Università Politecnica delle Marche

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Specialistica a Ciclo Unico in
INGEGNERIA EDILE - ARCHITETTURA

Dipartimento di Scienza e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente e Urbanistica

"Malte cementizie rinforzate con fibre di carbonio o fibre metalliche: confronto delle proprietà meccaniche, elettriche e di durabilità a diversi dosaggi"

"Cement-based mortars reinforced with carbon or steel fibers: comparison of mechanical, electrical and durability properties at different dosages"

RELATORE:
Prof.ssa Francesca Tittarelli

TESI DI LAUREA DI:
Luca Balestra

CORRELATORI:
Prof. Tiziano Bellezze
Ing. Alberto Belli

Anno Accademico 2020-2021

Indice

1. Introduzione e obiettivi 1
1.1. Premessa 1
1.2. Compositi fibrorinforzati 3
1.3. Stato dell'arte 4
1.4. Obiettivi e metodi 5
Bibliografia 6
2. Materiali 7
2.1. Introduzione 7
2.2. Acqua 7
2.3. Leganti idraulici 8
2.3.1. Cemento Portland 8
2.4. Inerti 10
2.5. Additivi 12
2.5.1. Superfluidificanti 12
2.6. Fibre 12
2.6.1. Fibre di carbonio vergini 13
2.6.2. Fibre di carbonio riciclate 15
2.6.3. Fibre metalliche in acciaio ottonato 16
Bibliografia 18
3. Preparazione degli impasti 19
3.1. Introduzione 19
3.2. Stato dell'arte 19
3.3. Prove preliminari di lavorabilità 20
3.4. Conclusioni 22
Bibliografia 23
4. Impasti definitivi 24
4.1. Mix-design 24
4.1.1. Composizione delle malte 25
4.2. Tecniche di impasto 26
4.2.1. Fase preliminare 26
4.2.2. Esecuzione dei getti 26
4.3. Provini realizzati e casseri di formatura 27
4.3.1. Casseri per provini 40x40x160 mm 27
4.4. Stagionatura 29

Bibliografia 30
5. Caratterizzazione allo stato fresco 31
5.1. Introduzione 31
5.2. Metodo di rilevazione 31
5.3. Risultati della prova 33
5.4. Confronto e considerazioni 34
6. Caratterizzazione meccanica allo stato indurito 35
6.1. Introduzione 35
6.2. Resistenza meccanica a flessione 35
6.2.1. Campionamento e stagionatura 35
6.2.2. Metodo di rilevazione 36
6.2.3. Risultati della prova 38
6.2.4. Confronto e considerazioni 40
6.3. Resistenza meccanica a trazione indiretta 41
6.3.1. Campionamento e stagionatura 41
6.3.2. Metodo di rilevazione 41
6.3.3. Risultati delle prove 43
6.3.4. Confronto e considerazioni 45
6.4. Resistenza meccanica a compressione 46
6.4.1. Campionamento e stagionatura 46
6.4.2. Metodo di rilevazione 46
6.4.3. Risultati della prova 48
6.4.4. Confronto e considerazioni 50
6.5. Resistenza residua a flessione in controllo di CMOD 51
6.5.1. Campionamento e stagionatura 52
6.5.2. Metodo di rilevazione 52
6.5.3. Risultati della prova 54
6.5.4. Confronto e considerazioni 55
7. Proprietà elettriche 58
7.1. Introduzione 58
7.2. Stato dell'arte 59
7.3. Indagini preliminari 60
7.3.1. Calcolo costanti di cella 61
7.3.2. Misure preliminari in corrente continua 63
7.3.3. Misure preliminari in corrente alternata 64
7.3.4. Conclusioni 65

7.4. Campionamento e stagionatura 65
7.5. Metodo di rilevazione 66
7.5.1. Risultati della prova 70
7.5.2. Confronto e considerazioni 72
Bibliografia 76
8. Assorbimento d'acqua per capillarità 77
8.1. Introduzione 77
8.2. Campionamento e stagionatura 77
8.3. Metodo di rilevazione 78
8.4. Risultati della prova 81
8.4.1. Assorbimento d'acqua per capillarità (UNI EN 1015-18:2004) 81
8.4.2. Assorbimento d'acqua per capillarità (UNI EN 15801:2010) 82
8.5. Confronto e considerazioni 83
Bibliografia 85
9. Microscopia elettronica a scansione 86
9.1. Introduzione 86
9.2. Campionamento 88
9.3. Metodo di rilevazione 89
9.4. Risultati delle prova 90
9.4.1. Microscopia elettronica a scansione sulle fibre 90
9.4.2. Microscopia elettronica a scansione sulle malte 93
9.5. Confronto e considerazioni 94
Bibliografia 95
10. Conclusioni 96
Schede tecniche 98

1. Introduzione e obiettivi

1.1. Premessa

Calcestruzzo, malte e altri compositi a base di cemento sono i materiali strutturali più comuni nel settore delle costruzioni, e su cui si basa gran parte del patrimonio edilizio mondiale [1].
I compositi a base di leganti idraulici sono stati scoperti e utilizzati migliaia di anni fa e, grazie alla loro efficacia immediata, le loro moderne tecniche di produzione sono rimaste molto simili a quelle dell'antichità.
Tuttavia, negli ultimi decenni, le numerose e sempre più complesse esigenze del settore edile, e la grande evoluzione tecnologica della scienza dei materiali e delle nanotecnologie, hanno favorito nuove opportunità per lo sviluppo di miscele cementizie attraverso l'introduzione di nuove tecniche e materiali innovativi.
Ciò consente di creare compositi multifunzionali, con molte caratteristiche aggiuntive (oltre alle proprietà strutturali) volte a migliorare la sicurezza e la qualità della vita all'interno degli edifici.
Infatti, a causa del numero crescente di strutture che hanno raggiunto i limiti teorici della loro vita di servizio [2] e a causa di eventi catastrofici provocati dalla mancanza di adeguati interventi sulle opere di calcestruzzo (Fig. 1.1), un'analisi tempestiva delle strutture è diventata di primaria importanza per la sicurezza e la salute umana.



