

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

Tesi di Laurea Magistrale

**Effetti prodotti dai cementi nelle malte
con materiali di riciclo**



Relatore:

Professore Alessandro Pasquale FANTILLI

Correlatori:

Professore Bernardino CHIAIA

Professoressa Roberta Maria BONGIOVANNI

Candidato:

Martina SALVATORE

228647

Anno accademico 2017/2018

Abstract	3
Capitolo 1. <i>Introduzione: Problematiche ambientali relative alla produzione di malte e calcestruzzi a base cementizia</i>	5
1.1. Descrizione malte e calcestruzzi.....	5
1.1.1. Aggregati.....	5
1.1.2. Leganti.....	6
1.1.2.1. Cemento Portland.....	7
1.1.2.2. Cemento solfoalluminoso.....	7
1.1.3. Additivi.....	13
1.2. Consumo e impatto ambientale per CO ₂ emessa da produzione cemento.....	14
1.3. Problematiche ambientali relative al reperimento degli inerti.....	19
Capitolo 2. <i>Possibili sostituti dell'aggregato vergine</i>	23
2.1. Recycled coarse aggregate.....	23
2.2. Gomma da pneumatici fuori uso.....	25
2.2.1. Problematiche ambientali per smaltimento PFU.....	27
2.2.2. Rubbercrete.....	28
2.3. Materie plastiche.....	30
2.3.1. Polipropilene.....	31
2.3.2. ABS.....	32
2.3.3. PBT.....	33
2.3.4. PA66.....	34
2.3.5. Smaltimento e riciclaggio plastica.....	36
2.3.5.1. Riciclaggio meccanico.....	37
2.3.5.2. Riciclaggio chimico.....	38

Abstract

“Il futuro delle costruzioni passa per l’innovazione ambientale” [...]. Sono queste le parole iniziali del *Rapporto dell’Osservatorio Recycle* promosso da Legambiente in *‘L’economia circolare nel settore delle costruzioni’*, che ha l’obiettivo di raccontare i cambiamenti a cui stiamo assistendo e a cui dovremmo tendere in ambito edilizio quanto infrastrutturale. È quindi un processo già in corso, che punta a ridurre l’impatto sugli ecosistemi favorendo l’utilizzo sempre più ingente di materiale da riciclo. La *Direttiva 2008/98/CE* prevede che al 2020 venga raggiunto un obiettivo pari al 70% del riciclo dei rifiuti da costruzione e demolizione. Si tratta quindi di prospettive realistiche di cui è ampiamente dimostrata la concreta realizzabilità e che oltretutto porterebbero anche ad un rilancio del settore con conseguente creazione di lavoro.

Il calcestruzzo è, dopo l’acqua, il materiale più usato sul pianeta, quindi il materiale da costruzione più usato al mondo, con un consumo mondiale stimato tra i 21 e 31 miliardi di tonnellate. Questo ha principalmente due conseguenze di cui è inevitabile preoccuparsi a livello di sostenibilità ambientale. La prima riguarda la significativa emissione di CO₂ comportata dalla produzione di alcuni dei componenti di cui è confezionato, il cemento, ma in particolare del clinker; la produzione di questo componente principale produce 900kg di CO₂ per ogni tonnellata, il che rappresenta un pesante contributo che concorre all’incremento dell’inquinamento ambientale globale (tra il 5% e l’8% delle emissioni di CO₂ nell’atmosfera ogni anno). Non solo, ma un altro aspetto problematico è rappresentato dall’utilizzo di inerti da cava, il cui impatto nei confronti del paesaggio è una delle questioni ambientali più importanti nel nostro Paese. La loro sostituzione con materiali provenienti dal riciclo porterebbe ovviamente anche vantaggi nello smaltimento di rifiuti di fonderia e da demolizione in edilizia. Oggi è possibile dare una risposta a questi problemi: non esistono più scuse di natura tecnica, prestazionale o economica per non utilizzare aggregati e inerti provenienti dal riciclo, anche dal riciclo delle stesse costruzioni. Eppure l’applicazione di tali processi sta risultando estremamente lenta a causa di barriere normative ancora presenti che ostacolano tale economia circolare nelle costruzioni. Si tratta di obblighi presenti ancora nei Capitolati, di assenza di riferimenti chiari e controlli che accompagnino la crescita dell’uso di materiali da riciclo fino agli obiettivi

previsti per il 2020. Per esempio tali temi sono stati introdotti ai sensi della Legge 296/2006 con *Decreto Ministeriale dell'Ambiente del 24 Dicembre 2015* tramite i **Criteri Ambientali Minimi**, divisi tra criteri di base e criteri premiali. Ma tali CAM riguardano solo gli appalti pubblici e prevedono comunque percentuali molto ridotte di materiale riciclato, per esempio per il calcestruzzo il limite è solo del 5%.

È per tutti questi motivi che il lavoro di tesi qui presentato propone la sperimentazione di malte cementizie contenenti materiale da riciclo, con utilizzo di leganti idraulici diversi. In particolare si effettuerà la parziale sostituzione dell'aggregato per mezzo di inerti ricavati da gomma proveniente da pneumatici fuori uso (PFU) e da materie plastiche riciclate. Non solo in questo modo si riescono a garantire migliori prestazioni ecologiche, ma si riscontra anche il miglioramento di alcune prestazioni meccaniche, come densità e duttilità.

Capitolo 1. Introduzione: Problematiche ambientali relative alla produzione di malte e calcestruzzi a base cementizia

1.1. Descrizione malte e calcestruzzi

Le malte e i calcestruzzi sono i materiali da costruzioni più usati al mondo. In entrambi i casi si tratta di composti che presentano una matrice legante ottenuta da cottura e macinazione di terre o rocce naturali (gesso, calce aerea o idraulica, cemento Portland, cemento alluminoso) che fa da collante per gli aggregati, materiale di origine naturale scelto per l'alta resistenza meccanica. Questo presenta varie dimensioni: si parla di *malta* quando la dimensione massima dell'aggregato non supera i 5 mm, altrimenti si tratta di *calcestruzzo*. Entrambi si realizzano miscelando questi elementi con acqua. [1]

1.1.1. Aggregati

Generalmente si tratta di un mix di ghiaia (dimensioni particelle superiori a 5mm) e sabbia (dimensioni minori di 5mm), chiamati "inerti" per la loro non-reattività con gli altri elementi del composto, per esempio con l'acqua o con le polveri, che potrebbe creare fenomeni espansivi precursori delle fessurazioni, che indebolirebbero la struttura.

Tali componenti si presentano all'interno del composto con un'ampia distribuzione delle dimensioni dei granuli per ottenere un favorevole grado di riempimento (circa il 60-75% del volume totale di calcestruzzo) rispetto all'impasto di acqua e cemento, più efficiente se le dimensioni si distribuiscono in un intervallo abbastanza grande: le particelle fini vanno a riempire gli spazi lasciati da quelle più grosse. La granulometria di una sabbia si valuta tramite il processo di setacciatura con vibrazione manuale o meccanica e dai dati desunti si definisce la curva granulometrica, ossia la percentuale in peso degli aggregati passanti ai vari setacci in funzione del diametro dei vagli. [1,2]

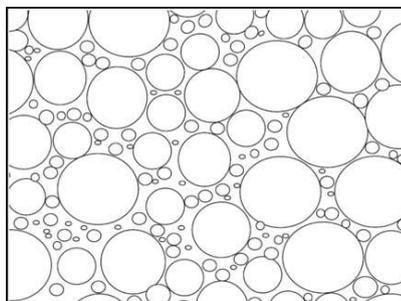


Figura 1 - Distribuzione aggregati fini e grossi (Da: Appendice A, "Malte e Calcestruzzi" di Alberto D'Amato)

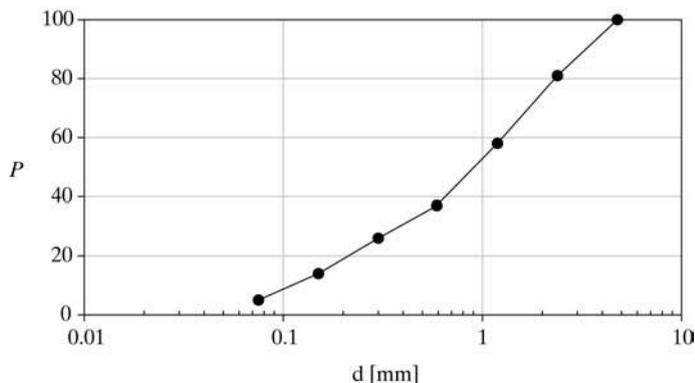


Figura 2 – Esempio di distribuzione cumulativa delle frazioni granulometriche (Da: Tab. A.1 Appendice “Malte e Calcestruzzi” di Alberto D’Amato)

La curva granulometrica del sistema solido, per garantire la massima densità possibile e quindi il minor contenuto di vuoti interstiziali, deve soddisfare l’equazione di Fuller e Thompson:

$$P = 100 * \left(\frac{d}{D}\right)^{1/2}$$

con P = percentuale passante al setaccio di diametro d

D = diametro aggregato più grosso.

Per migliorare la lavorabilità del calcestruzzo, che in questo modo risulterebbe fin troppo denso, tale equazione è stata modificata introducendo il parametro A (compreso tra 8 e 14) che tiene conto proprio della lavorabilità:

$$P = A + (100 - A) * \left(\frac{d}{D}\right)^{1/2}$$

1.1.2. Leganti

I leganti sono quei materiali che mescolati con l’acqua danno vita ad una pasta lavorabile e plastica che poi indurisce nel tempo e possono essere di due tipi:

- *Leganti aerei*, che induriscono in aria (calce, gesso);
- *Leganti idraulici*, che possono indurire sia in aria che in acqua (cemento, calce idraulica). Più rilevante è l’utilizzo del cemento, che si distingue in Portland, d’altoforno, pozzolanico e alluminoso.

Poniamo un po’ più attenzione alla descrizione del cemento Portland, il più comunemente utilizzato, e del cemento solfoalluminoso, usati per il confezionamento dei provini nella sperimentazione oggetto di questa tesi.

1.1.2.1. Cemento Portland

Il cemento è quella parte del composto che lega insieme i granuli per formare il corpo rigido. In particolare il Portland è un calcio alluminosilicato che si ottiene miscelando rocce calcaree e argillose cotte a 1000°C e successivamente macinate; il prodotto ottenuto si chiama *clinker*. Esistono diverse tipologie di cemento Portland che si differenziano per la varietà di concentrazione dei minerali contenenti calcio. La matrice cementizia si forma con l'aggiunta di acqua (circa il 25% della massa del cemento stechiometricamente, quindi rapporto $a/c = 0.25$; talvolta si arriva a 30-35% per migliorare la lavorabilità dell'impasto) alla polvere di cemento di dimensioni molto piccole se rapportate a quelle degli aggregati più fini. È questo processo di *idratazione* che rende duro il cemento, realizzando il legame chimico tra la matrice e le particelle e consiste in processi reattivi e diffusivi non isotermi: l'idratazione avviene in una prima fase per la dissoluzione dei composti anidri della fase acquosa, in cui questi precipitano e formano uno strato superficiale sulla particella di cemento; successivamente, con tempi più lunghi, l'acqua diffonde verso l'interno della particella. La complessa composizione del cemento Portland, formata principalmente da una miscela di idrossido di calcio, tobermorite, alluminato, solfoalluminati e alluminoferriti, rende altrettanto complesso anche il processo di idratazione. In sostanza però, a seguito di tale processo, nasce un volume di prodotto idrato che va ad occupare gli spazi dove c'era l'acqua, consolidando progressivamente l'impasto, attraverso i cosiddetti processi di *presa e indurimento*. [1]

La successiva aggiunta di aggregati alla pasta cementizia così ottenuta necessita di ulteriore acqua, perciò il rapporto acqua cemento raggiunge il 40-50% per le malte e anche fino all'80% per i calcestruzzi.

1.1.2.2. Cemento solfoalluminoso

Il cemento solfoalluminoso (SAC) viene utilizzato perché generalmente consuma meno energia del classico cemento Portland (PC), quindi riduce le emissioni di CO₂ e questo lo rende un materiale ecocompatibile. La matrice SAC risulta molto resistente grazie all'impacchettamento di cristalli aghiformi di *ettringite* (o *bacillo del cemento*, ossia chimicamente un trisolfo-alluminato di calcio idrato: $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$), il cui intreccio crea un interblocco meccanico che offre una migliore resistenza alla propagazione della cricca. La matrice PC si differenzia in quanto la resistenza nasce dalle forze di attrazione di Van Der Waals nel gel C-S-H, formato da silicati idrati di calcio prodotti della reazione di idratazione del cemento, in particolare dall'idratazione dei silicati presenti nel clinker, che assume

le proprietà di un gel rigido amorfo; l'indurimento, e quindi il potere legante del cemento, è dovuto principalmente alla formazione dei C-S-H. Data la differenza tra gli idrati del SAC e del PC, usare il SAC come legante può migliorare l'interfaccia tra fibra e matrice di cemento: i rigidi aghi di ettringite e la microstruttura più densa del SAC rispetto al Portland, genera una forza di adesione maggiore della matrice con eventuali fibre aggiuntive e migliora la resistenza al taglio a rottura rispetto a quella tra PC e fibre. [3]

Si trovano meno studi in letteratura riferiti al cemento solfoalluminoso rinforzato con fibre, ma la maggior parte considera fibre di vetro, in quanto il SAC fornisce un ambiente meno alcalino e quindi meno aggressivo per tali fibre, ma in tal modo non si sviluppa duttilità; con fibre di polipropilene (PP), di alcool polivinilico (PVA) o fibre di acciaio, invece, si realizzano migliori proprietà di legame con matrice di SAC rispetto al PC, che migliorano anche la duttilità.

Uno studio nato dalla collaborazione dei dipartimenti di ingegneria civile di Australia, USA e Cina [3], ha valutato i comportamenti di flessione del cemento solfoalluminoso rinforzato con fibre di PVA e PP rispetto al cemento Portland. Il confronto tra diverse fibre è utile per analizzare l'effetto delle proprietà di diversi legami fibra-matrice sui comportamenti di flessione delle matrici di cemento. In particolare le prove sono state effettuate con provini di SAC con rapporto acqua/cemento pari a 0.40 e 0.45, confrontati con provini di PC con rapporto a/c pari a 0.45.

La seguente tabella mostra le proprietà meccaniche e la composizione chimica dei cementi utilizzati e le proprietà dimensionali e meccaniche delle fibre di PVA e PP:

Chemical composition of SAC and PC (% by mass).

Cement type	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	C ₃ A ₃ S
SAC	7.7	49.3	30.3	2.66	2.44	–	22.1	–	–	60.3
PC	19.85	63.48	5.07	3.40	–	68.69	5.08	7.67	10.34	–

Physical properties of SAC and PC matrices.

Cement type	Specific area (m ² /kg)	Density (g/cm ³)	Water requirement of normal consistency (%)	Initial setting (min)	Final setting (min)	Flexural strength (MPa)		Compressive strength (MPa)	
						1-day	7-day	1-day	7-day
						SAC matrix	425	2.8	29.4
PC matrix	341	3.11	32.9	198	229	6.6	10.3	34.1	64.4

Physical properties of PVA and PP fibers.

Fiber type	Density (g/cm ³)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Diameter (mm)	Length (mm)
PVA	1.3	1500	48	0.020	6.0
PP	0.9	400	3.5	0.040	6.0

Tabella 1 – Proprietà chimiche e fisiche leganti PC e SAC e fibre PVA e PP (Da: "Reinforcement effects of polyvinyl alcohol and polypropylene fibers on flexural behaviors of sulfoaluminate cement")

Dalle curve carico-deformazione delle due matrici di legante si riscontra che il Portland mostri una parte lineare molto più marcata e una non lineare più corta rispetto al solfoalluminoso:

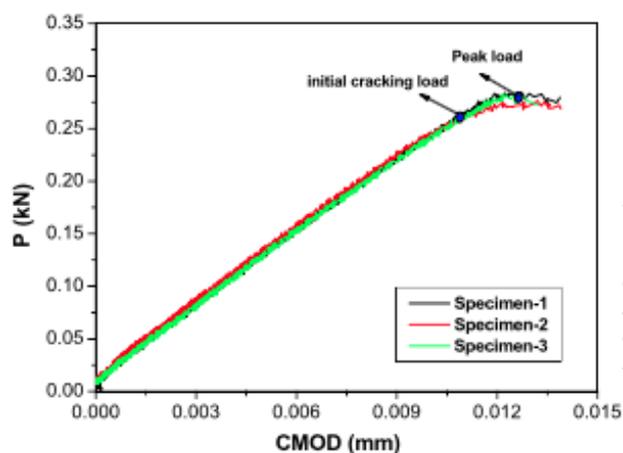


Figura 3 - Curva Carico-Spostamento PC con $a/c = 0.45$ (Da: "Reinforcement effects of polyvinyl alcohol and polypropylene fibers on flexural behaviors of sulfoaluminate cement")

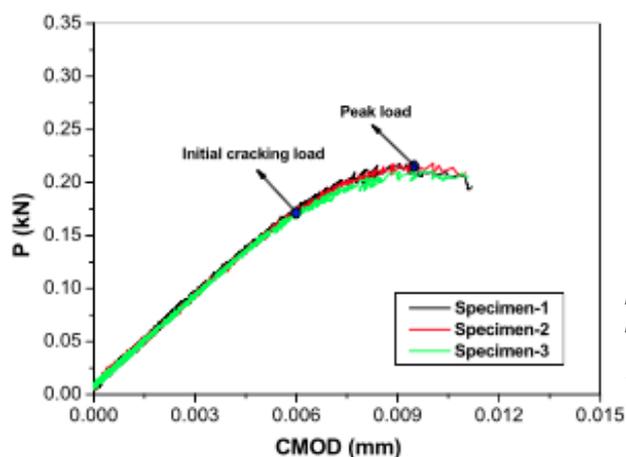


Figura 4 - Curva Carico-Spostamento SAC con $a/c = 0.45$ (Da: "Reinforcement effects of polyvinyl alcohol and polypropylene fibers on flexural behaviors of sulfoaluminate cement")

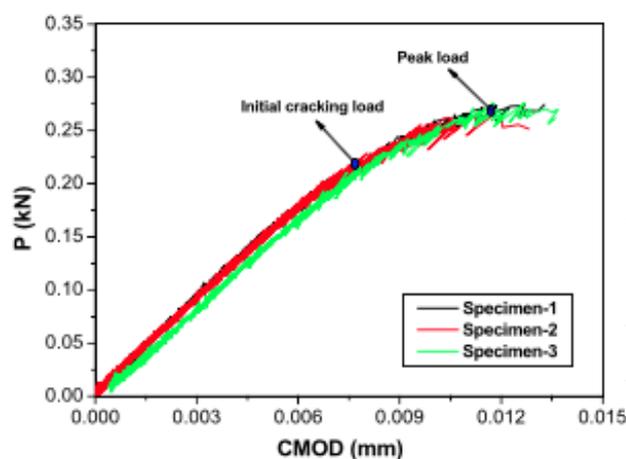


Figura 5 - Curva Carico-Spostamento SAC con $a/c = 0.40$ (Da: "Reinforcement effects of polyvinyl alcohol and polypropylene fibers on flexural behaviors of sulfoaluminate cement")

I valori di inizio crack e di picco sono riassunti in tabella 2, dove il primo punto di rottura viene definito dove la non linearità diventa più evidente o dove l'inclinazione della curva si riduce in maniera più significativa:

Cracking initiation and peak loads of SAC and PC matrices.

Cement matrices	Initial cracking point			Ultimate peak point		
	Load (kN)	CMOD (mm)	Deflection (mm)	Load (kN)	CMOD (mm)	Deflection (mm)
45SAC	0.186 ± 0.015	0.007 ± 0.001	0.035 ± 0.003	0.218 ± 0.021	0.010 ± 0.01	0.042 ± 0.005
40SAC	0.213 ± 0.009	0.008 ± 0.001	0.049 ± 0.04	0.276 ± 0.011	0.013 ± 0.001	0.063 ± 0.002
45PC	0.275 ± 0.007	0.012 ± 0.001	0.065 ± 0.001	0.286 ± 0.025	0.013 ± 0.001	0.069 ± 0.001

Note: The numbers indicate average ± standard deviation.

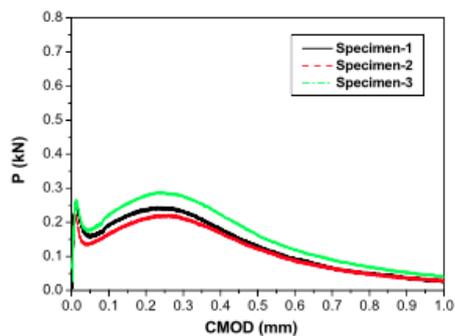
Tabella 2 - Risultati prova di flessione SAC e PC (Da: "Reinforcement effects of polyvinyl alcohol and polypropylene fibers on flexural behaviors of sulfoaluminate cement")

Risulta che sia la capacità di carico che la deformazione della matrice SAC sono inferiori a quelli della matrice PC considerando lo stesso rapporto a / c. Ma la matrice SAC con rapporto a / c di 0.4 mostra resistenza comparabile ma forza di apertura della fessura significativamente inferiore rispetto a quella di matrice PC ad a / c di 0.45.

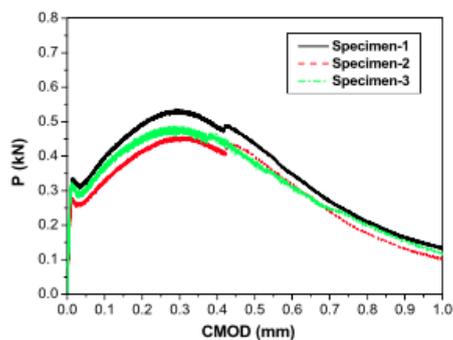
Sebbene le due matrici SAC mostrino una minore resistenza di inizio della fessura (fase lineare più corta), dalle curve si evince un comportamento non lineare evidente dopo lo stadio lineare, che indica che dopo l'inizio della fessura la propagazione della cricca è stabile, elasto-plastica, e la resistenza all'estensione della crepa instabile della matrice SAC è quindi migliore.

Entriamo ora nel merito delle prove riferite ai leganti con l'aggiunta di fibre: la *figura 6* mostra le curve carico-deformazione delle matrici di cemento solfoalluminoso contenenti 0.3%, 0.6% e 0.9% di fibra di PVA (in volume). Anche qui il primo punto di rottura è definito dal punto in cui la non linearità diventa più marcata o dove l'inclinazione della curva si riduce significativamente. Il composito SAC con rinforzo in fibra di PVA pari a 0.3% mostra una caduta improvvisa del carico subito dopo la prima fessura; tale comportamento migliora quando il dosaggio di PVA supera lo 0.6%.

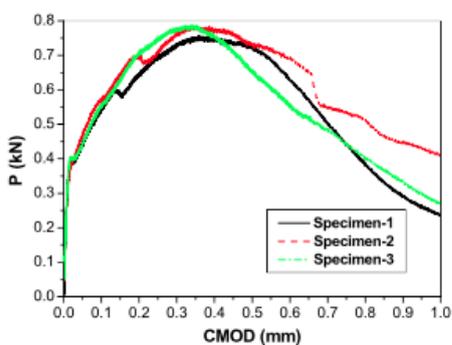
Introduzione



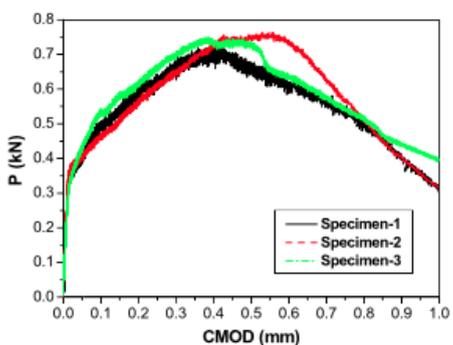
(a) PVA fiber (0.3%) reinforced SAC matrix at w/c ratio of 0.45



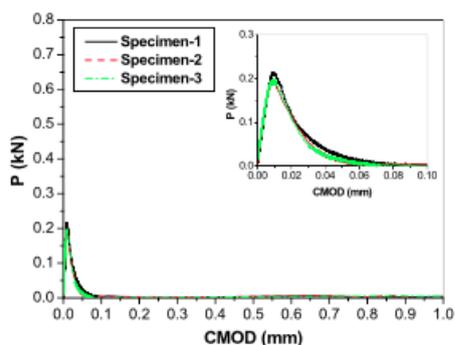
(b) PVA fiber (0.6%) reinforced SAC matrix at w/c ratio of 0.45



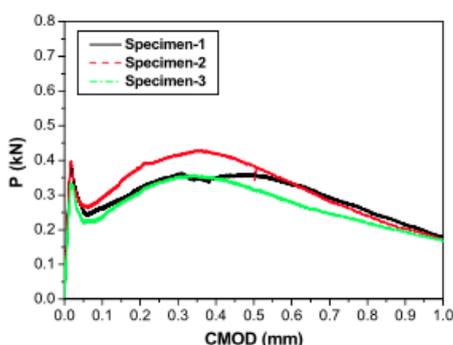
(c) PVA fiber (0.9%) reinforced SAC matrix at w/c ratio of 0.45



(d) PVA fiber (0.9%) reinforced SAC matrix at w/c ratio of 0.40



(e) PP fiber (0.9%) reinforced SAC matrix at w/c ratio of 0.45



(f) PVA fiber (0.9%) reinforced PC matrix at w/c ratio of 0.45

Figura 6 - Curva Carico-Spostamento matrice SAC con PVA (Da: "Reinforcement effects of polyvinyl alcohol and polypropylene fibers on flexural behaviors of sulfoaluminate cement")

Introduzione

Si nota che nella fase iniziale di cracking, il carico iniziale della fessura e la deflessione aumentano al crescere del contenuto di fibre PVA nel composito SAC, il che suggerisce una maggiore resistenza e duttilità. Anche la resistenza alla flessione finale aumenta significativamente. Dopo la rottura della matrice, le fibre creano come un ponte sulle microfratture nella matrice: all'aumentare del carico le fibre trasferiscono il carico alla matrice di cemento, e questo migliora la duttilità e la tenacità delle matrici di cemento. Quindi la quantità minima di fibre per ottenere già un efficace miglioramento è pari a 0.6% nella matrice SAC.

Le curve (c) ed (e) di *figura 8* rappresentano i compositi di SAC rinforzato con fibre di PVA e PP allo 0.9% (in volume). Rispetto alla matrice SAC semplice, quella con PP allo 0.9% presenta quasi lo stesso carico di picco e un leggero aumento della duttilità. Ma dove è presente fibra in PVA aumenta notevolmente sia il carico di picco che la duttilità: la resistenza massima è circa 3.5 volte superiore a quella del composito SAC con fibra di carbonio allo 0.9%. Pertanto la fibra PVA è più efficace della fibra PP. Ciò potrebbe dipendere dallo più scarso legame tra la fibra PP e la matrice SAC.

Flexural properties of PVA and PP fibers reinforced SAC matrices.

SAC matrices	Initial cracking point			Ultimate peak point		
	Load (kN)	CMOD (mm)	Deflection (mm)	Load (kN)	CMOD (mm)	Deflection (mm)
45SAC9PVA	0.349 ± 0.021	0.018 ± 0.002	0.070 ± 0.002	0.714 ± 0.031	0.564 ± 0.082	0.684 ± 0.024
45SAC9PP	0.192 ± 0.008	0.007 ± 0.001	0.049 ± 0.001	0.200 ± 0.009	0.010 ± 0.001	0.056 ± 0.002

Note: The numbers indicate average ± standard deviation.

Tabella 3 - Carichi compositi SAC con fibre PVA e PP 0.9%

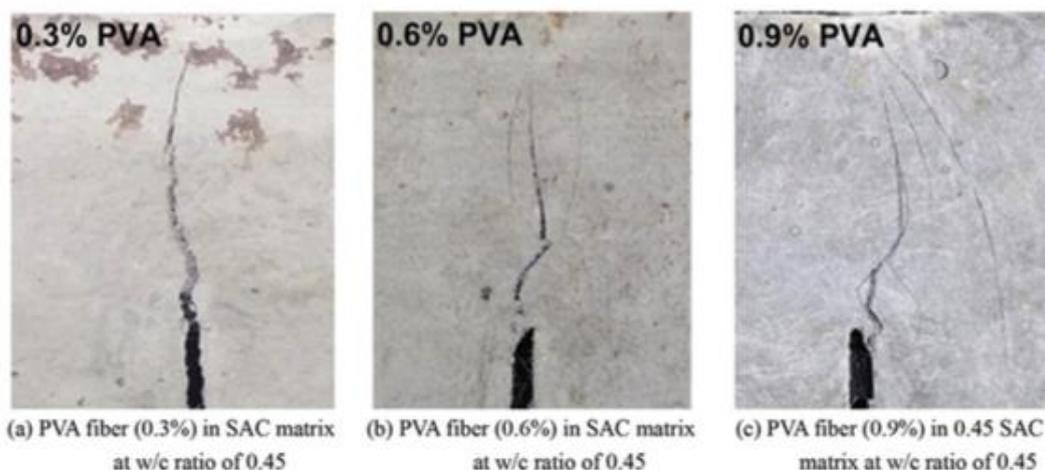


Figura 7 - Fratture del composito SAC con PVA (Da: "Reinforcement effects of polyvinyl alcohol and polypropylene fibers on flexural behaviors of sulfoaluminate cement")

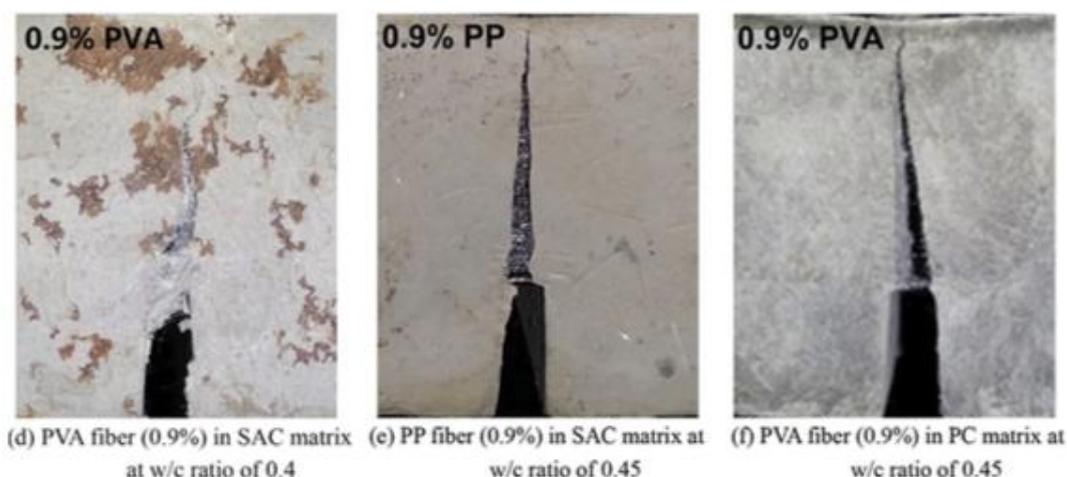


Figura 8 - Fratture compositi SAC con PVA e PP a 0.9% (Da: "Reinforcement effects of polyvinyl alcohol and polypropylene fibers on flexural behaviors of sulfoaluminate cement")

In conclusione, dal seguente studio si è riscontrato che:

- Il composito con il legante solfoalluminoso presenta un carico di inizio frattura inferiore ma comportamento della frattura elasto-plastica, al contrario del cemento Portland che mostra un'elevata forza di apertura della fessura ma un comportamento decisamente fragile della frattura;
- La fibra in PVA ha migliorato il comportamento a flessione della matrice SAC, per la quale si è riscontrata una maggiore resistenza a flessione e anche una più elevata duttilità, soprattutto per il dosaggio di fibre almeno pari allo 0.6%;
- Rispetto alle fibre in PP, considerando la stessa percentuale in volume pari allo 0.9%, le fibre PVA raggiungono una più elevata resistenza e duttilità e probabilmente questo è attribuito alle migliori proprietà di adesione tra le fibre e la matrice SAV. Le fibre in PP hanno presentato solo un lieve aumento della resistenza flessionale e della duttilità, probabilmente a causa dei legami più deboli con la matrice SAC;

1.1.3. Additivi

Gli additivi vengono aggiunti al conglomerato cementizio con lo scopo di modificare e migliorare alcune proprietà. Possono agire sulla velocità del processo di idratazione del cemento, accelerandolo o ritardandolo (nel periodo di presa e indurimento), tramite un'azione chimica oppure modificare direttamente una specifica proprietà reologica della pasta, tramite un'azione fisica. Tra questi ad esempio i fluidificanti, superfluidificanti, impermeabilizzanti, aeranti, ecc [12].

Con gli additivi *acceleranti* del processo di idratazione nascono malte a presa rapida che possono ad esempio servire nel caso di riparazioni urgenti, mentre quelli *ritardanti* servono a conservare più a lungo la lavorabilità della pasta cementizia; di conseguenza ne diminuiscono la resistenza meccanica per brevi stagionature ma la aumentano per lunghe stagionature.

Per quanto riguarda la seconda tipologia di additivi, che agiscono attraverso un'azione fisica, i *fluidificanti* riducono il rapporto a/c necessario all'impasto di almeno il 5% aumentandone la lavorabilità; gli *aeranti* migliorando la resistenza ai cicli gelo-disgelo, formando un sistema di micro bolle d'aria all'interno della pasta e favoriscono anche lavorabilità e coesione al calcestruzzo fresco.

1.2. Consumo e impatti ambientali per la CO₂ emessa dalla produzione del cemento

Il calcestruzzo sembra un materiale piuttosto inoffensivo, ma è una tra le più grandi fonti artificiali al mondo di produzione di anidride carbonica. Infatti tra il 5% e l'8% delle emissioni globali di CO₂ annuali nell'atmosfera derivano dalla produzione del cemento, in particolare del clinker [5]. Essendo il materiale da costruzione più usato al mondo, nasce la necessità di sviluppare calcestruzzi più sostenibili. Questi però devono garantire prestazioni strutturali affidabili, valutate allo stato limite di esercizio e allo stato limite ultimo, perciò la valutazione della sostenibilità dei materiali da costruzione in genere non si può limitare ad un'analisi delle sole emissioni di CO₂, perché si rischia di abbattere eccessivamente le proprietà meccaniche del prodotto finale (resistenza, duttilità) [4, 5].

La Commissione Europea ha definito l'edilizia sostenibile come una delle principali sfide del futuro, in quanto *"il settore residenziale e il terziario pesano per oltre il 40% sul consumo di energia finale dell'UE: un dato purtroppo in crescita con un conseguente aumento di emissioni di anidride carbonica"*, come sottolineato dalla *Direttiva sul Rendimento Energetico dell'Edilizia (2002/91/EC)*. È compito e dovere quindi dei progettisti del settore edilizio puntare alle tecnologie e alle innovazioni che migliorino sotto il profilo della sostenibilità ambientale.

Numerosi sono già gli obiettivi che il settore della produzione del calcestruzzo si è posto per migliorare l'eco-compatibilità delle strutture, scegliendo di promuovere la riciclabilità dei materiali e quindi di utilizzare le materie prime in modo più efficiente, per esempio introducendo aggregati provenienti da materiale da riciclo (plastiche, gomme da PFU, ecc.) o usando additivi che possano migliorare alcune importanti proprietà, come il fabbisogno d'acqua. Anche quest'ultimo fattore non è da sottovalutare, in quanto il fabbisogno d'acqua per il confezionamento di

calcestruzzo prodotto in media nel mondo si aggirerebbe intorno a 2,3 miliardi di m³ senza utilizzo di additivi ed è decisamente eccessivo in un quadro in cui sono in atto strategie globali che spingono verso una gestione più consapevole di questa importante risorsa [6].

I dati riferiti alle emissioni di CO₂ globali sono ormai inquietanti: *Eurostat* ha stimato che nel 2017 le emissioni di anidride carbonica derivanti dall'uso di energia prodotta da combustibili fossili è aumentata di +1,8% rispetto all'anno precedente nell'UE [7].

