fare una valutazione economica al fine di terminare la soluzione ottimale [48 – 53].

### **6.2.1. Indice meccanico**

Per la determinazione dell'indice meccanico MI è necessario definire l'unità funzionale a cui si fa riferimento, cioè il fine per cui si conduce lo studio. Si considera solitamente la meccanica della frattura e quindi la resistenza del materiale e la sua duttilità. Infatti, durante l'utilizzo di componenti del conglomerato cementizio alternativi, non è sufficiente garantire la resistenza del materiale tradizionale, è necessario avere anche un sufficiente grado di duttilità. Tali aspetti non sono però sempre adatti; per una malta da intonaco ad esempio può risultare più importante il peso per unità di volume o le caratteristiche termiche e di diffusione del vapore. L'indice MI viene quindi definito come prodotto di due parametri meccanici, uno riferito al materiale  $mp_m$  e uno riferito alla struttura  $mp_s$ , entrambi allo stato limite ultimo e condizioni di esercizio:

$$MI = mp_m \cdot mp_s \quad [6.2]$$

Nel caso in esame, lo studio è condotto sul materiale senza andare a valutarne la sua applicabilità a una struttura e quindi il secondo parametro viene considerato unitario. In mancanza di specifici limiti, si è deciso di valutare le caratteristiche meccaniche prendendo come riferimento una malta tradizionale in modo da comparare gli indici con i valori tipici delle costruzioni ordinarie [48 – 53].

### **6.2.2. Indice ecologico**

Per quanto riguarda l'indice ecologico EI, si deve considerare, per la produzione di un metro cubo di conglomerato cementizio, l'anidride carbonica emessa per la produzione del materiale, chiamata *carbon footprint*, l'energia utilizzata durante l'intero ciclo di vita del prodotto (*embodied energy*) e la quantità di acqua:

$$EI = (\alpha \cdot wc_\alpha) \cdot (\beta \cdot wc_\beta) \cdot (\gamma \cdot wc_\gamma) \quad [6.3]$$

In cui i parametri  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  indicano rispettivamente la quantità di  $\text{CO}_2$ , l'energia utilizzata e il volume d'acqua, mentre  $w_{c_\alpha}$ ,  $w_{c_\beta}$  e  $w_{c_\gamma}$  sono coefficienti che pesano i precedenti parametri in funzione delle condizioni locali, quali la disponibilità d'acqua in sito, il trasporto e la reperibilità del materiale. Per quanto riguarda le emissioni di anidride carbonica, più è lontano il sito di utilizzo del conglomerato rispetto a quello di produzione, maggiore è l'impatto ambientale e quindi il coefficiente  $w_{c_\alpha}$ . L'indice ecologico potrebbe essere ulteriormente arricchito di altri parametri ambientali, come l'impatto sulla biodiversità, l'emissione di sostanze tossiche o lo sfruttamento delle risorse, ritenuti però secondari rispetto a quelli considerati. Si vuole sottolineare che la valutazione dell'indice ecologico è fortemente influenzata dalle condizioni locali, non solo per quanto riguarda i parametri  $w_c$  ma anche le per stesse quantità di  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ . Si considerino ad esempio le emissioni di anidride carbonica per la produzione degli inerti, nel nord Italia, grazie alla conformazione geomorfologica della catena alpina, non vi sono problemi nel reperire le rocce atte alla produzione degli aggregati e quindi i costi ambientali ed economici risultano essere relativamente bassi. In altre zone del globo terrestre, la situazione potrebbe essere molto diversa e richiedere il trasporto di materiale per centinaia di chilometri comportando quindi un maggiore impatto ambientale ed economico. Un ragionamento analogo può essere fatto anche per un materiale da riciclo, come la plastica, gli Stati sottosviluppati o in via di sviluppo spesso non dispongono di impianti di trattamento dei rifiuti al fine del riciclo e quindi l'utilizzo di una materia prima secondaria in quei Paesi comporterebbe il trasporto della stessa da aree geografiche in cui è possibile produrla con un forte impatto ambientale.

Per quanto riguarda la presente ricerca, l'indice  $EI$  viene semplificato ponendo unitari i coefficienti relativi alle condizioni locali, in quanto non si valuta l'impiego delle malte in una costruzione specifica. Inoltre, poiché si focalizza l'analisi sulle emissioni di anidride carbonica, i parametri relativi al consumo di acqua e all'energia grigia vengono esclusi ponendoli pari a uno. L'indice risulta quindi essere [48 – 53]:

$$EI = \alpha \quad [6.4]$$

### 6.3. Analisi eco-meccanica delle diverse tipologie di malte

Di seguito si riportano le assunzioni adottate, i valori ottenuti e le considerazioni fatte in merito agli indici meccanico, ecologico ed eco-meccanico.

#### 6.3.1. Valutazione dell'indice ecologico EI

Il primo passo per la determinazione dell'indice ecologico è valutare il quantitativo dei diversi componenti delle malte prodotte all'interno di un metro cubo di conglomerato cementizio. Le quantità riportate nella tabella 16 sono utilizzate per realizzare tre provini, è quindi necessario operare una proporzione basandosi su tre volte il volume di un singolo provino che risulta essere:

$$v_{provino} = 0,04 \cdot 0,04 \cdot 0,16 = 0,000256 \text{ m}^3 \quad [6.5]$$

Di seguito si riportano i valori ottenuti per ciascuna malta.

Tabella 20. Quantitativo di materiale presente a metro cubo per ciascuna tipologia di malta.

ID PROVINO	Cemento [kg/m <sup>3</sup> ]	Acqua [kg/m <sup>3</sup> ]	Sabbia [kg/m <sup>3</sup> ]	PP [kg/m <sup>3</sup> ]	Gomma [kg/m <sup>3</sup> ]	Fibre PP [kg/m <sup>3</sup> ]
M	586	293	1758	-	-	-
FIBRE	586	293	1758	-	-	13
PP_27%	586	293	1280	116	-	-
PP_58%	586	293	736	153	-	-
PP_77%	586	293	396	314	-	-
GOMMA_30%	586	293	1228	-	145	-
GOMMA_59%	586	293	721	-	259	-

Dopodiché è necessario stimare le emissioni di anidride carbonica legate alla produzione di ogni materiale che compone le malte confezionate. Nel presente elaborato sono stati utilizzati i valori proposti dal database svizzero *Ecoinvent* [56]. Per quanto riguarda i valori utilizzati per i granuli di polipropilene ottenuti mediante riciclaggio, non sono stati reperiti dal database appena citato e quindi si è deciso di utilizzare quelli riferiti alla gomma ottenuta dagli pneumatici a fine vita in quanto le modalità di trattamento e il prodotto finale risultano essere simili. Tale approssimazione si ritiene accettabile poiché le emissioni di anidride carbonica prodotte risultano essere stimate per ogni materiale; per una maggiore precisione sarebbe necessario condurre lo studio su specifici impianti produttivi. Per la produzione del cemento, ad esempio, le emissioni di CO<sub>2</sub> variano a seconda della tipologia di forno rotante utilizzato e della presenza di recuperatore di calore.

## Analisi eco-meccanica

Tabella 21. Carbon footprint dei diversi componenti le malte confezionate.

Materiale	Carbon footprint [kg CO <sub>2</sub> /kg]
Cemento	0,83
Sabbia	0,30
Acqua	0,00
Fibre di polipropilene	2,70
Granuli polipropilene	0,20
Granuli gomma da PFU	0,20

Moltiplicando le emissioni di CO<sub>2</sub> per ogni singolo componente della malta e sommando i valori ottenuti si determina il carbon footprint per ciascuna malta che in questo caso equivale all'indice ecologico.

Tabella 22. Valutazione di EI e del rapporto  $EI_{sup}/EI$  per ciascuna malta.