Figura 1.1. Ponte Morandi (Genova, Italia) dopo il crollo (Agosto 2018).

Spesso, purtroppo, strutture che non presentano evidenti danni (rilevabili attraverso un'indagine visiva) possono comunque risultare, più o meno, seriamente danneggiate.
Efficaci strumenti di controllo, soprattutto nelle zone ad elevato rischio sismico, possono permettere di valutare con precisione le condizioni di lavoro delle strutture.
Per questo motivo è nata l'esigenza di un monitoraggio in continuo della salute della struttura, in grado di fornire un valido supporto per individuare, con sufficiente preavviso, l'insorgere di situazioni pericolose [3-5].
Molti sono i metodi per realizzare un tale sistema di monitoraggio, ma i sensori tradizionali presentano diversi inconvenienti quali la scarsa durata, l'inadeguata compatibilità e le difficoltà di applicazione.

Inoltre questi sistemi possono essere applicati solo in un limitato numero di punti fornendo un'informazione parziale per la successiva fase di diagnosi.
L'obiettivo che si cerca di raggiungere è, invece, quello di realizzare dei materiali *intelligenti*, capaci, cioè, di rispondere ad un'azione esterna modificando una caratteristica chimico/fisica, una specifica proprietà.
Inserendo questi materiali all'interno delle strutture sarà possibile diagnosticare *autonomamente* il loro stato di deformazione e di tensione (Fig. 1.2).



Figura 1.2. Concetto generale di "materiale intelligente".

Il punto di partenza, quindi, è l'utilizzo di materiali *compositi multifunzionali* che permettano di combinare capacità *portanti* e capacità *diagnostiche*.
I materiali compositi cementizi "*self-sensing*" (capaci di autodiagnosticare il proprio stato di deformazione) vengono ottenuti tramite l'aggiunta, all'interno della matrice, di materie prime conduttive, con peculiari proprietà elettriche.
Tale effetto si può ottenere, ad esempio, grazie all'utilizzo delle *fibre di carbonio.*
Le eccellenti caratteristiche meccaniche di queste fibre, insieme alla capacità di condurre energia elettrica, le rendono una valida soluzione per la realizzazione di strutture con capacità di *self monitoring* [4-5].
In particolare, caricando la matrice cementizia con una certa quantità di fibre di carbonio, è possibile ottenere una rete di conduttori che viene localmente interrotta in presenza di un danneggiamento (Fig. 1.3).
Misurando quindi la variazione della risposta elettrica del componente è possibile utilizzare il materiale stesso come sensore per monitorare l'innesco e l'evoluzione del danneggiamento [6].

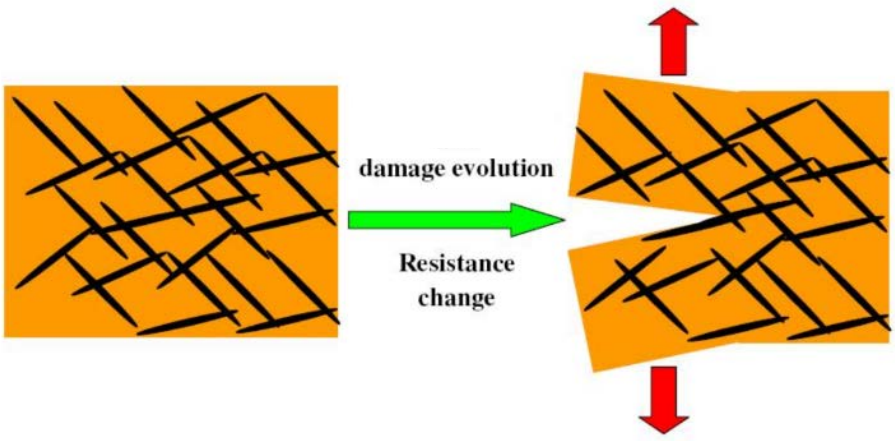


Figura 1.3. Schematizzazione del comportamento delle fibre all'interno della matrice cementizia.

I primi materiali cementizi self-sensing, ottenuti con l'aggiunta di particolari particelle, risalgono ai primi anni '90 (Muto et al. 1992).
Da allora, diversi studi presenti in letteratura si sono occupati di materiali a base cementizia con aggiunta di particelle di carbonio, come ad esempio micro e nanofibre di carbonio (Galao et al 2014, Sihai and Chung 2001), carbon black (Li et al. 2006), nanotubi di carbonio (Konsta-Gdoutos et al. 2010, Li et al. 2007), grafene (Chuah et al. 2014) o una combinazione di diverse tipologie (Azhari and Banthia 2012, Cao and Chung 2004) [5].

1.2. Compositi fibrorinforzati

Con materiali compositi si indicano dei materiali che rispondono a tre requisiti:

- consistono di due o più materiali fisicamente distinti;
- questi sono dispersi l'uno nell'altro in modo controllato;
- il materiale risultante presenta una combinazione di proprietà che non si può ottenere con i singoli materiali.

Nella versione più semplice, i materiali compositi sono costituiti da una fase continua (*matrice*) in cui è dispersa una fase discontinua (*rinforzo*), che può essere costituita da particelle o da fibre.
La matrice ha la funzione di inglobare le fibre, conferire continuità al materiale, consentire la trasmissione e ripartizione delle sollecitazioni e, infine, proteggere le fibre dall'aggressione dell'ambiente esterno [7].
Le caratteristiche dei materiali compositi fibrosi dipendono dalla loro struttura, legata alla presenza di fibre di elevate proprietà inserite in un legante che ha la funzione di tenerle insieme e definire quindi le proprietà globali dell'insieme così composto.
Non è possibile attribuire le maggiori responsabilità del composito alle fibre o alla matrice, ma è l'insieme delle due fasi a caratterizzare le proprietà finali di ogni tipo.
Le prestazioni del composito crescono all'aumentare del contenuto in volume di fibre, almeno fino al raggiungimento di un valore massimo, sopra il quale la matrice non riesce più ad inglobarle in modo efficace.
In genere, nel caso di fibre orientate in una determinata direzione, il materiale manifesta un comportamento anisotropo, cioè risulta più rigido e resistente lungo la direzione delle fibre, al contrario utilizzando fibre corte, orientate casualmente, il materiale ha un comportamento isotropo.
Quindi le proprietà meccaniche del composito migliorano a seconda della lunghezza delle fibre e al loro grado di orientamento.
Dal punto di vista meccanico, i materiali realizzati sotto forma di fibre o di filamenti di piccolo diametro presentano elevate resistenze lungo la direzione principale, come dimostrato da un fatto fisico noto (effetto grandezza) per cui le proprietà meccaniche aumentano notevolmente al diminuire delle dimensioni del campione del materiale su cui si effettua la misura.
Ciò è spiegabile sia per meccanismi strutturali coinvolti nel raggiungimento di dimensioni molto piccole, come appunto nel caso di fibre sottili, sia per l'eliminazione, o comunque minore presenza, di difetti superficiali o interni.
Le fibre presentano dunque una perfezione strutturale fuori dal comune e questa caratteristica, unita alle proprietà intrinseche dei materiali costitutivi, assicurano ad esse in molti casi: resistenza meccanica molto elevata, modulo elastico molto alto, peso specifico basso e comportamento generalmente elastico lineare fino a rottura.