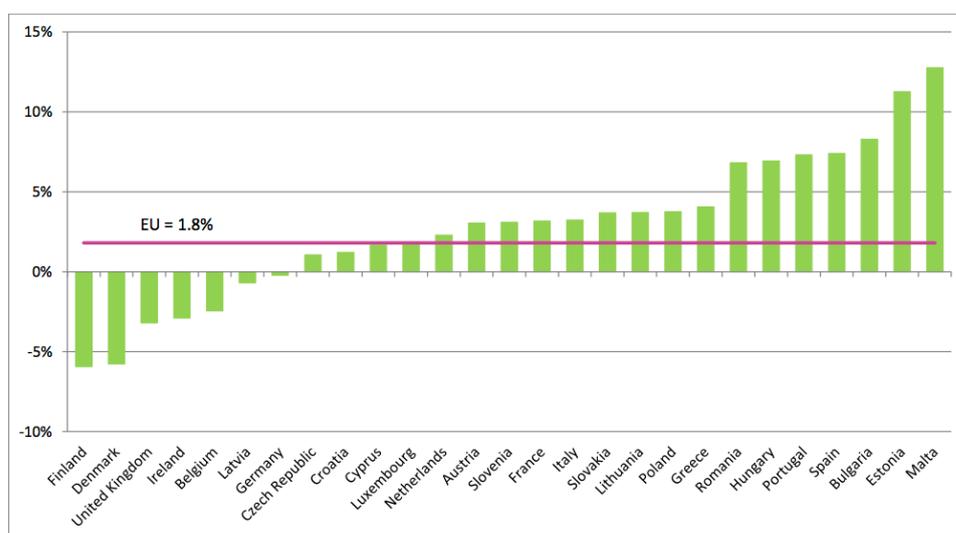


Figura 9 - Aumento emissioni CO₂ nel 2017 (Da: Eurostat, "Early estimates of CO₂ emissions from energy use")

Da un'analisi del ciclo di vita delle emissioni di CO₂ emessa dalla produzione delle malte si evince che le cause di queste emissioni sono sostanzialmente [25-28]:

- La cottura del cemento avviene attraverso combustione: i materiali grezzi devono essere riscaldati a 1450°C per formare il materiale intermedio, *clinker*, che viene poi polverizzato e mescolato con gesso per realizzare il classico cemento Portland e per raggiungere queste alte temperature ci vogliono notevoli quantità di carburante. Questa operazione rappresenta circa il 40% delle emissioni di anidride carbonica associate al cemento;
- La calcinazione (decomposizione termica) del carbonato di calcio in ossido di calcio durante la produzione del clinker ha come sottoprodotto proprio CO₂:

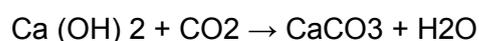


Questa operazione rappresenta circa il 50% delle emissioni di anidride

carbonica associate al cemento, nonché circa il 38% delle emissioni totali derivanti dalla produzione del calcestruzzo;

- Le restanti emissioni dalla produzione di cemento sono ripartite tra il trasporto di materie prime, le operazioni di equipaggiamento, l'elettricità per alimentare i macchinari per la produzione.

Quando un prodotto inizia la sua vita utile come materiale da costruzione, una parte delle emissioni di CO₂ perse durante la calcinazione viene riassorbita dall'atmosfera attraverso una reazione chimica, la *carbonatazione*:



e si verifica in prossimità delle superfici esposte di materiali in calcestruzzo. La ricerca su scala mondiale ha concluso che una media del 16,1% delle emissioni di CO₂ create dalla produzione di calcestruzzo è assorbita attraverso la carbonatazione durante la vita di servizio del materiale, con un ulteriore 1,4% assorbito durante la demolizione e un altro 0,1% durante lo smaltimento o riutilizzo di rifiuti concreti.

Annualmente vengono prodotti nel mondo circa 10 miliardi di tonnellate di cemento, prevalentemente Portland e si prevede che in media potrebbe aumentare nei prossimi 30 anni quasi fino a quadruplicarsi [8].

Paesi	Produzione 2010 (in migliaia di tonnellate)	Consumo pro-capite 2010 (in kg per abitante)	Produzione 2014 (in migliaia di tonnellate)	Consumo pro-capite 2014 (in kg per abitante)
Germania	30.150	301	32.009	388
Italia	34.408	565	21.541	354
Spagna	26.020	532	14.490	312
Francia	19.300	313	16.426	245
Regno Unito	8.000	159	9.280	144

Figura 10 - Produzione cemento in alcuni Paesi europei e consumo pro-capite, AITEC 2014 (Da: "Rapporto Cave 2017", Legambiente)

Tale crescita determina un grande rischio per l'impatto che può provocare sull'ambiente. Si parla quindi a livello globale, ma se restringiamo il campo del settore delle costruzioni a livello europeo le stime dell'*Euroconstruct* per l'anno 2017 relative ai dati di 19 Paesi dell'UE, Italia compresa, sostengono che il settore sia cresciuto del 3.5%, registrando l'aumento più marcato dal 2006.

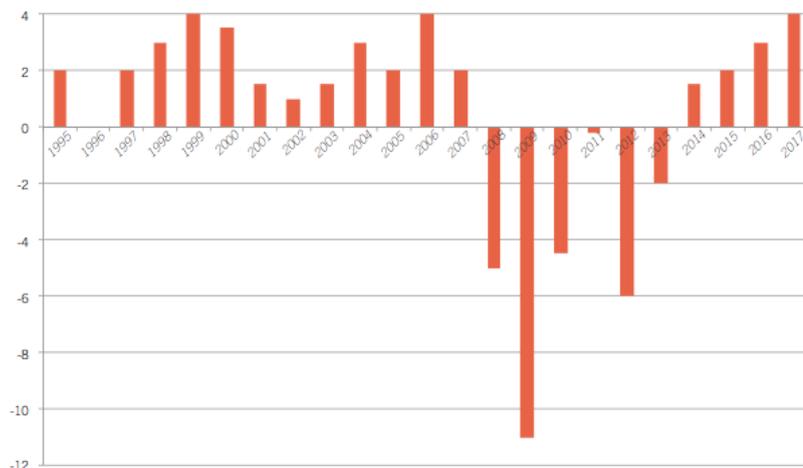


Figura 11 - Output delle costruzioni ($\Delta\%$ anno - 1), Euroconstruct

Le previsioni fatte al 2017 hanno stimato un aumento del volume delle costruzioni in Europa del 2.6% nel 2018, del 2.1% nel 2019 e un ulteriore aumento dell'1.1% per il 2020.

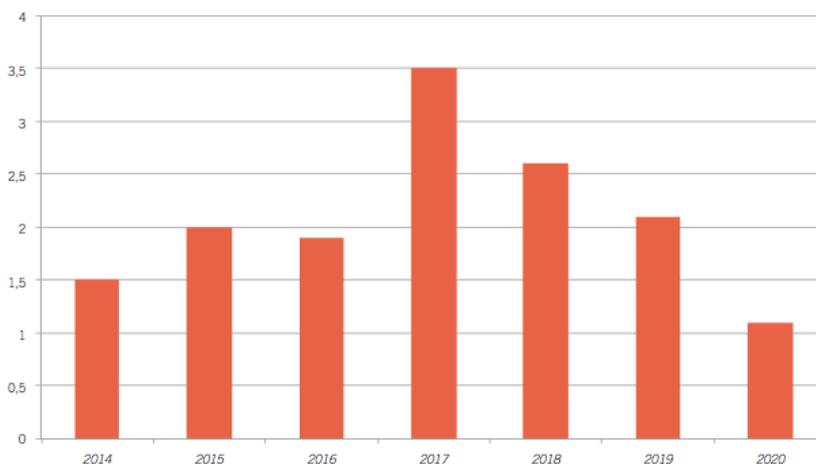


Figura 12 - Previsioni output Europa ($\Delta\%$ anno - 1), Eurconstruct

Tali crescita riguarderanno principalmente l'edilizia residenziale, della ristrutturazione, quindi meno rilevante sarà il settore relativo alle nuove costruzioni. I vincoli che incidono sulla domanda di nuove costruzioni sono lo stato critico delle finanze pubbliche, gli alti prezzi degli immobili e la crescente mancanza di terreni edificabili. Conseguentemente il calcestruzzo dovrà obbligatoriamente rispondere alle esigenze di sostenibilità nelle costruzioni ed è per questo che in Italia e in Europa si sta passando alla concezione di un'economia "circolare" che consiste in [9]:

- Produzione;

Introduzione

- Consumo;
- Riciclo degli scarti;
- Riutilizzo.

Esistono già diverse soluzioni tecniche per ridurre tali emissioni durante la produzione del calcestruzzo, prima tra tutte, come per quasi tutti i settori industriali, l'utilizzo di fonti di energia rinnovabili e carburanti alternativi che emettano meno anidride carbonica. Per le emissioni derivate chimicamente durante il processo di calcinazione, la soluzione potrebbe essere di utilizzare materiali supplementari o cementi alternativi che ottimizzino la produzione riducendone gli sprechi, anche il calcestruzzo stesso riciclato. Per esempio con l'utilizzo di silicati di magnesio al posto dell'ordinario cemento Portland si riescono a ridurre le temperature durante la produzione, si emette meno CO₂ e addirittura sono in grado di assorbirne notevoli quantità durante il raffreddamento e la posa in opera [5].

La parte di emissioni che non è possibile evitare in alcun modo, si potrebbe pensare di catturarla e per esempio utilizzarla come materia prima industriale. Ad esempio già dal 2010 la società californiana *Calera* trasformava il carbonio emesso dalle industrie in componenti per asfalto e calcestruzzo: è un processo chiamato CMAP che coinvolge i gas di combustione i gas di combustione attraverso l'utilizzo di acqua marina a pH regolato da soluzioni alcaline e può eliminare fino a circa l'80% delle emissioni. È inoltre in grado di neutralizzare altri inquinanti come mercurio, ammoniaca e azoto e cattura il 95-98% di anidride solforosa proveniente sempre dai gas di combustione [5].

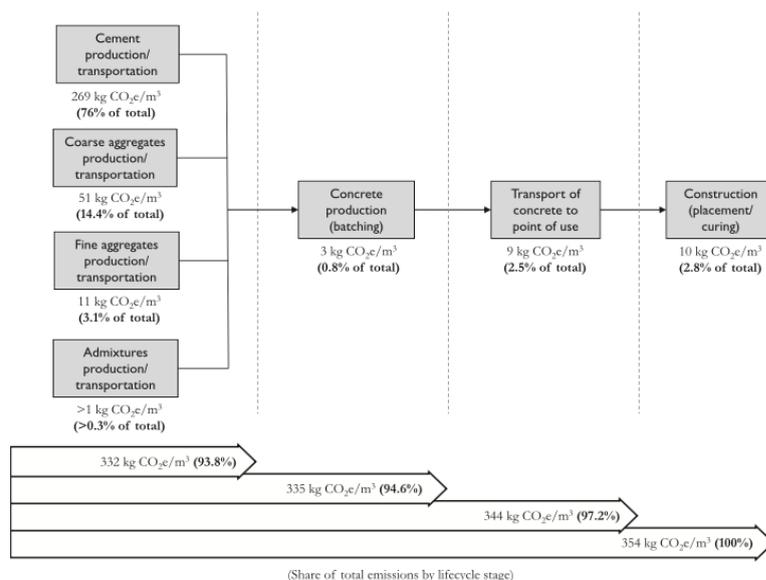


Figura 13 - Riassunto ciclo di vita di 1m³ di calcestruzzo prodotto con Cemento Portland ordinario (da L.K. Turner, F.G. Collins, Carbon dioxide equivalent emissions: a comparison between geopolymers and OPC cement concrete, Construct. Build. Mater. 43-201)

1.3. Problematiche ambientali relative al reperimento degli aggregati

Non di minore impatto sull'ambiente è il problema relativo al reperimento degli aggregati ordinari per la produzione di calcestruzzi e malte, principalmente legato all'attività estrattiva.

Nell'ottica di un'economia circolare nel settore delle costruzioni, l'intento è quello di ridurre il prelievo di materiali naturali, promuovendo l'utilizzo di aggregati riciclati e una più attenta e scrupolosa progettazione a tutela del territorio che deve fare i conti con una risorsa non rinnovabile come il suolo. Il *Nuovo Rapporto Cave* promosso da Legambiente nel Febbraio 2017 propone un'attenta analisi del settore dell'attività estrattiva e ne mostra gli impressionanti dati relativi al territorio italiano: 2012 Comuni hanno almeno una cava attiva sul proprio territorio e circa 1000 ne hanno almeno due; di questi almeno 1680 hanno almeno una cava abbandonata o dismessa e 1150 con almeno due siti. In totale le cave attive sul nostro territorio sono 4752 e almeno 14mila quelle dismesse, comprendenti quelle presenti in regioni in cui c'è monitoraggio e quelle in cui non esiste [8].

Regioni e Province Autonome	Cave Attive	Cave Dismesse e/o Abbandonate	Piani Cava (regionali e/o provinciali)
Abruzzo	265	640	NO
Basilicata	63	35	NO
Pr. Bolzano	102	33	NO
Calabria	237	49	NO
Campania	48	312	SI
Emilia-Romagna	177	63	SI
Friuli Venezia Giulia	64	-	NO
Lazio	260	475	SI
Liguria	104	380	SI
Lombardia	653	2.965	SI
Marche	181	1.002	SI
Molise	52	17	NO
Piemonte	394	224	NO*
Puglia	396	2.522	SI
Sardegna	303	492	NO
Sicilia	420	691	SI
Toscana	380	1.208	SI
Pr. Trento	151	1.107	SI
Umbria	83	77	SI
Valle d'Aosta	31	20	SI
Veneto	388	1.102	NO
TOTALE	4.752	13.414	

Figura 14 - Situazione cave nelle regioni italiane, Legambiente su dati Regioni, ISPRA e ISTAT

L'estrazione degli aggregati per la produzione del cemento, sabbia e ghiaia, costituisce il 61% della totalità di materiali ricavati da cave in Italia. Dai dati raccolti negli ultimi anni si rileva che gli inerti estratti da cava in Italia, parliamo quindi di sabbia, ghiaia, pietrisco per calcestruzzo e cemento, sono stati circa 80 milioni del 2012 e 53 milioni nel 2015. Allo stesso tempo i rifiuti da costruzioni e da demolizione sono cresciuti notevolmente, fino a raggiungere 53 milioni di tonnellate l'anno, di cui il 90% è destinato alla discarica. È evidente quindi l'uso eccessivo delle cave, ma anche delle discariche, per cui bisogna assolutamente affidarsi all'applicazione di aggregati riciclati.

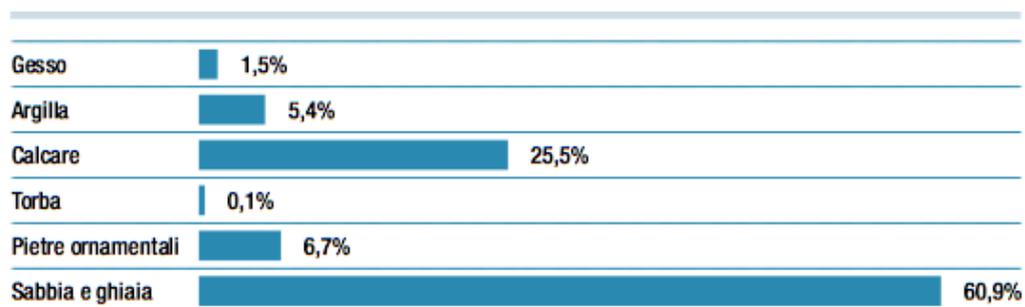


Figura 15 - Ripartizione gruppi materiali estratti dalle cave, Legambiente 2016

Il punto cruciale del rapporto di Legambiente è sottolineare quanto oggi sia davvero possibile porre rimedio a questi problemi e quindi spinge verso una profonda innovazione del settore dell'attività estrattive. La realizzabilità di questo obiettivo è dimostrata da diversi Paesi europei che hanno già attuato politiche di questo tipo a tutela del territorio, imponendo un'adeguata tassazione e promuovendo il riutilizzo dei rifiuti stessi delle costruzioni. È stato ampiamente dimostrato dall'esperienza di questi Paesi quanto ormai tali materiali possano garantire le stesse prestazioni degli aggregati naturali, potendoli quindi sostituire in ogni uso. La sfida lanciata dall'UE, stabilita dalla già citata *Direttiva Europea 2008/98/CE*, è di raggiungere entro il 2020 un quota pari al 70% riguardante il recupero di materiali inerti. Oggi siamo ancora a circa il 10% della capacità di recupero, mentre Paesi come l'Olanda, l'Irlanda, la Danimarca e la Germania sono da esempio, avendo già raggiunto rispettivamente il 98%, 97%, 92% e il 91% dei materiali recuperati.

Uno dei principali ostacoli all'attuazione di questo processo è dato dal quadro normativo decisamente poco chiaro e soprattutto datato nei confronti dell'attività estrattiva. Tale settore, seppure così delicato e di interesse molto attuale, è governato a livello nazionale dal *Regio Decreto n° 1443 di Vittorio Emanuele III del 1927* che tende a promuovere lo sviluppo di tale attività, non considerando

minimamente l'impatto che questa avrebbe potuto e ha provocato al territorio.

50 anni dopo con il *DPR 616/1977* sono state trasferiti alle regioni i poteri in materia, ossia le funzioni amministrative relative all'attività estrattiva e di conseguenza sono nate le Normative Regionali, che però si trovano ancora in situazioni di grave arretratezza. Tale quadro normativo risulta quindi totalmente inadeguato e privo di una pianificazione completa e di controlli pubblici prudenti. In tal modo si lascia il potere decisionali nelle mani di chi concede l'autorizzazione, preoccupante anche per la presenza della criminalità organizzata che si trova spesso a gestire il ciclo del cemento e il controllo della cava.

La *Direttiva Europea 85/337*, che stabilisce che l'apertura di nuove cave debba essere subordinata alla procedura di **Valutazione di Impatto Ambientale (VIA)**, in Italia è stata recepita nel 1996, prevedendo che fossero sottoposte a tale procedura le cave con più di 500mila m³ di materiale estratto o con un'area interessata superiore a 20 ettari. Da uno studio condotto dall'Università Bicocca di Milano nel 2012 si è riscontrato che il 99,5% delle imprese nel campo dell'attività estrattiva italiane non rientra nei parametri della *VIA* vista la grandezza delle cave e presentano poche garanzie riguardo la loro corretta gestione.

La *Direttiva 21/2006* prevede per tutti gli stati membri l'adozione di misure severe sulla gestione dei rifiuti derivanti dall'attività estrattiva e li obbliga alla redazione di un piano che regoli la loro massima riduzione e il successivo trattamento, recupero e smaltimento nell'ottica di uno sviluppo sostenibile. È esattamente ciò che manca in Italia, un piano che gestisca tale attività in maniera chiara e definita.

Importante è il *Decreto del Ministero dell'Ambiente 203/2003*, con cui si obbligano gli enti pubblici ad utilizzare beni realizzati con materiale proveniente da inerti riciclati, ma la poca informazione degli Enti Locali fa sì che tale obbligo non venga soddisfatto.

Di più recente pubblicazione, il 21 gennaio 2016, è stato reso noto il *Decreto del Ministero dell'Ambiente* che emana i **Criteria Ambientali Minimi (CAM)**, per l'affidamento dei lavori di

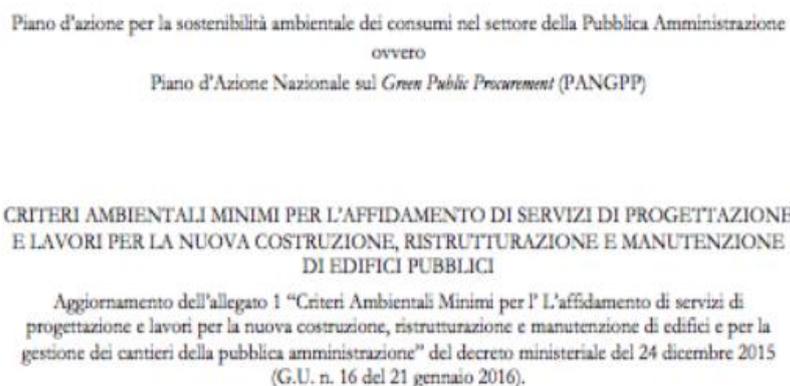


Figura 16 - Pubblicazione CAM sulla Gazzetta Ufficiale

progettazione, ristrutturazione e manutenzione di edifici e la gestione dei cantieri della Pubblica Amministrazione. Definiscono, inoltre, criteri per la valutazione dei progetti che partecipano alle gare pubbliche e i contenuti minimi di materia riciclata che devono contenere i materiali utilizzati: i calcestruzzi devono contenere almeno il 5% di materia riciclata, somma totale delle percentuali contenute nei singoli componenti. Ancora, prevedono l'obbligo di redigere un piano di gestione dei rifiuti prodotti in fase di progetto in cui almeno il 70% dei materiali venga avviato al recupero [10].

Nel prossimo capitolo verranno trattate alcune delle possibili soluzioni attuabili, ossia si parlerà di possibili sostituti dell'aggregato derivante dall'estrazione da cava.

Capitolo 2. Possibili sostituti dell'aggregato vergine

Sono stati condotti diversi studi al fine di fornire una soluzione efficace per il conseguimento di riduzioni significative dell'impronta ecologica del settore delle costruzioni. Tali soluzioni devono essenzialmente garantire una riduzione delle emissioni di anidride carbonica e di utilizzo di materiale derivante da estrazione da cava.

Parleremo in particolare di alcuni possibili sostituti dell'aggregato vergine, quali aggregati derivanti dal riciclo stesso del calcestruzzo (RCA), gomme provenienti da pneumatici fuori uso (PFU), il cui smaltimento rappresenta un altro punto critico nei riguardi della sostenibilità ambientale e materie plastiche riciclate.

L'obiettivo deve essere anche quello di fissare criteri tecnici e ambientali contenenti regole sulle caratteristiche che gli aggregati devono possedere per stabilire quando un rifiuto, a valle di determinate operazioni di recupero, diventi una materia prima secondaria.

2.1. Recycled coarse aggregate (RCA)

Valutando il ciclo di vita del calcestruzzo, si osserva che esso ricade nei cosiddetti C&DW, rifiuti da costruzione e demolizione, ossia dopo il suo utilizzo è destinato alla demolizione e al deposito in discarica. Di conseguenza circa il 33% dei rifiuti prodotti in Europa da manufatti in calcestruzzo deriva dalla loro demolizione.

Le Norme Tecniche per le Costruzioni del 14 gennaio 2008 affermano che “sono idonei alla produzione del calcestruzzo per uso strutturale gli aggregati ottenuti dalla lavorazione di materiali naturali, artificiali ovvero provenienti da processi di riciclo conformi alla norma europea armonizzata UNI EN 12620 e, per gli aggregati leggeri, alla norma europea armonizzata UNI EN 13055-1” [...] “è consentito l'uso di aggregati grossi provenienti da riciclo, secondo i limiti della Tabella 11.2.III, a condizione che la miscela di calcestruzzo confezionata con aggregati riciclati venga preliminarmente qualificata e documentata attraverso idonee prove di laboratorio.”

Possibili sostituti dell'aggregato vergine

Origine del materiale da riciclo	Classe del calcestruzzo	percentuale di impiego
Demolizioni di edifici (macerie)	= C 8/10	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%

Tabella 4 - Tabella 11.2.III NTC 2008

Per individuare i requisiti chimico-fisici che gli aggregati riciclati devono rispettare, in funzione delle prestazioni e della destinazione d'uso del calcestruzzo in esame, si fa riferimento alle norme *UNI 8520-1:2005* e *UNI 8520-2:2005*, le quali definiscono anche le quantità massime di aggregato da riciclo utilizzabili.

La fattibilità della produzione di tali aggregati nella composizione del calcestruzzo per uso strutturale è stata ampiamente dimostrata tramite studi a livello internazionale, tramite i quali è possibile mettere a confronto le caratteristiche e le prestazioni di un calcestruzzo ordinario e uno della stessa classe di resistenza confezionato con aggregati da riciclo: a parità di resistenza a compressione, le caratteristiche determinate per il calcestruzzo con materiale da riciclo risultano [11]:

- Resistenza a trazione inferiore circa del 10%;
- Modulo elastico inferiore circa del 20%;
- Uguale grado di vulnerabilità alla fessurazione da ritiro igrometrico;
- Uguale tensione di aderenza delle barre di acciaio;
- Durabilità più o meno equivalente in termini di resistenza a cicli di gelo e disgelo, resistenza alla penetrazione di agenti aggressivi per le armature, resistenza all'attacco solfatico;
- Nessuna cessione di sostanze pericolose per l'ambiente.

È possibile valutare l'andamento nei singoli paesi europei circa le quantità prodotte e le percentuali medie di riciclaggio dei rifiuti da C&DW. Dallo studio *Service Contract on management of construction and demolition waste – draft final report task 2*, tratto dalla relazione *"I rifiuti da scavo, demolizione e costruzione: iniziative di riduzione, recupero e riciclo"*, approvata nel 2010 dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, si ricavano i dati che definiscono una notevole differenza di andamento tra paesi nord-europei e sud-europei: i primi hanno già raggiunto l'obiettivo della Direttiva Europea, ossia il recupero di almeno il 70% dei materiali,

mentre i secondi si stanno piano piano ancora avvicinando all'obiettivo. Per alcuni paesi, inclusa l'Italia, non ci sono dati disponibili per effettuare tale stima [11].

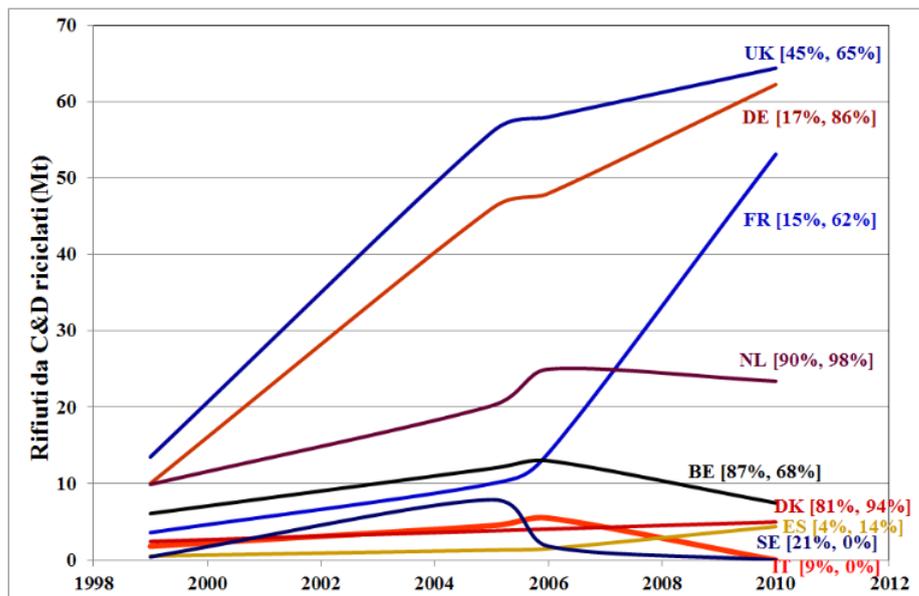


Figura 17 - Dati sulle percentuali medie di riciclaggio (1999;2010) di rifiuti da C&DW in EU (Da: "Aggregati riciclati nel calcestruzzo" di Giacomo Moriconi)

2.2. Gomma da pneumatico a fine vita

Uno pneumatico è sommariamente costituito dalle seguenti parti strutturali [34]:

- *Battistrada*, la parte direttamente a contatto con il terreno e che ne assicura l'attrito, con particolare attenzione al disegno per garantire aderenza sulle superfici bagnate: infatti una prima parte, con dei canali che vanno dal bordo al centro del battistrada, serve proprio per allontanare l'acqua e così permette alla restante parte di fornire attrito. Per i pneumatici invernali la profondità del battistrada è tale da avere un incremento di trazione e hanno una composizione più morbida;
- *Carcassa*, la parte strutturale su cui è vulcanizzato il battistrada e per le autovetture, diversamente dagli autocarri, include la componente tessile e hanno una percentuale minore di acciaio;
- *Spalla*, la parte laterale della carcassa che minimizza la percezione delle irregolarità del terreno sul veicolo, grazie alla flessibilità verticale, mentre la rigidità orizzontale permette il trasferimento dei carichi sul terreno;
- *Tele*, i piani di materiale posti tra carcassa e battistrada.

Possibili sostituti dell'aggregato vergine

Distinguiamo quindi due categorie principali di tipologie di pneumatico, nel settore delle autovetture e in quello degli autocarri, oppure semplicemente li distinguiamo in base al loro peso. Sono composti principalmente, per entrambi i settori, da gomma naturale e gomma sintetica, con componente elastomerica costituita dal copolimero Stirene-Butadiene (SBR), e miscela di nerofumo, tessile, acciaio, zolfo, ossido di zinco e additivi chimici, tali da realizzare specifiche caratteristiche e proprietà dello pneumatico. La gomma così composta è poi sottoposta a processi di vulcanizzazione che realizzano i legami tra le molecole per attribuire caratteristiche di robustezza ed elasticità; diventa così impermeabile ai gas, resistente alle abrasioni, al calore e alle azioni chimiche.

materiale	autoveicolo	autocarro
Gomma/elastomeri	48%	43%
Nero fumo	22%	21%
acciaio	15%	27%
tessile	5%	-
Ossido di zinco	1%	2%
zolfo	1%	1%
Altri additivi chimici	8%	6%

Figura 18 - Composizione gomma da PFU (Da: "Il riciclo: La Gomma" di Adriano Magliocco)

Le proprietà dei pneumatici determinano i trattamenti che possono essere effettuati al termine del loro ciclo di vita su strada, seppure tali trattamenti e le diverse forme di riciclaggio siano anche funzione di politiche nazionali, del mercato dei prodotti recuperati e quindi dell'economia. Generalmente i possibili reimpieghi dello pneumatico sono come combustibile alternativo o realizzazione di polveri e granuli come materia prima secondaria.

Il recupero e lo smaltimento di rifiuti in gomma, in particolare degli pneumatici fuori uso (PFU), ha suscitato negli ultimi anni crescente interesse, essendo la gomma un materiale recuperabile sia sotto forma di materiale che di energia, grazie all'elevato potere calorifico assimilabile a quello del carbone o dell'olio combustibile (circa 7500-8000 kcal/kg) [34].

Entriamo nello specifico delle due categorie in cui si distingue quindi il recupero di gomma:

- Attraverso la *triturazione* si riduce la granulometria del rifiuto in gomma fino a consentirne il reimpiego in mescole per produrre altri manufatti e può

avvenire *meccanicamente*, separando la parte in gomma (circa il 70%) da quella tessile e metallica e ottenendo materie prime riutilizzabili sotto forma di polveri o granuli, attraverso *processi criogeni*, in cui la gomma dopo una prima triturazione meccanica grossolana, viene raffreddata per mezzo di azoto liquido e assume una struttura cristallina fragile che facilita la macinazione, o con *metodi elettrotermici*, attraverso cui il pneumatico ridotto grossolanamente viene introdotto in un forno ad induzione elettromagnetica in cui, a temperature di circa 700°C, la gomma carbonizza e all'interfaccia il metallo si distacca dalla gomma. Successivamente con la *devulcanizzazione* in autoclave e la *rigenerazione* della gomma triturata, il materiale recuperato assume una composizione chimica simile a quella di partenza per poterla riutilizzare in nuove mescole.

- La *termodistruzione* permette invece il recupero energetico: i forni degli impianti addetti a questa combustione assicurano trattamenti ecologicamente affidabili ed efficienti, utilizzando la tecnologia a tamburo rotante e quella dei forni a letto fluido. Il riciclaggio energetico infatti non aumenta le emissioni inquinanti in atmosfera più dei combustibili tradizionali, consente la riduzione di consumo dei combustibili fossili che sono in via di esaurimento e permette lo smaltimento di PFU che è particolarmente resistente ai cicli di trattamento. Tali processi per il recupero dell'energia da usare come supplemento al combustibile non rinnovabile per la produzione di energia elettrica, per uso nelle industrie metallurgiche, cartarie o cementizie, è quindi una soluzione sicura, efficace e anche abbastanza economica per ridurre la quantità di pneumatici usati.

2.2.1 Problematiche relative allo smaltimento di PFU

Il problema del recupero e dello smaltimento di pneumatici fuori uso è un tema molto attuale nel nostro Paese e in tutto il mondo: la quantità da gestire solo dell'Unione Europea di pneumatici a fine vita è stata stimata, per esempio nel 2010, oltre 3,3 milioni di tonnellate; in Italia vengono generate circa 250/400mila tonnellate da smaltire [15]. Non essendoci una legge ben chiara e definita che regoli il recupero e lo smaltimento di questi elementi, negli anni sono nate numerose scariche abusive che hanno reso possibile lo stoccaggio abusivo e lo smaltimento illegale. Infatti prima c'era il mercato libero, ossia il gommista poteva contattare direttamente le aziende che operavano nel settore di raccolta e riciclaggio sul territorio e recuperava il costo di tale servizio direttamente dal

cliente. La nascita del *DM 82/2011*, che avrebbe dovuto regolare e fornire maggiore trasparenza al sistema, ha invece creato complicità: tale decreto ha obbligato i produttori di nuovi pneumatici a “gestire” non più pneumatici di quanti venissero immessi nel mercato nazionale, ma i produttori affidano l'attività di raccolta e riciclaggio a terzi e, una volta raggiunto il limite massimo imposto, non hanno più obblighi e il sistema si blocca. In sostanza tutti i soggetti che sarebbero obbligati a ritirare i PFU, quindi gli stessi produttori, dichiarano di aver già raggiunto il limite e i pneumatici rimangono bloccati presso i gommisti, le autofficine ecc., nonostante questi ultimi abbiano già versato l'eco contributo. Quindi se prima solo pochi soggetti operavano illegalmente, ora tutti i produttori di rifiuto, come i gommisti, si trovano in una condizione di illegalità involontaria, stoccando pneumatici che il sistema non riesce a smaltire. In pratica il consumatore versa il contributo al momento dell'acquisto dello pneumatico i produttori poi in maniera non corretta soldi che avrebbero finalità pubbliche. Conseguentemente risultano penalizzati tutti gli impianti di riciclaggio [13, 14].

Operativamente i pneumatici raccolti sono destinati ad impianti di trattamento finalizzati ad un vero e proprio riciclaggio che trasforma il PFU in una materia prima secondaria, oppure vengono semplicemente tritati per essere usati per esempio nella produzione di un combustibile usato nei forni dei cementifici.

Privilegiando la combustione e il recupero energetico, queste operazioni si cerca di eseguirle in paesi dove il controllo ambientale sia minimo, molte volte all'estero, ignorando ancora una volta ciò che è stato emanato dalla Direttiva Europea, ossia di cercare di trattare i rifiuti il più possibile vicino a dove vengono prodotti. In questo modo non solo vengono incrementate le emissioni di CO₂ a livello globale derivanti dalla combustione stessa e dalla produzione di materie prime vergini in assenza di quelle secondarie, ma aumentano anche a causa dei maggiori trasporti [13].

È evidente quindi la necessità di una regolamentazione più chiara e decisa e l'esigenza di sviluppare metodi innovativi per lo smaltimento degli PFU in maniera sostenibile.

2.2.2. Il Rubbercrete

Numerosi sono ormai gli studi che dimostrano la possibilità di creare calcestruzzi cementizi alternativi e sostenibili, proprio grazie alla presenza di particelle di gomma recuperata da pneumatici fuori uso che sostituiscano parzialmente l'inerte ordinario. Tale materiale è interessante per la sua elasticità, leggerezza, capacità di isolamento termico e acustico e di assorbimento di energia, utile per esempio in caso di barriere antirumore per strutture non portanti [15].

Possibili sostituti dell'aggregato vergine

Sono state analizzate le proprietà fisico-meccaniche dei calcestruzzi così composti, dimostrandone ampiamente la loro affidabilità. Le principali caratteristiche che si ottengono, confrontandoli con la miscela ordinaria, sono sicuramente una riduzione della resistenza a compressione e a flessione all'aumentare del quantitativo di gomma presente, che limita l'applicazione in campo strutturale, ma in compenso dall'analisi del diagramma forza-spostamento della prova di flessione è evidente che il comportamento tenda a diventare sempre più duttile. Tale proprietà ne rende favorevole l'utilizzo in aree ad elevato rischio sismico o comunque soggette a forte azione dinamica [15, 16]].