ID PROVINO	$\alpha$ Carbon footprint [kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ]	EI [kg/m <sup>3</sup> ]	$EI_{sup}/EI$
M	1012	1012	1,00
FIBRE	1047	1047	0,97
PP_27%	892	892	1,13
PP_58%	736	736	1,38
PP_77%	666	666	1,52
GOMMA_30%	882	882	1,15
GOMMA_59%	752	752	1,34

Come già accennato, il valore di riferimento assunto per l'analisi è quello relativo alla malta tradizionale, identificata con la sigla M. È stato quindi determinato il rapporto tra l'indice EI di riferimento e quello di ciascuna malta in modo da poter creare il diagramma per l'analisi eco-meccanica.

### 6.3.2. Valutazione dell'indice meccanico MI

Come già accennato, per la determinazione dell'indice meccanico è necessario definire l'unità funzionale. Nella presente analisi sono stati considerati i parametri di resistenza a compressione e a flessione, i parametri di duttilità (area sottesa al ramo post-picco e lavoro di frattura) e il peso per unità di volume. Secondo quanto già riportato nella *tabella 19* presente nel capitolo precedente.

Nella tabella che segue sono stati riportati i valori di MI e di  $MI/MI_{inf}$  per ciascuna tipologia di malta confezionata. Per quanto riguarda la densità, non è importante che la malta considerata sia più pesante di quella presa come riferimento, per questo il rapporto tra gli indici meccanici è stato variato in  $MI_{inf}/MI$ , in modo da avere valori maggior di uno nel caso in cui il peso per unità di volume sia minore del benchmark.

Tabella 23. Valutazione di MI e del rapporto  $MI/MI_{inf}$  per ciascuna malta.

Tipologia malta	M	FIBRE	PP_27%	PP_58%	PP_77%	GOMMA_30%	GOMMA_59%
$MI = \rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,26	2,21	2,02	1,78	1,48	1,99	1,77
$MI_{inf}/MI$	1,00	1,02	1,12	1,27	1,53	1,13	1,27
$MI = A_F$ [mm]	0,02	0,08	0,04	0,08	0,13	0,04	0,09
$MI/MI_{inf}$	1,00	3,20	1,76	3,27	5,68	1,60	3,85
$MI = G_F$ [N/mm]	0,17	0,49	0,23	0,34	0,31	0,19	0,30
$MI/MI_{inf}$	1,00	2,88	1,35	2,00	1,79	1,11	1,75
$MI = \sigma_F$ [MPa]	2,00	1,74	1,53	1,18	0,61	1,36	0,91
$MI/MI_{inf}$	1,00	0,87	0,77	0,59	0,31	0,68	0,46
$MI = \sigma$ [MPa]	47,69	38,57	29,95	20,41	7,83	23,53	13,71
$MI/MI_{inf}$	1,00	0,81	0,63	0,43	0,16	0,49	0,29

### 6.3.3. Determinazione dell'indice eco-meccanico EMI e considerazioni finali

Per la scelta della malta con maggiore indice eco-meccanico EMI, si è deciso di ricorrere al grafico adimensionale proposto da Fantilli e Chiaia.

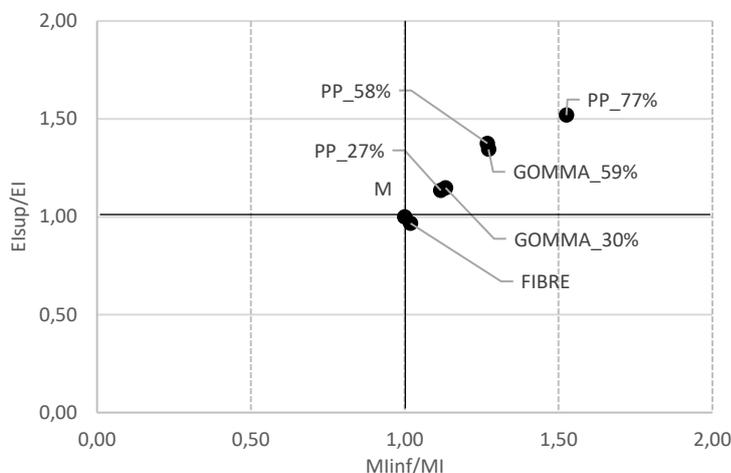


Figura 44. Grafico adimensionale dell'analisi eco-meccanica per la densità delle malte.

Analizzando il precedente grafico, si può notare che tutte le malte risultano essere più leggere rispetto a quella tradizionale di riferimento; la malta con migliori caratteristiche ecologiche e meccaniche è quella il cui contenuto di polipropilene è di circa il 77%. Secondo quanto riportato nella norma UNI EN 206:1 (2006), i calcestruzzi leggeri hanno peso per unità di volume compreso tra 800 e 2000 kg/m<sup>3</sup> [59]. Per ottenere valori compresi in tale intervallo si impiegano normalmente particelle cellulari, prodotte trattando termicamente alcune materie prime, come argilla, ceneri volanti o scisto. Si dimostra con la presente analisi la possibilità di utilizzare aggregati riciclati, a basso impatto ambientale, che consentono di raggiungere densità tali da definire il conglomerato leggero. Per quanto riguarda la differenza tra gomma e polipropilene, anche analizzando i dati riportati nella figura 39, non si rilevano differenze sostanziali sulla diminuzione della densità.

I calcestruzzi leggeri vengono utilizzati principalmente per ridurre la massa dell'edificio e facilitare il trasporto e il posizionamento di elementi prefabbricati. La riduzione della massa comporta un decremento dei carichi portati dalla struttura e di conseguenza delle azioni inerziali legate al sisma.

La norma UNI EN 13813 prescrive le caratteristiche meccaniche minime per sottofondi e massetti, in particolare la resistenza a compressione deve essere superiore a 5 MPa e quella a flessione a 1 MPa [60]. Le malte qui presentate rispettano tali limiti e quindi si può pensare di impiegarle per la realizzazione di intonaci, sottofondi e massetti per pavimentazioni. Si considerino come esempio due diverse stratigrafie per un edificio di civile abitazione. Gli strati evidenziati nella figura 44, riguardano gli intonaci presenti sulla superficie interna (1,5 cm) e su quella esterna (2,0 cm). Se si utilizzasse una malta tradizionale, la massa a m<sup>2</sup> di intonaco risulterebbe essere pari a circa 79 kg/m<sup>2</sup>;

impiegando invece la malta con il 77% di polipropilene si porta il valore a circa  $52 \text{ kg/m}^2$ , con un risparmio quindi di quasi  $30 \text{ kg}$  a metro quadrato di superficie.

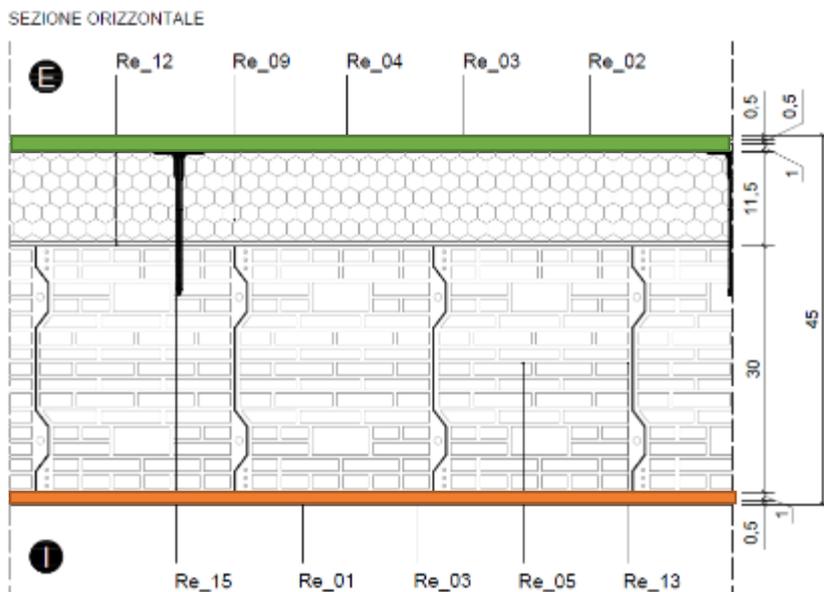


Figura 45. Stratigrafia involucro verticale.