Le fibre sono da considerarsi come il costituente di maggior importanza in un composito dal punto di vista delle proprietà meccaniche, anche se influiscono su numerose altre caratteristiche [7-8].

1.3. Stato dell'arte

Lo sviluppo e la ricerca di nuovi materiali strutturali con l'aggiunta di fibre altamente conduttive sono recenti e in continua crescita, grazie alla vastissima gamma di applicazioni in cui possono essere utilizzate.
Negli anni Novanta, la ricerca applicata all'utilizzo delle fibre di carbonio, inizialmente limitata al solo settore aerospaziale, ha cominciato ad interessare in maniera crescente il campo dei prodotti per l'edilizia.
In particolare, nel 1994, furono utilizzate per la prima volta delle fibre di carbonio corte per migliorare l'adesione all'interfaccia fra il calcestruzzo di nuova applicazione e il calcestruzzo esistente con finalità di riparazione e ripristino.
L'aggiunta delle fibre ha portato un miglioramento dell'adesione grazie ad una forte riduzione del ritiro da essiccamento e, quindi, minore stress all'interfaccia [9].
Nello stesso anno, negli USA, le fibre sono state impiegate in edilizia con l'obiettivo di creare un calcestruzzo con capacità di "self monitoring".
È stata studiata una nuova tecnologia di sensori di sforzo/deformazione, basata sul concetto della variazione di conduzione elettrica durante l'estrazione della fibra che accompagna l'apertura di una crepa.
L'estrazione della fibra aumenta la resistività elettrica del composito, che è il segnale fornito dal sensore sotto carico statico o ciclico.
La ricerca è stata condotta su calcestruzzi e malte contenenti fibre corte elettricamente conduttive (ad es. fibre di carbonio e fibre d'acciaio).
Le fibre di carbonio hanno dato risultati migliori, soprattutto nell'impedire la propagazione della fessura [10].
Negli ultimi anni, un crescente interesse verso lo sviluppo di questi nuovi materiali autodiagnosticanti ha portato ad intraprendere diversi studi, basati non solo sull'utilizzo di fibre, ma anche di nanoparticelle conduttive o combinazioni dei precedenti.
Da uno studio più recente, condotto su fibre di carbonio, fibre in acciaio e nanofibre di carbonio, si evince che le nanofibre e le fibre in carbonio, inserite in quantità pari allo 0,45% in volume sul totale, peggiorano la resistenza a compressione di un calcestruzzo base di riferimento (a differenza di quelle in acciaio).
Inoltre, le fibre in carbonio sono risultate le migliori nell'impedire la propagazione delle micro crepe e nel mantenere compatto il campione fessurato, mentre le nanofibre non solo contribuiscono alla compattezza del calcestruzzo fessurato, ma riducono notevolmente lo sviluppo di alti volumi di micro crepe.
L'effetto ponte, dato dalla capacità delle fibre di carbonio di mantenere la compattezza, permette di evitare la diminuzione dei valori di conducibilità dopo la fessurazione, fenomeno invece verificatosi nel caso delle fibre in acciaio [11].
I risultati ottenuti dalle prove sperimentali elettro-meccaniche, mostrano, in ogni caso, che questi nuovi sensori possono essere efficacemente utilizzati per monitorare la salute delle strutture.
Indagando sulla loro composizione e sulle loro proprietà si potrà ottenere un materiale che risponde esattamente ai requisiti necessari.