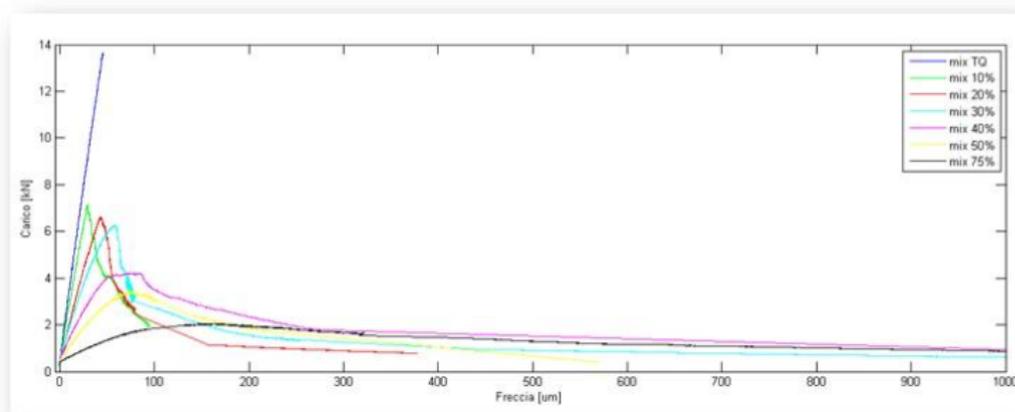


Figura 19 - Diagramma Forza-spostamento all'aumentare delle % di gomma presente (Da: "Rubbercrete" di Giuseppe Carlo Marano, Cesare Marti, Marcello Molfetta, Valentina Sammarco)

Più nel dettaglio, la sostituzione di parte dell'inerte del conglomerato cementizio con particelle recuperate da gomma di riciclo da PFU comporta numerosi vantaggi, tra i quali [37]:

- Primo tra tutti lo smaltimento economico ed efficace del PFU;
- Riduce gli oneri per l'estrazione di inerte da cava e l'impatto ambientale che ne consegue;
- La diminuzione del modulo di Young (E) rende il conglomerato meno rigido e quindi più deformabile e lavorabile;
- Migliora altre proprietà del calcestruzzo come duttilità, resistenza agli urti, capacità di assorbire energia, resistenza agli agenti atmosferici;
- Minor produzione di micro-polveri che consente un'ulteriore diminuzione dell'impatto ambientale dovuto alla produzione del calcestruzzo;
- Riduce anche l'assorbimento di acqua garantendo una più efficace protezione delle armature dalla corrosione.

2.3. Materie plastiche

Un altro materiale i cui rifiuti sono potenzialmente impiegabili nel confezionamento di calcestruzzi più sostenibili, è la plastica: si tratta ovviamente anche qui di rifiuti non biodegradabili e la cui produzione a livello globale rende questo problema non trascurabile. Nel 2014 in Europa si è registrato un consumo di plastica di circa 59 milioni di tonnellate, di cui almeno il 50% avrebbe dovuto essere smaltito, ma in quell'anno solo il 29,7% di tali rifiuti è stato realmente riciclato. Ciò che rimane viene generalmente buttato in discarica, incenerita, creando quantità significative di emissioni tossiche o, peggio, gettato negli oceani generando effetti inquinanti che incrementeranno l'inquinamento globale per anni. E purtroppo i dati sono davvero preoccupanti, in quanto si stima che ogni anno vengano gettati negli oceani tra 4,8 e 12,7 milioni di tonnellate di rifiuti plastici [17].

È per questo che si cerca di fornire una valida alternativa provando a reimpiegare la plastica riciclata sotto forma di aggregati per malte e calcestruzzi, permettendo anche di limitare l'impegno di materiale estratto da cava. Anche in questo caso, come per le gomma, la sostituzione con plastica dell'aggregato ordinario produce una diminuzione di resistenza a flessione e a compressione, ma in quantità accettabili per calcestruzzi sostenibili più leggeri.

Gli studi condotti in ambito europeo che approfondiscono questo tema, hanno evidenziato una certa difficoltà nella condivisione dei risultati, ossia una frammentazione degli esiti che non ha reso possibile analisi comparative dettagliate che consentissero di valutare le diverse opzioni di utilizzo di aggregati plastici riciclati (tipi di plastica, percentuali di sostituzione, ecc.) [38]. Si potrebbe far riferimento alle direttive della norma UNI 13055-1 da applicare anche agli aggregati di questa natura, e quindi:

Granulometria (UNI EN 933 - 1)	2 - 8
Assorbimento medio di acqua superficiale [%] (UNI EN 1097 - 6)	3 - 30*
Massa volumica media apparente dei granuli pre essiccati [kg/m³] (UNI EN 1097 - 3)	380-500
Massa volumica media in mucchio [kg/m³] (UNI EN 1097 - 3)	140*-300
Percentuale media vuoti intergranulari [%] (UNI EN 1097 - 3)	40 - 70
Resistenza alla frantumazione [N/mm²] (UNI EN 13055 - 1; App. A)	1.90
Contenuto di solfati solubili in acido [%] (UNI EN 1744 - 1)	0.12
Contenuto di sostanze organiche (UNI EN 1744 - 1)	tracce

*valore riferito all'aggregato triturato

Tabella 5 - Valori di soglia UNI 13055-1

In particolare nella sperimentazione oggetto di questa tesi si è fatto uso di polipropilene (PP), acrilonitrile butadiene stirene (ABS), polibutilentereftalato (PBT) e poliammide (PA66).

2.3.1. Polipropilene

Il *Polipropilene* chimicamente è un polimero termoplastico prodotto dalla polimerizzazione del propilene e, a seconda delle condizioni adottate, si considera *isotattico* se le singole molecole sono orientate nello spazio tutte nello stesso modo, altrimenti possono configurarsi in maniera casuale e disordinata [18]. Entrando più nel dettaglio, la polimerizzazione si può schematizzare nel seguente modo:

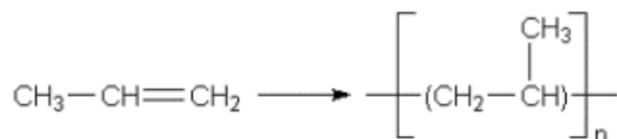


Figura 20 - Polimerizzazione propilene

Può dar luogo a 3 differenti composti a seconda del meccanismo di polimerizzazione:

- *Polipropilene atattico*, in cui le catene polimeriche sono orientate in maniera disordinata e il gruppo metilico (CH₃) è disposto casualmente

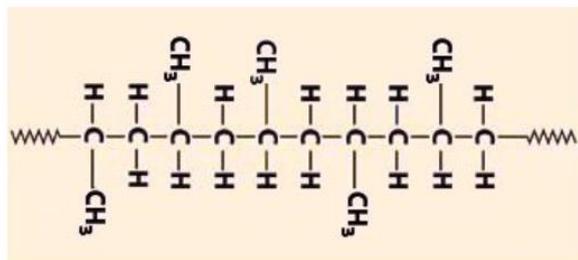


Figura 21 – Polipropilene atattico

- *Polipropilene sindiotattico*, in cui le catene sono in parte cristalline e i gruppi CH₃ si trovano alternati da un lato e dall'altro della catena

Possibili sostituti dell'aggregato vergine

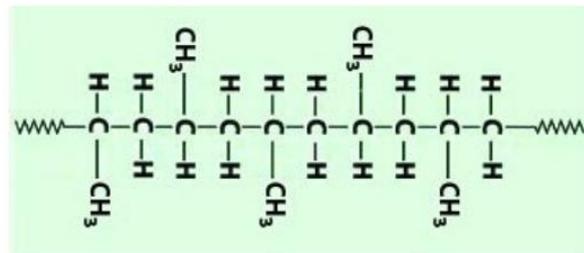


Figura 22 - Polipropilene sindiotattico

- *Polipropilene isotattico*, in cui i gruppi metilici si trovano tutti da un lato della catena del polimero, che quindi risulta ordinato

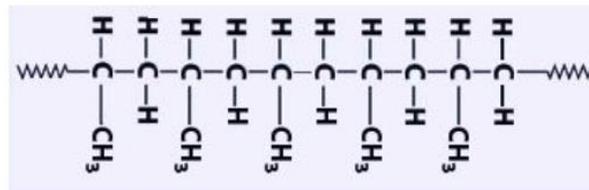


Figura 23 - Polipropilene isotattico

La regolarità del polimero isotattico dà vita ad un'elevata cristallinità che corrisponde a migliori caratteristiche meccaniche, fisiche e chimiche. È quindi poco deformabile, abbastanza rigido e si valuta una resistenza a trazione di circa 25-30 MPa. Ha, inoltre, una buona resistenza all'impatto e all'abrasione, tende ad ossidare alle alte temperature e a diventare fragile a circa 0°C. È un polimero abbastanza versatile che può essere usato sia come plastica che come fibra [18].

2.3.2. ABS

L'*acrilonitrile-butadiene-stirene* è un polimero termoplastico usato per la realizzazione di oggetti rigidi ma leggeri, comunemente usato per strumenti musicali, carrozzerie automobilistiche, giocattoli come i mattoncini LEGO, contenitori per assemblare componenti elettronici. È un copolimero che deriva dalla polimerizzazione dello stirene (40-60%) con l'acrilonitrile (15-35%) in presenza di polibutadiene (5-30%) [19, 21]. La sua formula molecolare è:

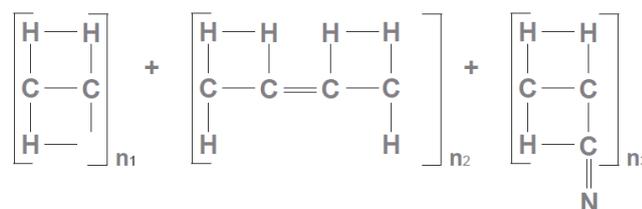
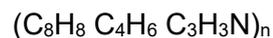


Figura 13 - Composizione chimica ABS

Rilevanti proprietà meccaniche sono la durezza e la resistenza all'impatto, migliorabili attraverso modifica delle proporzioni dei componenti. Ad esempio incrementando la quantità di butadiene aumenta la resistenza all'impatto, a discapito però di altre caratteristiche.

Principalmente l'ABS viene lavorato attraverso estrusione e stampaggio ad iniezione, con temperature di esercizio tra -20°C e 80°C . In particolare lo stampaggio alle alte temperature migliora l'estetica e la resistenza termica, mentre si prediligono basse temperature per migliorare la resistenza all'impatto e la solidità. Per incrementare la resistenza meccanica e termica si possono introdurre fibre di vetro o additivi, raggiungendo temperature di esercizio anche superiori ad 80°C . Se esposto a temperature eccessive è però infiammabile, può sciogliersi ed entrare in ebollizione, ma non produce generalmente agenti inquinanti organici, tranne l'acido cianidrico e il monossido di carbonio [19, 21].

2.3.3. PBT

Il *polibutilentereftalato* fa parte dei poliesteri termoplastici ed è un polimero semicristallino usato nello stampaggio ad iniezione per applicazioni ingegneristiche: nell'industria elettrica ed elettronica viene usato per connettori, prese, bobine, interruttori, quadri elettrici a basso voltaggio; nell'industria automobilistica si usa per realizzare componenti del sistema di accensione, sensori o per l'impianto elettrico. Deriva dalla policondensazione dell'acido tereftalico dimetiltereftalato con 1,4 butanediolo [19].

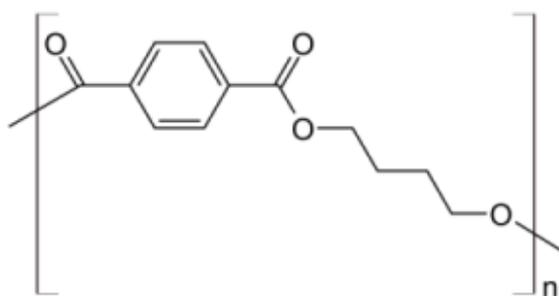


Figura 14 - Composizione chimica PBT

Gode di proprietà come:

- Buona resistenza allo snervamento (anche ad alte temperature);
- Rilevante forza;
- Elevata rigidezza;

Possibili sostituti dell'aggregato vergine

- Elevata durezza;
- Ottima stabilità dimensionale, in quanto presenta un basso coefficiente di espansione termica e altrettanto basso assorbimento d'acqua;
- No creazione fessurazioni per stress ambientale;
- Ottima resistenza a temperature di esercizio continuo fino a 150°C;
- Buona resistenza agli agenti atmosferici;
- Resistente all'abrasione.

2.3.4. PA66

Il *poliammide 66* (o *Nylon 6,6*) è ottenuto dalla polimerizzazione esametilendiammina e acido adipico ed è un materiale termoplastico tecnico semi-cristallino che presenta punto di fusione tra i più alti di tutte le poliammidi disponibili in commercio [20].

Le *ammidi* sono composti organici derivanti dagli acidi carbossilici che hanno la seguente struttura:

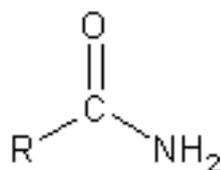


Figura 15 - Ammide primaria

In questo caso si dice *ammide primaria*, ma se uno tra i due atomi di idrogeno è sostituito da un gruppo R si dice *secondaria* e se entrambi gli atomi di idrogeno sono sostituiti da gruppi R, *terziaria*.

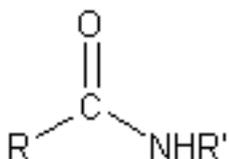


Figura 27 - Ammide secondaria

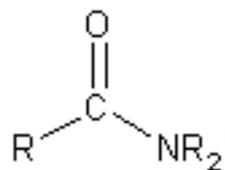


Figura 28 - Ammide terziaria

Le *poliammidi alifatiche* sono polimeri lineari comprendenti gruppi -CO-NH- e distinguiamo principalmente due tipi, il primo derivante da amminoacidi o lattami

Possibili sostituti dell'aggregato vergine

$(-\text{NH-R-CO-})_n$, il secondo da diammine e acidi bicarbossilici $(-\text{NH-R-NH-CO-R}'-\text{CO-})_n$. Sono costituiti da numero legami a idrogeno intra e intermolecolari, proprio per la presenza dei gruppi suddetti, che generano intense forze di coesione dando origine ad una struttura molto cristallina. Questo è facilitato anche dalla regolarità delle catene e conferisce ottime caratteristiche meccaniche come durezza, resistenza all'abrasione ed elevato modulo elastico al materiale.

La più famosa poliammide è proprio il *PA66*, anche detto *Nylon 6,6*, ossia la *poliesametilenadipanamide*. Deriva dalla policondensazione che nasce dalla reazione di sintesi tra l'unità monomerica dell'acido adipico:

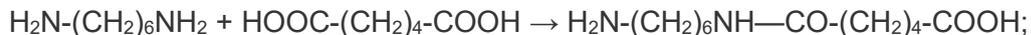


e l'esametildiammina:



Il processo avviene in due fasi:

- Nella prima viene preparata una soluzione acquosa al 50-60% di esametildiamminoadipato:



- Nella seconda, con uno stabilizzante, si effettua la polimerizzazione, continua o discontinua: in quella continua la soluzione di acido adipico e esametildiammina passa in un reattore a 230° in pressione a 17-18 atm, dopo due ore il polimero, scaricata la pressione, viene inserito in un evaporatore con temperatura pari a $260-290^\circ\text{C}$ per 5-10 minuti fino a raggiungere la viscosità voluta. Nel processo discontinuo si riscalda a 220°C alla pressione di 15-20 atm e in due ore circa si incrementa la temperatura fino a 275°C a pressione costante; poi la pressione viene gradualmente diminuita e l'acqua totalmente eliminata. Viene quindi estruso il polimero in forma di filamenti, raffreddati poi con acqua e tagliati in granuli e poi essiccati.

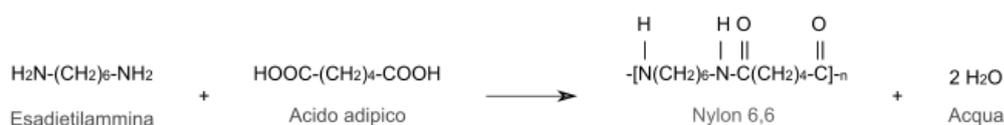


Figura 29 - Reazione chimica Nylon 6,6

2.3.5. Smaltimento e riciclaggio plastica

Anche i rifiuti plastici rappresentano un'importante fonte di recupero di materia ed energia, ma garantire uno smaltimento ecosostenibile e corretto presenta diverse difficoltà, in particolare a causa della quantità elevata di materiale da trattare e alla diversa natura dei polimeri.

Come l'attività di recupero di qualsiasi materiale, anche quella per il recupero di materie plastiche parte ovviamente dalla fase di *raccolta*, che può essere:

- Differenziata per tipologie di prodotto;
- Multimateriale per tipologie di prodotto;
- Indifferenziata di tutte le frazioni di rifiuti;

e di *selezione*, che può essere eseguita meccanicamente o manualmente in base all'impianto ed è quella fase che permette di eliminare eventuali frazioni non plastiche, che vengono poi suddivise in base alla tipologia di polimero [22].

Queste prime due fasi sono molto importanti, infatti è in base a queste che si determina la buona o pessima qualità del prodotto recuperato destinato al riciclo.

Il *riciclo* può essere di due tipi:

- *Eterogeneo*, ossia eseguito tramite lavorazione di un materiale contenente mix di PE, PS, PP, PVC ed eventualmente, anche se in minime quantità, anche PET, altri imballaggi, inerti, metalli. Avviene tramite una prima separazione dimensionale e una successiva magnetica per eliminare le frazioni estranee ancora presenti, seguite dalle fasi di triturazione, densificazione ed estrusione (possono anche essere eseguite solo in parte o solo alcune). Questo tipo di riciclo presenta difficoltà legate alle diverse temperature di lavorazione che presentano i diversi polimeri.
- *Omogeneo*, eseguito quindi su materiale polimerico termoplastico omogeneo, accertandosi che non ci siano polimeri di altra natura o inerti e additivi che potrebbero pregiudicare il processo. Quindi la plastica viene accuratamente selezionata in base alla tipologia del polimero e questo può avvenire con diversi metodi: separazione magnetica, per densità, per galleggiamento, per proprietà aerodinamiche, per flottazione, per separazione elettrostatica. Successivamente vengono avviati alle fasi successive.

Il riciclaggio può avvenire per via meccanica o per via chimica [22].

2.3.5.1. Riciclaggio meccanico

Prevede le fasi di:

- *Triturazione*, attraverso mulini che permettono la macinazione di una ampia gamma di tipi di prodotti, dai film sottili, alle bottiglie, ai pezzi di grosse dimensioni. Produce la grossolana frantumazione del materiale, che assume pezzatura di dimensioni pressoché omogenee ma irregolari, a seguito della quale si riscontra una notevole riduzione di volume rispetto a quello iniziale. L'omogeneità favorisce la lavorabilità del materiale nelle fasi successive.
- *Lavaggio*, eseguito nel caso in cui ci sia bisogno di separare alcune parti che potrebbero danneggiare il materiale durante la fase di trasformazione e dipende principalmente dal settore di provenienza del polimero riciclato. Il sistema più usato consiste nell'inserimento del materiale in una vasca con acqua corrente che lo trascina verso l'uscita della vasca: sul fondo rimangono i materiali che hanno maggiore densità rispetto all'acqua e va bene quindi per polimeri piuttosto leggeri, con bassa densità. Altrimenti il lavaggio può avvenire facendo passare il materiale su un nastro trasportatore su cui viene spruzzata acqua. Se i materiali recuperati presentano etichette adesivo (caso tipico delle bottiglie), vengono trattati con soluzioni basiche che staccano etichetta e colla.
- *Macinazione*, che avviene in un mulino in cui viene ulteriormente ridotta la pezzatura del materiale recuperato.
- *Essiccamento*, ossia, dopo aver centrifugato o pressato il materiale macinato per eliminare l'acqua libera, in corrente d'aria calda o gas combusto, per mezzo di essiccatori a zig-zag viene eliminata anche l'acqua adsorbita per raggiungere tenori residui pari circa al 2-3%. Il materiale essiccato viene poi stoccato nei silos che, con opportuni agitatori, omogeneizzano il prodotto.
- *Granulazione*, che avviene nella parte finale dell'impianto e dalla quale si ottengono i granuli che poi verranno usati nelle successive applicazioni. Dai silos il materiale essiccato viene prelevato e inviato in un estrusore con piastra forata con apertura di diametro di 2-4 mm. Il polimero che esce da questa filiera, fuso, viene poi raffreddato e tagliato in vasca ad acqua o da un sistema di coltelli rotanti in ambiente ad acqua nebulizzata, ossia tagliato a caldo.

2.3.5.2. Riciclaggio chimico

Dai processi termo-chimici degli scarti plastici possiamo ottenere combustibili alternativi a quelli fossili, riducendo quindi l'uso di fonti non rinnovabili e le emissioni di anidride carbonica nell'atmosfera. Tale metodo di riciclo avviene attraverso processi chimici che vogliono decomporre il polimero per recuperare i monomeri di partenza. In particolare si tratta di trattamenti termici grazie ai quali si rompono le catene polimeriche, quali:

- *Pirolisi*, scompone le molecole tramite riscaldamento sottovuoto e può avvenire ad alta o a basse temperature. Si ottiene una miscela di idrocarburi liquidi e gassosi simili al petrolio.
- *Idrogenazione*, ossia degradazione a base di calore e idrogeno tramite la quale si ottengono idrocarburi liquidi.
- *Gassificazione*, ad elevata temperatura (da 800°C a 1600°C) senza aria, che produce una miscela di idrogeno e ossido di carbonio, utilizzabile come combustibile nelle centrali o utile alla lavorazione di altre materie.
- *Chemiolisi*, trasforma le singole materie dismesse nelle materie prime originarie.
- *Glicolisi*, depolimerizzazione attraverso glicol tereftalico.
- *Metanolisi*, depolimerizzazione attraverso metanolo.
- *Ammonolisi*, depolimerizzazione attraverso ammoniaca.

2.3. Altre soluzioni

Un'alternativa all'uso di materiale riciclato al posto dell'aggregato ordinario, è l'utilizzo di nanoparticelle provenienti dagli scarti dell'industria in aggiunta o sostituzione del cemento [23, 24].

Un primo esempio potrebbe essere la **cenere volante**, residuo del carbonio bruciato proveniente dalle centrali termiche, che deve essere smaltito. Il riciclo delle ceneri volanti fornisce una valida alternativa anche a costi contenuti. Il calcestruzzo così ottenuto reagisce con l'idrossido di calcio del cemento e consente la formazione di composti più forti e durevoli. Riduce l'uso di energia e le emissioni di CO₂, riduce il fabbisogno idrico, incrementa la lavorabilità e migliora la resistenza al solfato e all'attacco acido, che lo rende più durevole [33].

Le **scorie d'altoforno granulate** sono il sottoprodotto di ferro e acciaio, perciò la loro composizione dipende dalle materie prime usate nella produzione del ferro.

Possibili sostituti dell'aggregato vergine

Può essere riciclato rendendolo un supplemento al cemento ed è composto da silicati, alluminati, CaO e MgO. Il cemento con queste aggiunte può presentare una resistenza a compressione e a flessione più elevata del normale cemento Portland [33].

Un altro possibile sostituto possono essere i **fumi di silice**, derivanti dalla fusione durante la produzione del metallo. È un materiale pozzolanico che risulta molto efficace grazie alla sua estrema finezza al contenuto di silice (circa 85-90%). Si presenta infatti come una polvere molto fine con dimensione media più piccola del cemento di più 100 volte [33].

Una recentissima ricerca, pubblicata nel luglio 2018 dalla facoltà di Ingegneria Civile della *Girne American University di Kyrenia (Cipro)*, mette a confronto le proprietà meccaniche e termiche di due gruppi di provini: gruppo A realizzato con un mix di cemento con altri materiali di scarto e aggregato ordinario; gruppo B include anche il 30% di aggregati da riciclo (RCA). Tale ricerca vuole migliorare e aumentare l'utilizzo di RCA in calcestruzzi sostenibili.

I materiali utilizzati sono:

- Cemento Portland di tipo CEM-I;
- Ceneri volanti polverizzate, come secondo componente in aggiunta al Portland, classificato come CEM IV;
- Scorie granulari d'altoforno macinate di tipo CEM III;
- Fumi di silice, secondo la Norma EN 13263-1 in forma liquida, ossia contenente per il 50% acqua e per l'altro 50% polvere;
- Aggregato fine naturale, quindi sabbia, con massima dimensione dei granuli di 5mm;
- Inerte ordinario (NCA, natural coarse aggregate), con dimensione massima granuli pari a 20mm;
- Aggregato riciclato (RCA), in dimensioni tra 5 e 20 mm, che include calcestruzzo tritato, pasta di cemento idrata e altri scarti di materiali in minori quantità.

Si riportano di seguito i risultati relativi a:

Possibili sostituti dell'aggregato vergine

- **Forza di compressione:**

Compressive strength [N/mm ²]									
NCA					RCA				
7 Day		28 Day			7 Day		28 Day		
Mix No.	Cube	Cylinder	Cube	Cylinder	Mix No.	Cube	Cylinder	Cube	Cylinder
A1	35	28	45	38	B1	27	23	39	33
A2	27	23	42	35	B2	22	19	42	36
A3	26	22	42	36	B3	21	18	37	31
A4	24	20	41	35	B4	21	17	40	34
A5	30	25	41	34	B5	26	22	42	36
A6	29	24	41	34	B6	25	21	41	35
A7	29	25	40	34	B7	24	21	39	33
A8	33	29	44	37	B8	28	24	42	35
A9	31	26	44	36	B9	30	26	41	35
A10	30	26	43	37	B10	26	22	38	32

Tabella 6 - Forza di compressione provini gruppo A e gruppo B

- **Resistenza flessionale:**

Flexural strength [N/mm ²]					
NA			RCA		
Mix No.	7 Day Beam	28 Day Beam	Mix No.	7 Day Beam	28 Day Beam
A1	3.5	4.5	B1	2.7	4.0
A2	2.8	4.2	B2	2.3	4.2
A3	2.6	4.3	B3	2.2	3.8
A4	2.5	4.2	B4	2.1	4.1
A5	3.0	4.2	B5	2.6	4.2
A6	2.9	4.1	B6	2.6	4.1
A7	3.0	4.0	B7	2.5	3.9
A8	3.3	4.4	B8	2.8	4.2
A9	3.1	4.5	B9	3.0	4.1
A10	3.0	4.3	B10	2.6	3.8

Tabella 7 – Resistenza flessionale provini gruppo A e gruppo B

- **Confronto proprietà termiche:**

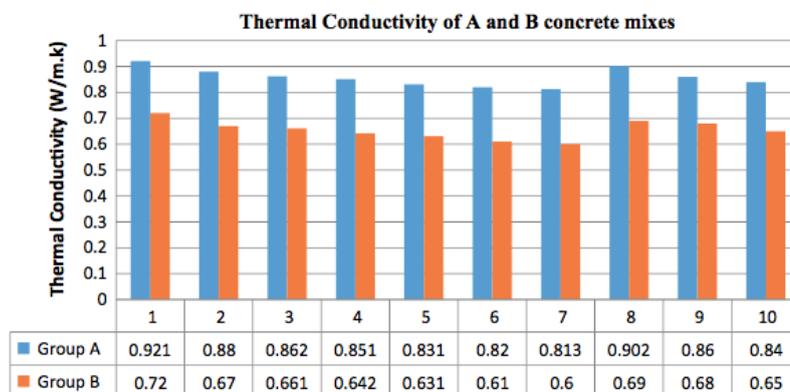


Figura 30 - Confronto Conducibilità termica tra provini 100% NCA e provini 30%RCA + 70% NCA

Possibili sostituti dell'aggregato vergine

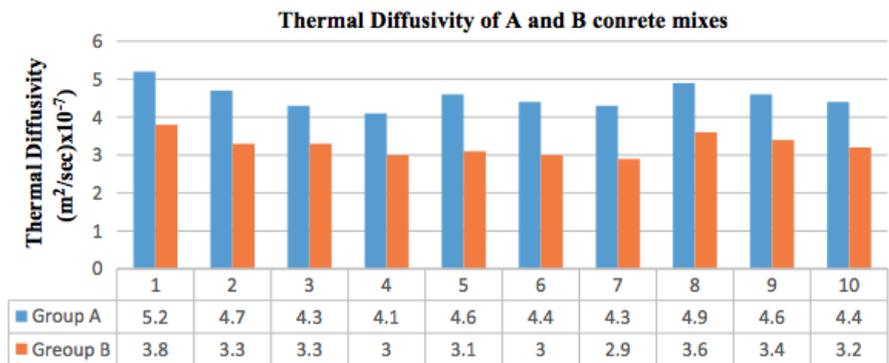


Figura 31 - Confronto diffusività termica tra provini 100% NCA e provini 30%RCA + 70% NCA

- **Confronto densità:**

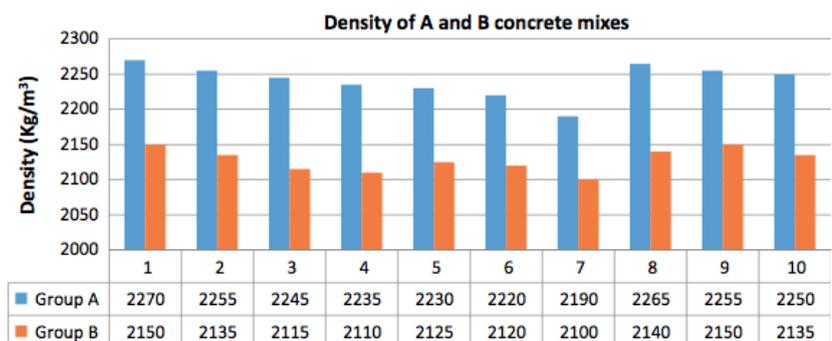


Figura 32 - Confronto densità tra provini 100% NCA e provini 30%RCA + 70% NCA

Questa ricerca mostra che utilizzando sia aggregati da riciclo che aggiunte al cemento ordinario densità, conducibilità e diffusività termica diminuiscono maggiormente rispetto all'uso separato dei due elementi. Tali caratteristiche rendono il calcestruzzo anche più isolante.

Capitolo 3. Campagna di indagine

In questo capitolo viene illustrata la campagna sperimentale eseguita sulle malte cementizie, alle quali è stata applicata la strategia di sostituzione parziale dell'inerte presente nel conglomerato. Gli inerti sostitutivi sono stati ricavati da materiale da riciclo, quali plastiche e gomme recuperate da pneumatici fuori uso, entrambe già presenti in dipartimento, fornite da aziende operanti nel settore del riciclaggio. In particolare 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 *ETRA* (Energie Territorio Risorsse Ambientali), azienda operante nel settore del riciclaggio. Per quanto riguarda la gomma recuperata da PFU, l'analisi è stata effettuata sia con il materiale vergine, utilizzato così come si presentava a seguito della vagliatura, sia dopo aver subito dei processi di modificazione superficiale che hanno lo scopo di migliorare le forze di adesione tra i granuli. I trattamenti effettuati sono due: ossidazione superficiale con trattamenti al plasma e funzionalizzazione dei granuli di PFU con l'utilizzo di alcossisilani, entrambi studiati al variare di parametri operativi tramite analisi di spettroscopia infrarossa. Tali trattamenti sono stati testati e successivamente eseguiti sui granuli di PFU destinati alle malte di cemento in questione, da una tesista del Dipartimento di Ingegneria Chimica del Politecnico di Torino, Luisa Gaiero. I provini così realizzati, sono stati poi sottoposti a prove di flessione e compressione per valutarne e confrontarne le caratteristiche meccaniche. Analoghe prove sono state eseguite su provini realizzati con una malta pronta all'uso a base calce e cemento usata nella costruzione di murature.

3.1. Scelta dei materiali

La Normativa a cui facciamo riferimento per le malte è la norma europea UNI EN 196-1, che descrive i materiali che la compongono, le procedure per la realizzazione dei provini e per le prove da eseguire. La malta non è altro che un conglomerato ottenuto dalla miscelazione in opportune proporzioni di uno o più leganti inorganici, acqua, inerti ed eventuali additivi. Nel presente lavoro sono state trattate malte cementizie e sono stati realizzati provini con due tipi diversi di

legante, cemento Portland e cemento Solfoalluminoso che, miscelato con l'acqua, diventa l'elemento collante del conglomerato, creando una pasta inizialmente lavorabile e deformabile che si indurisce gradualmente fino ad assumere una consistenza pietrosa; l'inerte è costituito da sabbia normalizzata con granuli di piccole dimensioni e realizza lo scheletro della miscela.

3.1.1. Cemento

Le stesse tipologie di provini sono stati realizzati con due diversi tipi di legante, cemento Portland e cemento solfoalluminoso, entrambi inviati dallo stabilimento Buzzi Unicem S.P.A. di Trino Vercellese. Il primo è il cemento Portland II/A-LL 42,5 R, a base di clinker e calcare con un tenore di costituenti minori massimo del 5%, caratterizzato dal rapido sviluppo delle resistenze iniziali, conforme alla norma europea armonizzata UNI EN 197/1 e caratterizzato da una resistenza a compressione dopo stagionatura a 28 giorni maggiore 47,0 MPA [40]. Il cemento solfoalluminoso inviato dallo stesso stabilimento è il NEXT Binder SN05, il quale fa parte di una famiglia di leganti idraulici a base di clinker solfoalluminato ottenuto tramite cottura di una miscela di bauxite, gesso e calcare ad una temperatura di circa 1350°C e successiva macinazione [41]. In particolare il NEXT Binder SN05 è costituito da clinker solfoalluminato, anidride e cemento Portland in ragione del 40% del peso totale, in modo da ottenere prodotti caratterizzati da basso ritiro, rapido sviluppo delle resistenze iniziali e progressivo incremento delle resistenze alle medie e lunghe scadenze, durabilità e bassa permeabilità alle sostanze aggressive.

3.1.2. Inerti polimerici

Come già anticipato, gli inerti sostitutivi della sabbia recuperati da materiale di riciclo sono plastica e gomma. In particolare sono stati usati due tipi di materia plastica, la prima composta da un mix a secco di ABS (acrilonitrile-butadiene-stirene) e PBT (polibutilentereftalato) senza ulteriori cariche, la seconda da mix a secco di PP (polipropilene) caricata con 30% di fibra di vetro e PA66 (poliammide) caricata con 25-30% di fibra di vetro. Per quanto riguarda la gomma da PFU, alcuni provini sono stati realizzati con il materiale semplicemente setacciato e sono state sostituite direttamente le frazioni granulometriche scelte in base alla quantità disponibile, ma bisogna entrare un po' più nel merito dei provini realizzati previo trattamento superficiale della gomma.

3.1.2.1. *Trattamento PFU al plasma*

L'ossidazione con plasma ad aria è stata prima testata con il macchinario March Plasmod, un reattore da tavola che genera il plasma, costituito da un generatore interno RF, una camera di reazione con amplificatore di potenza, un condensatore che permette di controllare che non venga superata la capacità della camera di reazione, una pompa a vuoto connessa al macchinario che permette di ottenere il grado di vuoto desiderato nella camera di reazione [42].

Le variabili operative in questo caso risultano il tempo di residenza, il grado di vuoto e la potenza operativa.

Una seconda campagna di prove è stata fatta con un reattore in grado di lavorare a potenze maggiori (fino a 1000W) e in presenza di solo ossigeno, il PECVD, con sistema ad elettrodi interni e accoppiamento capacitivo come per il precedente. Il range di variabili operative in questo caso si arricchisce della percentuale di ossigeno in camera [42].



Figura 33 - March Plasmod



Figura 34 - Reattore al plasma PECVD

Dopo aver effettuato delle prove sui singoli granuli, determinate le condizioni operative migliori, per il rivestimento dei successivi campioni i granuli sono stati disposti nella camera di reazione ben distesi e in una sospensione su un retino molto fine (fig. 3), in maniera tale da evitare sovrapposizioni in quanto il plasma è in grado di agire solo sulla superficie esposta del granulo, e in questo modo ha agito anche sul lato inferiore.



Figura 35 - Disposizione granuli di gomma da PFU

3.1.2.2. Funzionalizzazione PFU con alcossisilani

Per la silanizzazione il PFU è stato immerso in soluzioni alcossisilani utilizzando il TEOS, ortosilicatico tetraedile: non essendo solubile in acqua, è stato messo in soluzione con etanolo e, per aumentare la velocità di reazione, in alcune prove è stata anche aggiunta una goccia di acido cloridrico al 10% ogni 10ml di soluzione, come catalizzatore acido. I granuli silanizzati sono in grado di reagire con una reazione sol-gel all'interno della malta cementizia. A seguito di diverse prove è stato raggiunto il rapporto ottimale tra tempo di permanenza e concentrazione della soluzione [42].

3.1.3. Malta premiscelata

Alcuni provini sono stati realizzati sostituendo aggregati provenienti da materiale da riciclo direttamente ad una malta premiscelata, la malta Vimark MPD20 [39].

Si tratta di una malta a base di calce e cemento con additivi specifici per migliorarne l'adesione e la lavorabilità, pronta all'uso per la costruzione di murature tradizionali interne ed esterne, conglomerati cementizi, tufo o pietre naturali. Per la sua resistenza a compressione maggiore di 5,0 N/mm², è stata classificata come Classe M5 secondo la Norma EN 1015-11, ma su richiesta è disponibile anche di Classe M10. La resistenza a flessione è dichiarata maggiore di 2,0 N/mm².

È consigliata una quantità di acqua d'impasto compresa tra 20% e 24% in peso e nel nostro caso è stata considerata la media, il 22% del peso totale iniziale disponibile: si è considerata la percentuale sul peso iniziale, nonostante sia stata effettuata la sostituzione con materiale da riciclo e quindi il peso sia cambiato, perché tale sostituzione vedremo in seguito sarà eseguita solo sulle frazioni da 0.5 mm e 1 mm, quindi sull'inerte; la parte fine, che è quella che reagisce con l'acqua, rimarrà pressoché la stessa.