Nel secondo esempio si considera invece la partizione orizzontale della figura 45. In tale stratigrafia sono presenti 12,3 cm di sottofondo e 4,5 cm di massetto al di sopra dello strato di riscaldamento radiante a pavimento. Sostituendo il sottofondo<sup>25</sup> con la malta già proposta per l'intonaco, si passa da  $277 \text{ kg/m}^2$  a  $182 \text{ kg/m}^2$ ; se invece si considerano entrambi gli strati si passa da  $379 \text{ kg/m}^2$  a  $248 \text{ kg/m}^2$ , con una riduzione del carico portato rispettivamente di 95 e  $131 \text{ kg/m}^2$ .

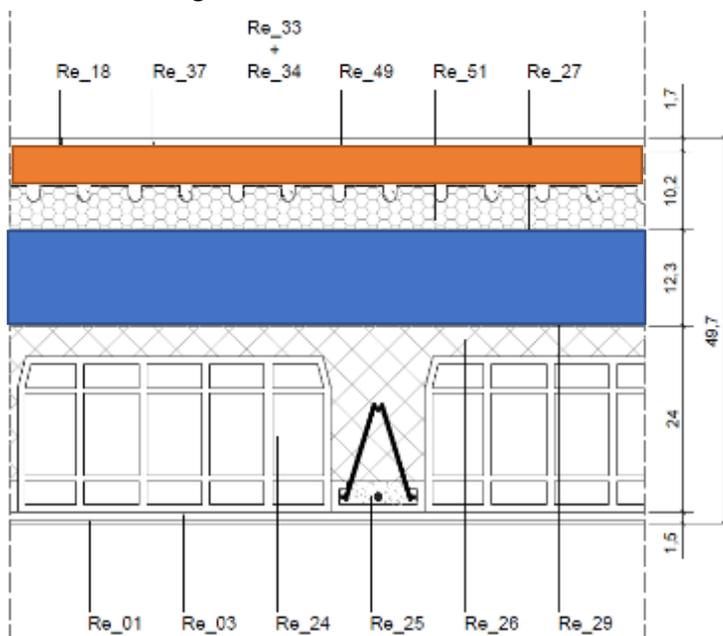


Figura 46. Stratigrafia partizione orizzontale.

<sup>25</sup> Per il sottofondo si utilizza normalmente conglomerato cementizio alleggerito.

Analizzando invece l'area sottesa al ramo post-picco della curva sforzo-spostamento, la malta con indice EMI maggiore risulta essere anche in questo caso quella con il 77% di polipropilene.

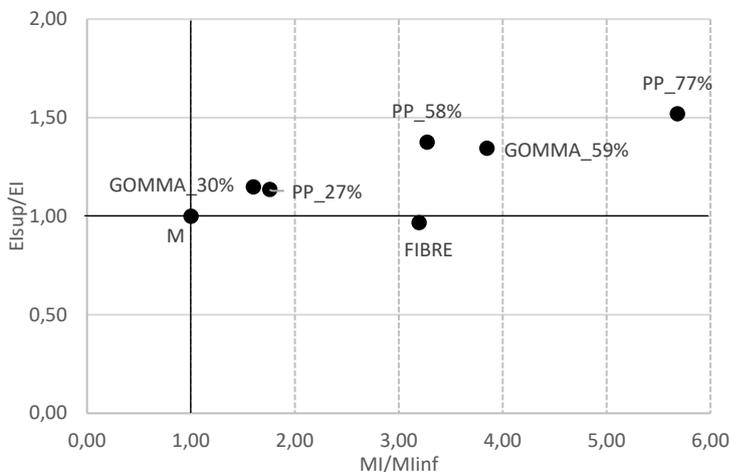


Figura 47. Grafico adimensionale dell'analisi eco-meccanica per  $A_F$  delle malte.

Considerando invece il lavoro di frattura, si può notare che i provini con le fibre risultano avere un valore di indice meccanico molto elevato poiché l'area sottesa al ramo post-picco è ampia e la resistenza a flessione è elevata. Tale tipologia di malta non soddisfa però il minimo indice ecologico. I conglomerati cementizi con migliori caratteristiche eco-meccaniche risultano essere quelli con elevate percentuali di polipropilene (58% e 77%). Confrontando le figure 46 e 47, si nota che nella prima i provini GOMMA\_59% possiedono valori di MI maggiori dei provini PP\_58%, nonostante la percentuale di materiale sostituito sia simile. Questo dimostra, rispetto al caso della densità, che la tipologia di polimero utilizzato influenza le caratteristiche della malta, infatti la gomma fa sì che  $A_F$  sia maggiore, ma riduce maggiormente la resistenza flessionale rispetto al polipropilene.

Sono stati studiati  $A_F$  e  $G_F$  in quanto importanti in campo sismico, poiché rappresentano l'energia che il telaio iperstatico di una struttura è in grado di dissipare plasticamente.

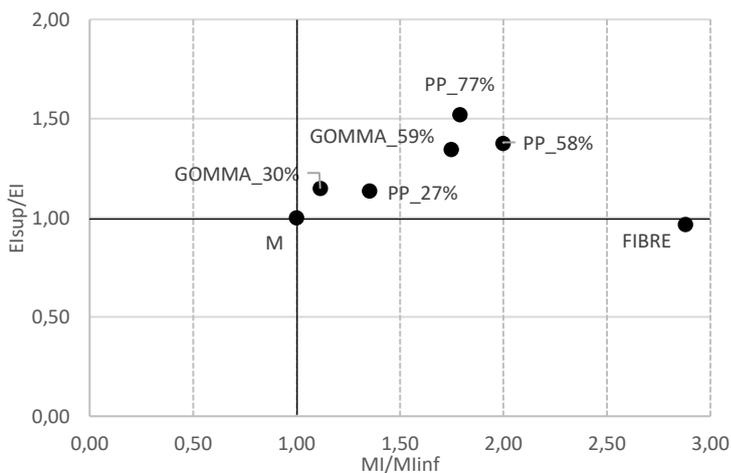


Figura 48. Grafico adimensionale dell'analisi eco-meccanica per il lavoro di frattura  $G_F$  delle malte.

## Analisi eco-meccanica

Considerando invece come unità funzionale la resistenza flessionale, si può notare che nessuna malta prodotta ricade all'interno del terzo quadrante in quanto tutte subiscono una riduzione della resistenza.

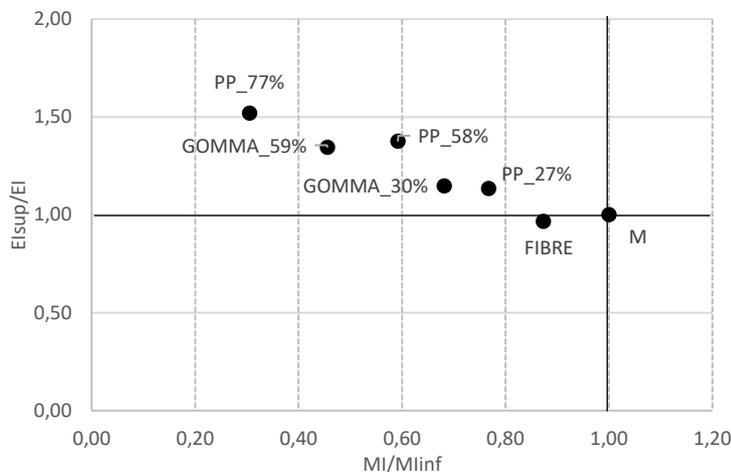


Figura 49. Grafico adimensionale dell'analisi eco-meccanica per la resistenza flessionale delle malte.