1.4. Obiettivi e metodi

La letteratura riporta già molti lavori sull'utilizzo di fibre conduttive per migliorare le proprietà meccaniche ed elettriche di compositi cementizi.
Tuttavia, generalmente, viene studiato un singolo tipo di fibra e in una gamma ristretta di concentrazioni.
La novità di questo lavoro è quella di fornire uno studio completo sull'ottimizzazione compositiva di malte cementizie rinforzate con fibre ad alta conduttività.
A tale scopo, sono stati confrontati gli effetti di tre diversi tipi di fibre (che hanno già mostrato buone prestazioni nella letteratura pertinente), analizzando un elevato numero di concentrazioni, al fine di individuare il giusto compromesso in termini di lavorabilità, proprietà meccaniche, elettriche e di durabilità.
In particolare, sono stati selezionati due tipi di fibre di carbonio: *fibre di carbonio vergini* di uso commerciale e *fibre di carbonio riciclate* ottenute da processi industriali.
Le fibre riciclate sono state studiate con l'obiettivo di creare compositi più economici ed eco- compatibili.
Inoltre, è stato testato un terzo tipo di fibra, ovvero *fibre metalliche in acciaio ottonato*.
Questo tipo di fibra è ampiamente utilizzato nella produzione di malte e calcestruzzi armati, e le loro comprovate proprietà meccaniche ed elettriche sono utili come confronto per i risultati ottenuti.
I tre tipi di fibre sono stati dispersi, attraverso opportune modalità di miscelazione, all'interno di una matrice cementizia in 7 differenti concentrazioni, espresse come percentuale in volume sul totale dell'impasto delle malte prodotte: 4 con basse quantità, pari a 0,05%, 0,1%, 0,2%, 0,4% e 3 con quantità elevate, pari a 0,8%, 1,2%, 1,6%.
Sui provini di malta sono state eseguite prove di lavorabilità, prove di resistenza meccanica (resistenza a flessione, a trazione indiretta, a compressione, a flessione con controllo di CMOD), prove di durabilità (assorbimento d'acqua per capillarità) e analisi microstrutturali (SEM).
Una parte importante della ricerca è stata anche dedicata allo studio delle proprietà elettriche delle malte sviluppate, al fine di valutarne accuratamente il potenziale utilizzo come materiali compositi autodiagnosticanti con cui poter realizzare sensori intelligenti per il monitoraggio strutturale.
Infatti mentre i metodi utilizzati per testare le proprietà meccaniche e di durabilità dei materiali da costruzione sono ampiamente descritti e regolamentati da apposite normative (insieme alla caratterizzazione chimico-fisica e microstrutturale), le tecniche per la valutazione delle proprietà elettriche non sono standardizzate, e possono variare ampiamente a seconda delle esigenze dello studio.
Ciò ha richiesto un'analisi approfondita delle configurazioni di misura e dei diversi metodi utilizzati in letteratura per lo studio dei parametri elettrici delle malte fibrorinforzate, soprattutto a causa della loro composizione multifase.
Pertanto, al fine di identificare il diverso contributo elettrico delle fibre e della matrice cementizia sulle proprietà elettriche dei compositi sviluppati, un'accurata analisi della loro *resistività elettrica* è stata effettuata mediante spettroscopia di impedenza elettrochimica (EIS).
Correlando la variazione della resistività elettrica con la variazione dello stato deformativo del composito è possibile ottenere la capacità di autodiagnosi.
L'obiettivo principale di questo studio è quindi quello di favorire un'ampia implementazione di questi materiali innovativi e multifunzionali, sviluppando un valido background per la ricerca del miglior mix per una data applicazione, sia in termini di prestazioni che di costi.

Bibliografia

[1] B. Han, X. Yu, J. Ou, Self-Sensing Concrete in Smart Structures, 2014.

[2] J.M.W. Brownjohn, Structural health monitoring of civil infrastructure, Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci. 365 (2007) 589–622.

[3] Fabio Sarchi. "Usi di materiali autodiagnosticanti per la determinazione dello stato di danno di elementi strutturali". Tesi di Laurea facoltà di Ingegneria, Università degli studi di Pavia, A.A. 1999/2000.

[4] C. Vendittozzi, F. Felli. "Studio e sperimentazione di materiali e sensori intelligenti basati su tecnologia FBG". Università La Sapienza. Dipartimento di Ingegneria Chimica dei Materiali e Ambiente. Tesi di Dottorato. 2013.

[5] D'Alessandro A., Ubertini F., Materazzi A. L., 2016. Il calcestruzzo nanocomposito "Intelligente" per il monitoraggio delle costruzioni. Ingenio, No 42 p. 28.

[6] Marino Quaresimin, Michele Zappalorto, 2014. Nanocompositi "self-sensing" per il monitoraggio dell'integrità strutturale di componenti in composito. Compositi magazine, No 32.

[7] Luca Bertolini. Materiali da costruzione. Volume primo. Seconda edizione. CittàStudi, 2010.

[8] Ignazio Crivelli Visconti, Giancarlo Caprino, Antonio Langella. Materiali Compositi. Tecnologie- Progettazione- Applicazioni. HOEPLI, 2009.

[9] Pu-Woei Chen, Xuli Fu and D.D.L. Chung, 1995. Improving the bonding between old and new concrete by adding carbon fibers to the new concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 3 pp. 491-496.

[10] Pu-Woei Chen and D. D. L. Chung, 1995. Concrete as a new strain/stress sensor. Composites: Part B 27B, 11-23.

[11] Savaş Erdem, Serap Hanbay, Marva Angela Blankson, 2017. Self-sensing damage assessment and image-based surface crack quantification of carbon nanofibre reinforced concrete. Construction and Building Materials, 134 (2017) 520–529.

2. Materiali

2.1. Introduzione

La pasta cementizia è il prodotto della miscelazione di un legante con acqua, il quale, indurendo, contribuisce a formare un sistema monolitico.
Il comportamento della pasta è inevitabilmente influenzato dalla tipologia e dalla quantità delle materie prime, nonché dal loro dosaggio all'interno dell'impasto.
I materiali usati nella seguente sperimentazione per il confezionamento degli impasti da sottoporre alle prove, sono stati scelti con l'intento di realizzare una miscela il più possibile omogenea e lavorabile, nonostante gli elevati dosaggi di fibre presenti in alcuni casi.
In linea con i presupposti della tesi, si è deciso di aggiungere alle miscele differenti tipologie di fibre, per testarne il diverso comportamento.
Le fibre selezionate per valutarne le proprietà sono:

- fibre di carbonio vergini (*CAR*);
- fibre di carbonio riciclate (*CAR R*);
- fibre metalliche in acciaio ottonato (*MET*).

Di seguito verranno approfondite le caratteristiche di tutti i materiali utilizzati per la realizzazione delle miscele testate.

2.2. Acqua

L'acqua è uno degli elementi indispensabili per la produzione di paste e malte.
Infatti, senza questo elemento, l'idratazione del cemento non avverrebbe e quindi non si avrebbero i processi di presa e di indurimento.
La frazione d'acqua all'interno del composto cementizio influisce notevolmente sulle sue proprietà allo stato indurito.
Un eccessivo quantitativo di acqua all'interno del materiale comporta una drastica riduzione delle resistenze meccaniche.
Viceversa, un quantitativo esiguo, potrebbe compromettere la lavorabilità del prodotto, e la sua corretta posa in opera.
Ciò che penalizza la resistenza meccanica e la durabilità della malta non è un eccessivo quantitativo di acqua in assoluto, ma piuttosto un eccessivo rapporto tra acqua e legante (definito a/c, in riferimento al generico legante cementizio) [1].
Per questo motivo, nel caso in cui sia necessario aggiungere acqua all'impasto per esigenze di lavorabilità, è opportuna una conseguente aggiunta di legante idraulico, in modo da riequilibrare il rapporto a/c e mantenere inalterate le proprietà del materiale.
La normativa UNI EN 1008: 2003 fissa dei requisiti fondamentali di accettazione per le acque destinate all'impasto di malte e calcestruzzi.
La qualità dell'acqua d'impasto è importante perché i sali o le impurità che può contenere possono interferire con i processi di presa e indurimento e influenzare la resistenza meccanica finale o causare efflorescenze e macchie sulla superficie della pasta.