Indicativamente è stata definita dalla ditta fornitrice di questo materiale una curva granulometrica del tipo:

- 34% passante al 100 micron
- 16% residuo al 100 micron
- 18% residuo al 400 micron
- 14% residuo al 800 micron
- 18% residuo al 1.25 micron

3.2. Confezionamento provini

Prima di procedere alla vera e propria preparazione dei provini, è stato necessario verificare la disponibilità in termini di quantità delle varie granulometrie di materiale da riciclo per definire quali andare effettivamente a sostituire all'inerte classico impiegato. Importante specificare che la sostituzione è stata effettuata in termini volumetrici, non in massa, considerando che il peso specifico degli inerti polimerici risulta inferiore a quello della sabbia. Quindi, dopo aver calcolato in laboratorio il peso specifico dei materiali, è stato verificato, mediante setacciatura di tutti i materiali, che il quantitativo di inerte polimerico fosse sufficiente a sostituire le granulometrie preponderanti all'interno di un sacchetto di sabbia normalizzata. È stato possibile quindi procedere al confezionamento dei provini, eseguendo i getti in 3 giornate differenti e lasciandoli maturare, alcuni in acqua e altri in aria, per 28 giorni.

È stata effettuata la stessa operazione anche sulla malta preconfezionata Vimark, nonostante ovviamente non fosse possibile effettuarla solo sulla sabbia, ma sull'intero composto. È stata necessaria, seppure a grandi linee, per poter ottenere le frazioni interessate alla sostituzione.

3.2.1. Verifica granulometrica

La determinazione delle frazioni granulometriche è stata effettuata tramite setacciatura, utilizzando vagli con maglia delle stesse dimensioni sia per la sabbia che per gli inerti provenienti da materiale da riciclo. In più, per questi ultimi, sono stati impiegati anche setacci da 3mm e 4mm, in quanto i granuli derivanti dai processi di riciclaggio hanno dimensioni maggiori rispetto alla sabbia. In particolare sono stati impiegati i seguenti setacci:

- 4,00 mm (solo per gomma e plastica)
- 3,00 mm (solo per gomma e plastica)
- 2,00 mm
- 1,65 mm
- 1,00 mm
- 0,50 mm
- 0,125 mm
- 0,063 mm

La procedura adottata consiste nel:

- Definire la massa iniziale del materiale da setacciare;
- Impilare i setacci con dimensione di maglia crescente dal basso verso l'altro, come in figura n°;
- Versare il materiale nel setaccio superiore;
- Far vibrare la pila di setaccia manualmente o in maniera meccanica (nel caso in questione è stato sfruttato il secondo metodo citato);
- Determinare le masse presenti in ogni setaccio;
- Separare e conservare le varie frazioni granulometriche in sacchetti opportunamente denominati.

Normalmente la somma delle masse trattenute ad ogni setaccio non corrisponde precisamente alla massa totale del materiale impiegato. Questo perché è frequente che parte del materiale rimanga intrappolato nella maglia dei setacci e un'altra piccola quantità può essere persa durante lo spostamento e il versamento dello stesso.

Da questa operazione si determinano:

- Il trattenuto parziale, come percentuale rispetto alla massa totale:

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

con i = i-esimo setaccio

N = numero setacci

Pi = massa trattenuta dall'i-esimo setaccio;

- Il trattenuto cumulativo, nonché la somma di tutti i trattenuti fino al j-esimo setaccio come percentuale rispetto alla massa totale:

$$T_j[\%] = \frac{100 * \sum_{i=1}^j P_i}{\sum_{i=1}^N P_i}$$

con i = i-esimo setaccio

j = j-esimo setaccio

N = numero setacci

Pi = massa trattenuta dall'i-esimo setaccio.

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti.

3.2.1.1. Setacciatura sabbia normalizzata

Nonostante le quantità delle frazioni granulometriche dei sacchetti di sabbia fossero normalizzate, quindi note, l'operazione di vagliatura è stata eseguita per separare le diverse frazioni per poi effettuare la sostituzione di alcune di queste.

Essendo numerosi i provini realizzati, si riportano solo alcuni esempi di risultati ottenuti da setacciatura di alcuni sacchetti di sabbia:

1	Diametri [mm]	Massa trattenuta [g]	Trattenuto parziale [%]	Trattenuto cumulativo [%]	Trattenuto cumulativo da Normativa [%]
	2	19.8	1.482	1.482	0
	1.65	23.7	1.774	3.256	7
	1	432.4	32.365	35.621	33
	0.5	427.4	31.991	67.612	67
	0.125	365.1	27.328	94.940	87
	0.063	67.1	5.022	99.963	99
	< 0,063	0.5	0.037	100	-
		1336	99.963		
	Massa iniziale [g]				
Percentuale massa a fine setacciatura rispetto a quella iniziale [%]					99.0
Percentuale massa persa [%]					1.0
2	Diametri [mm]	Massa trattenuta [g]	Trattenuto parziale [%]	Trattenuto cumulativo [%]	Trattenuto cumulativo da Normativa [%]
	2	15.3	1.131	1.131	0
	1.65	12.9	0.954	2.085	7
	1	406.1	30.019	32.104	33
	0.5	453.5	33.523	65.627	67
	0.125	417.3	30.847	96.474	87
	0.063	47.3	3.496	99.970	99
	< 0,063	0.4	0.030	100	-
		1352.8	99.970		
	Massa iniziale [g]				
Percentuale massa a fine setacciatura rispetto a quella iniziale [%]					100.2
Percentuale massa persa [%]					0.2
3	Diametri [mm]	Massa trattenuta [g]	Trattenuto parziale [%]	Trattenuto cumulativo [%]	Trattenuto cumulativo da Normativa [%]
	2	15.3	1.136	1.136	0
	1.65	12	0.891	2.027	7
	1	397	29.475	31.502	33
	0.5	486.6	36.127	67.629	67
	0.125	382.1	28.369	95.998	87
	0.063	53.4	3.965	99.963	99
	< 0,063	0.5	0.037	100	-
		1346.9	99.963		
	Massa iniziale [g]				
Percentuale massa a fine setacciatura rispetto a quella iniziale [%]					99.8
Percentuale massa persa [%]					0.2

Tabella 8 - Risultato setacciatura sabbia normalizzata

Si evince che i valori di trattenuto cumulativo ottenuti sono vicini a quelli definiti dalla Normativa e inoltre la percentuale di massa persa è sempre minore o al più uguale all'1%, quindi accettabile.

Le granulometrie più presenti sono quelle che si riferiscono ai diametri 1mm, 0.5mm e 0.125mm, quindi si è ritenuto opportuno effettuare la sostituzione di queste frazioni per cercare di ottenere risultati apprezzabili.

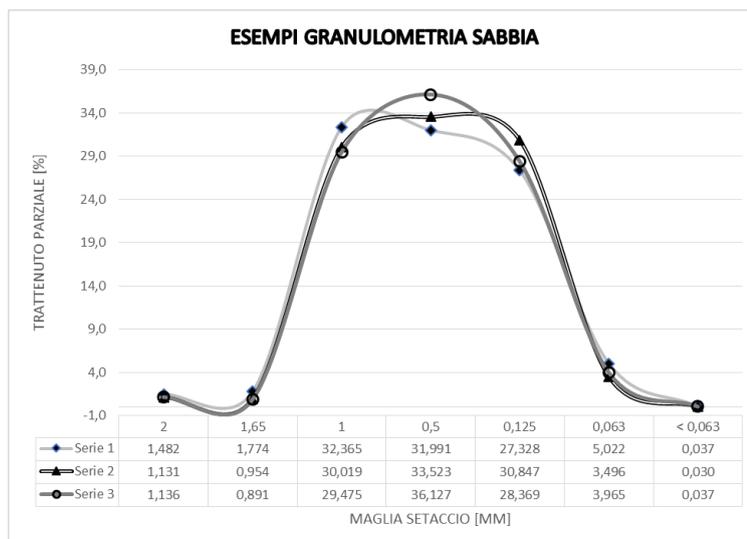


Figura 36 - Granulometria sabbia

Vedremo in seguito che la sostituzione con l'inerte polimerico è stata effettuata solo sulle frazioni da 1 mm e 0.5 mm in quanto non c'era sufficiente materiale da riciclo della frazione da 0.125 mm.

3.2.1.2. Setacciatura gomma da PFU

Come anticipato, per questo materiale sono stati utilizzati anche i setacci da 3mm e 4mm, considerando la pezzatura più grossa di questi aggregati rispetto alla sabbia. L'operazione, come anche per la materia plastica, è risultata un po' più complessa a causa della differente natura chimica, peso specifico e forma dell'aggregato: il basso peso specifico e la forma più piatta e allungata ha fatto sì che spesso il setaccio rimanesse costipato e i tempi necessari ad un'opportuna vagliatura diventavano inevitabilmente più lunghi.

Si riportano di seguito i dati ottenuti:

Diametri [mm]	Massa trattenuta [Kg]	Trattenuto parziale [%]	Trattenuto cumulativo [%]
4	0.292	1.163	1.163
3	14.845	59.118	60.28035522
2	7.592	30.234	90.51411732
1.65	0.296	1.179	91.6928836
1	1.888	7.519	99.21150094
0.5	0.187	0.745	99.9561945
0.125	0.008	0.032	99.9805304
0.063	0.003	0.012	100
	25	100	

Tabella 9 - Risultati setacciatura gomma da PFU

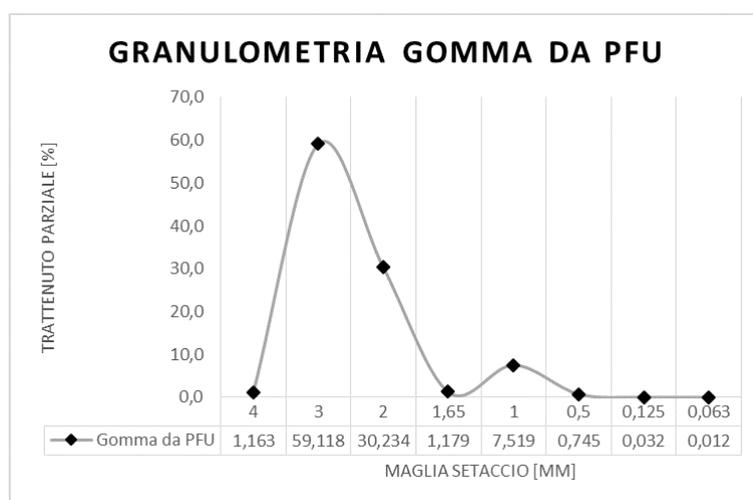


Figura 37 - Curva granulometrica gomma da PFU

Dalla *Tabella 2* e dalla *Figura 5* si nota una bassa percentuale di aggregato trattenuto al setaccio di 0.125 mm tale da non rendere possibile la sostituzione di questa frazione. Sarà più evidente quando verrà mostrato effettivamente il quantitativo necessario, dopo averne calcolata la densità e facendone quindi la sostituzione in volume.

Inoltre, essendo i sacchi di gomma da PFU da 25 kg ed essendo la somma delle masse trattenute ai vari setacci anch'essa pari a 25 kg, non è praticamente stato perso materiale.

3.2.1.3. Setacciatura materia plastica

Stessi problemi riscontrati per la gomma da PFU sono stati riscontrati con le due tipologie di materia plastica esaminate. In questo caso non è stato verificato quanto

Campagna di indagine

materiale è stato perso durante l'operazione di vagliatura, in quanto non è stato possibile pesare il materiale disponibile inizialmente.

Di seguito si mostra ciò che è stato ottenuto, indicando come plastica 1 il mix di ABS e PBT senza ulteriori cariche e come plastica 2 il mix di PP e PA66 con aggiunta di cariche in fibra di vetro:

1	Diametri [mm]	Massa trattenuta [Kg]	Trattenuto parziale [%]	Trattenuto cumulativo [%]
	2	1.913	54.955	54.955
	1.65	0.202	5.803	60.758
	1	0.982	28.210	88.969
	0.5	0.315	9.049	98.018
	0.125	0.069	1.982	100.000
	0.063	0	0.000	100.000
	< 0,063	0	0.000	100
	3.481	100.000		

Tabella 10 – Risultati setacciatura plastica tipo (1)

2	Diametri [mm]	Massa trattenuta [Kg]	Trattenuto parziale [%]	Trattenuto cumulativo [%]
	2	2.125	62.189	62.189
	1.65	0.11	3.219	65.408
	1	0.668	19.549	84.958
	0.5	0.35	10.243	95.200
	0.125	0.162	4.741	99.941
	0.063	0.002	0.059	100.000
	< 0,063	0	0.000	100
	3.417	100.000		

Tabella 11 - Risultati setacciatura plastica tipo (2)

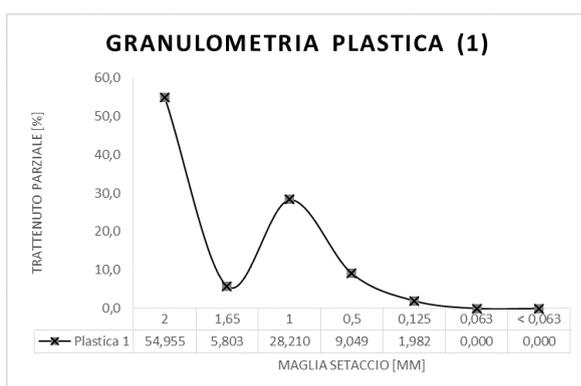


Figura 40 - Curva granulometrica plastica tipo (1)

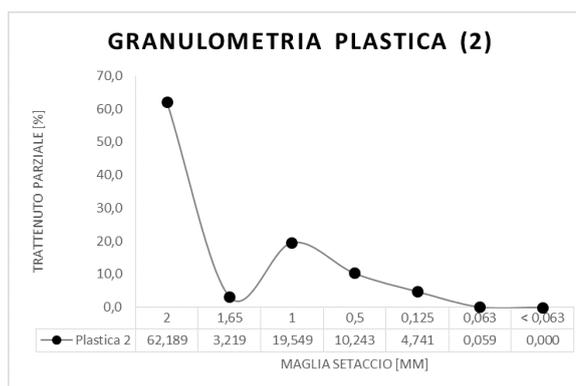


Figura 41 - Curva granulometrica plastica tipo (2)

Anche in questo caso, la frazione trattenuta al setaccio di maglia 0.125 mm risulterà non sufficiente.

3.2.1.4. Setacciatura malta premiscelata

La vagliatura in questo caso è stata ovviamente eseguita sull'intero composto con l'unico scopo di ottenere le frazioni interessate dalla sostituzione, in questo caso unicamente con gli inerti plastici. Per questo gli unici vagli impiegati sono stati quelli con maglia da 1 mm e 0.5 mm.

Massa totale disponibile [g]	Massa per ogni provino [g]
7207,5	1801.88

1	Diametri [mm]	Massa trattenuta [g]	Trattenuto parziale [%]	Trattenuto cumulativo [%]
	> 1 e < 0,125	1202.9		
	1	256.2	14.290	81.382
	0.5	333.8	18.618	100.000
		1792.9	32.908	

2	Diametri [mm]	Massa trattenuta [g]	Trattenuto parziale [%]	Trattenuto cumulativo [%]
	> 1 e < 0,125	1203.4		
	1	250.9	14.004	81.173
	0.5	337.3	18.827	100.000
		1791.6	32.831	

Tabella 12 - Risultati setacciatura malta Vimark

Considerando che sono stati realizzati 4 provini per testare questo materiale, il peso del materiale disponibile per il singolo provino risultava di circa 1802 g. La quantità di materiale perso durante l'operazione risulta quindi sicuramente accettabile.

3.2.2. Realizzazione provini

In base a quanto analizzato dalle distribuzioni granulometriche al paragrafo precedente, è stata effettuata la sostituzione delle sole frazioni da 1 mm e 0.5 mm.

Per quanto riguarda la gomma da PFU e le materie plastiche, è stato sostituito circa il 35% della sabbia totale; per la malta Vimark sono state introdotte solo le due plastiche esaminate, in quantità pari al 17% del composto totale presente per ogni provino.

Tale operazione è stata preceduta dal calcolo dei pesi specifici di ogni materiale per rendere possibile la sostituzione in volume, non in massa, in quanto vedremo di seguito che il peso specifico della sabbia è parecchio maggiore di quello dei materiali derivanti da processi di riciclaggio. Con una sostituzione in massa avremmo ricavato una quantità di materiale sostitutivo decisamente elevata.

3.2.2.1. Calcolo pesi specifici e masse inerte sostitutivo

Si è fatto riferimento ad un volumetto cilindrico noto:



Figura 42 - Cilindretto di volume noto per calcolo peso specifico

Diametro [cm]	1.25
Raggio [cm]	0.625
Altezza [cm]	2.5
AREA [cm ²]	1.23
VOLUME [cm³]	3.07

Tabella 13 - Dimensioni cilindretto per calcolo pesi specifici

Dopo averne effettuato la tara sulla bilancia, è stato riempito di materiale e compattato il più possibile manualmente; ci si rende conto che il peso calcolato in questo modo differisca in base al grado di compattazione raggiunto e quindi non sia quello riferito ad un corpo unico compatto di materiale, ma comprende una certa quantità di vuoti. Determinato il peso del materiale contenuto all'interno del cilindretto, il peso specifico non è altro che:

$$\text{Peso specifico [g/cm}^3\text{]} = \frac{\text{Massa [g]}}{\text{Volume [cm}^3\text{]}}$$

Tale operazione, eseguita per sabbia, plastica 1, plastica 2 e gomma da PFU per le 3 granulometrie preponderanti (1 mm, 0.5 mm e 0.125 mm) ha fornito i seguenti risultati:

		GOMMA	SABBIA	PLASTICA 1	PLASTICA 2
Peso specifico Ø 0.125 mm	Massa [g]	1.20	4.65	1.60	1.30
	Peso specifico [g/cm ³]	0.39	1.52	0.52	0.42

Tabella 14 - Pesi specifici frazione da 0.125 mm

Campagna di indagine

		GOMMA	SABBIA	PLASTICA 1	PLASTICA 2	MALTA
Peso specifico \varnothing 0.5 mm	Massa [g]	1.20	5.00	1.50	1.60	4.60
	Peso specifico [g/cm ³]	0.39	1.63	0.49	0.52	1.50

Tabella 15 - Pesi specifici frazione da 0.5 mm

		GOMMA	SABBIA	PLASTICA 1	PLASTICA 2	MALTA
Peso specifico \varnothing 1 mm	Massa [g]	1.30	5.00	1.80	1.80	4.70
	Peso specifico [g/cm ³]	0.42	1.63	0.59	0.62	1.53

Tabella 16 - Pesi specifici frazione da 1 mm

Per effettuare la sostituzione in volume, considerando che abbiamo sostituito il 35% sul totale della sabbia e, alla fine, solo delle frazioni da 1 mm e 0.5 mm, dividendo la massa corrispondente a questa percentuale per il peso specifico, si è determinato il volume di sabbia da sostituire:

	Frazioni [mm]	Peso specifico [g/cm ³]	Percentuale sulla sabbia totale	Trattenuto [g]	Percentuale da sostituire (della frazione)	Massa da sostituire (della frazione) [g]	Volume sabbia da sostituire [cm ³]
Sabbia	1	1.63	30%	403.4	15/30	201.7	123.7
	0.5	1.63	35%	470.6	20/35	268.9	165.0
	0.125	0.00	30%	403.4	15/30	201.7	133.0

Tabella 17 - Calcolo volumi sabbia da sostituire

Operando solo sulle prime due frazioni, la somma delle loro masse corrisponde al 35 % della massa totale della sabbia.

La massa di inerte proveniente da materiale da riciclo da sostituire si calcola facilmente moltiplicando il volume di sabbia ottenuto per la densità del materiale in questione:

	Frazione [mm]	Peso specifico [g/cm ³]	Massa sostitutiva [g]
Gomma	1	0.42	52.0
	0.5	0.39	64.3
	0.125	0.00	52.0
Plastica (1)	1	0.59	73.0
	0.5	0.49	80.8
	0.125	0.52	69.2
Plastica (2)	1	0.62	76.7
	0.5	0.52	85.8
	0.125	0.42	55.9

Tabella 18 - Calcolo masse sostitutive effettive

Stessa operazione è stata effettuata per la sostituzione dell'inerte plastico nella malta Vimark; in questo caso la percentuale totale di sostituzione è stata del 17% sul totale del composto:

	Frazioni [mm]	Densità [g/cm ³]	Percentuale sul composto totale	Trattenuto [g]	Percentuale da sostituire (della frazione)	Massa da sostituire (della frazione) [g]	Volume composto da sostituire [cm ³]
Malta	1	1.53	14%	250.9	15/30	125.5	82.0
	0.5	1.5	18%	322.6	20/35	184.3	122.9

Tabella 19 - Calcolo volume composto da sostituire

	Massa sostitutiva [g]		
Plastica (1)	1	0.59	73.0
	0.5	0.49	80.8
Plastica (2)	1	0.62	76.7
	0.5	0.52	85.8

Tabella 20 - Calcolo masse effettive sostitutive

3.2.2.2. Esecuzione getti e maturazione

Per ogni tipologia di malta sono stati realizzati 3 provini prismatici, con casseri metallici che danno dimensioni standard ad ogni prisma di 40x40x160 mm³.

Di seguito si riporta l'elenco dei provini realizzati, in cui *P series* indica i provini realizzati con cemento Portland, i cui getti sono stati eseguiti il 12.06.2018, *SA series* quelli con cemento solfoalluminoso, eseguiti il giorno seguente ed *M series* sono i provini con la malta Vimark, eseguiti per primi nei giorni 16-17/05/2018:

		cement	pp fibers (g)	other aggregates	Cement (g)	Water (g)	Sand (g)
P series	P_1	P	0		450	225	1350
	P_2	P	0	Rubber	450	225	modified(*)
	P_3	P	0	rubber treated with silan	450	225	modified(*)
	P_4	P	0	rubber treated with plasma	450	225	modified(*)
	P_5	P	10		450	225	1350
		cement	pp fibers (g)	other aggregates	Cement (g)	Water (g)	Sand (g)
SA series	SA_1	SA	0		450	225	1350
	SA_2	SA	0	Rubber	450	225	modified(*)
	SA_3	SA	0	rubber treated with silan	450	225	modified(*)
	SA_4	SA	0	rubber treated with plasma	450	225	modified(*)
	SA_5	SA	10		450	225	1350

(*) sostituzione del 35% in peso di sabbia. Si sostituiscono i diametri 0.5 (20%) e 1 (15%) con gomma dello stesso diametro e volume.

Campagna di indagine

		cement	pp fibers (g)	other aggregates	Cement (g)	Water (g)	Sand (g)
P series	P_7	P	0	Plastica 1	450	225	modified(*)
	P_8	P	0	Plastica2	450	225	modified(*)
		cement	pp fibers (g)	other aggregates	Cement (g)	Water (g)	Sand (g)
SA series	SA_7	SA	0	Plastica 1	450	225	modified(*)
	SA_8	SA	0	Plastica2	450	225	modified(*)

(*) sostituzione del 35% in peso di sabbia. Si sostituiscono i diametri 0.5 (20%) e 1 (15%) con plastica dello stesso diametro e volume.

		cement	pp fibers (g)	other aggregates	Water (g)	Cement + Sand (g)
M series	M_1	M	0		396	1800
	M_2	M	10		396	1800
	M_3	M	0	Plastica 1	396	modified(**)
	M_4	M	0	Plastica2	396	modified(**)

(**) sostituzione del 17% in peso di sabbia. Si sostituiscono i diametri 0.5 (10%) e 1 (7%) con plastica dello stesso diametro e volume.

Tabella 21 – Elenco provini

La procedura per l'esecuzione dei getti è data dalla Norma già citata UNI EN 196-1 e consiste nei seguenti passaggi:

1. A macchina ferma versare nell'impastatrice meccanica acqua e cemento nelle quantità:
225 g di acqua
450 g di cemento;
2. Avviare a bassa velocità e far girare per 30 secondi;
3. Versare la sabbia (1350 g o equivalente con inerte sostitutivo o sabbia + fibre) in 30 secondi mentre la macchina è in moto;
4. Arrestare la macchina, impostare l'alta velocità e far girare per altri 30 secondi;
5. Arrestare, raschiare le pareti della macchina in 15 secondi e coprire per 1 minuto e 15 secondi;
6. Azionare ad alta velocità per 1 minuto.

L'operazione appena descritta è stata eseguita per i provini delle serie P ed SA. Per quanto riguarda i provini della serie M, non essendo possibile scindere la sabbia dal cemento, la procedura di esecuzione dei getti è stata un po' differente:

è stata miscelata acqua, in quantità pari al 22% del peso totale iniziale della malta (abbiamo detto circa 1800 g per ogni provino), come suggerito dalla ditta fornitrice della malta in questione, con la malta e, solo per il provino M2, con le fibre per circa 1.5 minuti; risultando questo composto più liquido rispetto al classico di sabbia e cemento, la cassetatura è avvenuta dando solo un paio di colpi a metà riempimento del cassero e altri 2-3 colpi finali per completare la compattazione.



Figura 43 - Fase 2 e 4 del confezionamento provini

Per la successiva cassetatura:

1. Si ripongono i casseri, lubrificati con olio per facilitare la scassetatura, sul macchinario che permette la vibratura;
2. Si riempiono solo per metà di malta e si avvia il macchinario che sbatte il cassero con 60 colpi;
3. Si versa la malta rimanente e si sbatte il cassero con altri 60 colpi;
4. Dopo aver lisciato manualmente con una spatola i provini per rimuovere l'eccesso di materiale, si lasciano riposare per 24 ore in un luogo a 20°C e un grado di umidità pari al 90%;
5. Dopo 24 ore si procede con la scassetatura e si lasciano maturare in acqua o in aria per 28 giorni (nel caso in questione in acqua i provini P ed SA e in aria i provini M, perché malta in commercio che generalmente viene fatta maturare in aria).

Teoricamente, quando aggiungo le fibre, sarebbe opportuno cambiare il mix design, cioè i quantitativi di sabbia e cemento, per permettere alla pasta di avvolgere meglio le fibre. Se questo non succede si corre il rischio che la resistenza possa diminuire parecchio nonostante la duttilità cresca. Ciò non accade nel caso della sostituzione della sabbia con gomma o plastica in quanto la superficie di pasta di cemento che deve aderire è sempre la stessa. Ciò sarà evidente quando analizzeremo i risultati, in quanto noteremo che non c'è una grande diminuzione di resistenza rispetto alla situazione con fibre.

3.3. Prove

Le prove sono state eseguite dopo 28 giorni per i provini M e dopo 29 giorni per i provini P ed SA e sono state effettuate prove di flessione su tre punti e successivamente di compressione sulle due parti in cui il provino risultava spezzato.

I provini sono stati preventivamente pesati e misurati, tranne quelli della *serie M* per i quali non è stato necessario in quanto la variazione di peso risultava trascurabile (diminuzione inferiore circa al 10%). Le misure sono state eseguite su 3 punti, 2 più estremi e uno centrale, sia per l'altezza che per la larghezza, e si riportano di seguito i dati ricavati:

	P_1			P_2			P_3		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
PESO [g]	608.2	596.4	597.8	509.2	504.9	513.8	519.2	515.2	516.7
H1 [mm]	41.34	41.71	42.27	41.25	40.47	41.85	41.23	40.06	41.5
H2 [mm]	41.87	41	41.26	41.17	40.36	41.29	40.43	40.6	40.78
H3 [mm]	42.06	40.5	40.59	41.4	41.26	41.8	40.14	41.53	40.05
S1 [mm]	40.02	40.1	40.08	40.2	40.1	40.1	40.4	40.07	39.74
S2 [mm]	40.04	40.18	40.09	40.1	40.4	40.13	40.32	40.22	40.43
S3 [mm]	40.03	40.17	40.31	40.7	40.4	40.18	40.32	40.23	40.19
L [mm]	160.14	160	160.18	160.05	160	160.1	159.8	160.03	160.02

	P_4			P_5			P_7			P_8		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
PESO [g]	517.1	513	518.3	580.4	592.6	579.7	514.2	509.2	508.2	511.2	515.3	516
H1 [mm]	40.54	40.95	40.13	41.21	41.3	41.22	40.99	40.21	40.32	40.38	40.52	40.59
H2 [mm]	40.8	40.64	40.02	40.82	41.78	40.85	40.33	39.8	40.35	40.05	40.45	40.43
H3 [mm]	40.61	40.69	40.29	40.79	41.95	40.64	40.73	40.11	40.54	40.28	40.93	41.17
S1 [mm]	40.05	40	40.22	40.6	40.07	40.48	39.97	40.02	39.95	39.95	39.94	40.05
S2 [mm]	40.8	40.02	40.09	40.19	40.35	40.14	39.94	40.23	39.94	40	39.93	40.07
S3 [mm]	40.61	40.01	40.06	40.08	40.31	40.14	39.93	40.09	39.95	40.03	39.95	40.08
L [mm]	160.13	160.13	160.51	160.08	160	160.02	159.96	160.17	160.06	160.22	160.06	160.05

Tabella 22 - Pesi e dimensioni provini serie P

	SA_1			SA_2			SA_3		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
PESO [g]	594.5	600.3	597.7	521.5	513.6	514.1	516.1	531.6	511.4
H1 [mm]	40.47	41	41.07	41.71	42.15	41.71	40.63	41.1	40.67
H2 [mm]	40.99	40.92	40.45	41.3	41.24	41	40.47	41.11	40.44
H3 [mm]	41.89	41.63	41.99	41.14	40.48	40.49	40.75	41.38	40.65
S1 [mm]	40.13	40.85	40.34	40.05	40.54	40.27	40.22	40.76	40.22
S2 [mm]	40.15	40.38	40.19	40.1	40.06	40.3	40.16	40.47	39.97
S3 [mm]	40.17	40.33	40.08	40.02	40.16	40.24	40.21	40.4	40.01
L [mm]	160.02	159.99	160.05	160.11	160.14	160.04	160.06	160.06	160.05

	SA_4			SA_5			SA_7			SA_8		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
PESO [g]	520.1	520	532.8	598.5	598.7	596	520.7	516.1	518	534.5	526.8	527.8
H1 [mm]	41.52	41.82	41.85	41.71	42.06	42.26	41.63	41.32	41.19	41.38	40.79	41.03
H2 [mm]	40.55	40.4	41.34	41.73	42.17	42.32	40.89	40.43	40.71	41.19	40.86	40.84
H3 [mm]	40.01	39.99	41.08	41.86	42.85	42.15	40.56	40.01	40.54	41.54	41.51	41.37
S1 [mm]	40.1	40.1	40.62	40.07	39.95	40.31	39.96	39.9	40.21	40.52	40.07	40.8
S2 [mm]	40.2	40.2	40.7	40.13	39.95	40.08	39.91	40.01	40.04	40.45	40.02	40.21
S3 [mm]	40.05	40.17	40.37	40.15	39.92	40.06	39.87	39.99	39.96	40.13	40.08	40.04
L [mm]	160.21	160.37	160.21	160.06	159.99	160.06	160.03	160.05	160.01	160.06	160.04	160.02

Tabella 23 - Pesi e dimensioni provini serie SA

3.3.1. Prova di flessione

Per l'esecuzione di tale prova facciamo riferimento al capitolo 4.7 della Norma UNI EN 196-1. Tale prova consiste nel posizionare il provino al centro del macchinario, in modo tale le estremità del prisma abbiano uno sbalzo di 30 mm rispetto agli appoggi inferiori, in quanto questi sono distanti tra loro di 100 mm e il provino è lungo circa 160 mm. In tal modo l'appoggio superiore risulta automaticamente posizionato nella mezzeria del provino.

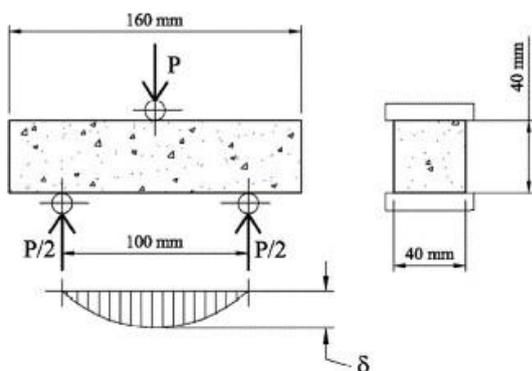


Figura 44 - Schema statico flessione su tre punti (da "The use of wool as fiber-reinforcement in cement-based mortar")



Figura 45 - Strumentazione prova di flessione

La prova è stata effettuata in controllo di deformazione con una velocità pari a 0.0008 mm/s; raggiunto il picco massimo di resistenza non abbiamo bloccato la prova perché ciò che ci interessava maggiormente era il ramo post-picco, per cui la prova è stata fermata raggiunta una deformazione circa pari a 0.2 mm.

Campagna di indagine

Durante la prova sono state scattate immagini che mostrano per ogni provino il raggiungimento del picco massimo di resistenza e la sezione a rottura avvenuta:

Tipo di malta	Vista dopo rottura a flessione	Vista superficie sezione di frattura
<p>M1 Malta normale</p>		
<p>M2 Malta con fibre</p>		
<p>M3 Malta con Plastica (1)</p>		
<p>M4 Malta con Plastica (2)</p>		

Tabella 24 – Rottura a flessione provini serie M

Campagna di indagine

Tipo di malta	Vista dopo rottura a flessione	Vista superficie sezione di frattura
P1 Malta normale		
P2 Malta con gomma		
P3 Malta con gomma trattata con silani		
P4 Malta con gomma trattata al plasma		
P5 Malta con fibre		
P7 Malta con Plastica (1)		
P8 Malta con Plastica (2)		

Tabella 25 - Rottura a flessione provini serie P

Campagna di indagine

Tipo di malta	Vista dopo rottura a flessione	Vista superficie sezione di frattura
SA1 Malta normale		
SA2 Malta con gomma		
SA3 Malta con gomma trattata con silani		
SA4 Malta con gomma trattata al plasma		
SA5 Malta con fibre		
SA7 Malta con Plastica (1)		
SA8 Malta con Plastica (2)		

Figura 26 – Rottura a flessione provini serie SA

3.3.2. Prova di compressione

Durante la prova di flessione il provino arriva a rottura e si divide in due pezzi. Su ognuno di questi si esegue la prova di compressione, nello stesso macchinario ma utilizzando un supporto metallico che permette di trasmettere la forza di compressione sulla parte centrale del provino.

In questo caso la velocità di prova è maggiore rispetto alla prova precedente, ossia risulta pari a 0.5 mm/min.



Figura 49 - Supporto per prova di compressione

Esamineremo nel dettaglio i risultati ottenuti, ma si può già anticipare che durante la prima giornata di prove, relativa alle malte della serie M, appena superato il picco massimo di resistenza i provini tendevano praticamente a sbriciolarsi (fig. 50); questo comportamento non si è invece verificato nel caso dei provini realizzati con cemento Portland o solfoalluminoso (fig. 51).



Figura 50 – Esempio rottura a compressione provini serie M



Figura 51 - Esempio rottura a compressione provino serie P

Capitolo 4. Analisi dei risultati ottenuti

Sia per la prova di flessione che per quella di compressione, i dati ricavati dal programma in laboratorio sono stati elaborati in più fasi. La prima, comune ad entrambe le prove, ha previsto una pulizia generale dei dati acquisiti per essere elaborati facilmente su un file Excel. Successivamente i due processi si sono un po' differenziati: per la *prova di flessione* l'obiettivo è stato calcolare ovviamente il picco massimo di resistenza a rottura, ma particolare attenzione è stata data al ramo post-picco del diagramma forza-spostamento per ricavarne l'area sottesa, in quanto dal confronto di questo dato si può effettuare un confronto sulla duttilità tra i provini preparati con i diversi materiali; anche per quanto riguarda la *prova di compressione* è stato ricavata la massima resistenza a rottura e la corrispondente deformazione.

4.1. Analisi risultati prova di flessione

Dopo aver pulito e ordinato i dati, è stato ricavata per ogni provino la resistenza massima raggiunta prima di rompersi (P_{max}) e lo spostamento corrispondente (δ_p); da questo punto in poi abbiamo i dati post-picco, in quanto abbiamo continuato la prova fino a raggiungere uno spostamento pari a circa 0.2 mm (per qualche provino questo non è stato possibile, ci siamo fermati prima); abbiamo impostato l'origine del sistema di riferimento in corrispondenza del picco e gli assi P e δ sono stati rapportati proprio ai valori massimi. Da questi è stato elaborato il *diagramma* ($P/P_{max} - \delta/\delta_p$), importante per determinare le proprietà meccaniche della malta e, per rendere più facile la loro valutazione, è stato approssimato ad una relazione bilineare: in particolare il dato ricavato dal diagramma così definito è l'area sottesa al ramo post-picco (A_F) per mezzo dei dati geometrici della bilineare (x_1 , y_1 e x_2 , y_2), tale per cui:

$$A_F = \frac{1 + y_1}{2} x + \frac{y_1 + y_2}{2} (0.2 - x_1)$$

dove: y_1 = % sforzo residuo dopo la frattura;

Analisi dei risultati ottenuti

y_2 = % sforzo residuo raggiunta una deformazione pari a 0.2 mm.