L'andamento è simile, con decrementi maggiori, per quanto riguarda la resistenza a compressione.

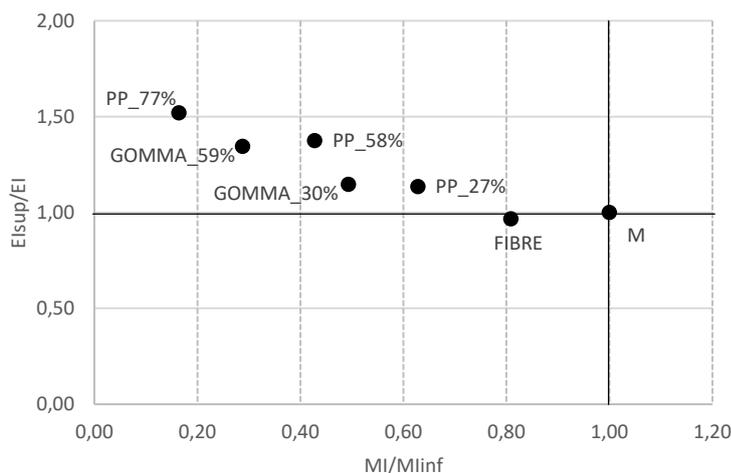


Figura 50. Grafico adimensionale dell'analisi eco-meccanica per la resistenza a compressione delle malte.

La sostituzione degli inerti naturali con i materiali polimerici comporta una riduzione della resistenza della malta, funzione della percentuale di aggregato sostituito. Confrontando il polipropilene con la gomma, si può inoltre notare, che il decremento di resistenza è maggiore nel caso della gomma, legato probabilmente alle caratteristiche meccaniche intrinseche del polimero.

A conclusione dell'analisi condotta, sono stati cercati studi o pubblicazioni in merito all'impiego dei due polimeri all'interno della malte o dei calcestruzzi. Per quanto riguarda il polipropilene non è stato reperito materiale in merito; si ritiene che tale assenza di interesse per l'utilizzo di detto polimero nei conglomerati cementizi sia legato alla nobiltà del prodotto riciclato, che può essere utilizzato per la produzione di nuovi prodotti commercialmente validi.

La gomma proveniente dagli pneumatici a fine vita è invece tema di molti studi da diversi anni. Secondo le ricerche condotte da diversi autori [54 - 55], sostituendo una parte di aggregati del calcestruzzo con la gomma, la resistenza meccanica a compressione e la densità diminuiscono con l'aumentare della percentuale di prodotto sostituito, come è stato appurato nella presente analisi. Si è inoltre riscontrato che la diminuzione di resistenza sia minore nel caso in cui la gomma inserita sia fine oppure nel caso in cui i granuli del polimero siano preventivamente trattati, ad esempio con una soluzione di NaOH, per aumentare l'aderenza tra i grani e la pasta di cemento. Per quanto riguarda invece la resistenza a trazione, si rileva in generale una diminuzione del valore con la presenza della gomma, anche se i dati presenti in letteratura mostrano che il fenomeno dipenda fortemente dalle caratteristiche della gomma impiegata in quanto in taluni casi la resistenza aumenta e in altri diminuisce. La durezza e quindi il potere di smorzamento del calcestruzzo con gomma riciclata è maggiore di uno tradizionale, così come la sua duttilità a causa della natura fisica del polimero. Considerando invece le proprietà termiche, la sostituzione di aggregati fini con gomma riduce la conducibilità termica del calcestruzzo. È stato valutato che fino al 30% di materiale sostituito si riduce la conducibilità termica oltre il 50%, fino a raggiungere un valore minimo di 0,241 W/mK. Si rileva anche un buon comportamento per la riduzione del rumore per le alte frequenze, con un fattore riduttivo maggiore del 36% rispetto a quello del calcestruzzo tradizionale. La resistenza all'abrasione decresce all'aumentare della percentuale di gomma contenuta; tale diminuzione è trascurabile in quanto la sostituzione in massa è minore del 5%. La capacità di assorbimento del conglomerato se immerso in acqua è minore se è presente la gomma come aggregato grossolano, mentre aumenta per la gomma fine in quanto vi è un aumento di porosità.

## Capitolo 7. Conclusioni

Negli ultimi anni si parla molto di soluzioni costruttive alternative in cui vi è ampio utilizzo dei materiali naturali o da riciclo, come legno, canapa, fibre di cocco e così via, al fine di ridurre i consumi e le emissioni del fabbricato durante la propria vita utile e contenere l'impatto ambientale dell'edificio nell'intero ciclo di vita. Considerando, ad esempio, le costruzioni con struttura in legno portante X-lam, si possono evidenziare sostanzialmente due problemi. Il primo è legato all'uso comune della popolazione che nel momento in cui pensa a un edificio in legno si immagina la tipica baita di montagna. Il secondo riguarda il know-how delle imprese edili, che sono abituate a lavorare da anni con il calcestruzzo e che nel momento in cui devono affrontare l'utilizzo di materiali differenti possono incorrere in alcune difficoltà che portano a un aggravio di tempi e costi. Tali problemi, legati anche alla limitata versatilità di utilizzo del legno nel quadro complessivo delle opere ingegneristiche, fanno sì che il calcestruzzo sia ancora l'elemento base delle costruzioni.

Dai dati riportati in merito al mercato del cemento e al suo impatto ambientale è evidente quindi la necessità di trovare, da un lato, delle alternative ai tradizionali impianti produttivi e, dall'altro, un miglioramento dei calcestruzzi e delle malte tipicamente impiegate. La ricerca di conglomerati cementizi alternativi non può considerare unicamente l'aspetto ambientale. È necessario operare delle valutazioni fondate non solo sui fattori qualitativi e descrittivi del materiale ma anche su misurazioni numeriche che correlino le caratteristiche meccaniche con l'impatto sull'ambiente. Ci si deve quindi inserire nel quadro della progettazione integrale che vede la collaborazione, la comunicazione e l'interoperabilità di più figure professionali che operano sinergicamente per la realizzazione dell'edificio. La progettazione moderna di nuove costruzioni, nuovi materiali o soluzioni tecnologiche non può essere portata avanti da un unico professionista che ha conoscenze su tutti gli aspetti del settore, ma è necessaria la collaborazione tra diverse figure con conoscenze specifiche e un back-ground di base comune. Attraverso questo modo di operare, facilitato anche dall'adozione di nuove metodologie come il BIM, è possibile fondere le necessità architettoniche, strutturali e funzionali di un edificio con considerazioni sull'impatto ambientale.

Per quanto riguarda lo studio condotto nella presente tesi, le malte confezionate con inerti in polipropilene o in gomma mostrano buone possibilità applicative all'interno di un edificio per la loro leggerezza e duttilità della frattura. Il primo aspetto consente una riduzione dei carichi portati dalle strutture e una diminuzione della massa dell'interno fabbricato, con un conseguente decremento delle forze inerziali dovute all'azione sismica.