2.3. Leganti idraulici

I leganti sono prodotti inorganici che si presentano sotto forma di polvere molto fine e, mescolati con acqua, danno luogo ad una pasta di consistenza variabile.
La pasta, inizialmente plasmabile, perde gradualmente la sua plasticità, e fa presa, fino ad assumere una consistenza monolitica.
Attraverso questo processo, a seguito di diverse reazioni chimiche, la pasta sviluppa resistenza meccanica.
I fenomeni della presa e dell'indurimento si determinano a seguito di reazioni e processi di idratazione dei componenti idraulici presenti nel legante per formare composti idrati che mantengono solidità meccanica e stabilità dimensionale nel tempo, sia all'aria che sott'acqua.
Tra questi vi sono: la calce idraulica, la calce aerea mescolata con cocciopesto o pozzolana, e il cemento.

2.3.1. Cemento Portland

Il cemento, in particolare il cemento Portland, è il più noto legante idraulico, e il materiale da costruzione più utilizzato, su cui si basa gran parte della moderna tecnica edilizia [2].
Rappresenta la base per la realizzazione della maggior parte dei cementi utilizzati.
Si ottiene dalla macinazione del prodotto di cottura di una miscela di argilla, calcare e sabbia (*clinker*) con piccole aggiunte di gesso e, eventualmente, altri materiali quali: pozzolane naturali, cenere volante, loppa d'altoforno ecc.
Il clinker è il prodotto di una miscela di calcari e argille portati a 1450 °C in forni rotanti.
Dopo la cottura, i granuli sono costituiti prevalentemente da *silicato tricalcico* (indicato brevemente con C_3S), *silicato bicalcico* (C_2S) e alluminati nella forma di *alluminato tricalcico* (C_3A).
Sono presenti, inoltre, altri composti in genere indicati con *fase ferrica* (la cui composizione può essere indicata con C_4AF).
I composti C_3S, C_2S, C_3A non sono puri, ma contengono disciolte piccole quantità di ossidi, per cui vengono indicati anche con i termini rispettivamente di *alite*, *belite* e *celite*.
Il materiale in uscita dal forno, una volta raffreddato, viene miscelato con circa il 5% in massa di gesso (in questa fase si possono aggiungere anche cenere volante, calcare, loppa d'altoforno ecc.) per consentire una corretta presa del cemento.
Questa miscela viene poi macinata in mulini rotanti per ottenere la polvere di cemento pronta per l'uso.
Mescolando il cemento Portland con acqua si ottiene un impasto (*pasta cementizia*) che subisce nel tempo processi di *idratazione* dei vari costituenti presenti che, danno luogo, con velocità diverse, a prodotti di idratazione differenti.
Responsabili del fenomeno di presa sono gli alluminati.
Questi si idratano così velocemente che la pasta perderebbe di plasticità in pochi minuti ostacolando la corretta posa in opera.
Per rallentare questo processo si aggiunge il gesso, che aiuta a mantenere una buona lavorabilità della pasta dopo la miscelazione.
Gli alluminati di calcio idrati (brevemente indicati con C-A-H) non contribuiscono all'incremento significativo della resistenza meccanica [3].
L'idratazione dei silicati è invece determinante nella fase dell'indurimento.
Questi danno luogo a una famiglia di silicati di calcio idrati (C-S-H), responsabile della resistenza meccanica della pasta cementizia, e a cristalli di idrossido di calcio (*portlandite*), che contribuiscono a mantenere alcalino il calcestruzzo.

A parità di massa, il C_2S produce una quantità maggiore di C-S-H rispetto a quella prodotta dal C_3S, inoltre, la velocità di idratazione del primo è molto inferiore di quella del secondo.
La belite è pertanto il principale responsabile dell'aumento di resistenza meccanica a lungo termine.
Dallo studio delle cause e degli effetti riguardanti il processo di maturazione, si può facilmente notare come l'utilizzo di alcune materie prime piuttosto che altre influisca in maniera considerevole sulle fasi di presa e indurimento.
La normativa UNI EN 197-1:2011 raccoglie in un'unica classificazione tutti i tipi di cemento prodotti nei paesi membri, ed è la carta di riferimento per la classificazione dei leganti in base alla loro composizione e alla loro resistenza meccanica: identifica cinque 5 di cemento, con 27 sottotipi e 6 classi di resistenza (Fig. 2.1).