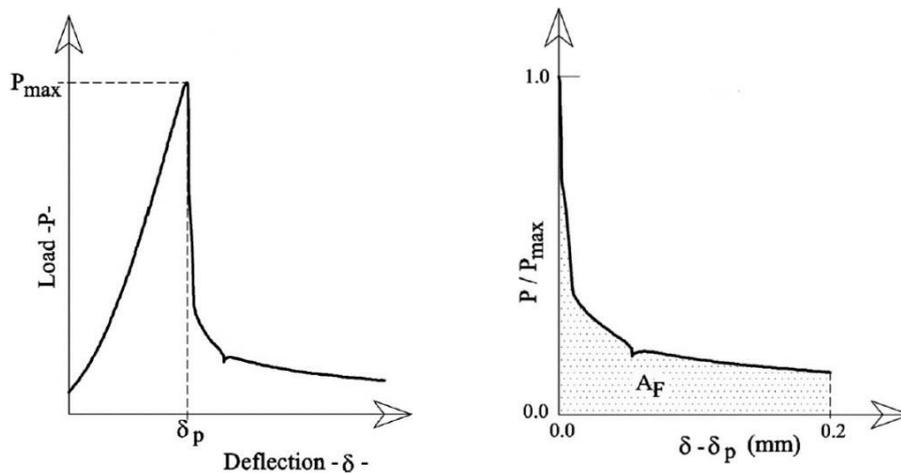


Figura 52 - Diagramma forza-spostamento e ramo posto-picco

Di seguito si riportano i risultati ottenuti, in particolare P_{max} , riferimenti della bilatera e A_F , per ogni provino (tranne per il provino SA1_A di cui non è stato possibile ricavarli per errore sulla prova):

Analisi dei risultati ottenuti

M1				M2			
	M1_A	M1_B	M1_C		M2_A	M2_B	M2_C
Pmax (kN)	0.73272586	0.77245313	0.8425352	Pmax (kN)	0.49464101	0.58065373	0.50032806
δp (mm)	0.42154875	0.39745545	0.45453072	δp (mm)	0.34720048	0.33122799	0.44946659
x0 (mm)	0	0	0	x0 (mm)	0	0	0
y0	1	1	1	y0	1	1	1
x1 (mm)	0.006	0.006	0.0073	x1 (mm)	0.02	0.0027	0.033
y1	0.112	0.103	0.105	y1	0.45	0.5	0.495
x2 (mm)	0.2	0.2	0.2	x2 (mm)	0.2	0.2	0.2
y2	0.20051488	0.018403483	0.018304357	y2	0.345281399	0.400484588	0.378363908
AF(mm)	0.033649943	0.015085138	0.015913625	AF(mm)	0.086075326	0.090857805	0.097593386

M3				M4			
	M3_A	M3_B	M3_C		M4_A	M4_B	M4_C
Pmax (kN)	0.60184473	0.6208967	0.60491127	Pmax (kN)	0.6385293	0.62171352	0.74967057
δp (mm)	0.38124722	0.55872744	0.49145159	δp (mm)	0.38015544	0.36935946	0.55296814
x0 (mm)	0	0	0	x0 (mm)	0	0	0
y0	1	1	1	y0	1	1	1
x1 (mm)	0.02	0.011	0.013	x1 (mm)	0.001	0.01	0.004
y1	0.265	0.235	0.26	y1	0.28	0.18	0.17
x2 (mm)	0.2	0.2	0.2	x2 (mm)	0.2	0.2	0.2
y2	0.07091822	0.05253898	0.055558785	y2	0.054345238	0.040964917	0.03519282
AF(mm)	0.04288264	0.03396493	0.037694746	AF(mm)	0.033907351	0.026891667	0.0224489

Tabella 27 - Risultati prova di flessione provini M

Analisi dei risultati ottenuti

P1				P2			
	P1_A	P1_B	P1_C		P2_A	P2_B	P2_C
Pmax (kN)	3.3588858	3.2673316	3.4972823	Pmax (kN)	1.46E+00	1.5594357	1.4123774
δp (mm)	0.3730094	0.2033157	0.350134	δp (mm)	0.3061921	0.4660684	0.318852
x0 (mm)	0	0	0	x0 (mm)	0	0	0
y0	1	1	1	y0	1	1	1
x1 (mm)	0.028	0.03	0.032	x1 (mm)	0.03	0.025	0.0265
y1	0.03	0.018	0	y1	0.065	0.15	0.1
x2 (mm)	0.2	0.2	0.2	x2 (mm)	0.2	0.2	0.2
y2	0	0	0	y2	0	0.037	0
AF(mm)	0.017	0.0168	0.016	AF(mm)	0.0215	0.0307375	0.02325

P3				P4			
	P3_A	P3_B	P3_C		P4_A	P4_B	P4_C
Pmax (kN)	1,4833828	1,8513787		Pmax (kN)	1,62E+00	1,7	
δp (mm)	0,1939055	0,4267214		δp (mm)	0,2705544	0,3719902	
x0 (mm)	0	0		x0 (mm)	0	0	
y0	1	1		y0	1	1	
x1 (mm)	0,028	0,028		x1 (mm)	0,02	0,026	
y1	0,03	0,09		y1	0,14	0,1	
x2 (mm)	0,06	0,2		x2 (mm)	0,2	0,2	
y2	0,003085382	0,0414922		y2	0,061715414	0,05289944	
AF(mm)	0,014949366	0,02656833		AF(mm)	0,029554387	0,027602251	
σ ₁ [Mpa]	-20,956809	-20,443664	-21,028085	σ ₁ [Mpa]	-20,972545	-20,033624	-20,810084
σ ₂ [Mpa]	-20,906358	-21,013629	-20,659945	σ ₂ [Mpa]	-21,218729	-15,997384	-19,42116

	prova persa/sbagliata
	non arriva a 0.2 mm

Tabella 28 - Risultati prova di flessione provini P1-P4

Analisi dei risultati ottenuti

P5				P7			
	P5_A	P5_B	P5_C		P7_A	P7_B	P7_C
Pmax (kN)	2.6190696	2.8944168	2.7272274	Pmax (kN)	2.3440626	2.19E+00	2.3050151
δp (mm)	0.3940479	0.3568134	0.3775555	δp (mm)	0.3725136	0.4078822	0.3880459
x0 (mm)	0	0	0	x0 (mm)	0	0	0
y0	1	1	1	y0	1	1	1
x1 (mm)	0.032	0.035	0.038	x1 (mm)	0.027	0.033	0.03
y1	0.15	0.14	0.13	y1	0.2	0.2	0.26
x2 (mm)	0.2	0.2	0.2	x2 (mm)	0.2	0.2	0.2
y2	0.11179831	0.1236564	0.10675636	y2	0.068841818	0.086903417	0.09741317
AF(mm)	0.04039106	0.041701653	0.04064727	AF(mm)	0.039454817	0.043756435	0.04928012

P8			
	P8_A	P8_B	P8_C
Pmax (kN)	2.4104631	2.2286975	2.1452234
δp (mm)	0.5461118	0.2686834	0.2371455
x0 (mm)	0	0	0
y0	1	1	1
x1 (mm)	0.035	0.04	0.032
y1	0.14	0.1	0.05
x2 (mm)	0.2	0.2	0.12
y2	0.044135697	0	0
AF(mm)	0.035141195	0.03	0.019

	prova persa/sbagliata
	non arriva a 0.2 mm

Tabella 29 - Risultati prova di flessione provini P5-P8

Analisi dei risultati ottenuti

	SA1				SA2		
	SA1_A	SA1_B	SA1_C		SA2_A	SA2_B	SA2_C
Pmax (kN)		4.6613984	3.4387143	Pmax (kN)	2.02E+00	1.701511	1.830749
δ_p (mm)		0.42107809	0.29019988	δ_p (mm)	0.29791772	0.36005077	0.38260946
x0 (mm)		0	0	x0 (mm)	0	0	0
y0		1	1	y0	1	1	1
x1 (mm)		0.038	0.0025	x1 (mm)	0.015	0.019	0.012
y1		0	0.01	y1	0.09	0.125	0.1
x2 (mm)		0.2	0.2	x2 (mm)	0.2	0.2	0.2
y2		0.000210524	0	y2	0.02	0.05097356	0.056881522
AF(mm)		0.019017052	0.00225	AF(mm)	0.01835	0.026613107	0.021346863

	SA3				SA4		
	SA3_A	SA3_B	SA3_C		SA4_A	SA4_B	SA4_C
Pmax (kN)	1.9017304	2.1660483	1.8121399	Pmax (kN)	1.98E+00	1.8923689	1.863436
δ_p (mm)	0.3660261	0.31744131	0.21818671	δ_p (mm)	0.59998441	0.41870955	0.23793431
x0 (mm)	0	0	0	x0 (mm)	0	0	0
y0	1	1	1	y0	1	1	1
x1 (mm)	0.016	0.014	0.017	x1 (mm)	0.0165	0.023	0.018
y1	0.09	0.07	0.085	y1	0.07	0.07	0.0127
x2 (mm)	0.2	0.2	0.2	x2 (mm)	0.2	0.2	0.2
y2	0.056390049	0.044836526	0.055159589	y2	0.051564395	0.055047967	0.06667323
AF(mm)	0.022187885	0.018169797	0.022047102	AF(mm)	0.019981033	0.023371745	0.01633726

	prova persa/sbagliata
	non arriva a 0.2 mm

Tabella 30 - Risultati prova di flessione provini SA1-SA4

Analisi dei risultati ottenuti

SA5				SA7			
	SA5_A	SA5_B	SA5_C		SA7_A	SA7_B	SA7_C
Pmax (kN)	3.2472644	3.8483617	2.9257112	Pmax (kN)	2.4052868	2.53E+00	2.8926289
δp (mm)	0.29763368	0.25966275	0.18421599	δp (mm)	0.39952341	0.32840201	0.32913086
x0 (mm)	0	0	0	x0 (mm)	0	0	0
y0	1	1	1	y0	1	1	1
x1 (mm)	0.026	0.03	0.019	x1 (mm)	0.045	0.035	0.02
y1	0.11	0.09	0.15	y1	0.31	0.24	0.022
x2 (mm)	0.2	0.2	0.2	x2 (mm)	0.2	0.2	0.2
y2	0.08269416	0.082319799	0.11452988	y2	0.133300199	0.096989723	0.04
AF(mm)	0.03119439	0.030997183	0.03486495	AF(mm)	0.063830765	0.049501652	0.0158

SA8_A			
	SA8_A	SA8_B	SA8_C
Pmax (kN)	2.4846044	2.6203101	2.40358
δp (mm)	0.40564093	0.30110762	0.21124551
x0 (mm)	0	0	0
y0	1	1	1
x1 (mm)	0.042	0.02	0.024
y1	0.24	0.15	0.22
x2 (mm)	0.2	0.2	0.2
y2	0.084628197	0	0.051546031
AF(mm)	0.051685628	0.025	0.038536051

	prova persa/sbagliata
	non arriva a 0.2 mm

Tabella 31 - Risultati prova di flessione provini SA5-SA8

Analisi dei risultati ottenuti

Per ognuno di questi dati sono stati realizzati degli istogrammi sul valore medio dei 3 provini confezionati per ogni tipologia di malta; la stessa operazione è stata eseguita anche sulla *densità* (tranne per la serie M), in quanto i provini P ed SA prima di essere sottoposti alle prove sono stati tutti pesati e misurati. Sono stati ottenuti i seguenti risultati:

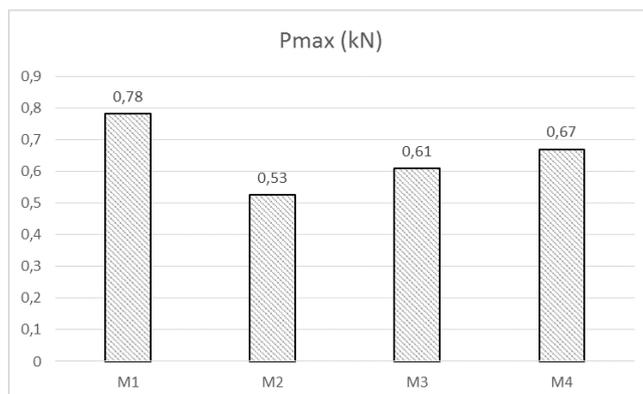


Figura 53 - Istogramma Pmax provini serie M

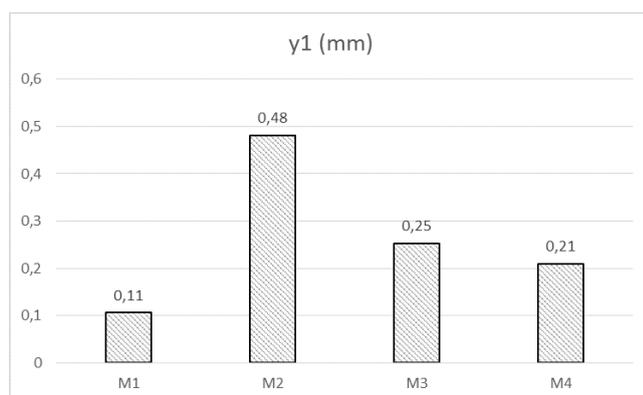


Figura 54 - Istogramma y1 provini serie M

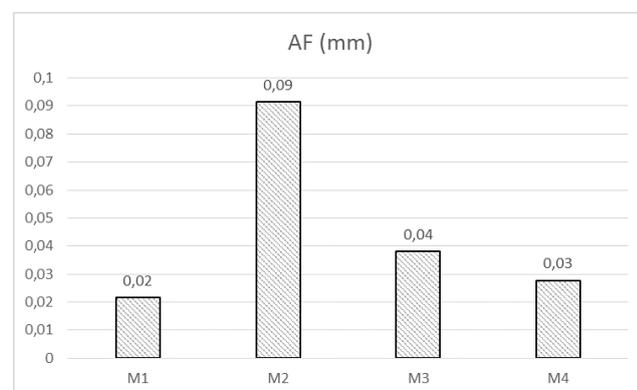


Figura 55 - Istogramma Af provini serie M

Analisi dei risultati ottenuti

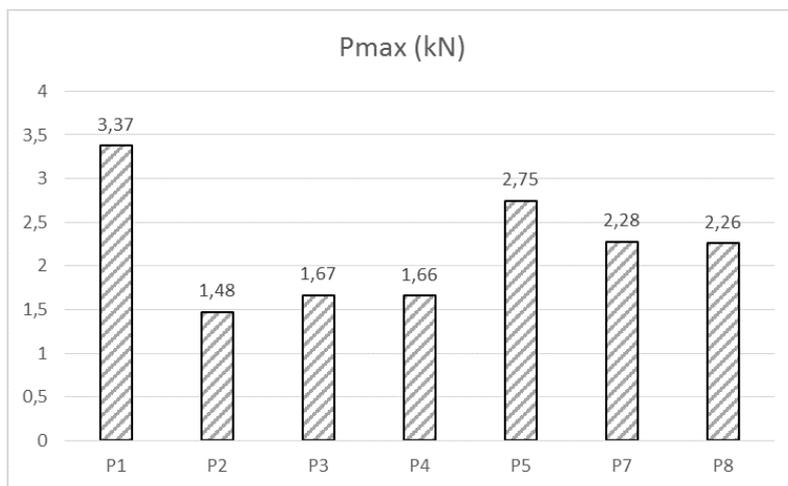


Figura 16 - Istogramma Pmax provini serie P

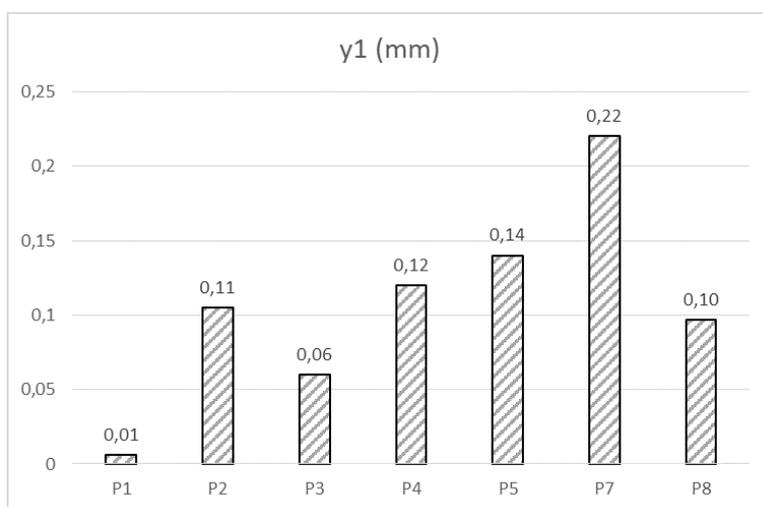


Figura 17 - Istogramma y1 provini serie P

Analisi dei risultati ottenuti

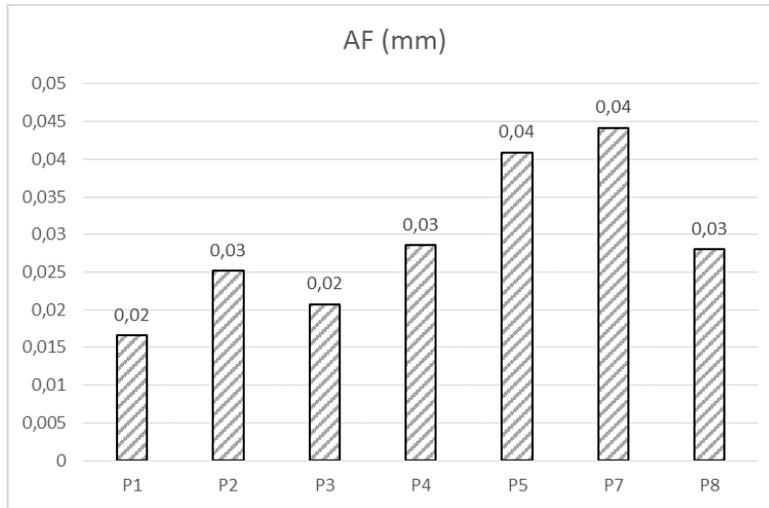


Figura 18 - Istogramma Af provini serie P

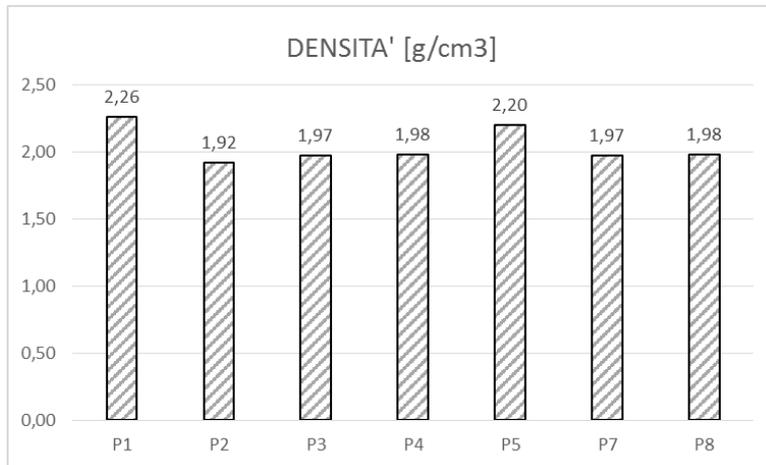


Figura 19 - Istogramma densità provini serie P

Analisi dei risultati ottenuti

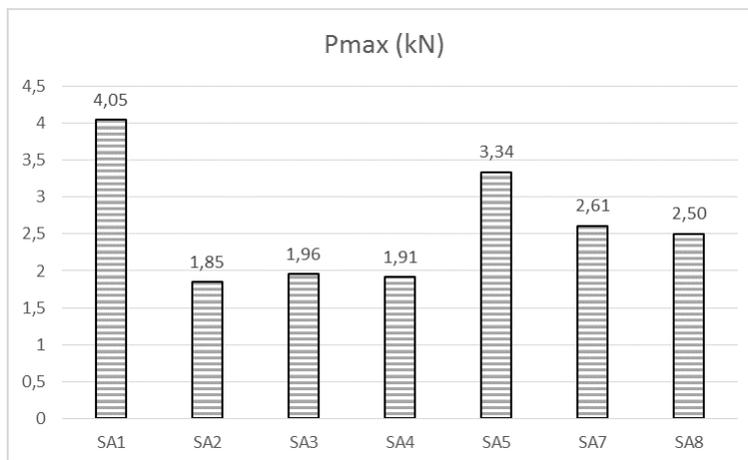


Figura 20 - Istogramma Pmax provini serie SA

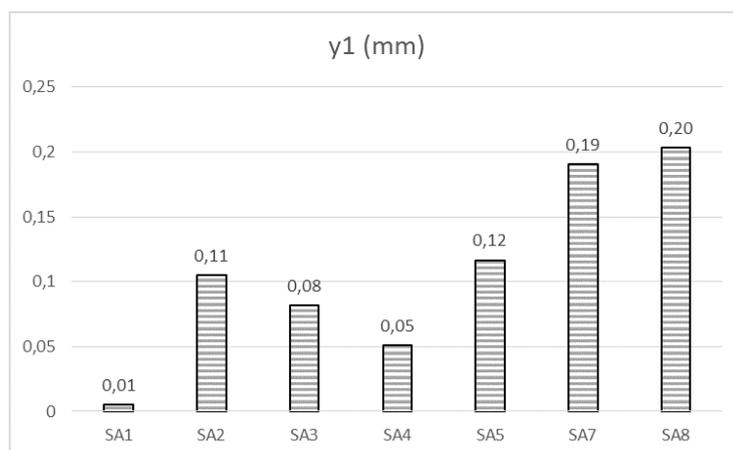


Figura 21 - Istogramma y1 provini serie SA

Analisi dei risultati ottenuti

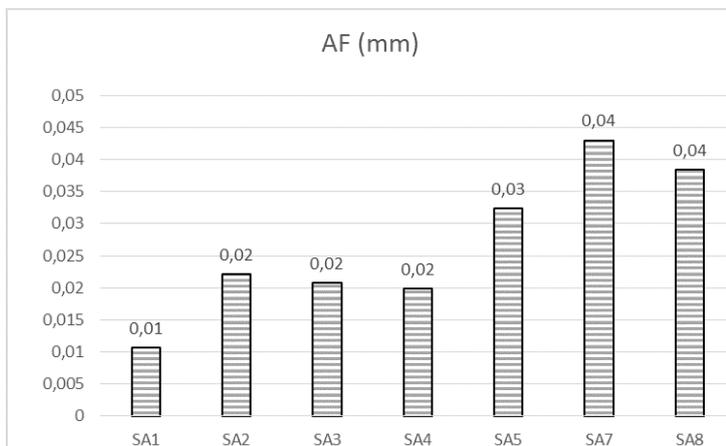


Figura 22 - Istogramma Af provini serie SA

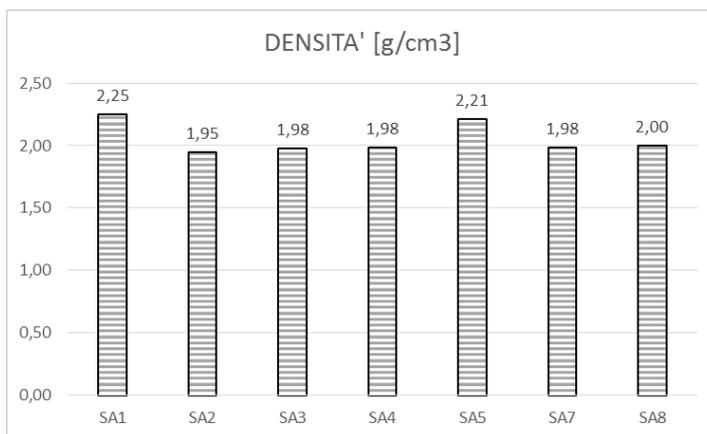


Figura 23 - Istogramma densità provini serie SA

4.2. Analisi risultati prova di compressione

L'elaborazione dei dati ricavati dalla prova di compressione è risultata più semplice della prova precedente, in quanto è stato solo calcolato il picco massimo di resistenza P_{max} con il corrispondente spostamento δ ma, poiché il comportamento di questa rottura è fragile, non esiste un ramo post-picco da valutare. La P_{max} rapportata all'area su cui agisce il carico (40mm x 40mm), fornisce la tensione di rottura per compressione σ_c . Come già anticipato, tale prova si esegue sui due pezzi di provino rimasti a seguito della prova di flessione su tre punti, quindi si hanno due valori di σ_c per ogni provino;

	M1			M2		
	M1_A	M1_B	M1_C	M2_A	M2_B	M2_C
σ_1 [Mpa]	-5.8301914	-5.721538	-5.762356	-2.96E+00	-3.674368	-3.361638
σ_2 [Mpa]	-5.8981353	-5.390265	-5.790602	-2.5518879	-3.662323	-3.18387
	M3			M4		
	M3_A	M3_B	M3_C	M4_A	M4_B	M4_C
σ_1 [Mpa]	-4.860198	-4.948668	-5.012943	-4.181816	-4.696709	-4.913534
σ_2 [Mpa]	-4.65E+00	-4.193879	-5.193685	-5.139006	-4.370969	-4.940853

Tabella 31 - Risultati prova di compressione provini serie M

	P1			P2		
	P1_A	P1_B	P1_C	P2_A	P2_B	P2_C
σ_1 [Mpa]	-51.209874	-55.757842	-54.132194	-21.018999	-19.243829	-19.183036
σ_2 [Mpa]	-55.335064	-53.592544	-53.804689	-20.657084	-19.619616	-19.296169
	P3			P4		
	P3_A	P3_B	P3_C	P4_A	P4_B	P4_C
σ_1 [Mpa]	-20.956809	-20.443664	-21.028085	-20.972545	-20.033624	-20.810084
σ_2 [Mpa]	-20.906358	-21.013629	-20.659945	-21.218729	-15.997384	-19.42116
	P5			P7		
	P5_A	P5_B	P5_C	P7_A	P7_B	P7_C
σ_1 [Mpa]	-38.962154	-36.875267	-39.367583	-30.025625	-29.936433	-30.00004
σ_2 [Mpa]	-37.938239	-34.557118	-39.087017	-29.201031	-28.975441	-29.515107
	P8					
	P8_A	P8_B	P8_C			
σ_1 [Mpa]	-32.278306	-32.908413	-30.272615			
σ_2 [Mpa]	-32.914276	-32.43541	-30.968242			

Tabella 32 - Risultati prova di compressione provini serie P

Analisi dei risultati ottenuti

	SA1			SA2		
	SA1_A	SA1_B	SA1_C	SA2_A	SA2_B	SA2_C
σ_1 [Mpa]	-59.691806	-59.206152	-59.002276	-23.604024	-20.836313	-22.891803
σ_2 [Mpa]	-60.163326	-59.502993	-58.911094	-21.489379	-21.374254	-20.575648
	SA3			SA4		
	SA3_A	SA3_B	SA3_C	SA4_A	SA4_B	SA4_C
σ_1 [Mpa]	-22.255933	-23.685894	-21.085164	-23.751306	-23.478961	-24.909146
σ_2 [Mpa]	-22.737515	-23.733752	-21.888854	-23.467116	-23.146248	-23.565194
	SA5			SA7		
	SA5_A	SA5_B	SA5_C	SA7_A	SA7_B	SA7_C
σ_1 [Mpa]	-55.40442	-55.390558	-52.704048	-43.215246	-40.518999	-38.260103
σ_2 [Mpa]	-55.275559	-52.625098	-51.579652	-43.877501	-40.472517	-40.829163
	SA8_A					
	SA8_A	SA8_B	SA8_C			
σ_1 [Mpa]	-44.093451	-42.80149	-43.170247			
σ_2 [Mpa]	-45.486174	-44.509998	-45.287461			

Tabella 33 - Risultati prova di compressione provini serie SA

Gli istogrammi per tale proprietà sono stati realizzati sul valore medio tra i due:

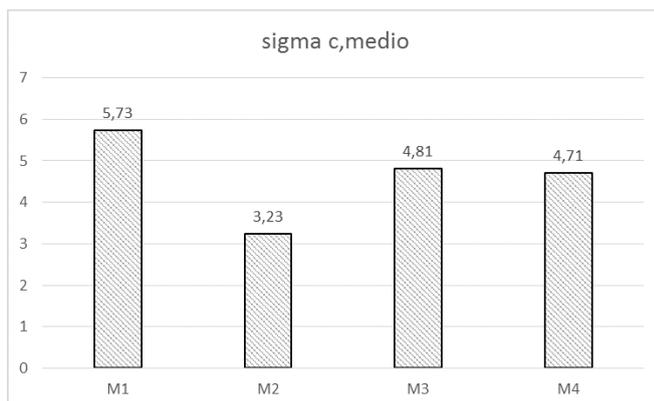


Figura 64 – Istogramma σ_c provini serie M

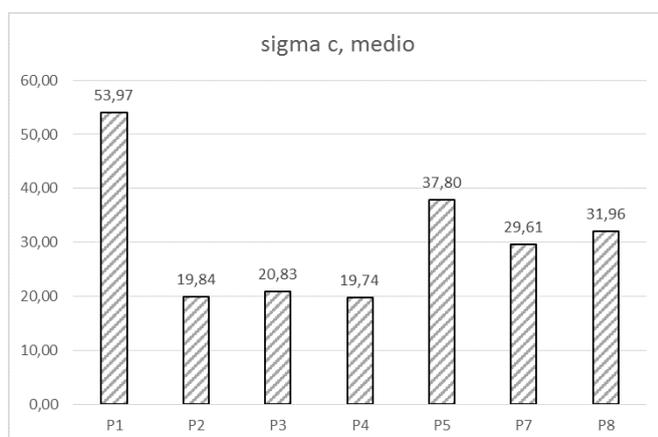


Figura 65 – Istogramma σ_c provini serie P

Analisi dei risultati ottenuti

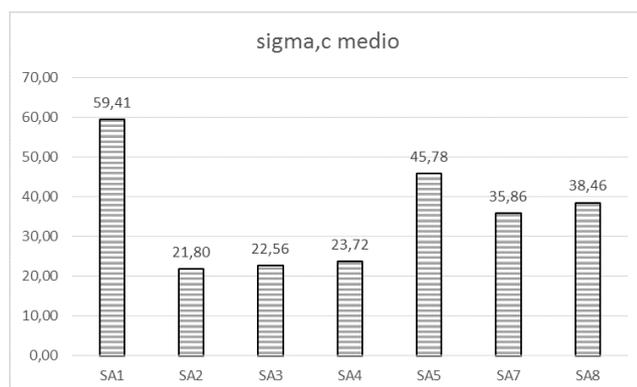


Figura 66 – Istogramma σ_c provini serie SA

4.3. Valutazioni relative ai risultati ottenuti

Per effettuare una valutazione sui risultati ottenuti dalle prove effettuate, sono stati messe a confronto le caratteristiche meccaniche dei provini della stessa composizione (malta normale, presenza di gomma, presenza di fibre, presenza di materia plastica) realizzati con i diversi cementi. Si riportano di seguito schematicamente i risultati ottenuti per una migliore comprensione dell'analisi che stiamo per effettuare:

	Duttilità	Resistenza flessionale	Resistenza a compressione
M1	0,02	0,78	5,73
M2	0,09	0,53	3,23
M3	0,04	0,61	4,81
M4	0,03	0,67	4,71
P1	0,02	3,37	53,97
P2	0,03	1,48	19,84
P3	0,02	1,67	20,83
P4	0,03	1,66	19,74
P5	0,04	2,75	37,8
P7	0,04	2,28	29,61
P8	0,03	2,26	31,96
SA1	0,01	4,05	59,41
SA2	0,02	1,85	21,8
SA3	0,02	1,96	22,56
SA4	0,02	1,91	23,72
SA5	0,03	3,34	45,78
SA7	0,04	2,61	35,86
SA8	0,04	2,50	38,46

Tabella 34 - Risultati complessivi prove

Analisi dei risultati ottenuti

È stata calcolata la variazione percentuale rispetto alla malta premiscelata e, per quelli contenenti gomma, la variazione percentuale tra i provini con i due tipi di cemento:

Tipologia Malta	Pmax [kN]	y1 [mm]	Af [mm]	σ_c [Mpa]
M1	0.78	0.11	0.02	-5.73
Variazione percentuale rispetto alla malta normale [%]				
P1	331.21	-85.00	-24.22	-1041.53
SA1	417.53	-95.31	-50.66	-1136.43

Tabella 35 - Differenza malte semplici senza sostituzione aggregati

Dalla *tabella 34* si riscontra che la malta Vimark ha prestazioni inferiori rispetto alle malte da noi realizzate con cemento Portland o solfoalluminoso in termini di resistenza flessionale e di compressione, ma risulta più duttile, raggiungendo il doppio di A_F per il provino SA1.

Risultati analoghi si ottengono anche per i provini contenenti fibre (vedi *tabella 36*):

Tipologia Malta	Pmax [kN]	y1 [mm]	Af [mm]	σ_c [Mpa]
M2	0.53	0.48	0.09	-3.23
Variazione percentuale [%]				
P5	423.01	-70.93	-55.29	-1269.43
SA5	536.02	-75.78	-64.65	-1516.31

Tabella 36 - Differenza malte con fibre

Confrontando i provini contenenti plastica, la situazione cambia: per le malte realizzate con cemento, serie P ed SA, migliorano le caratteristiche di duttilità e infatti aumenta l'area sottesa alla curva post-picco pur diminuendo i carichi di picco rispetto al caso precedente.

Analisi dei risultati ottenuti

Tipologia Malta	Pmax [kN]	y1 [mm]	Af [mm]	σ_c [Mpa]
M3	0.61	0.25	0.04	-4.81
Variazione percentuale [%]				
P7	274.13	-13.16	15.67	-715.61
SA7	328.48	-24.74	12.74	-845.55

Tabella 37 - Differenza malte con plastica tipo (1)

Tipologia Malta	Pmax [kN]	y1 [mm]	Af [mm]	σ_c [Mpa]
M4	0.67	0.21	0.03	-4.71
Variazione percentuale [%]				
P8	237.55	-53.97	1.07	-778.97
SA8	273.57	-3.17	38.41	-917.06

Tabella 38 - Differenza malte con plastica tipo (2)

Il confronto tra le malte contenenti gomme da PFU si effettua quindi solo tra i provini della serie P ed SA: risultano più duttili le malte con cemento Portland, seppur con resistenze minori (*tabella 39*); il trattamento superficiale della gomma con i silani non migliora il comportamento duttile, anzi A_F risulta leggermente inferiore alla gomma non trattata, ma le resistenze risultano leggermente superiori (*tabella 40*); per la gomma trattata al plasma si ottengono risultati simili (*tabella 41*).

Tipologia Malta	Pmax [kN]	y1 [mm]	Af [mm]	ρ [g/cm ³]	σ_c [Mpa]
P2	1.48	0.11	0.025	1.92	19.84
Variazione percentuale [%]					
SA2	25.33	0.00	-12.16	1.56	9.88

Tabella 39 – Differenza malte con gomma non trattata

Analisi dei risultati ottenuti

Tipologia Malta	Pmax [kN]	y1 [mm]	Af [mm]	ρ [g/cm ³]	σ_c [Mpa]
P3	1.67	0.06	0.021	1.97	20.83
Variazione percentuale [%]					
SA3	17.55	36.11	0.21	0.51	8.31

Tabella 40 – Differenza malte con gomma trattata con silanizzazione

Tipologia Malta	Pmax [kN]	y1 [mm]	Af [mm]	ρ [g/cm ³]	σ_c [Mpa]
P4	1,66	0,12	0,029	1,98	19,74
Variazione percentuale [%]					
SA4	15,15	-57,58	-30,38	0,00	20,16

Tabella 41 – Differenza malte con gomma trattata al plasma

Il secondo confronto è stato, per ogni tipo di cemento utilizzato, quindi per ogni serie di provini, tra il provino numero 1 (malta semplice) e i successivi, sui quali sono state effettuate le sostituzioni:

Tipologia Malta	Pmax [kN]	y1 [mm]	Af [mm ²]	σ_c [Mpa]
M1	0.78	0.11	0.02	-5.73
Variazione percentuale rispetto alla malta normale [%]				
M2	-32.89	351.56	324.64	-43.61
M3	-22.15	137.50	77.18	-16.09
M4	-14.39	96.88	28.77	-17.88

Tabella 42 – Differenza tra provini serie M

Si evince che, nel caso della malta premiscelata Vimark, il risultato più efficace è stato raggiunto con il provino M4: il provino M2 risulta il più duttile, in quanto i parametri Af e y1 aumentano notevolmente rispetto alla malta semplice M, ma è quello che mostra più di tutti un abbattimento di resistenza. Potrebbe risultare strano, in quanto ci si aspetterebbe che con le fibre si raggiungano resistenze maggiori rispetto a quella ottenuta con la sostituzione in plastica, ma come già anticipato il problema potrebbe essere stato non aver cambiato il mix design di sabbia e cemento, che avrebbe permesso alla pasta di avvolgere meglio le fibre.