## Conclusioni

La duttilità è invece fondamentale nelle strutture iperstatiche, per le quali non è sufficiente avere elevata resistenza, ma possedere anche buona capacità nel dissipare le sollecitazioni plasticamente. Le caratteristiche di resistenza flessionale e a compressione, come ci si aspettava, tendono a diminuire compromettendo l'impiego di tali conglomerati per applicazioni strutturali. L'analisi non ha preso in considerazione altri aspetti meccanici dei materiali, come la durabilità, la durezza o le proprietà termo-acustiche. Per quanto riguarda la trasmittanza termica, anche se non è stata misurata in laboratorio, considerando le caratteristiche chimico-fisiche dei polimeri impiegati, si ritiene che le malte studiate abbia un valore minore di trasmittanza termica rispetto alle malte tradizionali. Tale aspetto, legato alla bassa densità, potrebbe essere fondamentale per l'utilizzo di tali conglomerati nelle costruzioni in quanto riescono a soddisfare contemporaneamente gli aspetti sismici ed energetici.

Come già accennato, l'analisi eco-meccanica deve essere seguita da una valutazione di tipo economico, infatti l'effettivo utilizzo di un materiale è legato al costo dello stesso. Dagli studi reperiti in letteratura si immagina che vi sia una convenienza nell'impiego della gomma riciclata all'interno delle costruzioni. Per il polipropilene non si hanno invece notizie in merito ma si pensa che, a fronte delle proprietà termoplastiche che permettono un elevato numero di ricicli, sia poco conveniente l'utilizzo nel settore delle costruzioni in cui non può essere più reimpiegato. Un altro elemento da considerare che concerne il costo di produzione del granulato da riciclo è la dimensione dei granuli prodotti; all'interno delle malte gli inerti hanno dimensioni inferiori di 2,0 mm, è quindi necessario comprendere quale sia l'entità dell'aggravio di costi legato a una macinazione dei rifiuti così spinta.

Un possibile sviluppo futuro della ricerca condotta, è quello di studiare l'applicazione delle malte e quindi condurre un'analisi eco-meccanica per un determinato caso studio. Ciò consente di determinare meglio quali possano essere i pregi e i difetti dell'impiego di inerti polimerici. In particolar modo si opera una migliore valutazione dell'aspetto ecologico in quanto, come già detto, è fortemente influenzato dalle condizioni locali del sito in cui si colloca il manufatto. Nel campo delle costruzioni ogni opera è di per sé un prototipo poiché pur mantenendo invariate tutte le caratteristiche del bene varia la localizzazione, per questo ogni manufatto necessita di studi, considerazioni e di una progettazione specifica. Questa deve comprendere anche l'aspetto ambientale fin dalle prime fasi dell'iter progettuale, considerando l'intero ciclo di vita dell'opera dall'estrazione delle materie prime fino alla demolizione del bene.

In un'epoca in cui l'uomo cerca di dominare ogni aspetto della natura, come avviene per l'aspetto economico o per la sicurezza, si deve contemplare la possibilità di rinunciare alla realizzazione di una determinata opera in quanto l'impatto ambientale risulterebbe troppo elevato, cercando di riutilizzare e dare nuova vita a manufatti abbandonati.

## Ringraziamenti

A conclusione del lavoro svolto e del mio percorso di studi è doveroso volgere alcuni ringraziamenti. Inizialmente ringrazio il professore Alessandro Pasquale Fantilli, che si è mostrato disponibile fin dall'inizio seguendomi, dandomi suggerimenti e anche consolandomi durante tutto il percorso di ricerca. Ringrazio anche i signori Antonino e Pietro che mi hanno supportato durante le ore spese in laboratorio, consentendo concretamente la riuscita della sperimentazione. Un ringraziamento è dovuto anche ai signori Russo che si sono resi disponibili nel creare una collaborazione dalla quale ha preso vita la presente tesi, in particolar modo ringrazio loro per aver fornito il polipropilene, spendendo tempo per macinarlo in modo differente rispetto ai loro standard aziendali.

Rivolgendomi invece ai miei cari, vorrei esprimere gratitudine ai miei genitori, Anna e Claudio, e alle mie nonne, che mi hanno sostenuto durante tutto il mio percorso scolastico, facendosi sempre più indietro con il passare degli anni in modo da far accrescere in me maggiore senso di responsabilità e convinzione delle decisioni prese.

Nonostante ciò che è accaduto negli ultimi mesi, ringrazio calorosamente Martina che è stata al mio fianco durante questi anni universitari, aiutandomi nelle scelte che la vita mi ha posto di fronte e sostenendomi nei momenti di difficoltà. Un grande grazie va a Valentina A. con la quale nell'ultimo periodo ho creato un rapporto d'amicizia speciale che è riuscito a darmi la grinta e la pazzia che stavo ormai perdendo.

Ringrazio inoltre tutti gli amici che in qualche modo mi sono stati vicini in questo mio percorso, in particolare Marco, Michela, Nicolò, Silvia, Simone, Simonetta, la piccola Vittoria, Enrico, Luca, Alessandro e Valentina G., amica di vecchia data che mi ha sempre spronato nell'essere positivo nei confronti dello sport, dello studio e della vita.

Infine, un *grazie* è dovuto al gruppo *sub-urban*: a Cristina per aver ascoltato tutti i miei racconti e aver vegliato durante i riposini in treno; a Roberta per la sua disponibilità e capacità con i diversi software; a Valerio per avermi fatto ridere e avermi dato un pizzico di buon umore anche nei momenti più duri.

Ringrazio, inoltre, tutti coloro che non ho nominato ma che hanno contribuito comunque a rendere questi cinque anni di università piacevoli e proficui.

- [1] Luigi Coppola, **Concretum**, McGraw-Hill (2007), pp. 1-53.
- [2] Mario Collepari, **Scienza e tecnologia del calcestruzzo**, terza edizione aggiornata Hoepli (1991), pp. 1-18, 249-373.
- [3] LVH-APA, **Manuale del calcestruzzo, Provincia autonoma di Bolzano – Alto Adige**.
- [4] [www.holcim.it](http://www.holcim.it), (Data ultima consultazione 26/07/2017).
- [5] AITEC, **Relazione annuale 2016**, AITEC (2017).
- [6] AITEC, **Rapporto di sostenibilità AITEC 2015**, AITEC (2016).
- [7] Daniele Gizzi, **Rifiuti in cementeria. Opportunità di crescita ad elevata sostenibilità ambientale**, Consulting (anno 8 – n°4/5 – luglio – ottobre 2010).
- [8] AITEC, **L'utilizzo di combustibili solidi secondari CSS nell'industria del cemento**, AITEC (2013).
- [9] [www.aitecweb.com](http://www.aitecweb.com), (Data ultima consultazione 02/08/2017).
- [10] [www.aitec-ambiente.org](http://www.aitec-ambiente.org), (Data ultima consultazione 03/08/2017).
- [11] Dr. Ivana Torresan, slide **Calcestruzzo e sostenibilità**, ASSIAD (Made Expo, Milano 2 ottobre 2013).
- [12] ASSIAD, **Il calcestruzzo armato sostenibile**, IMready (2011).
- [13] Madeleine Rubenstein, **Emissions from Cement Industry, State of the Planet** (9 maggio 2012).
- [14] NRMCA, **Concrete CO<sub>2</sub> fact sheet**, NRMCA (Febbraio 2012).
- [15] PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, **Trends in global CO<sub>2</sub> emissions report 2016**, PBL e European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability (novembre 2016).
- [16] Ing. Fabio Miseri, **Spunti di riflessione sulla sostenibilità del ciclo di vita delle infrastrutture in calcestruzzo**, Federbeton (Pubblicamento s.r.l. dicembre 2010).
- [17] Legambiente, **Rapporto cave 2014**, Legambiente (febbraio 2014).
- [18] [www.lowcarboneyconomy.cembureau.eu](http://www.lowcarboneyconomy.cembureau.eu), (Data ultima consultazione 18/08/2017).
- [19] THE EUROPEAN CEMENT ASSOCIATION, **The role of CEMENT in the 2050 LOW CARBON ECONOMY**, The European Cement Association (-).
- [20] [www.repubblica.it](http://www.repubblica.it), (Data ultima consultazione 22/08/2017).
- [21] ENEA, **Guida operativa per il settore di produzione del cemento**, ENEA (gennaio 2014).