Main types	Notation of the 27 products (types of common cement)		Composition (percentage by mass [a])										
			Main constituents										Minor additional constituents
			Clinker	Blast-furnace slag	Silica fume	Pozzolana		Fly ash		Burnt shale	Limestone		
						natural	natural calcined	siliceous	calca-reous				
			K	S	D [b]	P	Q	V	W	T	L	LL	
CEM I	Portland cement	CEM I	95-100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
CEM II	Portland-slag cement	CEM II/A-S	80-94	6-20	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
	Portland-silica fume cement	CEM II/A-D	90-94	–	6-10	–	–	–	–	–	–	–	0-5
	Portland-pozzolana cement	CEM II/A-P	80-94	–	–	6-20	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-P	65-79	–	–	21-35	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	–	–	–	6-20	–	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	–	–	–	21-35	–	–	–	–	–	0-5
	Portland-fly ash cement	CEM II/A-V	80-94	–	–	–	–	6-20	–	–	–	–	0-5
		CEM II/B-V	65-79	–	–	–	–	21-35	–	–	–	–	0-5
		CEM II/A-W	80-94	–	–	–	–	–	6-20	–	–	–	0-5
		CEM II/B-W	65-79	–	–	–	–	–	21-35	–	–	–	0-5
	Portland-burnt shale cement	CEM II/A-T	80-94	–	–	–	–	–	–	6-20	–	–	0-5
		CEM II/B-T	65-79	–	–	–	–	–	–	21-35	–	–	0-5
	Portland-limestone cement	CEM II/A-L	80-94	–	–	–	–	–	–	–	6-20	–	0-5
		CEM II/B-L	65-79	–	–	–	–	–	–	–	21-35	–	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	–	–	–	–	–	–	–	–	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	–	–	–	–	–	–	–	–	21-35	0-5
	Portland-composite cement [c]	CEM II/A-M	80-94	<---------- 6-20 ---------->									0-5
		CEM II/B-M	65-79	<---------- 21-35 ---------->									0-5
CEM III	Blastfurnace cement	CEM III/A	35-64	36-65	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	–	–	–	–	–	–	–	–	0-5
CEM IV	Pozzolanic cement [c]	CEM IV/A	65-89	–	<---------- 11-35 ---------->					–	–	–	0-5
		CEM IV/B	45-64	–	<---------- 36-55 ---------->					–	–	–	0-5
CEM V	Composite cement [c]	CEM V/A	40-64	18-30	–	<-------- 18-30 -------->			–	–	–	–	0-5
		CEM V/B	20-38	31-50	–	<-------- 31-50 -------->			–	–	–	–	0-5

a The values in the table refer to the sum of the main and minor additional constituents.
b The proportion of silica fume is limited to 10 %.
c In Portland-composite cements CEM II/A-M and CEM II/B-M, in pozzolanic cements CEM IV/A and CEM IV/B and in composite cements CEM V/A and CEM V/B the main constituents other than clinker shall be declared by designation of the cement (for example see clause 8).

Figura 2.1. Tipi di cemento previsti dalla normativa e composizione percentuale in massa.

La tipologia utilizzata per questa sperimentazione è classificabile come CEM I 52,5R.
Si tratta pertanto di un cemento Portland costituito per il 95-100% in massa da clinker, con una resistenza iniziale elevata (R) e una resistenza meccanica a compressione (sviluppata da una malta standard confezionata con il cemento dopo 28 gg di stagionatura umida) pari a 52,5 MPa (Fig. 2.2) [4].

Classe	Resistenza a compressione (N/mm^2)				Tempo di inizio presa (min)
	Resistenza iniziale		Resistenza normalizzata		
	2 gg	7 gg	28 gg		
32,5 N	-	≥ 16	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 60
32,5 R	≥ 10	-			
42,5 N	≥ 10	-	≥ 42,5	≤ 62,5	
42,5 R	≥ 20	-			
52,5 N	≥ 20	-	≥ 52,5		≥ 45
52,5 R	≥ 30	-			

Figura 2.2. Requisiti meccanici e fisici dei cementi (UNI EN 197-1:2011).

2.4. Inerti

L'inerte, anche detto aggregato, costituisce l'ossatura principale della maggior parte dei materiali compositi presenti in edilizia, la cui coesione è, come si è visto, garantita dalla pasta cementizia.
Gli aggregati vengono definiti come "materiali minerali granulari particellari", e vengono denominati "inerti" in quanto non contribuiscono al processo di idratazione e, quindi, ai processi di presa e indurimento, ma influiscono comunque, e in buona parte, sulle resistenze meccaniche ottenibili dal materiale composito.
Comprendono un'ampia schiera di materiali di differenti denominazioni a seconda della composizione granulometrica di ognuno, la quale identifica l'inerte in base alla quantità di particelle di determinate dimensioni all'interno dell'aggregato.
Si distinguono in particolare, in base al diametro delle particelle, in:

- inerti finissimi (filler), minore di 0,063 mm;
- inerti fini (sabbia), compreso tra 0,063 mm e 4 mm;
- inerti grossi (ghiaietto o ghiaia), maggiore di 4 mm.

Differiscono in proprietà in base al processo di estrazione o di fabbricazione da cui derivano (estratti da letti di fiume, da cave o prodotti dalla frantumazione di rocce), in base alla forma che possiedono (arrotondata o spigolosa), e alla loro natura petrografica (sabbie silicee o calcaree).
I requisiti di accettabilità degli inerti utilizzati per confezionare calcestruzzi e malte sono contenuti nella normativa europea UNI EN 13055:2016 (parte I).
L'inerte utilizzato nella seguente sperimentazione è una *sabbia silicea naturale*, con diametro dei grani minore o uguale a 1 mm (Fig. 2.3), utilizzata in condizioni di *sabbia umida.*
Utilizzare la sabbia umida, così come viene fornita dal venditore, significa considerare nel suo peso una dose considerevole di acqua.
Solitamente l'umidità dell'inerte varia a seconda del periodo di fornitura del prodotto e delle condizioni atmosferiche.

L'umidità della sabbia utilizzata in questa sperimentazione si attesta tra il 5% e il 7% rispetto al peso della sabbia asciutta, valore rilevato mediante pesatura di un campione di inerte prima e dopo essiccatura in forno.



Figura 2.3. Sabbia del Po essiccata.

Di seguito sono riportati i dati rilevati dall'analisi granulometrica (Fig. 2.4).

Tabella 2.1. Analisi granulometrica sabbia del Po.