Analisi dei risultati ottenuti

Tipologia Malta	Pmax [kN]	y1 [mm]	Af [mm]	ρ [g/cm ³]	σ_c [Mpa]
P1	3,37	0,02	0,02	2,26	53,97
Variazione percentuale rispetto alla malta normale [%]					
P2	-56,24	556,25	51,58	-15,04	-63,24
P3	-50,59	275,00	25,05	-12,83	-61,40
P4	-50,80	650,00	72,16	-12,39	-63,42
P5	-18,60	775,00	146,47	-2,65	-29,96
P7	-32,46	1275,00	166,05	-12,83	-45,14
P8	-32,98	504,17	68,96	-12,39	-40,78

Tabella 43 – Differenza tra provini serie P

Per le malte realizzate con cemento Portland, i carichi di picco diminuiscono meno nel caso del provino realizzato con l'aggiunta di fibre, il P5; la densità, e quindi il peso dei provini, ovviamente diminuisce con l'aggiunta di inerte polimerico sia con gomma che con plastica. Si è dimostrata però più efficace la sostituzione parziale dell'inerte con la plastica composta da mix a secco di ABS e PBT senza ulteriori cariche (provino P7): si ottiene ovviamente una riduzione di resistenza, che si osserva comunque anche in presenza di fibre, ma è comunque ridotta rispetto all'utilizzo della gomma, che la abbatterebbe di più del 50%; tale riduzione è però compensata da un favorevole acquisto di duttilità, che diventa circa 4 volte quella della malta semplice, maggiore anche rispetto a quello ottenuto con le fibre.

Analisi dei risultati ottenuti

Tipologia Malta	Pmax [kN]	y1 [mm]	Af [mm]	ρ [g/cm ³]	σ_c [Mpa]
SA1	4.05	0.01	0.01	2.25	59.41
Variazione percentuale rispetto alla malta normale [%]					
SA2	-54.31	2000.00	107.86	-13.33	-63.31
SA3	-51.61	1533.33	95.62	-12.00	-62.03
SA4	-52.80	918.00	87.11	-12.00	-60.07
SA5	-17.52	2233.33	204.25	-1.78	-22.94
SA7	-35.55	3713.33	304.80	-12.00	-39.64
SA8	-38.20	3966.67	261.19	-11.11	-35.26

Tabella 44 – Differenza tra provini serie SA

Per le malte con cemento solfoalluminoso, i risultati sono pressoché simili ai precedenti, tranne per quanto riguarda la duttilità: i provini più duttili risultano non solo gli SA7, ma anche gli SA8, ossia quelli con la parziale sostituzione di plastica di tipo (1) e (2), maggiore anche di quella ottenuta dai provini con fibre, SA5, e anche in questo caso a discapito di una diminuzione del picco massimo di resistenza sia per la flessione che per la compressione. Tale riduzione è comunque meno rilevante di quella che si ottiene con le gomme, sia trattate che non trattate, che quindi sono risultate non favorevoli al miglioramento della malta in questione.

Di seguito si portano dei grafici riassuntivi che sintetizzano l'andamento dei risultati di cui si è appena discusso:

Analisi dei risultati ottenuti

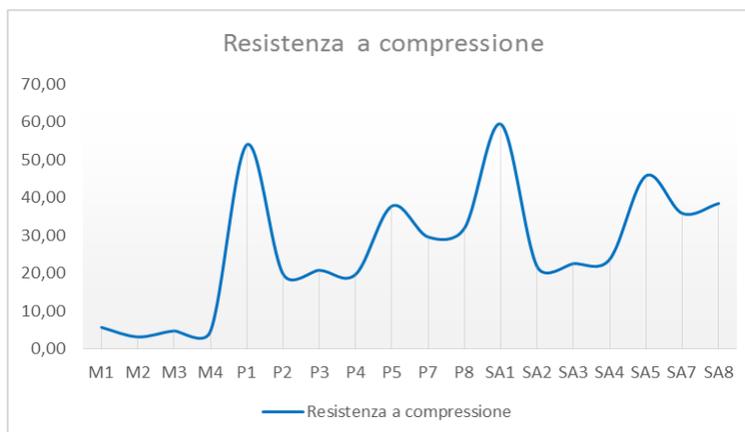
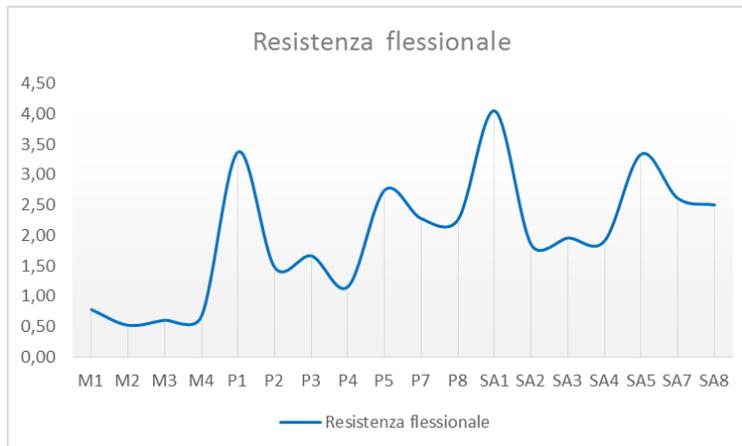
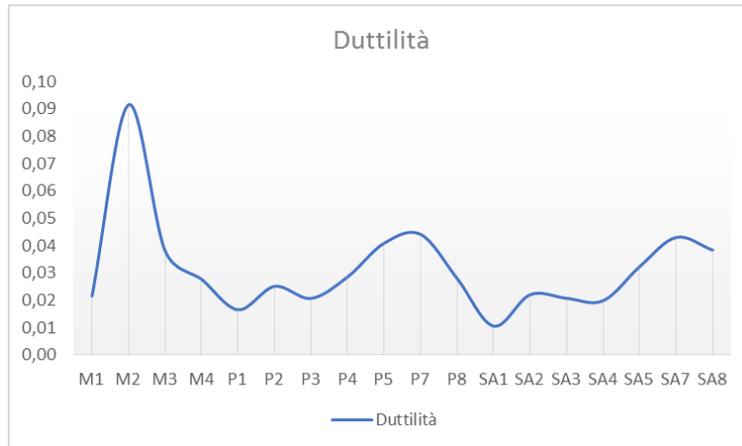


Figura 67 – Andamento duttilità e resistenze tra i diversi provini

Capitolo 5. Conclusioni

Lo *sviluppo sostenibile* è un concetto che si basa su tre pilastri fondamentali che riguardano valori ambientali, sociali ed economici ed è comunemente definito come “*lo sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri*” [6]. Tali concetti sono stati ampiamente presi in considerazione dal comitato tecnico europeo del CEN nella definizione di edilizia sostenibile.

A fronte della pericolosità a livello di impatto di ambientale delle eccessive emissioni di CO₂, di cui una grossa percentuale è generata proprio dalla produzione del calcestruzzo, in particolare del clinker, e delle problematiche riguardanti l'estrazione da cava per il reperimento degli aggregati, è dovere del settore delle costruzioni vertere verso un'economia detta *circolare*. Questa deve puntare all'utilizzo, seppure parziale, di materie prime secondarie provenienti da materiale da riciclo, che possono essere rifiuti derivanti dalla stessa demolizione di costruzioni esistenti o recuperati da materie il cui smaltimento contribuirebbe all'aumento delle emissioni globali di CO₂, come gomma e plastica.

È stato questo il principio su cui è stato realizzato questo lavoro di tesi, che ha sperimentato l'utilizzo di questi materiali per la realizzazione di malte di cemento. Ciò ha permesso non solo di ridurre l'impronta ecologica dovuta alla produzione di malte e calcestruzzi, ma si è anche verificato il miglioramento di alcune caratteristiche meccaniche del conglomerato stesso: in generale, con l'aggiunta di materiale polimerico, si è riscontrato un aumento della duttilità a discapito di una riduzione delle resistenze a compressione e flessione e ovviamente una diminuzione della densità per il minor peso specifico dei materiali polimerici rispetto all'inerte classico.

Per quanto riguarda la sperimentazione sui provini realizzati con malta premiscelata (serie M), per i quali è stato sostituito parzialmente l'inerte con plastica, in quantità pari a circa il 17% (M3-M4), o sono state semplicemente aggiunte fibre di polipropilene (M2), si è riscontrata una apparentemente strana perdita di resistenza con le fibre, più che con le plastiche, a favore però di un notevole aumento di duttilità; rapporto migliore tra resistenza e duttilità si ottiene con la plastica 1 (provini M3), per i quali la duttilità, seppur non raggiungendo quella ottenuta con le fibre, comunque raddoppia, ma con un abbattimento più ridotto della resistenza, sia compressiva che flessionale.

Per i provini realizzati con cemento Portland e solfoalluminoso sono state

Conclusioni

effettuate parziali sostituzioni sia con la plastica che con la gomma (circa il 35% in volume); la sperimentazione ha valutato anche le variazioni delle proprietà meccaniche a seguito di trattamenti superficiali della gomma, in particolare al plasma e con silani. Per entrambi i cementi è stato ottenuto un risultato migliore con le plastiche rispetto alle gomme, i cui trattamenti hanno anche portato all'infragilirsi della malta.

Riferendoci alle malte con cemento Portland si è dimostrata più efficace la sostituzione parziale dell'inerte con la plastica composta da mix a secco di ABS e PBT senza ulteriori cariche (provini P7): si ottiene ovviamente una riduzione di resistenza, che si osserva comunque anche in presenza di fibre, ma è comunque ridotta rispetto all'utilizzo della gomma, che la abbatterebbe di più del 50%; tale riduzione è però compensata da un favorevole acquisto di duttilità, che diventa circa il doppio rispetto alla malta semplice, quindi anche maggiore rispetto a quello ottenuto con le fibre.

Tendenza simile si evince anche dall'analisi dei risultati dei provini realizzati con cemento solfoalluminoso, per i quali però si ottengono risultati ancora più ottimali nei provini SA8, ossia quelli in cui la sostituzione è stata effettuata con plastica ottenuta da mix a secco di PP caricata con 30% di fibra di vetro e PA66 caricata con 25-30% di fibra di vetro. In questo caso i provini SA7 ed SA8 superano addirittura la duttilità ottenuta con le fibre, SA5, pur con la prevista riduzione di resistenza, inferiore al 40%.

Si può dire in generale quindi che, analizzando il comportamento post-fessurativo dei provini realizzati, si ottengono risultati migliori con la sostituzione dell'inerte con materiale plastico rispetto alla gomma e che addirittura, cercando di migliorare le proprietà di quest'ultima con dei trattamenti superficiale, si rischia di infragilire la malta, come si può osservare per esempio dai provini P3, per i quali l'area A_F sottesa al diagramma post-picco del diagramma carico-deformazione, risulta circa la metà rispetto a quella ottenuta dai provini P2, con gomma non trattata.

La tendenza ad avere risultati migliori con la plastica rispetto alla gomma potrebbe essere dovuta sia ad una maggiore resistenza intrinseca della plastica, sia alla migliore interfaccia del materiale, evidentemente più affine al cemento (in particolare maggiore polarità rispetto alle gomme). Si è cercato con i trattamenti superficiali della gomma di sopperire a questo, ma non è stato comunque efficace.

In conclusione possiamo dire che il calcestruzzo realizzato con materiale da riciclo ha sicuramente un minor impatto ambientale, in accordo con l'idea di "*Green concrete*" verso la quale tende l'economia circolare da adottare nel settore delle costruzioni, e quindi non solo garantiamo migliori prestazioni ecologiche, ma

Conclusioni

abbiamo dimostrato che l'utilizzo di materiale di scarto di natura polimerica aiuta anche a migliorare alcune proprietà meccaniche del conglomerato stesso, come densità, quindi lavorabilità, duttilità e durabilità.

Fonti bibliografiche

- [1] Alberto D'Amore, **APPENDICE A: Malte e calcestruzzi**. In: J.K SHACKELFORD, *Scienza ed Ingegneria dei Materiali*, Milano: Pearson Paravia Bruno Mondadori (2009)
- [2] Coppola L., **Concretum**, McGraw-Hill, Milano (2007)
- [3] Yuelin Li, Wengui Li, Dehua Deng, Kejin Wang, Wen Hui Duan, **Reinforcement effects of polyvinyl alcohol polypropylene fibers on flexural behaviours of sulfoaluminate cement matrices** (Febbraio 2018)
- [4] A.P. Fantilli, Silvio Sicardi, Francesca Dotti, **The use of wool as fiber-reinforcement in cement-based mortar** (2016)
- [5] www.genitronsviluppo.com, **Calcestruzzo e cemento che catturano CO₂: l'importanza di responsabilizzare il settore dell'edilizia verso la Green Economy** (Febbraio 2010)
- [6] Assiad, **Il calcestruzzo armato sostenibile**
- [7] Eurostat, **Early estimates of CO₂ emissions from energy use** (Maggio 2018)
- [8] Legambiente, **Rapporto cave 2017**, ATECAP (Febbraio 2017)
- [9] Legambiente, **L'economia circolare nel settore delle costruzioni – Rapporto dell'Osservatorio Recycle** (Giugno 2017)
- [10] ATECAP, **Criteri ambientali minimi per l'edilizia** (Settembre 2017)
- [11] Giacomo Moriconi, **Aggregati riciclati nel calcestruzzo: Le Norme, l'evoluzione in Italia e in Europa e i pregiudizi da superare**, In *Concreto*
- [12] Andrea Zegna, **Le malte di cemento con inerti polimerici**, Politecnico di Torino (2017)
- [13] www.recuperpneus.it, **Pneumatici fuori uso: ecco perchè la raccolta non funziona**(Agosto 2018)
- [14] www.architetturasostenibile.it, **Pneumatici dismessi: una risorsa sostenibile per materiali edili** (Agosto 2018)
- [15] Giuseppe Marano, Cesare Marti Ph. D., Marcello Molfetta, Valentina Sammarco, **Il rubbercrete - analisi delle proprietà fisico-meccaniche e durabilità**, In *Concreto*
- [16] Najib N. Gerges, Camille A. Issa, Samer A. Fawaz, **Rubber concrete: Mechanical and dynamical properties** (Luglio 2018)
- [17] Fahad K. Alqathani, Gurmel Ghataora, M. Iqbal Khan, Samir Dirar, **Novel lightweight concrete containing manufactured plastic aggregate** (Maggio 2017)

- [18] www.chimica-online.it, **Polipropilene**
- [19] www.resinex.ch/it, **Tipi di polimeri: PBT**
- [20] www.chimicamo.org, **Poliammidi**
- [21] [https://it.wikipedia.org/wiki/Acrilonitrile_butadiene_stirene_\(ABS\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Acrilonitrile_butadiene_stirene_(ABS))
- [22] www.matrec.it, Adriano Magliocco, **Il riciclo: La Plastica** (2006)
- [23] Lateef Assi, Kealy Carter, Edward (Eddie) Deaver, Rafal Anay, Paul Ziehl, **Sustainable concrete: Building a greener future** (Luglio 2018)
- [24] Vinita Vishwakarma, D. Ramachandran, **Green concrete mix using solid waste and nanoparticles as alternatives – A riview** (Dicembre 2017)
- [25] James di Filippo, Jason Karpman, J.R. Deshazo, **Cement and concrete composites - The impacts of policies to reduce CO₂ emissions within the concrete supply chain** (2018)
- [26] www.pbl.nl, **Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions: 2017 report**
- [27] Personal Factory, **Life cycle's analysis of CO₂ emissions**
- [28] Prof. Ing. Alessandro Pasquale Fantilli, Prof. Ing. Bernardino Chiaia, Ing. Carmelo Blandino, **L'impatto ambientale del calcestruzzo** (Giugno 2015)
- [29] www.stradeeautostrade.it, **Eco-aggregati riciclati: performance meccaniche e sostenibilità ambientale** (Agosto 2018)
- [30] www.encosrl.it, **Inerti**
- [31] www.ingegno-web.it, Giacomo Moriconi, **Calcestruzzo strutturale con aggregati riciclati, Concrete2014-Progetto e tecnologia per il costruito tra XX e XXI secolo** (Aprile 2016)
- [32] Jianzhuang Xiao a, b, *, Chunhui Wang a, Tao Ding a, Ali Akbarnezhad, **A recycled aggregate concrete high-rise building: Structural performance and embodied carbon footprint** (Luglio 2018)
- [33] O. Damdelen, **Investigation of 30% recycled coarse aggregate content in sustainable concrete mixes** (Giugno 2018)
- [34] www.matrec.it, Adriano Magliocco, **Il riciclo: La gomma** (2007)
- [35] Alessandro P. Fantilli, Bernardino Chiaia, Andrea Gorino, **Ecological and mechanical assessment of lightweight fiber-reinforced concrete made with rubber or expanded clay aggregates** (Ottobre 2016)
- [36] A. Sofi, **Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete – A review** (Agosto 2017)
- [37] Giuseppe Carlo Marano, Sara Sgobba, Alessandra Fiore, Domenico Similimeo e Rita Greco, **Valutazione della resistenza a compressione di calcestruzzi con aggregati in gomma da riciclo di pneumatici**

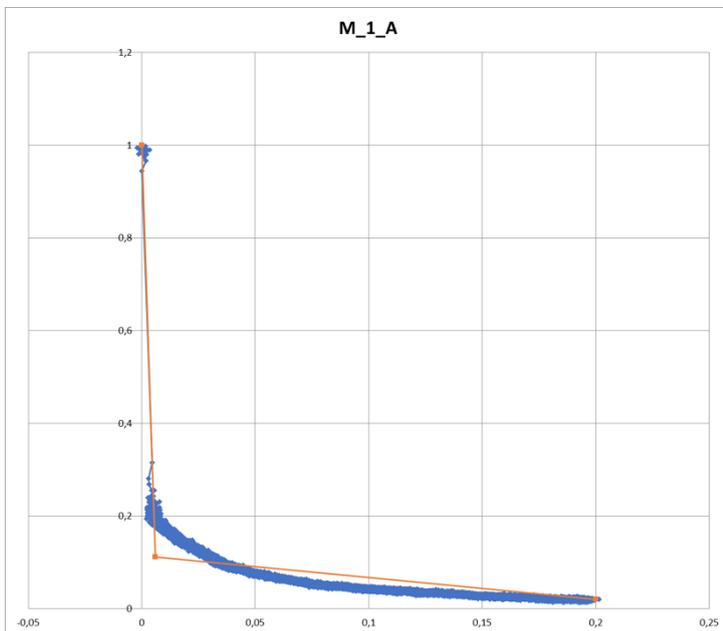
Fonti bibliografiche

- [38] Ornella Fiandaca, **Aggregati plastici riciclati per calcestruzzi leggeri strutturali**
- [39] www.vimark.com, **MPD20 - malta a base calce e cemento per la costruzioni di murature**
- [40] www.buzziunicem.it, **Cemento tipo IIA-LL425R**
- [41] www.buzziunicem.it, **Nextbinder-SN05**
- [42] Luisa Gaiero, **Processi di modificazione superficiale dello Pneumatico Fuori Uso**, Politecnico di Torino (2018)

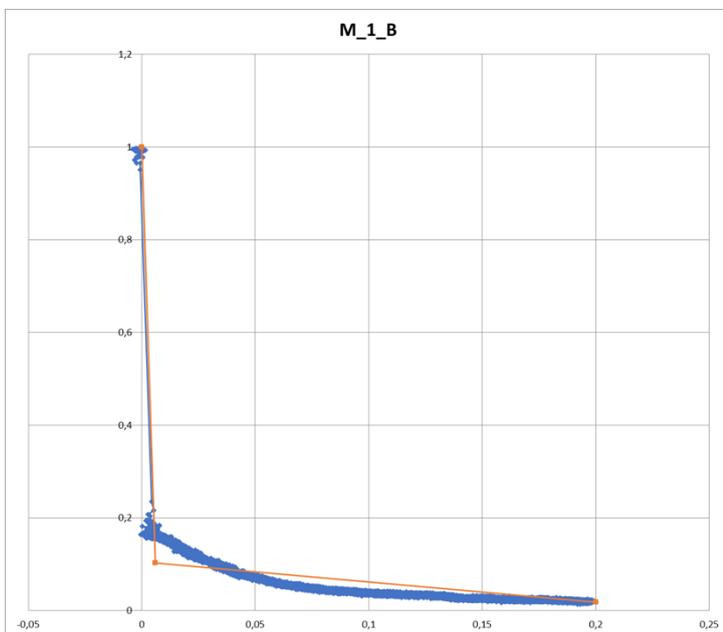
Allegati

Si riportano di seguito i diagrammi post-picco di tutti i provini analizzati con la costruzione della bilatera che meglio approssima la curva. Le coordinate dei punti che definiscono i tratti di cui è composta, quindi $(x_0; y_0)$, $(x_1; y_1)$ e $(x_2; y_2)$, sono servite per calcolare l'area sottesa al diagramma (AF) per valutare la duttilità dei vari provini.