- [22] G. Habert e N. Roussel, **Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives**, *Cement & Concrete Composites* (n°31 (2009) pp. 397–402).
- [23] D.M. 14 gennaio 2008 (G.U. 4 febbraio 2008 n. 29 - S. O. n. 30), **Nuove Norme tecniche per le Costruzioni**.
- [24] UNI EN 12620 (2008), **Aggregati per il calcestruzzo**.
- [25] Prof. Luigi Coppola, slide **Qualificazione di materiali e prodotti per uso strutturale secondo D.M. 14.01.2008**, Laboratorio Prove Materiali – Dipartimento di Progettazione e Tecnologie (Facoltà di Ingegneria - Università di Bergamo, 5/06/2008).
- [26] Arch. Antonio Carbonari, dispense accademiche **Sviluppo sostenibile**, Audit e progettazione energetica A.A. 2013/2014 (Corso di studi in Innovazione tecnologica e design per i sistemi urbani e il territorio).
- [27] Giulio De Leo, slide **Life Cycle Assessment - Ecolabel**, Dipartimento di scienze ambientali (Università degli studi di Parma).
- [28] Blengini, G. A. and Shields, D. J, **Green labels and sustainability reporting – overview of the building products supply chain in Italy**, *Management and Environmental Quality: An International Journal* (n°21 (2010) pp. 477–493).
- [29] William D. Callister, Jr, **Scienza e Ingegneria dei materiali**, Edises (Salt Lake City, gennaio 1999), pp. 446-517.
- [30] Prof. Federico Smeacetto, slide **Polimeri**, *Scienza e tecnologia dei materiali A.A. 2013/2014* (Corso di studi in Ingegneria Edile, Politecnico di Torino).
- [31] [www.eprints.unife.it](http://www.eprints.unife.it), (Data ultima consultazione 18/09/2017).
- [32] [www.treccani.it](http://www.treccani.it), (Data ultima consultazione 20/09/2017).
- [33] [www.dsij.it](http://www.dsij.it), (Data ultima consultazione 27/07/2017).
- [34] UNI EN 197-1 (2011), **Cemento – Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni**.
- [35] [www.conserve-energy-future.com](http://www.conserve-energy-future.com) (Data ultima consultazione 20/09/2017).
- [36] [www.zanettiarturo.com](http://www.zanettiarturo.com), (Data ultima consultazione 20/09/2017).
- [37] Arch. Adriano Magliocco, slide **Il riciclo: la plastica**, *Principi di Eco-design A.A. 2005/2006* (Corso di studi in disegno industriale).
- [38] [www.chimicamo.org](http://www.chimicamo.org), (Data ultima consultazione 21/09/2017).
- [39] Arch. Adriano Magliocco, slide **Il riciclo: la gomma**, *Principi di Eco-design A.A. 2005/2006* (Corso di studi in disegno industriale).
- [40] M. Bergonzoni, **Valorizzazione dei pneumatici fuori uso attraverso il recupero e il riciclaggio per la produzione di prodotti innovativi**, Dottorato di Ricerca in Scienze dell’Ingegneria (Università degli studi di Ferrara, 2009).
- [41] [www.chimica-online.it](http://www.chimica-online.it), (Data ultima consultazione 21/09/2017).
- [42] [www.oponeo.it](http://www.oponeo.it), (Data ultima consultazione 21/09/2017).
- [43] UNI EN 196-1 (2005), **Metodi di prova dei cementi – Parte 1: Determinazione delle resistenze meccaniche**.

- [44] Piano d’Azione Nazionale sul Green Public Procurement (28/01/2017), **Criteri ambientali minimi per l’affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici**.
- [45] [www.isprambiente.gov.it](http://www.isprambiente.gov.it), (Data ultima consultazione 02/10/2017).
- [46] Legambiente, **Rapporto dell’Osservatorio Recycle – Legambiente: 100 MATERIALI PER UNA NUOVA EDILIZIA**, Legambiente (novembre 2016).
- [47] Alessandro P. Fantilli, Silvio Sicardi, Francesca Dotti, **The use of wool as fiber-reinforcement in cement-based mortar**, *Cement & Concrete Composites* (n°139 (2017) pp. 562–569).
- [48] Prof. Ing. Alessandro Pasquale Fantilli, Prof. Ing. Bernardino Chiaia, Ing. Carmelo Blandino, **L’impatto ambientale del calcestruzzo: Applicazione dell’analisi eco-meccanica ad una struttura in calcestruzzo armato**, *Ingegno* (Giugno 2015).
- [49] Alessandro P. Fantilli, Bernardino Chiaia, Andrea Gorino, **Ecological and mechanical assessment of lightweight fiber-reinforced concrete made with rubber or expanded clay aggregates**, *Cement & Concrete Composites* (n°127 (2016) pp. 692–701).
- [50] Alessandro P. Fantilli e Tomoya Nishiwaki, **ECOLOGICAL AND MECHANICAL PERFORMANCES OF UHP FRCC CONTAINING FLY ASH**, (2017).
- [51] Bernardino Chiaia, Alessandro P. Fantilli, Alexandre Guerini, Giovanni Volpatti, Davide Zampini, **Eco-mechanical index for structural concrete**, *Cement & Concrete Composites* (n°67 (2014) pp. 386–392).
- [52] Alessandro P. Fantilli, Bernardino Chiaia, **Eco-mechanical performances of cement-based materials: An application to self-consolidating concrete**, *Cement & Concrete Composites* (n°40 (2013) pp. 189–196).
- [53] Alessandro P. Fantilli, Bernardino Chiaia, **The Work of Fracture in the Eco-Mechanical Performances of Structural Concrete**, *Journal of Advanced Concrete Technology* (n°11 (2013) pp. 282–290).
- [54] F. Pacheco-Torgal, Yining Ding, Said Jalali, **Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview**, *Cement & Concrete Composites* (n°30 (2012) pp. 714–724).
- [55] Blessen Skariah Thomas, Ramesh Chandra Gupta, **A comprehensive review on the applications of waste tyre rubber in cement concrete**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (n°54 (2016) pp. 1323–1333).
- [56] Swiss Centre for Life Cycle Inventories, **The Ecoinvent Database**, [www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch) (Data ultima consultazione 02/10/2017).
- [57] [www.esrl.noaa.gov](http://www.esrl.noaa.gov), (Data ultima consultazione 03/10/2017).
- [58] [www.lescienze.it](http://www.lescienze.it), (Data ultima consultazione 03/10/2017).
- [59] UNI EN 206-1 (2006), **Calcestruzzo - Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità**.
- [60] Leca, **Sottofondi: progetto, esecuzione e soluzioni in Leca**, Leca (2013).