Vaglio (mm)	**Trattenuto (g)**	**Trattenuto (%)**	**Trattenuto cumulativo (%)**	**Passante cumulativo (%)**
1,000	0,00	0,00	0,00	100,00
0,500	24,32	2,44	2,44	97,56
0,300	587,15	58,85	61,28	38,72
0,250	156,13	15,65	76,93	23,07
0,180	154,75	15,51	92,44	7,56
0,150	23,38	2,34	94,79	5,21
0,125	26,44	2,65	97,44	2,56
0,090	13,03	1,31	98,74	1,26
0,063	7,24	0,73	99,47	0,53
Fondello	4,97	0,50	100,00	0,00

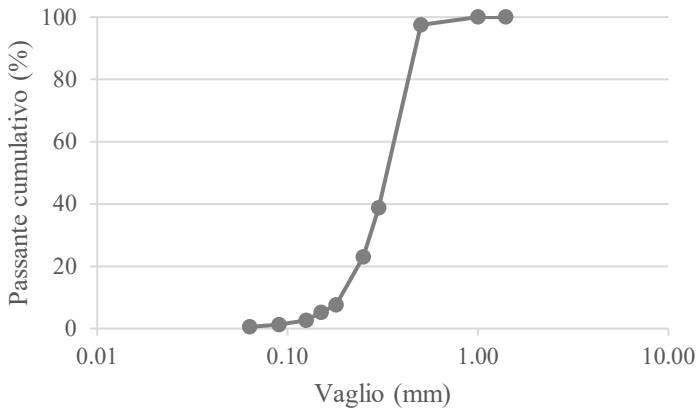


Figura 2.4. Curva granulometrica sabbia del Po.

2.5. Additivi

Gli additivi sono prodotti chimici aggiunti agli ingredienti della miscela al fine di migliorarne una o più prestazioni.

2.5.1. Superfluidificanti

Tutti i superfluidificanti sono basati su polimeri idrosolubili, che esercitano un'azione disperdente sui grani di cemento.
I più recenti si basano sull'utilizzo di poli-carbossilati che formano una famiglia molto vasta di nuovi polimeri, tutti caratterizzati dall'assenza dei gruppi solfonici (utilizzati nei primi fluidificanti).
Da un punto di vista prestazionale i superfluidificanti a base di poli-carbossilati sono capaci di fluidificare l'impasto molto di più rispetto a quelli a base di gruppi solfonici, ma soprattutto conservano meglio la lavorabilità durante il trasporto in climi caldi.
Ovviamente, diminuendo o aumentando la quantità di additivo, si riduce o incrementa il suo effetto.
Dosaggi elevati possono essere adottati in impasti con una lavorabilità molto bassa, ad esempio quelli con un alto contenuto di fibre di carbonio [5].
Nella seguente sperimentazione è stato utilizzato un superfluidificante a base acrilica (Fig 2.5) [6] caratterizzato dalla presenza di ramificazioni laterali che contribuiscono a fluidificare maggiormente il sistema con un effetto di ingombro sterico (superfluidificante in polvere Melflux® 4930F della BASF).

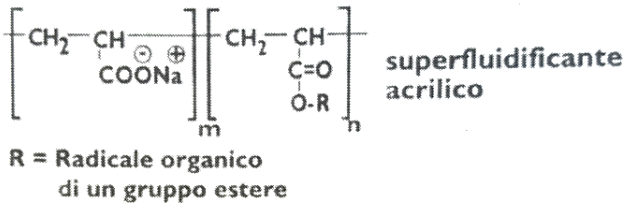


Figura 2.5. Superfluidificante acrilico.

2.6. Fibre

Negli ultimi decenni, l'esteso successo riscosso dalle fibre nel settore dei materiali da costruzione deriva dalla possibilità di disporre di un materiale non solo con densità inferiore, ma anche resistenza e modulo elastico superiori rispetto al materiale costitutivo del composito.
Le fibre sono l'aggiunta tradizionale per creare materiali multifunzionali, con una maggiore resistenza meccanica insieme ad una maggiore leggerezza.
La loro primaria funzione (assunta fin dall'antichità, ad esempio i mattoni realizzati con l'aggiunta di paglia sin dai tempi degli antichi Egizi) è quella di aumentare la tenacità alla frattura.
Da qualche tempo alla funzione "antifessurativa" si è affiancata anche la funzione strutturale, ossia, la funzione di conferire al materiale elevata *rigidità* e *resistenza meccanica*.

Le fibre disponibili oggi in commercio sono di differenti tipologie e materiali, e devono essere scelte in funzione della specifica applicazione.
In questa sperimentazione sono state utilizzate tre differenti tipologie:

- fibre di carbonio vergini (*CAR*);
- fibre di carbonio riciclate (*CAR R*);
- fibre metalliche in acciaio ottonato (*MET*).

2.6.1. Fibre di carbonio vergini

Le fibre di carbonio a struttura reticolare di grafite sono state introdotte verso la fine degli anni sessanta per soddisfare le esigenze dell'industria aerospaziale, che richiedeva fibre aventi una *resistenza* e un *modulo di elasticità* molto elevati.
Sono composte al 99,9% da carbonio grafitico chimicamente puro, avente una struttura cristallina esagonale, in cui i cristalli sono disposti in piani allineati parallelamente all'asse della fibra (Fig. 2.6) [7].

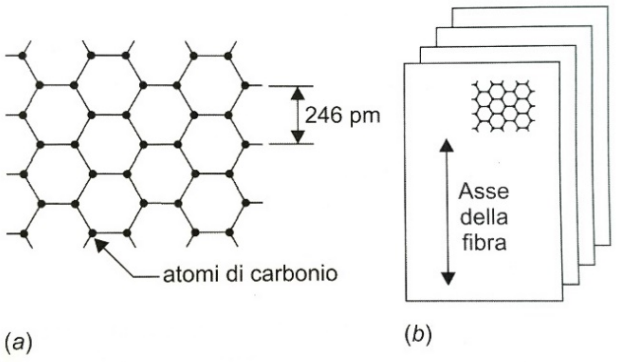


Figura 2.6. Struttura grafitica delle fibre di carbonio: (a) reticolo esagonale degli atomi di carbonio nei diversi strati; (b) unità strutturale della fibra (insieme di piani paralleli all'asse della fibra).

Tutti i tipi commercialmente validi di fibre di carbonio sono ottenuti mediante pirolisi di fibre polimeriche, che rappresentano il materiale di partenza, detto *precursore*.
Esistono diversi tipi di precursore ma il più utilizzato è il poliacrilonitrile (PAN).
Il processo di fabbricazione, che può variare nei particolari a seconda del precursore, si articola generalmente in:

- una fase di filatura del polimero precursore;
- una fase di ossidazione da 220 a 300 °C, in cui il filamento del precursore è trasformato in un filamento infusibile, capace di essere riscaldato ulteriormente senza subire ritiro o alterazione di forma;
- una fase di carbonizzazione, ovvero il riscaldamento in atmosfera inerte da 300 a 1500 °C, in cui il filamento è liberato da altri prodotti volatili iniziando la formazione di cristalli di grafite;
- una fase di grafitizzazione, ovvero il riscaldamento in atmosfera inerte da 2000 °C fino a 2800÷3000 °C, in cui il filamento viene stirato per ridurre la distanza media tra i piani cristallini e per innalzare notevolmente il modulo;
- trattamenti superficiali per migliorare l'adesione con la matrice e la maneggiabilità.