Allegati

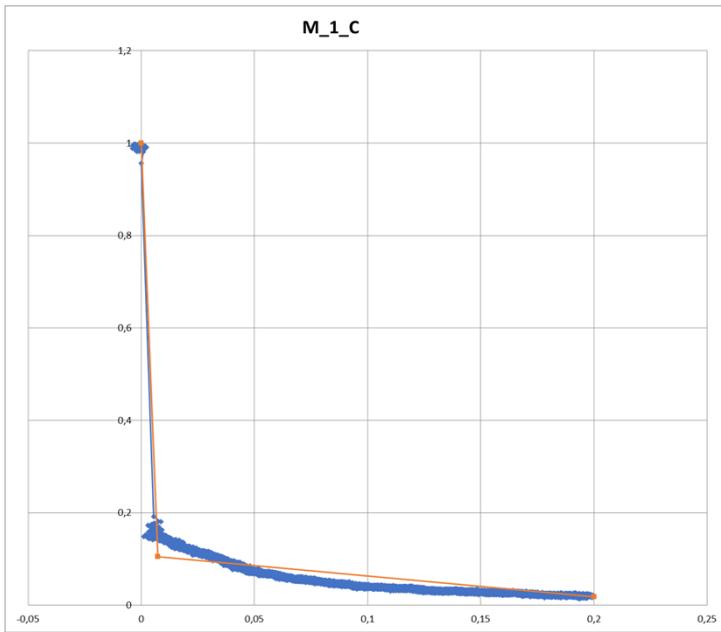


x0	0
y0	1
x1	0,006
y1	0,112
x2	0,2
y2	0,020051488

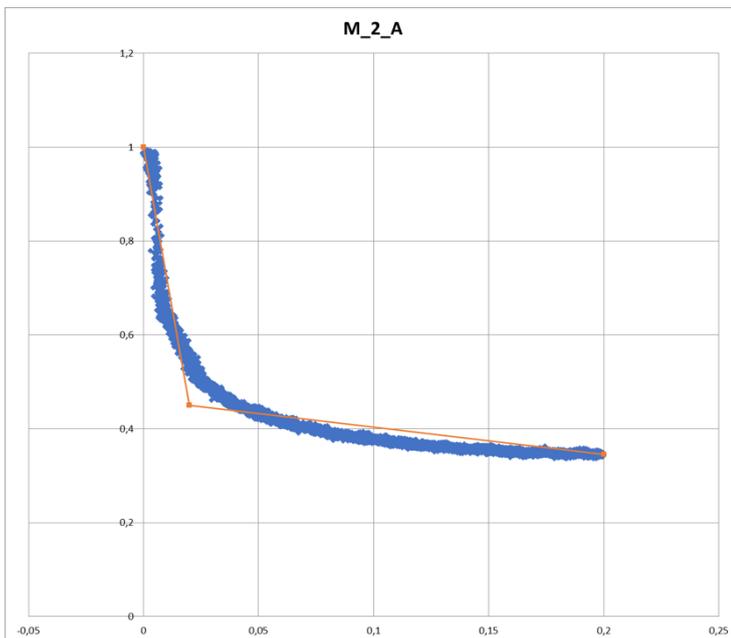


x0	0
y0	1
x1	0,006
y1	0,103
x2	0,2
y2	0,018403483

Allegati

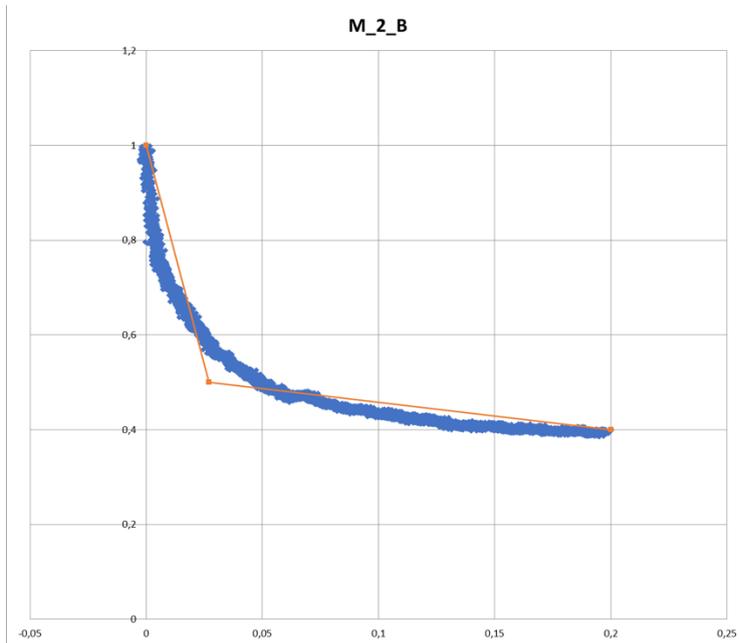


x0 0
y0 1
x1 0,0073
y1 0,105
x2 0,2
y2 0,018304357

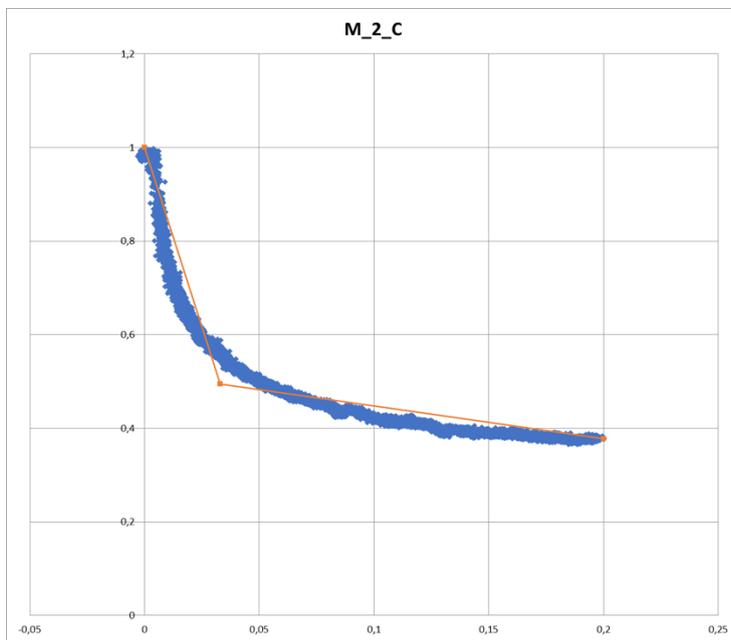


x0 0
y0 1
x1 0,02
y1 0,45
x2 0,2
y2 0,345281399

Allegati

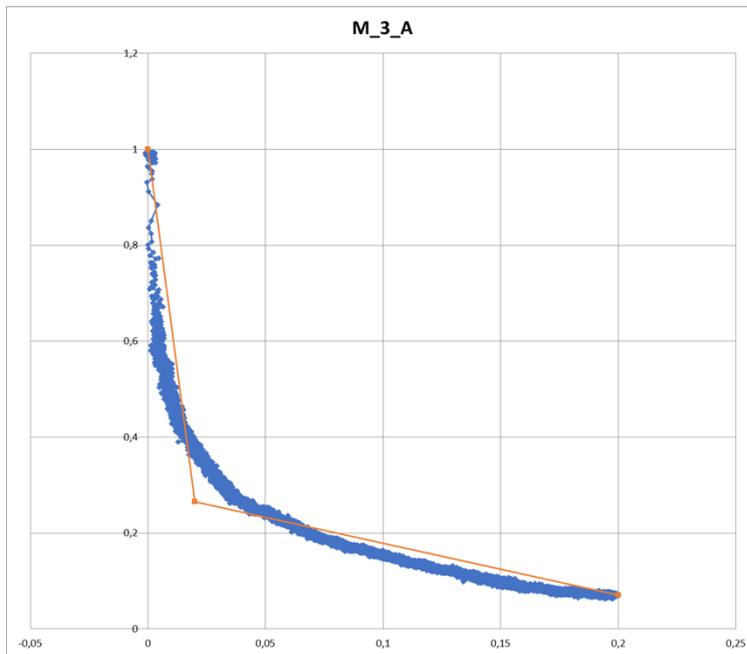


x0	0
y0	1
x1	0,027
y1	0,5
x2	0,2
y2	0,400484588

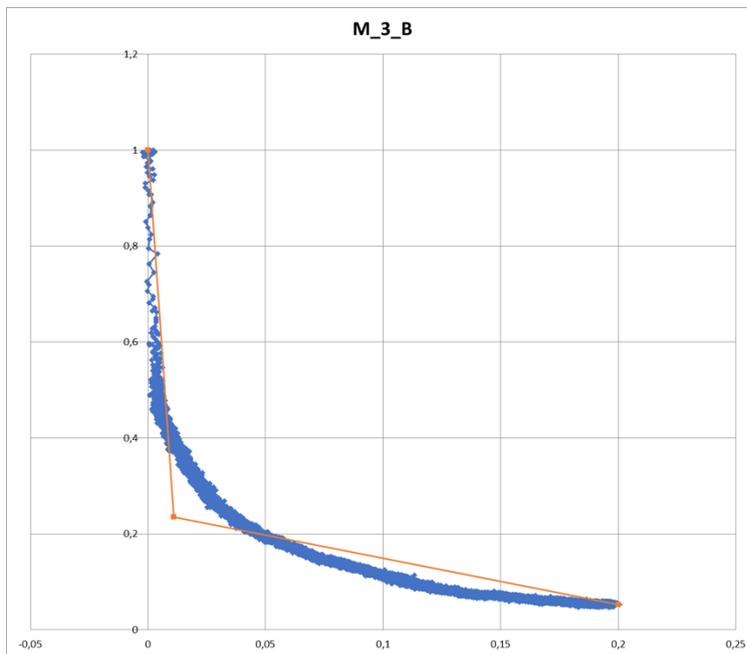


x0	0
y0	1
x1	0,033
y1	0,495
x2	0,2
y2	0,378363908

Allegati

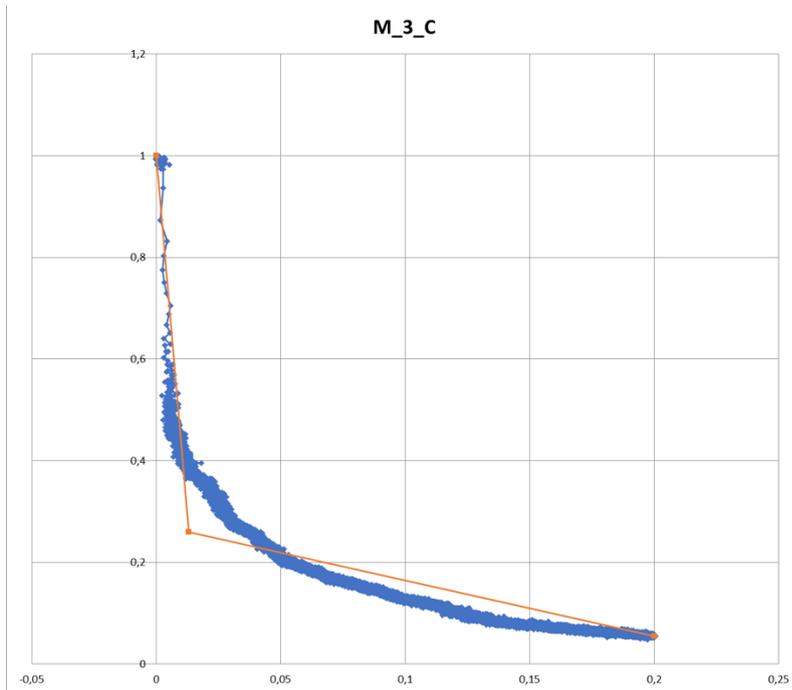


x0	0
y0	1
x1	0,02
y1	0,265
x2	0,2
y2	0,07091822

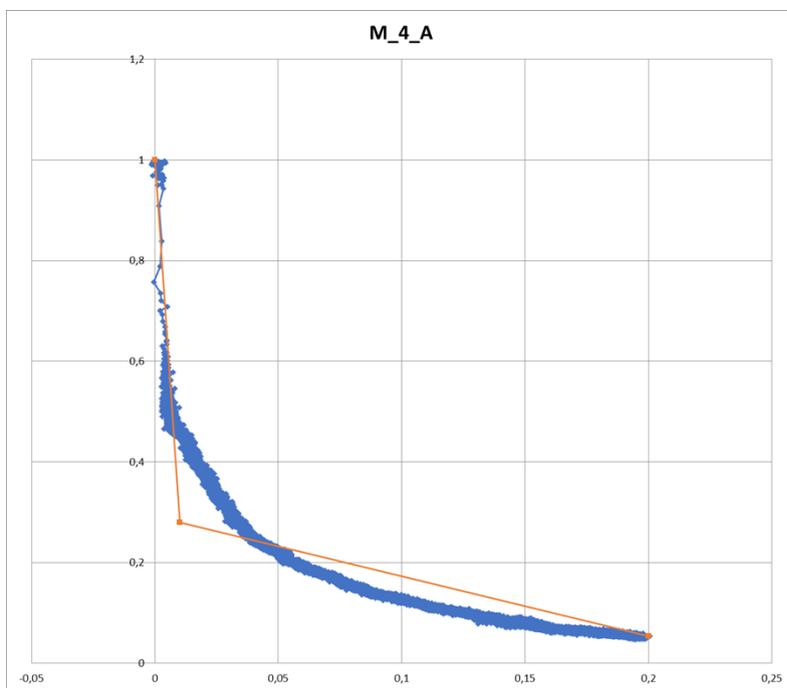


x0	0
y0	1
x1	0,011
y1	0,235
x2	0,2
y2	0,05253898

Allegati

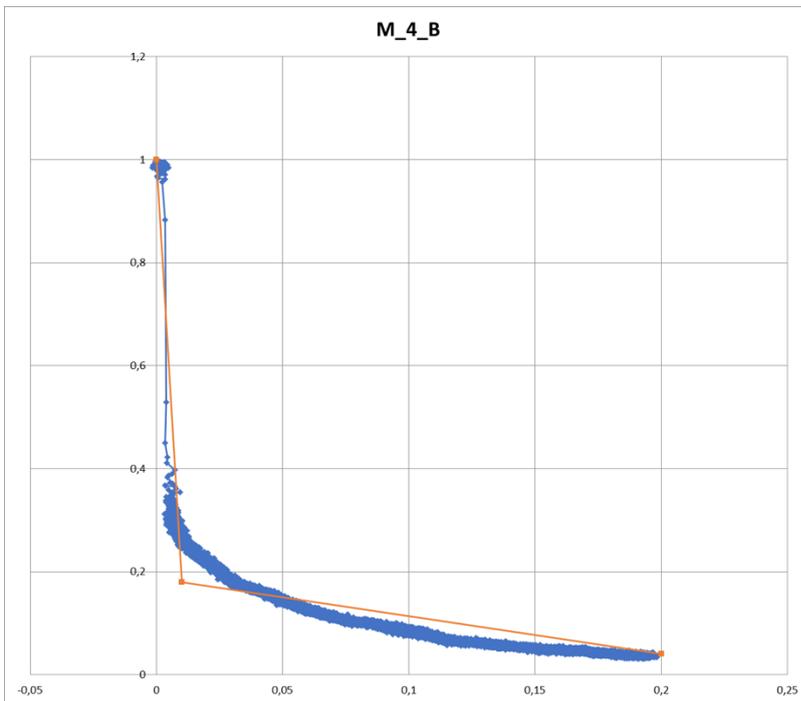


x0	0
y0	1
x1	0,013
y1	0,26
x2	0,2
y2	0,055558785

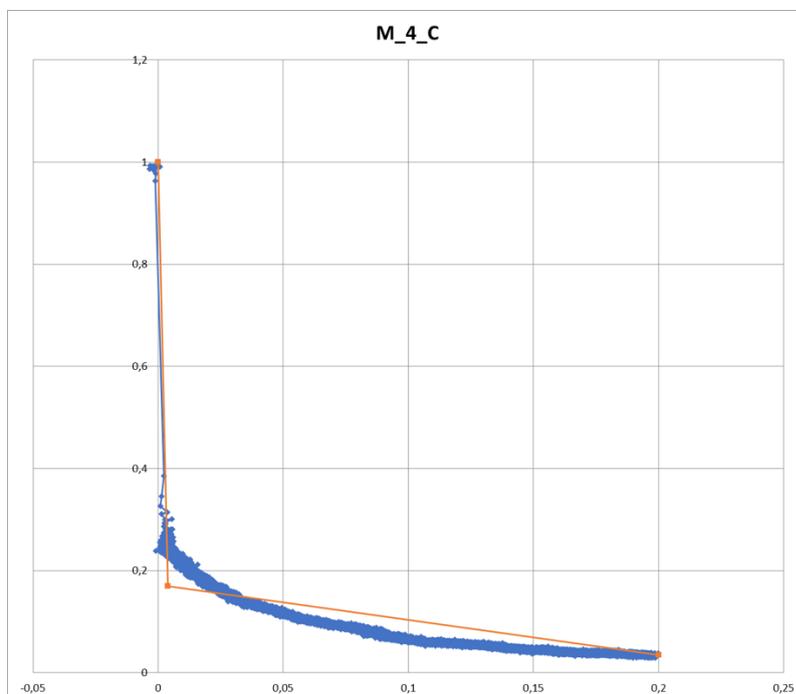


x0	0
y0	1
x1	0,01
y1	0,28
x2	0,2
y2	0,054345238

Allegati

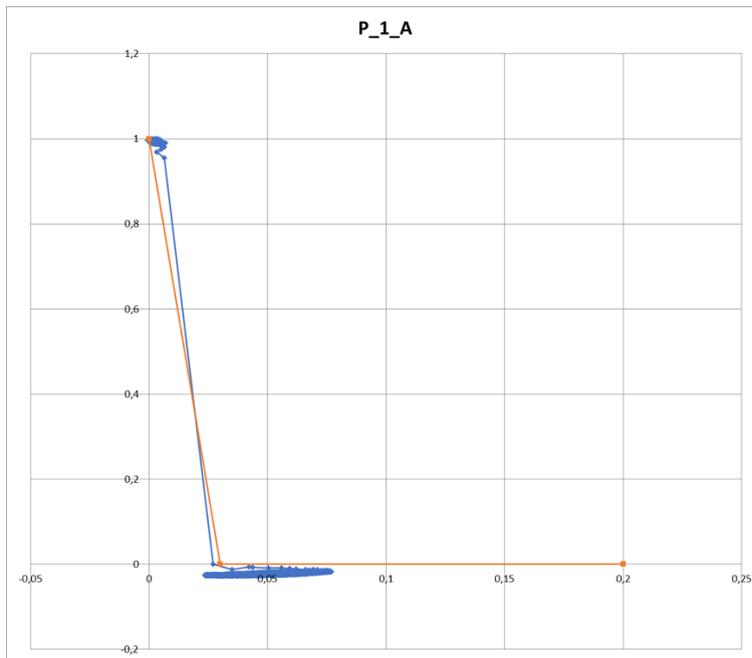


x0	0
y0	1
x1	0,01
y1	0,18
x2	0,2
y2	0,040964917

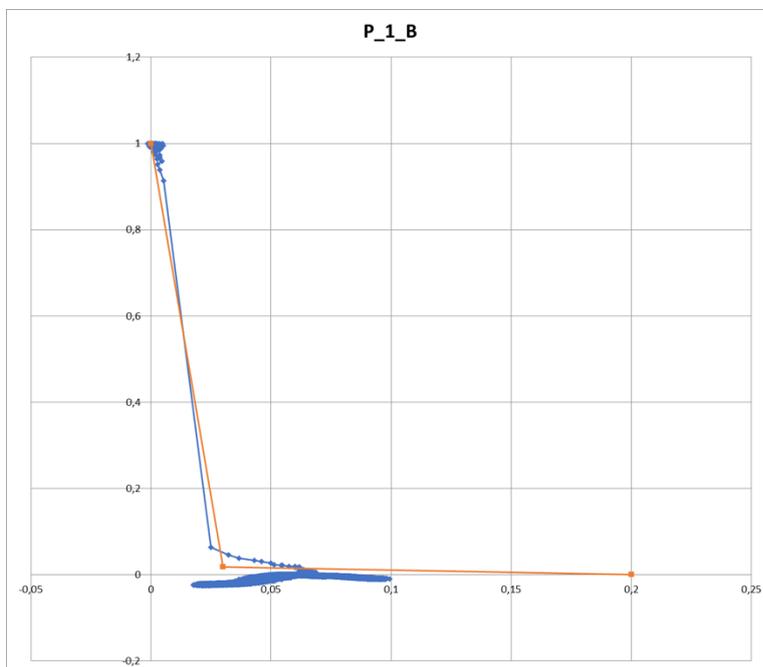


x0	0
y0	1
x1	0,004
y1	0,17
x2	0,2
y2	0,035192815

Allegati

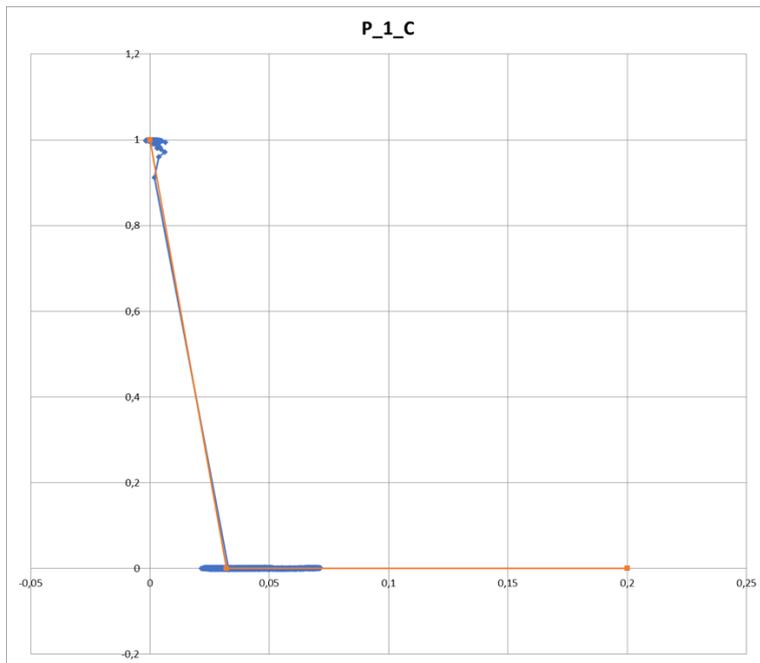


x0	0
y0	1
x1	0,03
y1	0
x2	0,2
y2	0

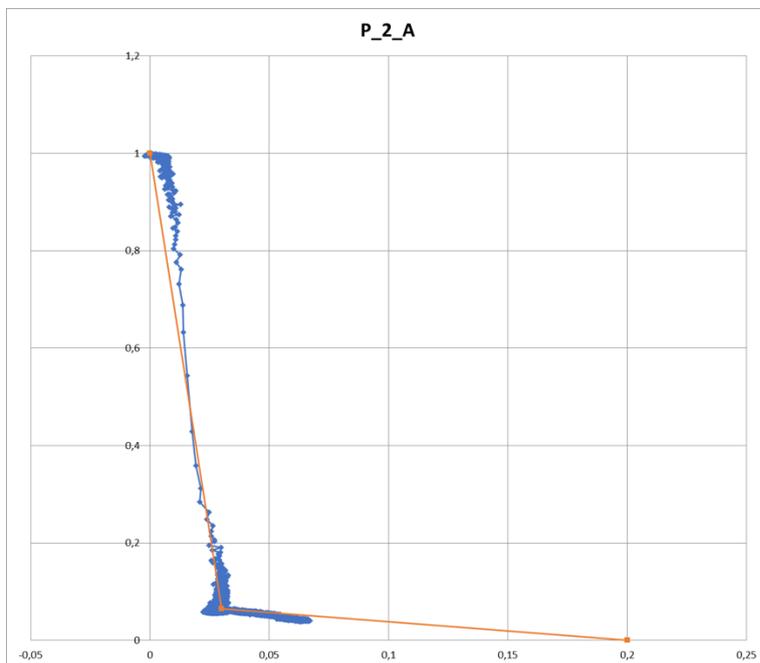


x0	0
y0	1
x1	0,03
y1	0,018
x2	0,2
y2	0

Allegati

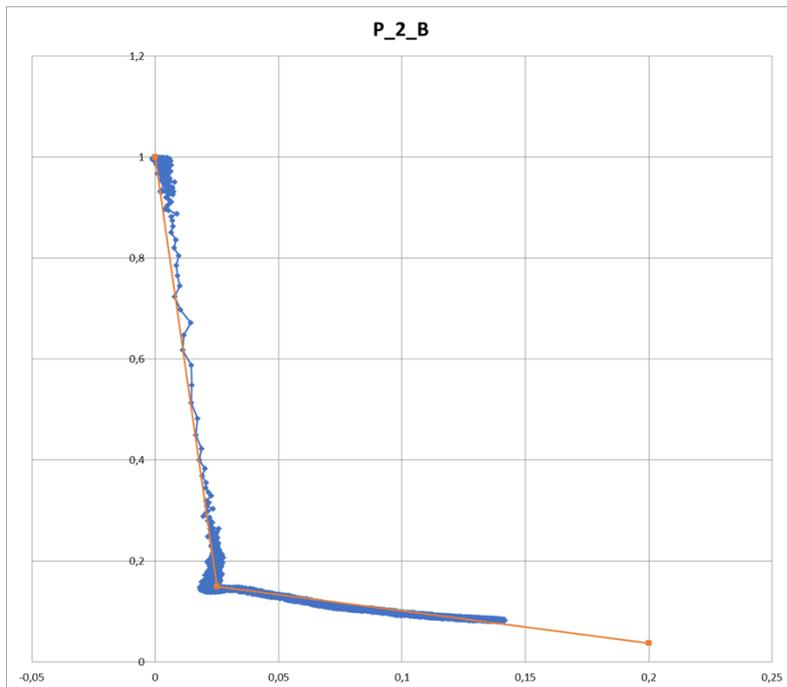


x0	0
y0	1
x1	0,032
y1	0
x2	0,2
y2	0

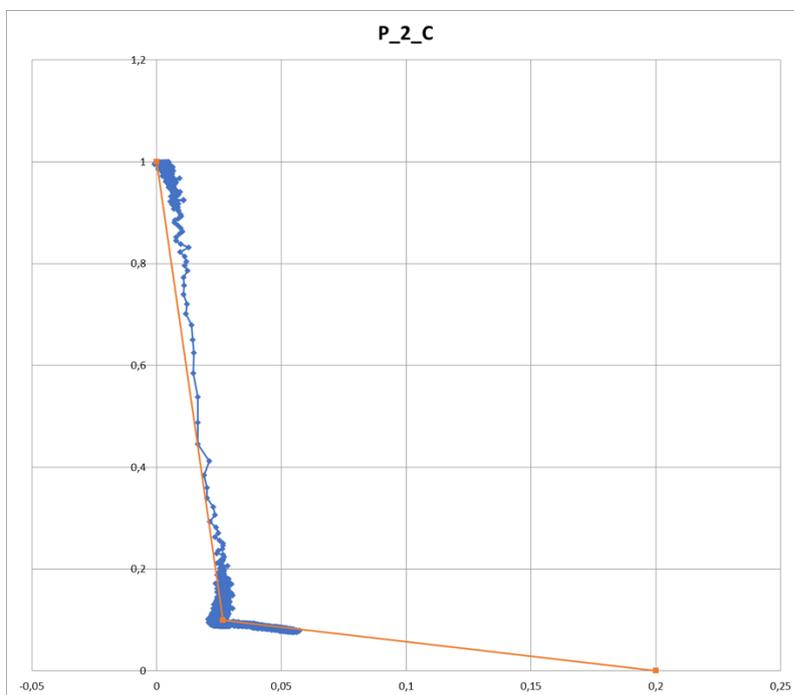


x0	0
y0	1
x1	0,03
y1	0,065
x2	0,2
y2	0

Allegati

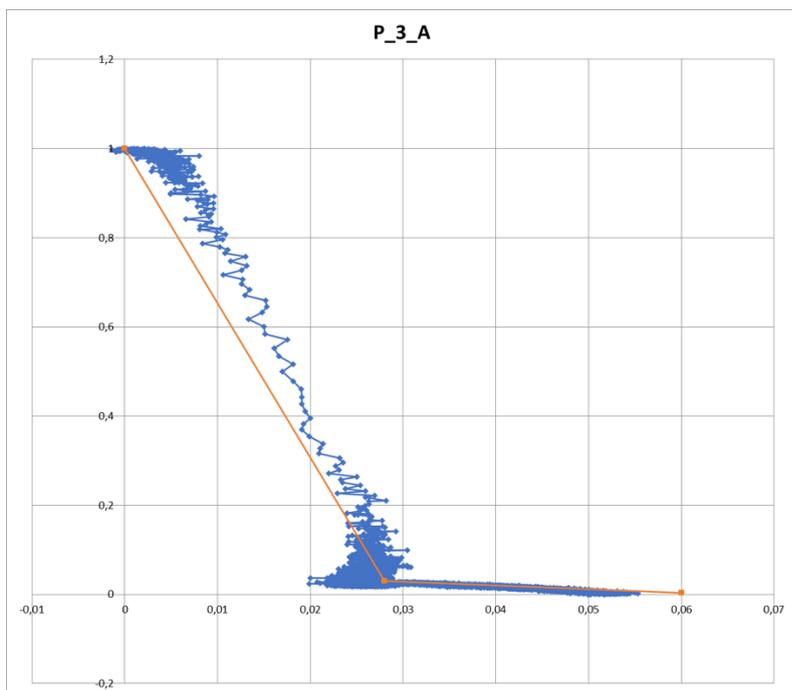


x0	0
y0	1
x1	0,025
y1	0,15
x2	0,2
y2	0,037

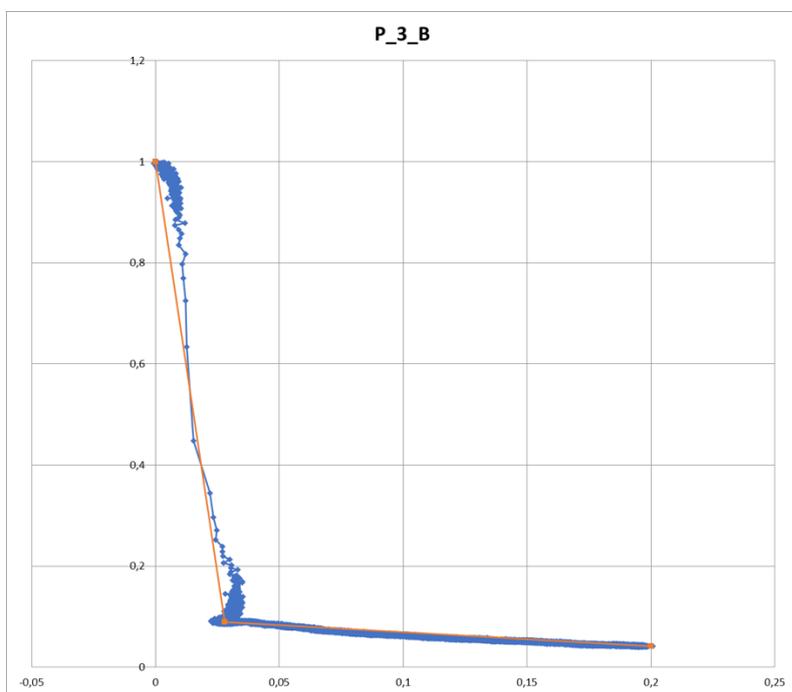


x0	0
y0	1
x1	0,0265
y1	0,1
x2	0,2
y2	0

Allegati

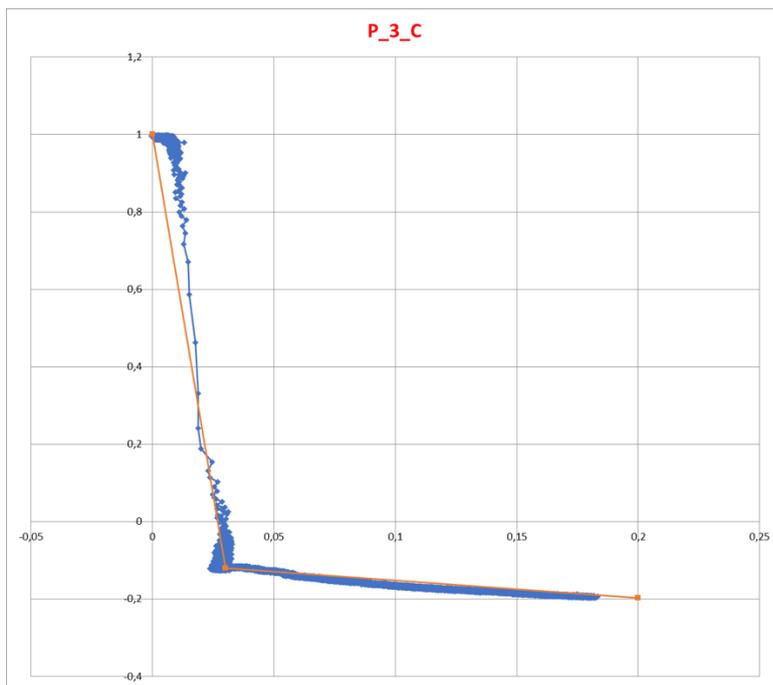


x0	0
y0	1
x1	0,028
y1	0,03
x2	0,06
y2	0,003085382

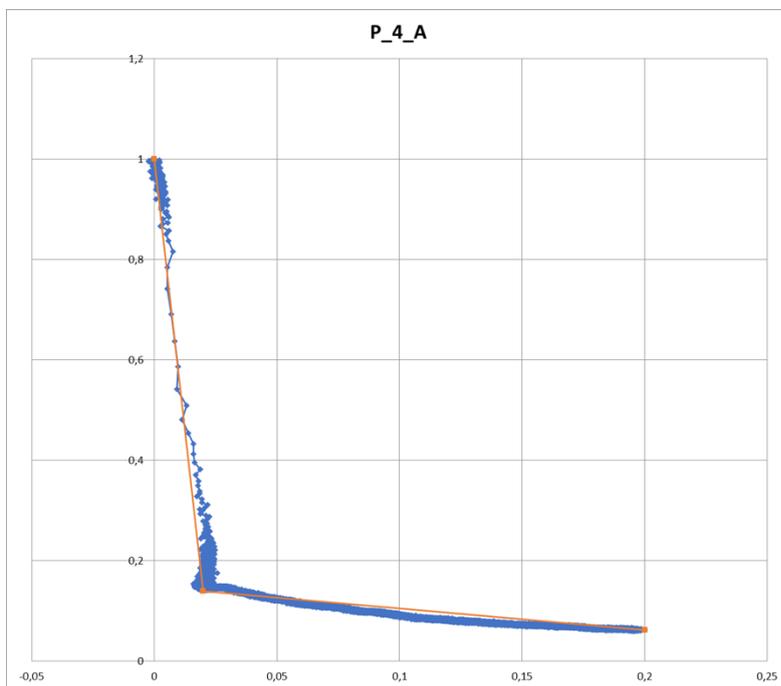


x0	0
y1	1
x1	0,028
y1	0,09
x2	0,2
y2	0,041492199

Allegati

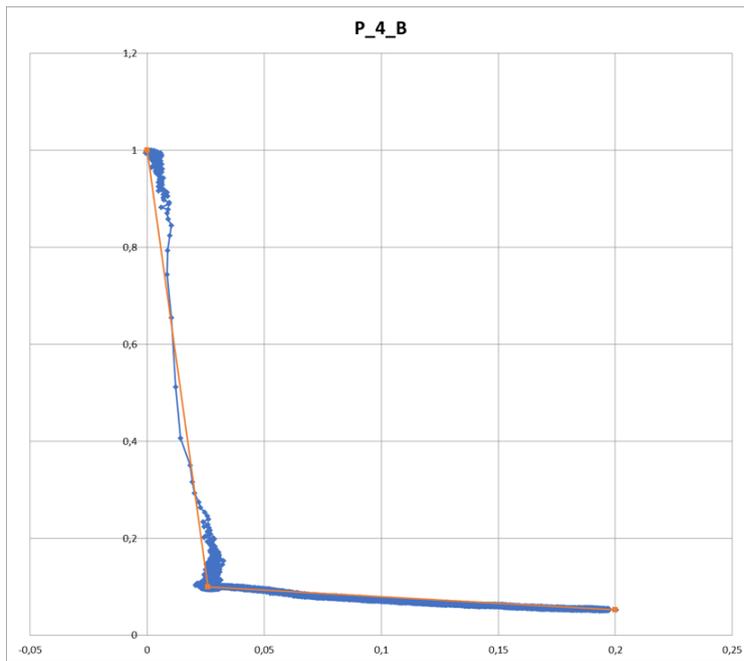


x0	0
y0	1
x1	0,03
y1	-0,12
x2	0,2
y2	-0,19671149

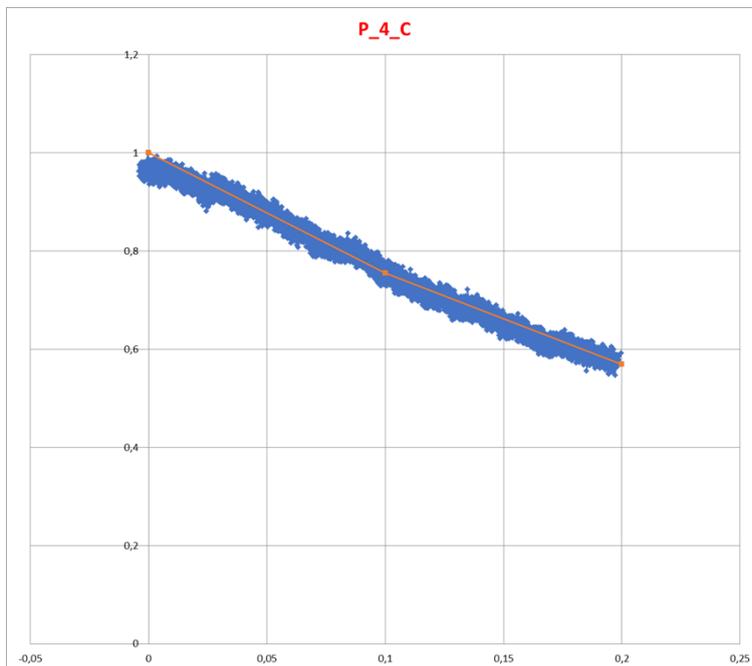


x0	0
y0	1
x1	0,02
y1	0,14
x2	0,2
y2	0,061715414

Allegati

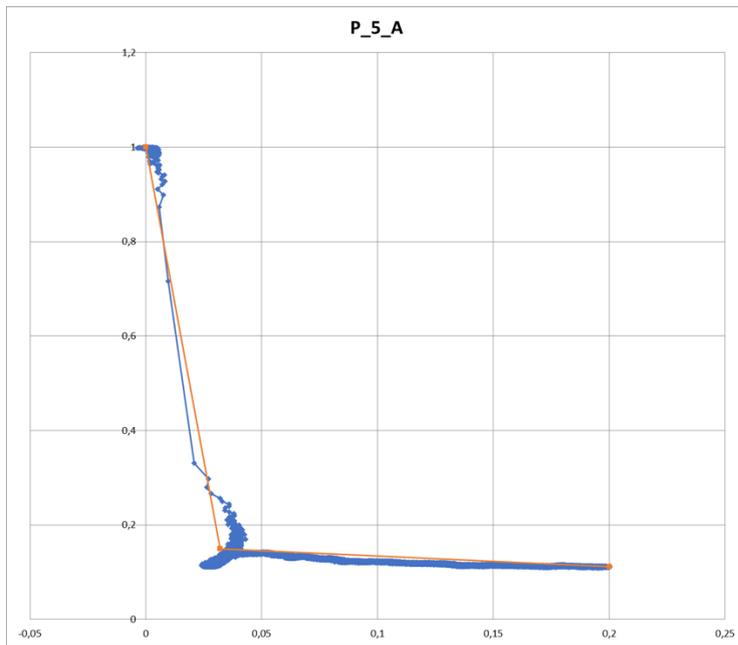


x0	0
y0	1
x1	0,026
y1	0,1
x2	0,2
y2	0,052899844

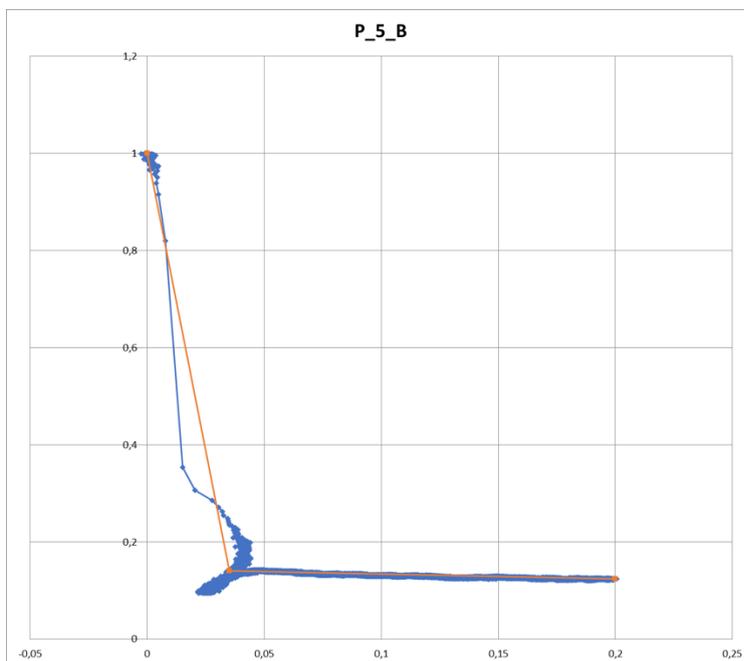


x0	0
y0	1
x1	0,1
y1	0,755
x2	0,2
y2	0,568871388

Allegati

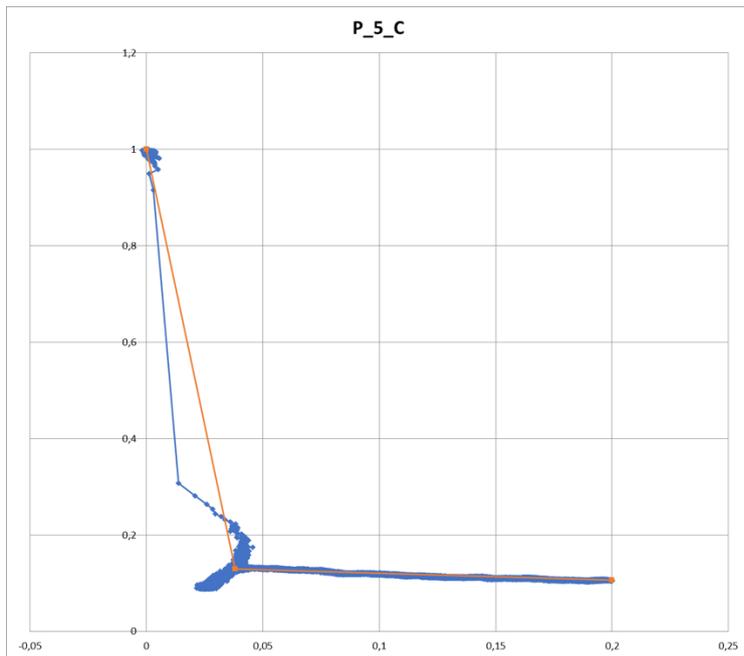


x0	0
y0	1
x1	0,032
y1	0,15
x2	0,2
y2	0,111798308

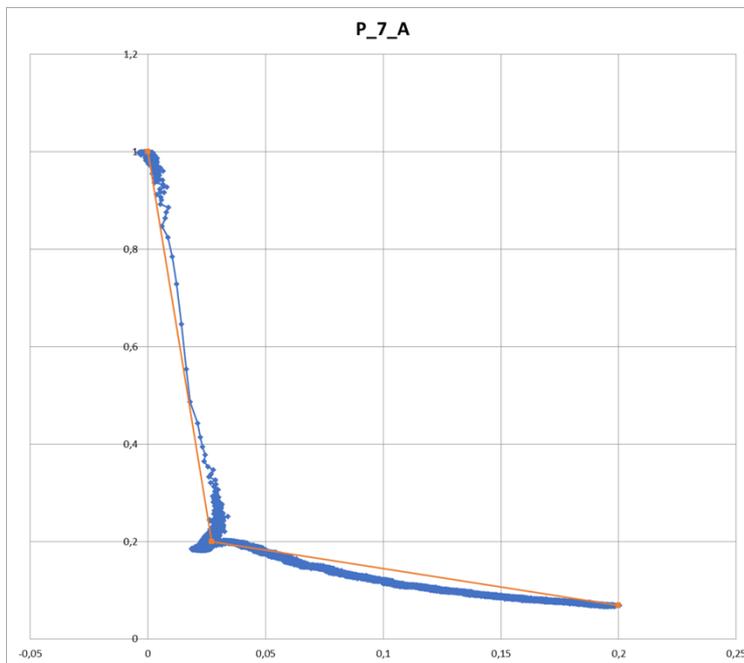


x0	0
y0	1
x1	0,035
y1	0,14
x2	0,2
y2	0,123656403

Allegati