## Indice tabelle e figure

Tabella 1. Distribuzione granulometrica della sabbia normalizzata CEN. ....	67
Tabella 2. Setacciatura sabbia (eseguita il 27/02/2017). ....	70
Tabella 3. Setacciatura sabbia (eseguita il 21/03/2017). ....	70
Tabella 4. Setacciatura polipropilene (eseguita il 27/02/2017). ....	72
Tabella 5. Setacciatura polipropilene (eseguita il 21/03/2017). ....	72
Tabella 6. Setacciatura gomma da PFU (eseguita il 13/07/2017). ....	74
Tabella 7. Provini realizzati durante la campagna sperimentale. ....	76
Tabella 8. Caratteristiche geometriche dei volumetti per il calcolo del peso specifico. ....	77
Tabella 9. Procedura per il calcolo della massa di polipropilene da sostituire alla sabbia per la frazione 1,00 mm. ....	77
Tabella 10. Procedura per il calcolo della massa di polipropilene da sostituire alla sabbia per la frazione 0,50 mm. ....	78
Tabella 11. Calcolo percentuale di inerte sostituito con polipropilene (getto eseguito il 28/03/2017). ....	78
Tabella 12. Calcolo percentuale di inerte sostituito con polipropilene (getto eseguito il 23/05/2017). ....	79
Tabella 13. Calcolo percentuale di inerte sostituito con polipropilene (getto eseguito il 23/05/2017). ....	80
Tabella 14. Calcolo percentuale di inerte sostituito con gomma da PFU (getto eseguito il 13/07/2017). ....	81
Tabella 15. Calcolo percentuale di inerte sostituito con gomma da PFU (getto eseguito il 13/07/2017). ....	82
Tabella 16. Costituenti le malte realizzate. ....	84
Tabella 17. Rottura a flessione. ....	86
Tabella 18. Densità, carico massimo, spostamento al carico massimo, resistenza flessionale, area sottesa al ramo post-picco ed energia di frattura per ogni provino esaminato. ....	92
Tabella 19. Variazioni percentuali delle caratteristiche meccaniche delle diverse tipologie di malte rispetto alla malta tradizionale, presa come riferimento. ....	95
Tabella 20. Quantitativo di materiale presente a metro cubo per ciascuna tipologia di malta. ...	103
Tabella 21. Carbon footprint ed embodied energy dei diversi componenti le malte confezionate. ....	104
Tabella 22. Valutazione di EI e del rapporto $EI_{sup}/EI$ per ciascuna malta. ....	104
Tabella 23. Valutazione di MI e del rapporto $MI/MI_{inf}$ per ciascuna malta. ....	105
Tabella 24. Carico massimo a rottura per flessione e corrispondente spostamento per i provini errati. ....	120

## Indice tabelle e figure

Figura 1. Ciclo produttivo del cemento. (Da <a href="http://www.dsij.in">www.dsij.in</a> 27/07/2017).....	12
Figura 2. Compravendite immobiliari per residenziale in Italia. (Da Relazione annuale AITEC 2016). .....	15
Figura 3. Incidenza percentuale per area sul mercato mondiale del cemento. (Da Relazione annuale AITEC 2016). .....	16
Figura 4. Cemento prodotto ripartito per tipologia. (Da Relazione annuale AITEC 2016). .....	18
Figura 5. Cemento prodotto ripartito per classi di resistenza. (Da Relazione annuale AITEC 2016). .....	18
Figura 6. Ripartizione delle cave per gruppo di materiali estratti. (Da Rapporto Cave 2014 di Legambiente).....	19
Figura 7. Anidride carbonica emessa durante la produzione del cemento. ....	21
Figura 8. Variazione nell'impiego delle diverse tipologie di combustibili. (Da Relazione annuale 2016 di AITEC). .....	22
Figura 9. Consumi energetici anno 2016 per la produzione del cemento. (Da Relazione annuale AITEC 2016). .....	23
Figura 10. Classifica delle emissioni di CO <sub>2</sub> prodotte nel 2015 espresse in milioni di tonnellate. (Da Trends in global CO <sub>2</sub> emissions report 2016).....	24
Figura 11. Quantità di CO <sub>2</sub> emessa dall'utilizzo di combustibile fossili e dalla produzione di cemento. (Da Trends in global CO <sub>2</sub> emissions report 2016). .....	24
Figura 12. Quantità di CO <sub>2</sub> pro-capite emessa dall'utilizzo di combustibile fossili e dalla produzione di cemento. (Da Trends in global CO <sub>2</sub> emissions report 2016).....	25
Figura 13. Recupero di energia dai rifiuti in Italia. (Da Rapporto di sostenibilità AITEC 2015). .....	29
Figura 14. Tasso di sostituzione calorica con CSS. (Rapporto di sostenibilità AITEC 2015). .....	30
Figura 15. Diagramma resistenza/emissioni di anidride carbonica per diversi tipi di cementi. (Da Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives). .....	38
Figura 16. Percentuale di impiego aggregati riciclati. (Da tabella 11.2.III NTC-2008). .....	41
Figura 17. Influenza sull'impatto ambientale delle scelte prese durante le diverse fasi del ciclo di vita delle strutture in calcestruzzo. (Da Spunti di riflessione sulla sostenibilità del ciclo di vita delle infrastrutture in calcestruzzo). .....	47
Figura 18. Struttura portante di un polimero. (Da slide Scienza e tecnologia dei materiali, prof. Federico Smeacetto). .....	49
Figura 19. Diagramma sforzo-deformazione dei polimeri. (Da slide Scienza e tecnologia dei materiali, prof. Federico Smeacetto).....	51
Figura 20. Monomero del polipropilene. (Da slide Scienza e tecnologia dei materiali, prof. Federico Smeacetto). .....	53
Figura 21. Struttura chimica dell'isoprene. (Da <a href="http://www.chimicamo.org">www.chimicamo.org</a> 21/09/2017). .....	60
Figura 22. Diagramma sforzo-deformazione per gomma vulcanizzata e non vulcanizzata. (Da Scienza e Ingegneria dei materiali).....	61
Figura 23. Struttura di un pneumatico. (Da <a href="http://www.oponeo.it">www.oponeo.it</a> 21/09/2017). .....	62
Figura 24. Batteria di setacci. ....	68
Figura 25. Curva granulometrica del trattenuto parziale per la sabbia.....	71
Figura 26. Curva granulometrica del trattenuto parziale per il polipropilene.....	73
Figura 27. Curva granulometrica del trattenuto parziale per la gomma da PFU.....	74
Figura 28. Cilindro utilizzato per il calcolo del peso specifico. ....	76
Figura 29. Provini appena gettati nel cassero metallico.....	83
Figura 30. Strumentazione per la prova a flessione su tre punti.....	85

## Indice tabelle e figure

Figura 31. Schema statico della flessione su tre punti (Da The use of wool as fiber-reinforcement in cement-based mortar). .....	85
Figura 32. Supporto metallico utilizzato per la prova a compressione. ....	87
Figura 33. Diagrammi carico-spostamento ( $P-\delta$ ) per i provini esaminati. ....	89
Figura 34. Valor medio del carico massimo a rottura per flessione per tipologia di malta. ....	90
Figura 35. Analisi del ramo post-picco (Da The use of wool as fiber-reinforcement in cement-based mortar). ....	90
Figura 36. Grafico $P/P_{max} - \delta-\delta_p$ per ogni tipologia di malta. ....	91
Figura 37. Valor medio della resistenza flessionale per tipologia di malta. ....	93
Figura 38. Valor medio dell'area sottesa alla curva per tipologia di malta. ....	93
Figura 39. Valor medio dell'energia di frattura per tipologia di malta. ....	93
Figura 40. Valor medio della densità per tipologia di malta. ....	93
Figura 41. Diagrammi carico-spostamento a compressione ( $P-\delta$ ) per ogni tipologia di malta. ....	94
Figura 42. Valor medio della resistenza a compressione per tipologia di malta. ....	95
Figura 43. Diagramma dell'indice EMI per l'analisi eco-meccanica. ....	100
Figura 44. Grafico adimensionale dell'analisi eco-meccanica per la densità delle malte. ....	106
Figura 45. Stratigrafica involucro verticale. ....	107
Figura 46. Stratigrafia partizione orizzontale. ....	107
Figura 47. Grafico adimensionale dell'analisi eco-meccanica per $A_f$ delle malte. ....	108
Figura 48. Grafico adimensionale dell'analisi eco-meccanica per il lavoro di frattura $G_f$ delle malte. ....	108
Figura 49. Grafico adimensionale dell'analisi eco-meccanica per la resistenza flessionale delle malte. ....	109
Figura 50. Grafico adimensionale dell'analisi eco-meccanica per la resistenza a compressione delle malte. ....	109
Figura 51. Diagrammi carico-spostamento ( $P-\delta$ ) per prova a flessione dei provini in malta M_1. ....	120
Figura 52. Diagrammi carico-spostamento ( $P-\delta$ ) per prova a flessione dei provini errati con polipropilene. ....	121
Figura 53. Diagrammi carico-spostamento ( $P-\delta$ ) per prova a compressione dei provini in malta M_1. ....	121
Figura 54. Diagrammi carico-spostamento ( $P-\delta$ ) per prova a compressione dei provini errati con polipropilene. ....	121

## Allegato: Risultati dei provini errati

Di seguito si riportano i risultati ottenuti per i primi provini realizzati. Sono stati confezionati tre provini in malta tradizionale e otto in cui è stato sostituito il polipropilene in massa e non in volume. Nonostante ci si fosse accorti dell'errore, sono stati lasciati maturare in acqua e sono poi stati sottoposti alle prove di flessione e di compressione. Ciò ha permesso di prendere dimestichezza con l'attrezzatura prima di procedere all'analisi dei provini più significativi. Per tali provini non sono state eseguite la verifica dimensionale e la valutazione della massa prima della rottura, quindi non è possibile determinare le resistenze e la densità.

Tabella 24. Carico massimo a rottura per flessione e corrispondente spostamento per i provini errati.

ID_PROVINO	ao [mm]	P <sub>max</sub> [N]	δ <sub>p</sub> [mm]
M_1_01	40	3021	0,57
M_1_02	40	3214	0,71
M_1_03	40	2731	0,53
PP_ERR_01	40	138	0,40
PP_ERR_02	40	172	0,32
PP_ERR_03	40	184	0,34
PP_ERR_04	40	137	0,45
PP_ERR_05	40	146	0,40
PP_ERR_06	40	181	0,36
PP_ERR_07	40	149	1,05
PP_ERR_08	40	141	0,73

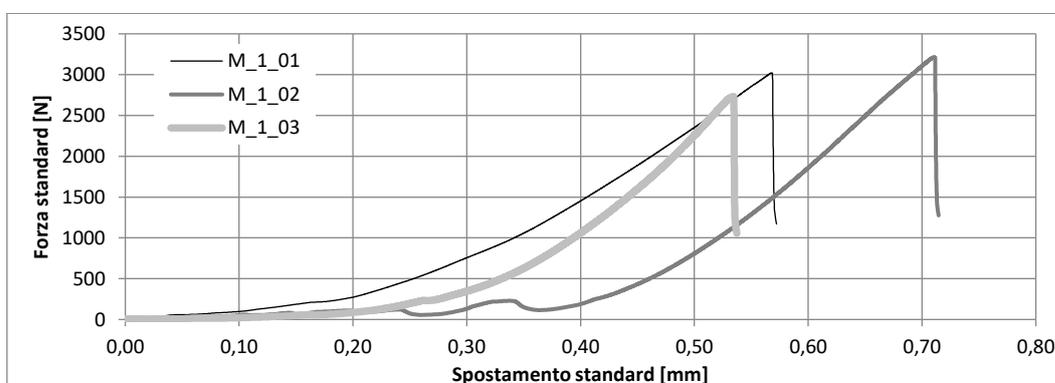


Figura 51. Diagrammi carico-spostamento (P-δ) per prova a flessione dei provini in malta M\_1.

Allegato: Risultati dei provini errati

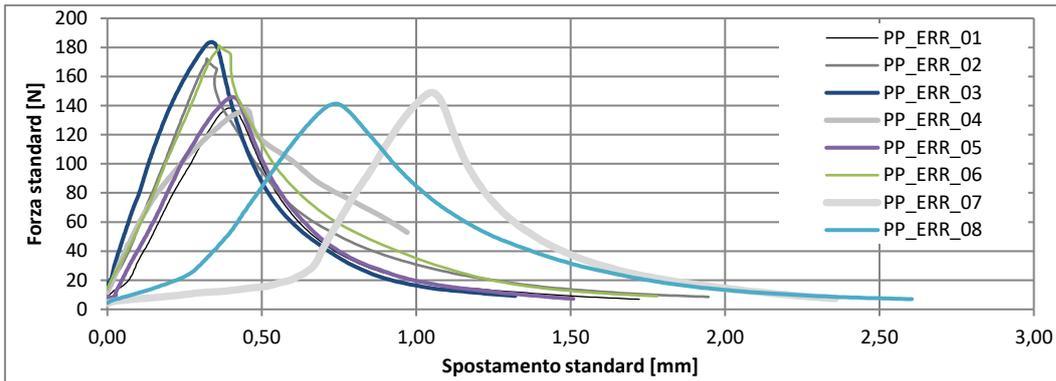


Figura 52. Diagrammi carico-spostamento ( $P-\delta$ ) per prova a flessione dei provini errati con polipropilene.

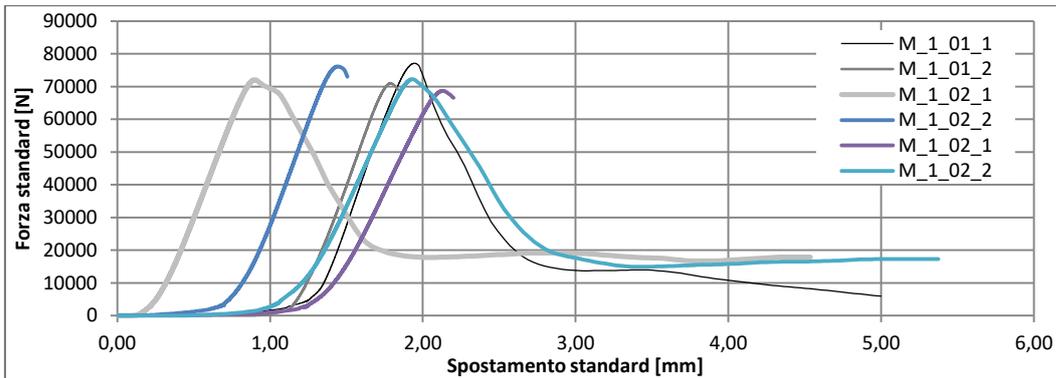


Figura 53. Diagrammi carico-spostamento ( $P-\delta$ ) per prova a compressione dei provini in malta M\_1.

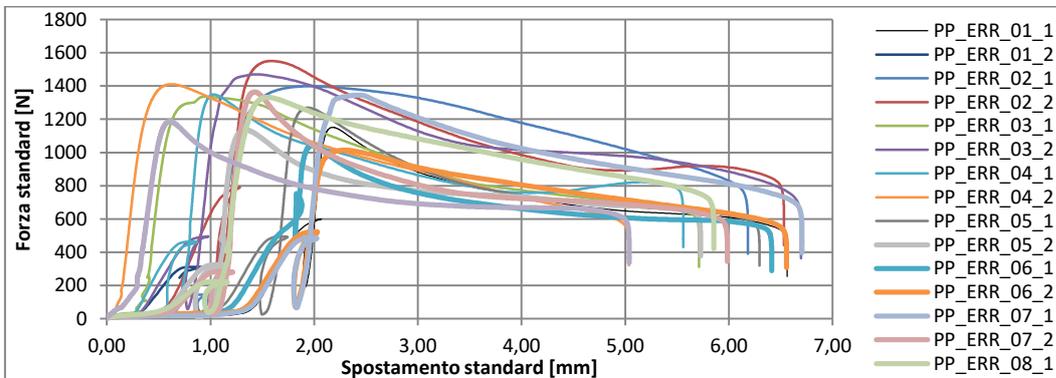


Figura 54. Diagrammi carico-spostamento ( $P-\delta$ ) per prova a compressione dei provini errati con polipropilene.