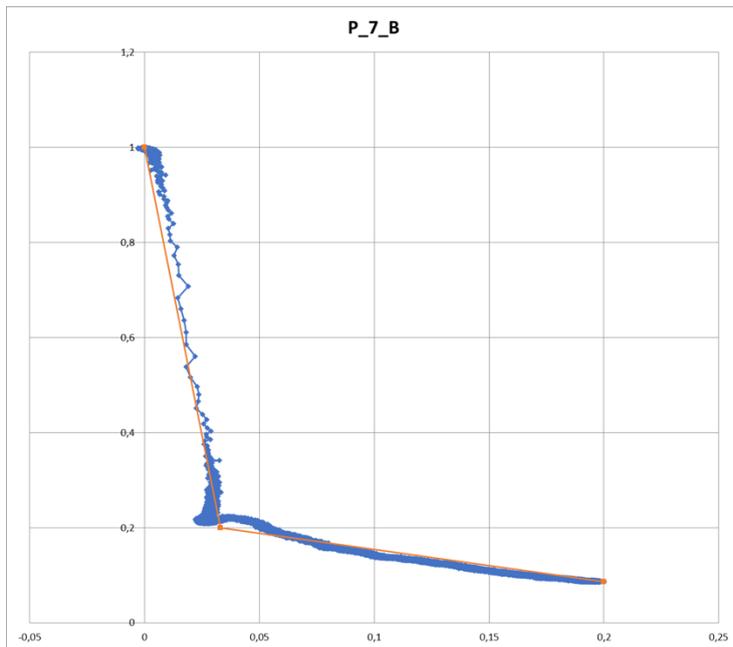


x0	0
y0	1
x1	0,038
y1	0,13
x2	0,2
y2	0,10675636

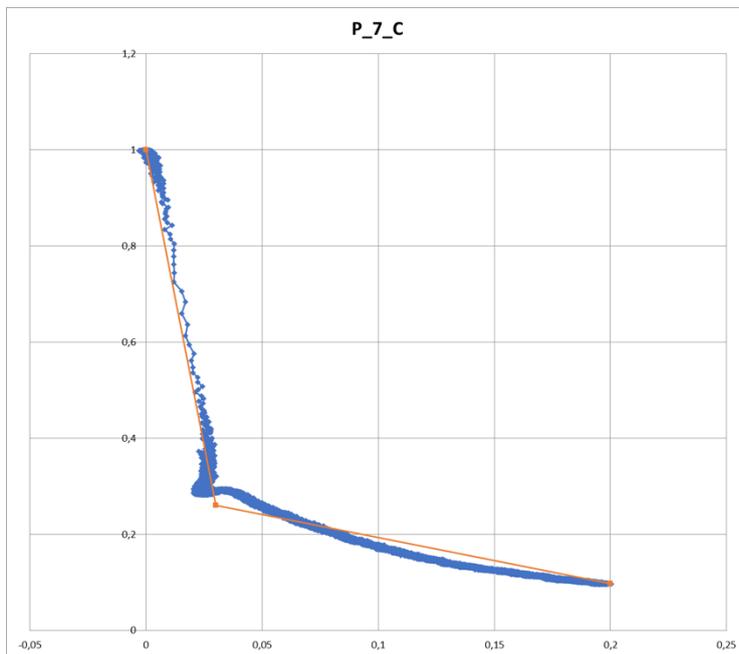


x0	0
y0	1
x1	0,027
y1	0,2
x2	0,2
y2	0,068841818

Allegati

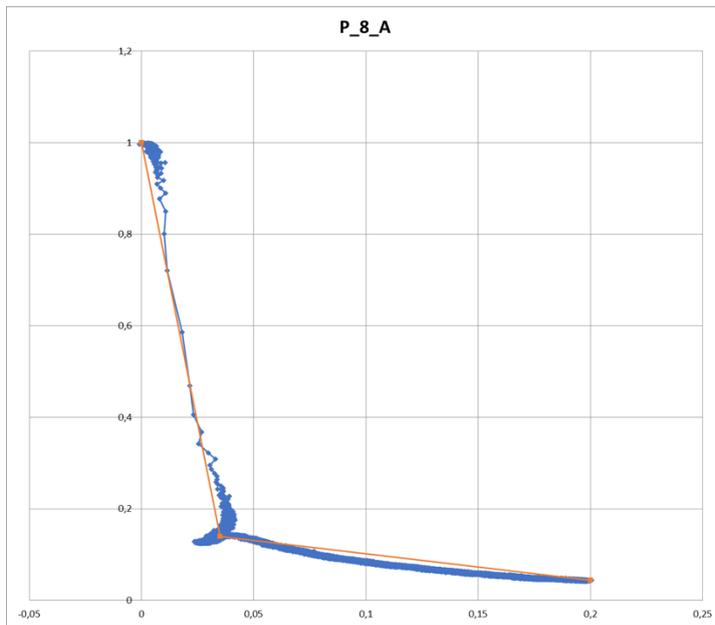


x0	0
y0	1
x1	0,033
y1	0,2
x2	0,2
y2	0,086903417

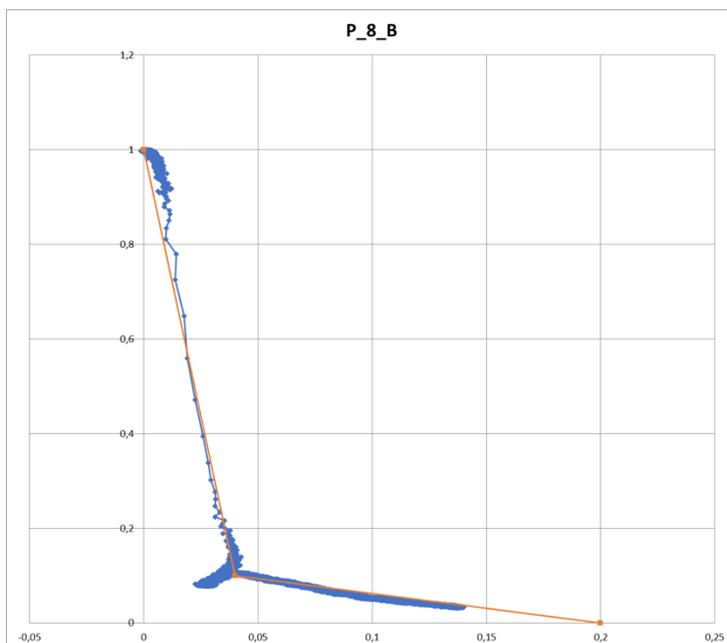


x0	0
y0	1
x1	0,03
y1	0,26
x2	0,2
y2	0,097413167

Allegati

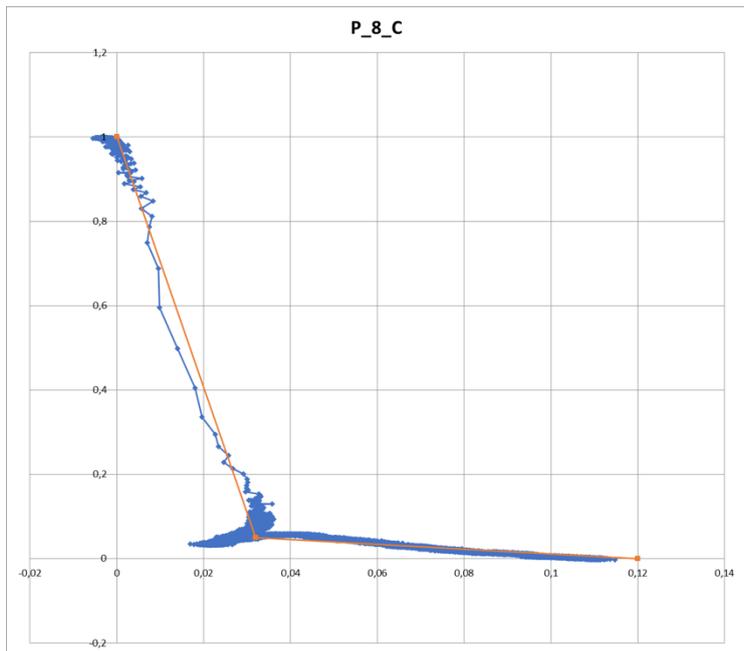


x0	0
y0	1
x1	0,035
y1	0,14
x2	0,2
y2	0,044135697



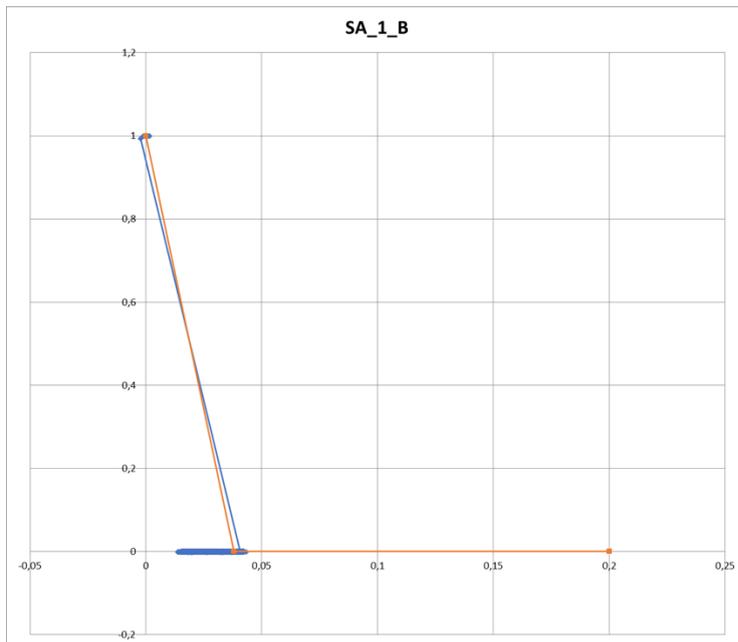
x0	0
y0	1
x1	0,04
y1	0,1
x2	0,2
y2	0

Allegati

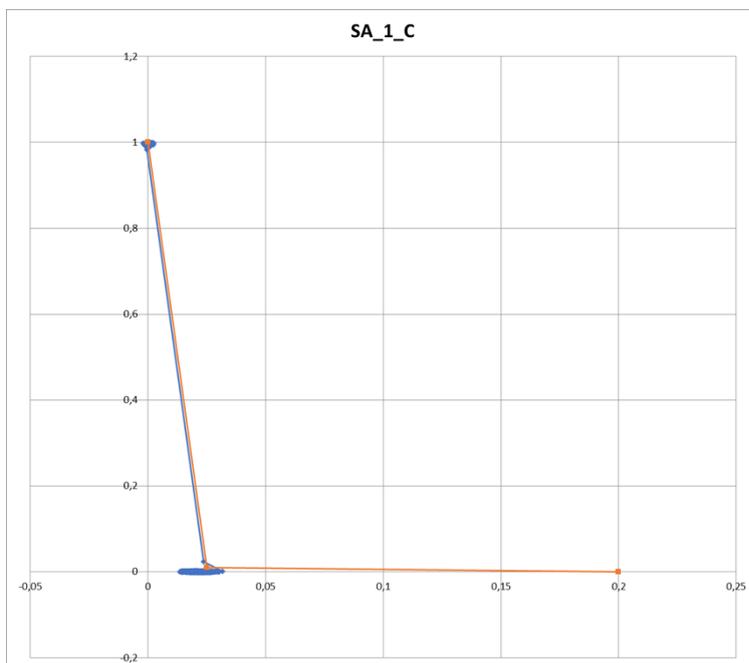


x0	0
y0	1
x1	0,032
y1	0,05
x2	0,12
y2	0

Allegati

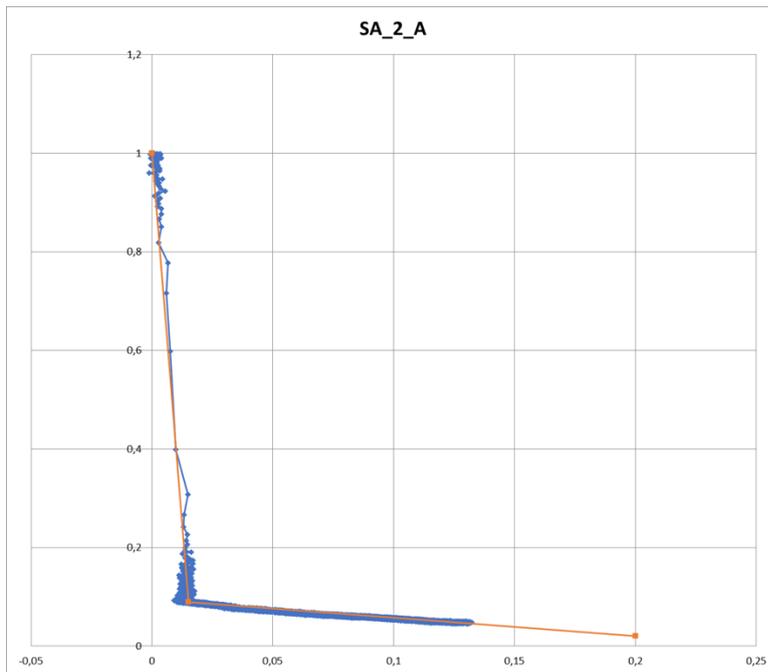


x0	0
y0	1
x1	0,038
y1	0
x2	0,2
y2	-0,000210524

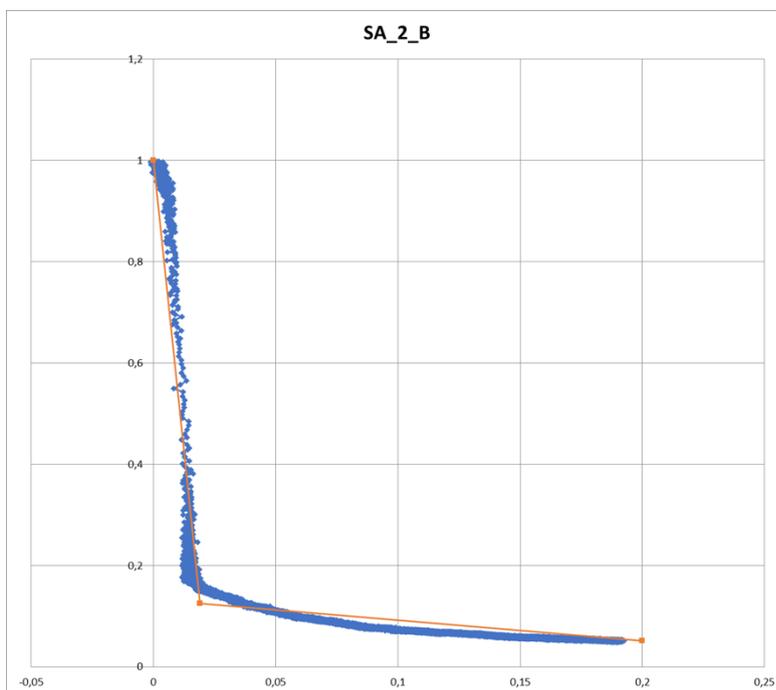


x0	0
y0	1
x1	0,025
y1	0,01
x2	0,2
y2	0

Allegati

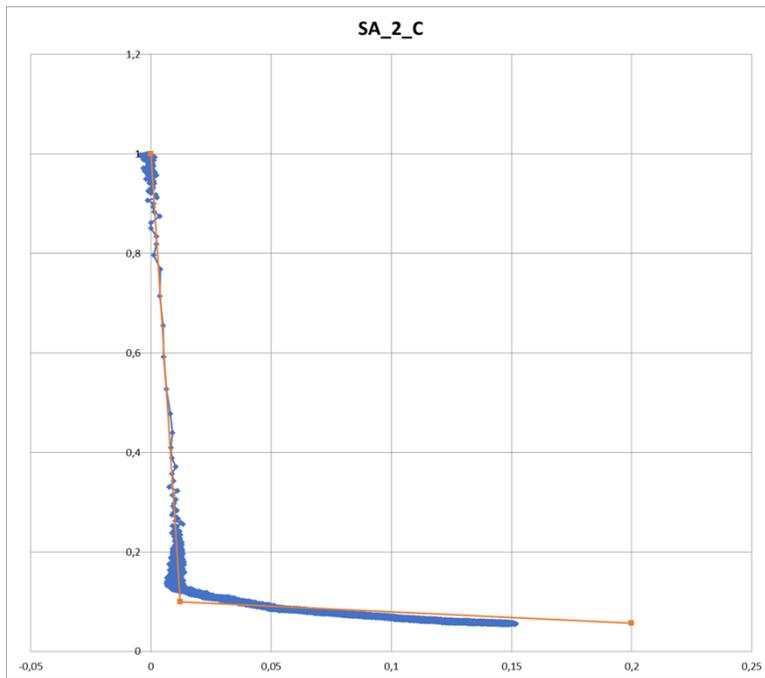


x0	0
y0	1
x1	0,015
y1	0,09
x2	0,2
y2	0,02

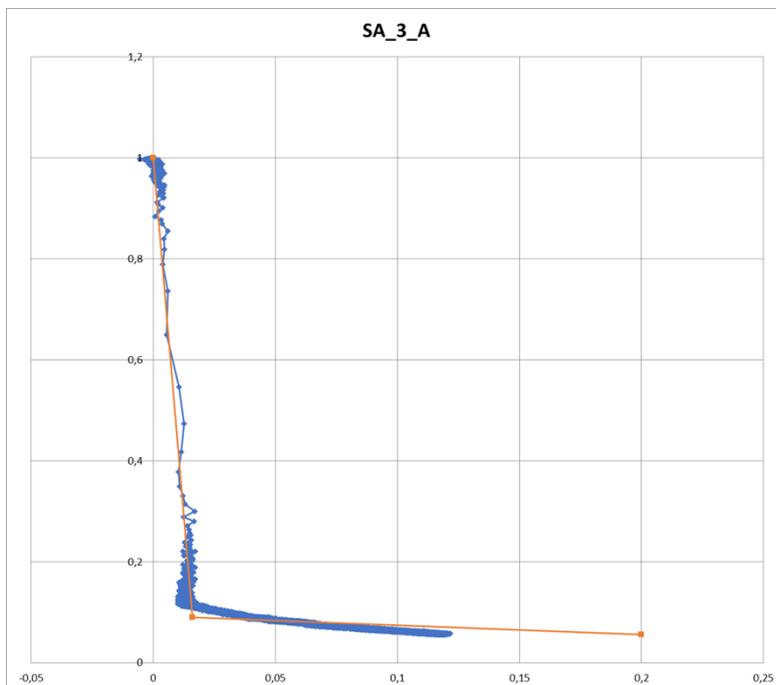


x0	0
y0	1
x1	0,019
y1	0,125
x2	0,2
y2	0,05095376

Allegati

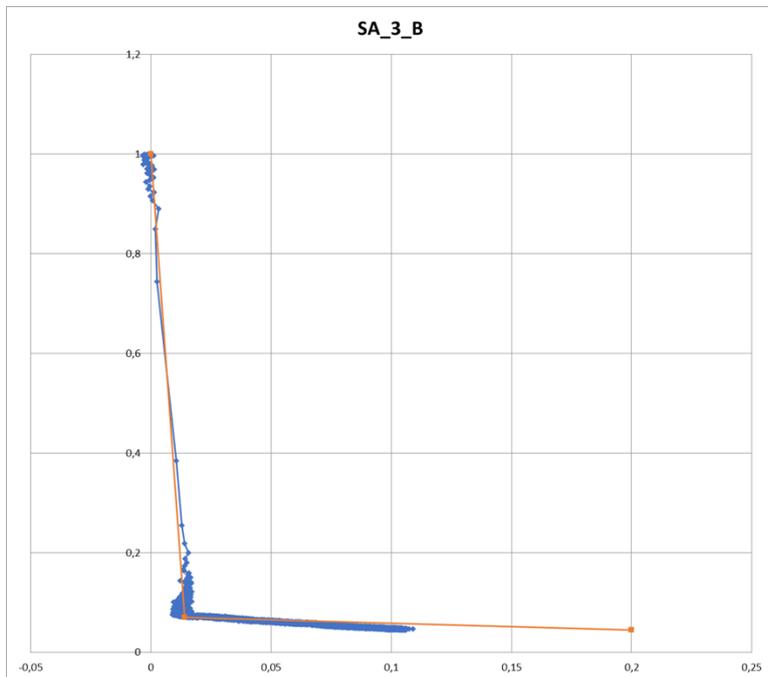


x0	0
y0	1
x1	0,012
y1	0,1
x2	0,2
y2	0,056881522

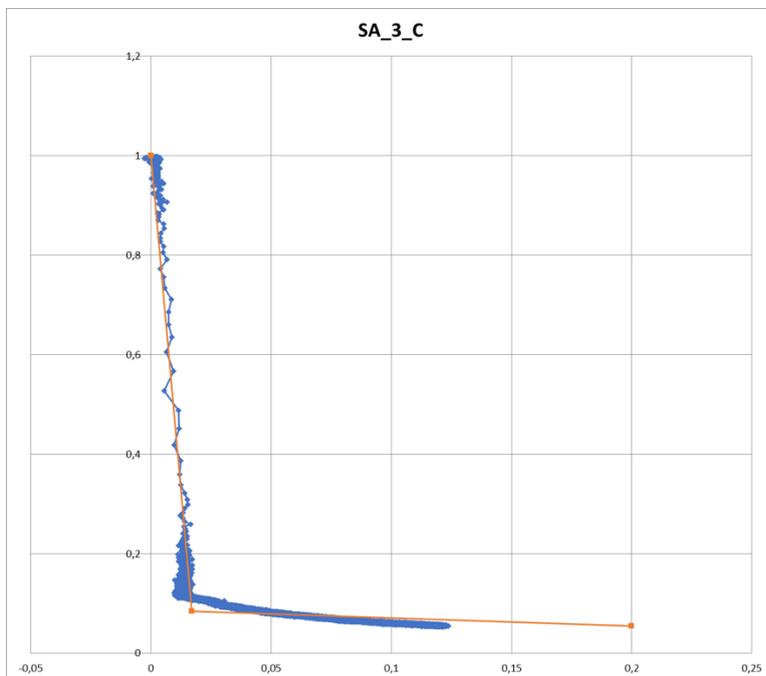


x0	0
y0	1
x1	0,016
y1	0,09
x2	0,2
y2	0,056390049

Allegati

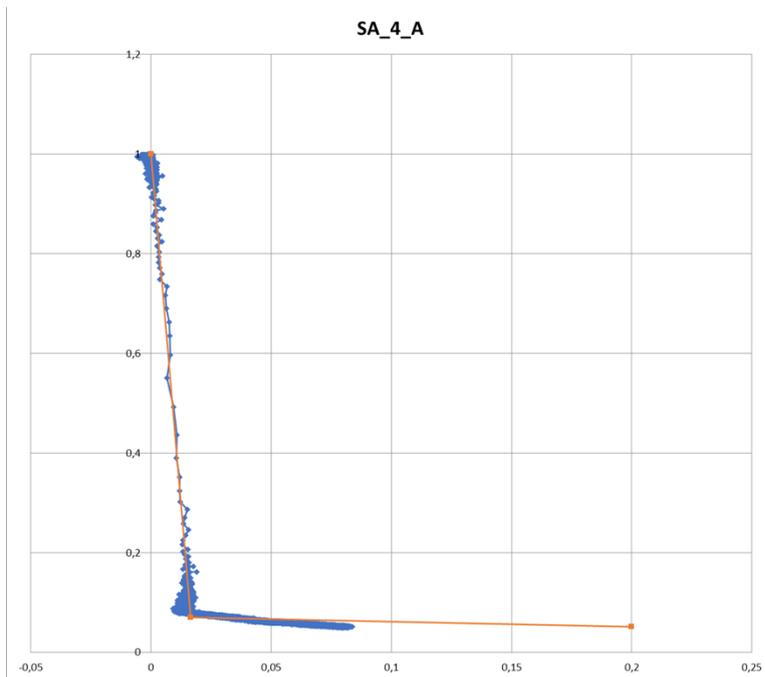


x0	0
y0	1
x1	0,014
y1	0,07
x2	0,2
y2	0,044836526

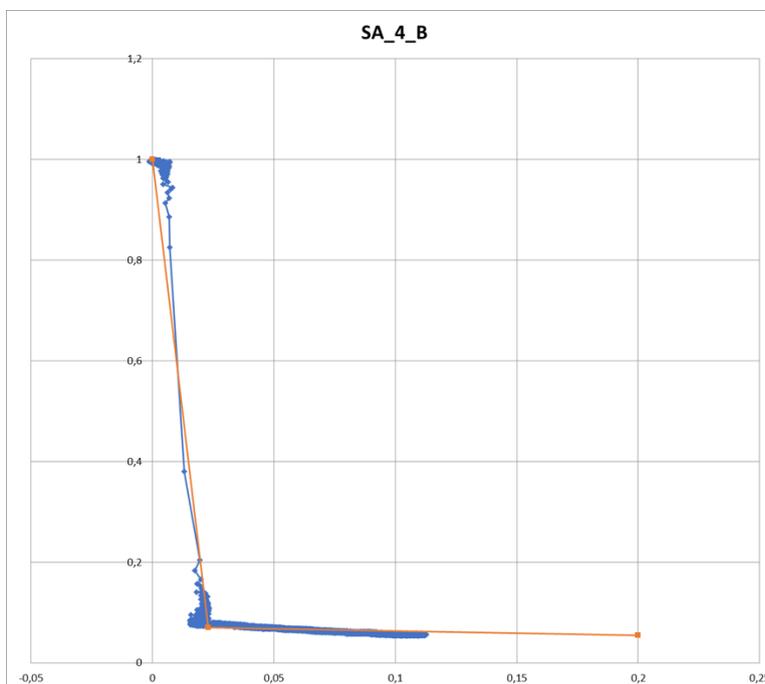


x0	0
y0	1
x1	0,017
y1	0,085
x2	0,2
y2	0,055159589

Allegati

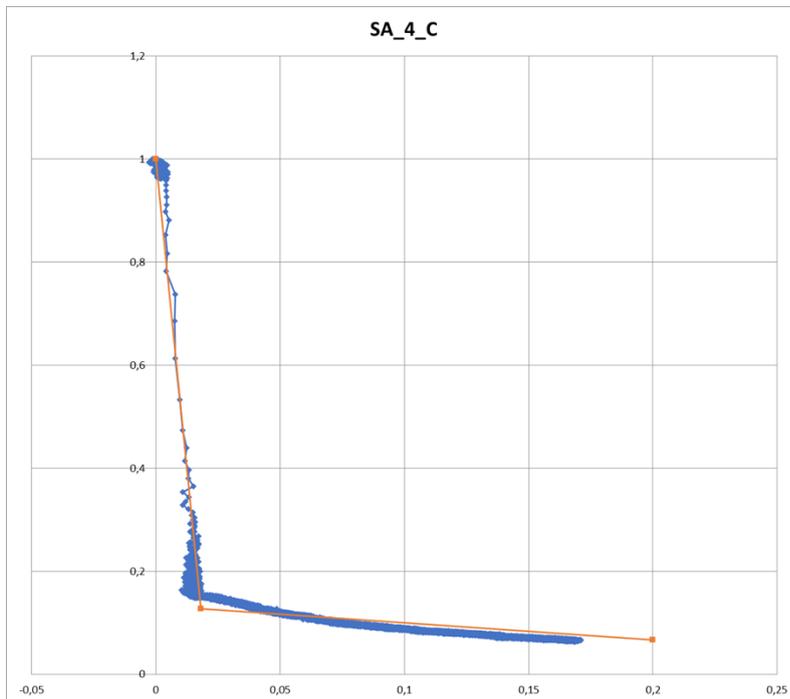


x0	0
y0	1
x1	0,0165
y1	0,07
x2	0,2
y2	0,051564395

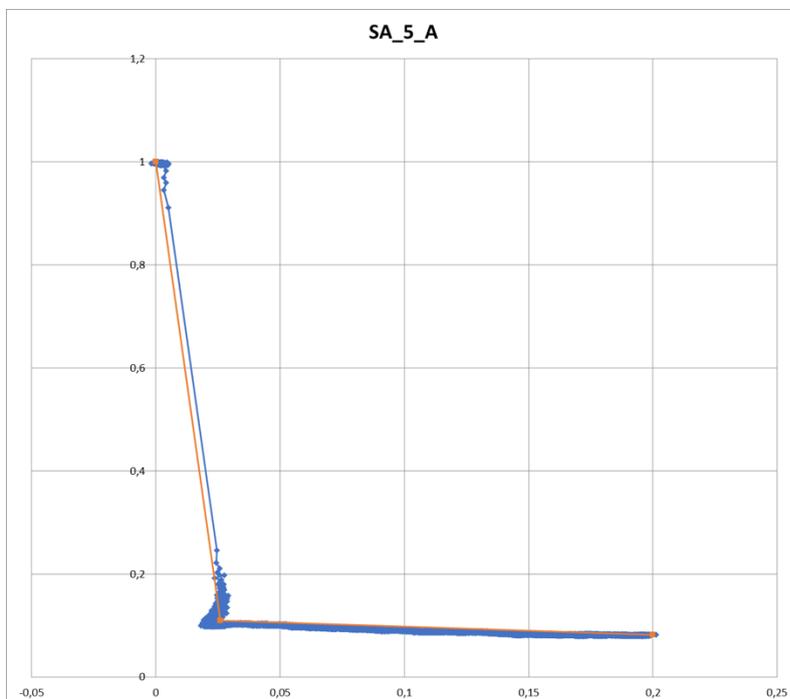


x0	0
y0	1
x1	0,023
y1	0,07
x2	0,2
y2	0,055047967

Allegati

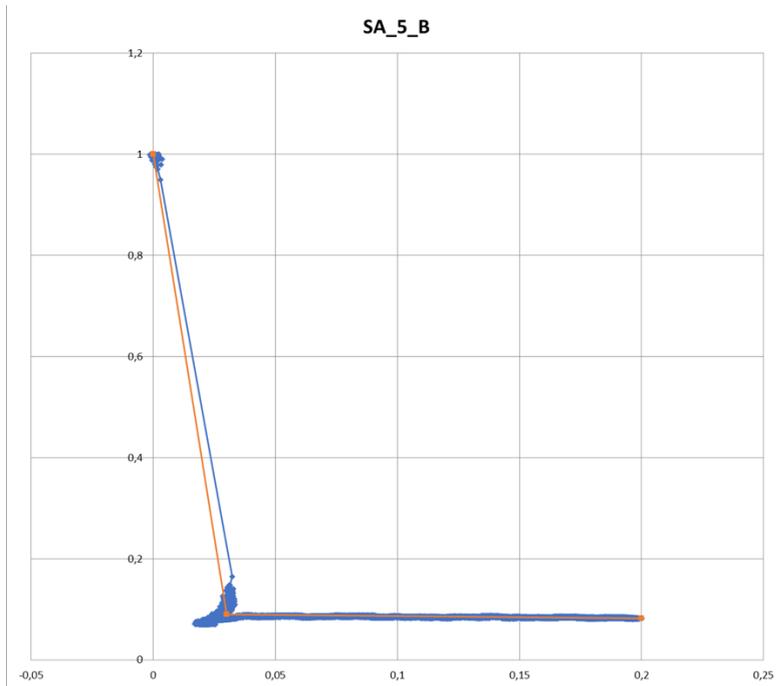


x0 0
y0 1
x1 0,018
y1 0,127
x2 0,2
y2 0,066673226

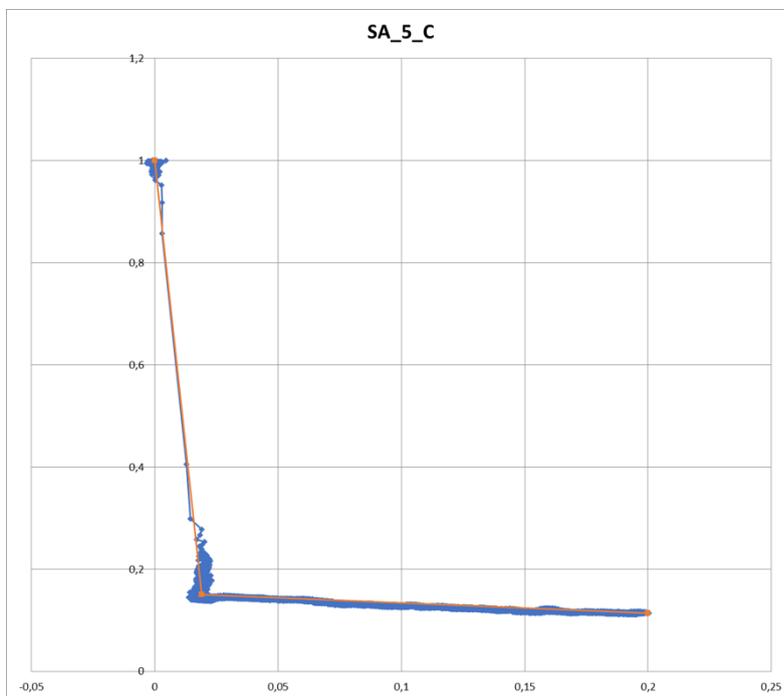


x0 0
y0 1
x1 0,026
y1 0,11
x2 0,2
y2 0,082694159

Allegati

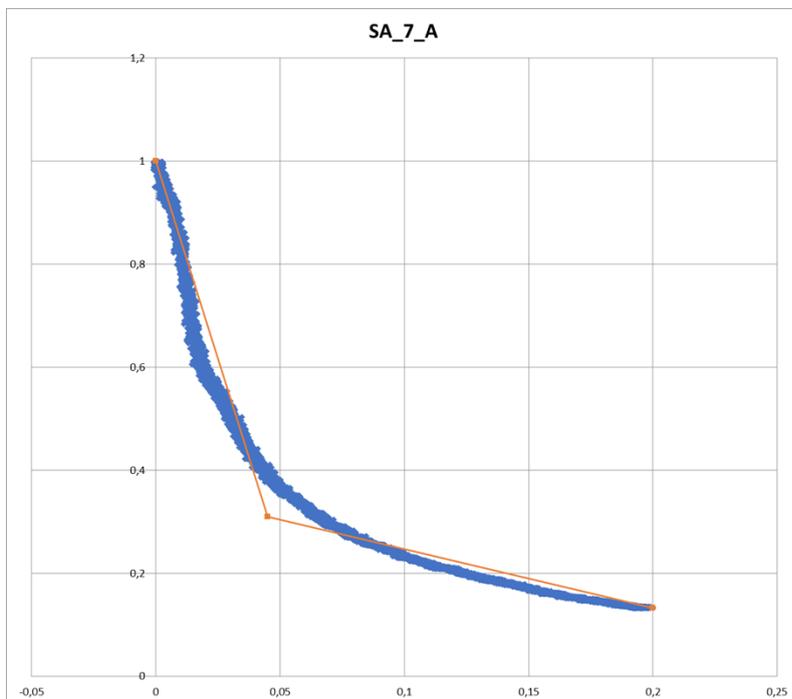


x0	0
y0	1
x1	0,03
y1	0,09
x2	0,2
y2	0,082319799

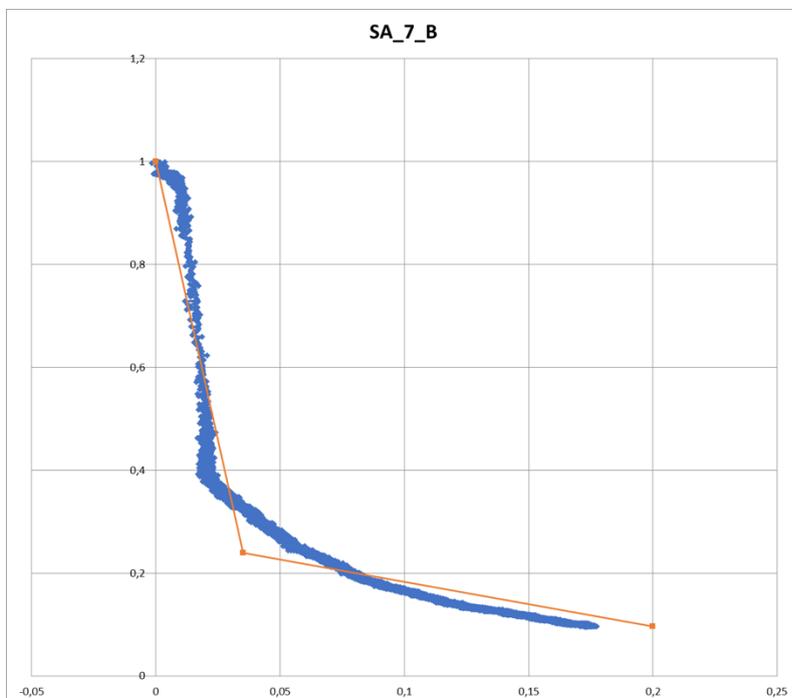


x0	0
y0	1
x1	0,019
y1	0,15
x2	0,2
y2	0,114529876

Allegati

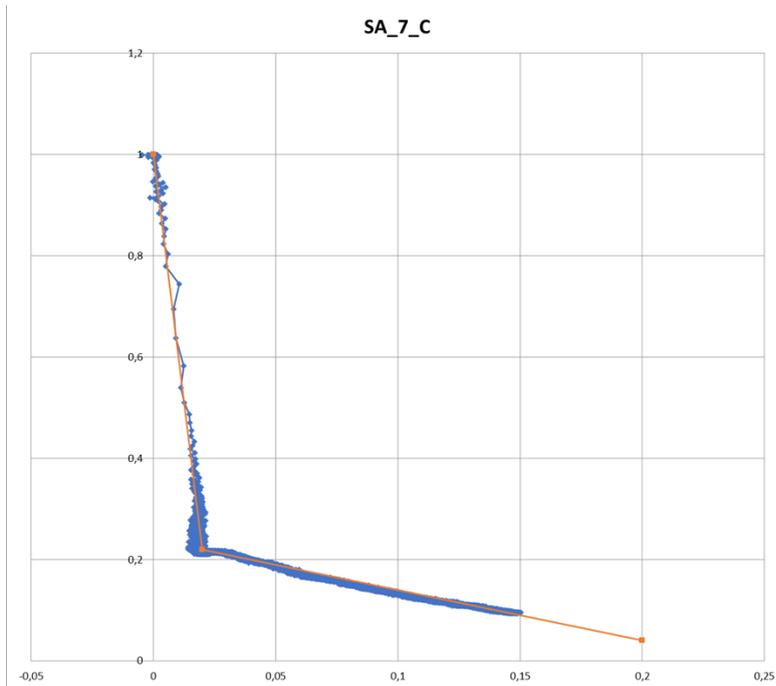


x0	0
y0	1
x1	0,045
y1	0,31
x2	0,2
y2	0,133301987

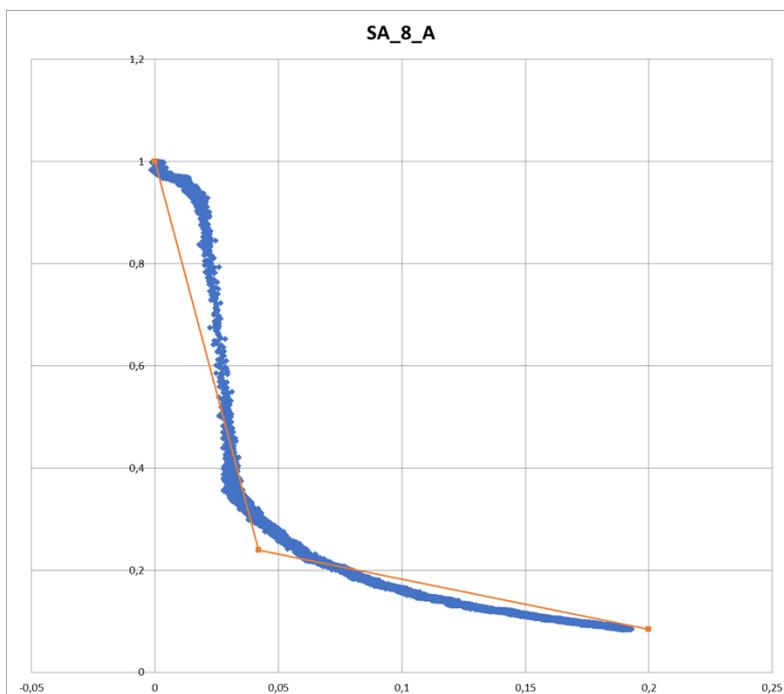


x0	0
y0	1
x1	0,035
y1	0,24
x2	0,2
y2	0,096989723

Allegati

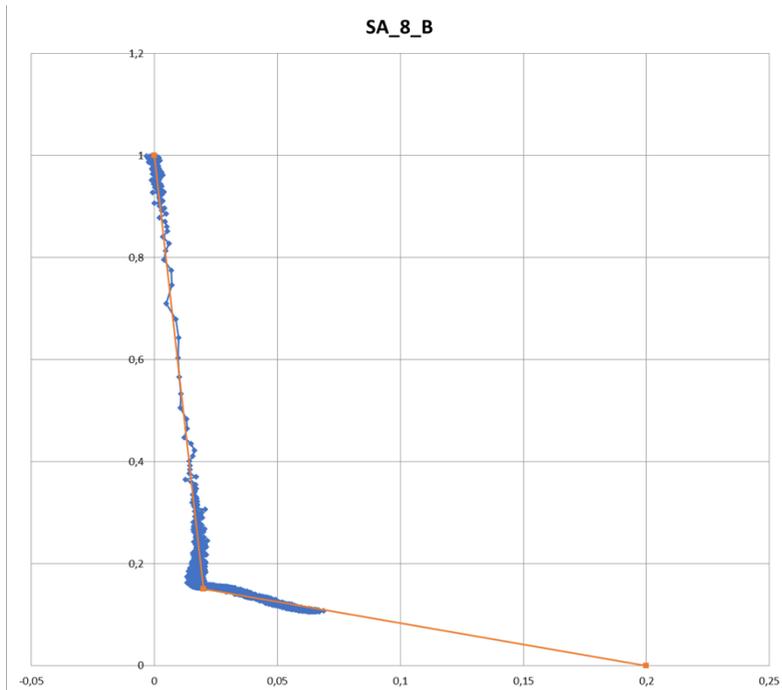


x0	0
y1	1
x1	0,02
y1	0,22
x2	0,2
y2	0,04

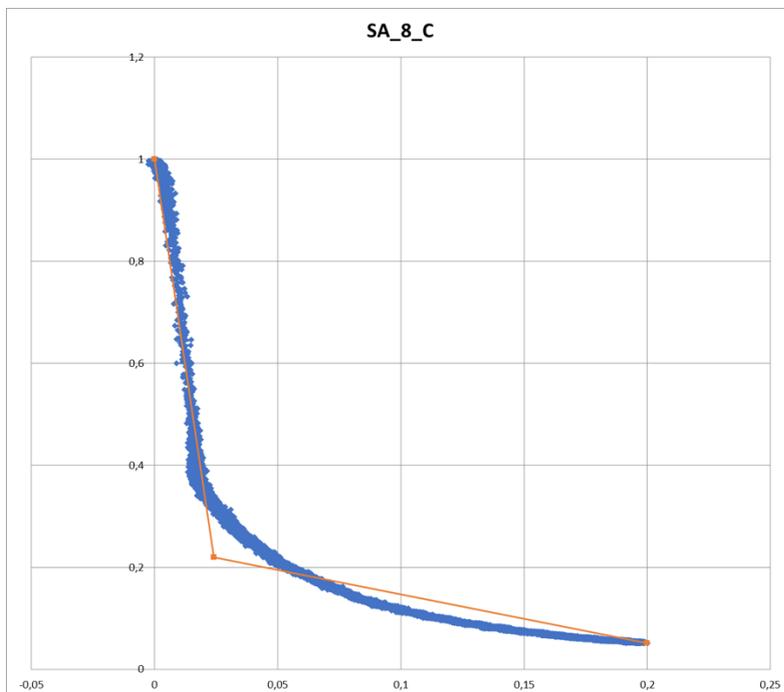


x0	0
y0	1
x1	0,042
y1	0,24
x2	0,2
y2	0,084628197

Allegati



x0	0
y0	1
x1	0,02
y1	0,15
x2	0,2
y2	0



x0	0
y0	1
x1	0,024
y1	0,22
x2	0,2
y2	0,051546031

Allegati