I filamenti di carbonio hanno una forma cilindrica con un diametro pari a 5÷8 µm e quindi è molto difficile maneggiarli, perciò sono riuniti in fasci di 1000÷160 000 filamenti individuali.
In relazione alle proprietà meccaniche, le fibre di carbonio sono classificate in:

- *High Tensile Strength* (HT), caratterizzate da resistenza superiore a 4000 MPa, modulo sui 250 GPa e allungamento a rottura di 1,5÷1,9%;
- *High Modulus* (HM), caratterizzate da resistenza sui 2000 MPa, modulo sui 350÷500 GPa, allungamento a rottura dello 0,5%;
- *Intermediate Modulus* (IM), caratterizzate da resistenza simile alle HT, modulo sui 300 GPa e allungamento a rottura prossimo a 1,5%.

La resistenza e il modulo dipendono principalmente dal precursore utilizzato e, secondariamente, dal riscaldamento finale e dal grado di orientamento dei piani cristallini ottenuto con l'allungamento [8].
Le fibre di carbonio sono inoltre classificate in base alla lunghezza in:

- macinate, tra 0,03 e 3,0 mm;
- taglio corto, circa 6 mm;
- taglio lungo, tra 10 e 50 mm.

Le fibre di carbonio vergini utilizzate in questa sperimentazione sono fibre dal taglio corto (6 mm) della STW, provenienti da precursori PAN, grafitizzate a 2000 °C, con rivestimento a base epossidica e con le seguenti caratteristiche (Fig. 2.7).

Tabella 2.2. Caratteristiche delle fibre di carbonio vergini utilizzate.

Densità (g/cm^3)	**Diametro (µm)**	**Rapporto d'aspetto**	**Modulo elastico (GPa)**	**Resistenza a trazione (MPa)**	**Resistenza specifica (Ω·cm)**	**Prezzo (€/Kg)**
1,78	7,0	857	230÷250	4000	0,0015	59,50



Figura 2.7. Fibre di carbonio vergini.

2.6.2. Fibre di carbonio riciclate

Il settore della produzione di componenti in fibra di carbonio è in costante crescita, grazie ai continui progressi del settore automobilistico, dell'ingegneria meccanica e dei materiali.
L'aumento della produzione però porta inevitabilmente ad un aumento dei rifiuti prodotti dai processi produttivi.
In particolare, la realizzazione di profili in fibra di carbonio produce molti scarti dai processi di taglio di pannelli e tessuti e dalle operazioni di fresatura (fino al 10-20% in peso della materia prima).
Questi rifiuti possono essere riutilizzati all'interno della stessa industria, ma quando ciò non è possibile possono essere riciclati in altri settori, ad esempio nel settore edile [9].
I sottoprodotti industriali utilizzati nel settore edile possono essere di due tipi:

- filamenti di fibre di carbonio sfuse, ottenuti dai processi di taglio di tessuti e bobine;
- frammenti di pannelli compositi, costituiti da fibra di carbonio (almento 70%) e da un polimero formante.

Le fibre di carbonio riciclate utilizzate in questa sperimentazione sono fibre dal taglio corto (6 mm) della APPLYCARBON, provenienti da una miscela di fibre di carbonio e grafite ex-PAN, con rivestimento a base di glicerolo e con le seguenti caratteristiche (Fig. 2.8).

Tabella 2.3. Caratteristiche delle fibre di carbonio riciclate utilizzate.

Densità (g/cm^3)	**Diametro (µm)**	**Rapporto d'aspetto**	**Modulo elastico (GPa)**	**Resistenza a trazione (MPa)**	**Resistenza specifica (Ω·cm)**	**Prezzo (€/Kg)**
1,70÷2,00	7,0	857	230	3500	0,0015	20,00



Figura 2.8. Fibre di carbonio riciclate.

2.6.3. Fibre metalliche in acciaio ottonato

Le fibre utilizzate nel settore edile si suddividono, in base alle loro prestazioni, in fibre non strutturali e strutturali.
Le fibre strutturali più comuni per la produzione di calcestruzzo sono le fibre di acciaio.
L'acciaio è una lega del ferro con un tenore di carbonio minore o uguale al 2,06%.
In realtà sono sempre presenti anche altri elementi di lega, il tenore di carbonio non supera quasi mai 1,2%, ed è quasi sempre compreso tra 0,03 e 0,8%.
È possibile quindi avere fibre metalliche a basso contenuto di carbonio ($C \leq 0{,}2\%$), ad alto contenuto di carbonio ($C > 0{,}2\%$), oppure in acciaio inox (leghe ferrose a basso contenuto di carbonio e con un tenore di cromo superiore al 12%, possono contenere anche nichel, molibdeno e altri elementi) [10].
Le fibre metalliche sono generalmente fibre ottenute mediante due processi produttivi (Fig. 2.9):

- *trafilatura a freddo*;
- dal taglio di lamiere.

La trafilatura l'operazione con la quale si modifica, di solito a freddo, la sezione di un profilato di acciaio semilavorato obbligandolo a passare attraverso un foro tronco-conico detto trafila o filiera: utilizzando matrici con diametro progressivamente inferiore è possibile far raggiungere al prodotto le dimensioni volute.
Nella fase di taglio, le fibre metalliche possono eventualmente anche essere sottoposte ad una leggera laminatura (compressione esercitata da due cilindri, opportunamente distanziati, rotanti in senso opposto) e sagomatura delle estremità.
Le fibre possono raggiungere una lunghezza finale compresa tra 6 mm e 70 mm, ed un diametro equivalente finale tra 0,15 mm e 1,20 mm.

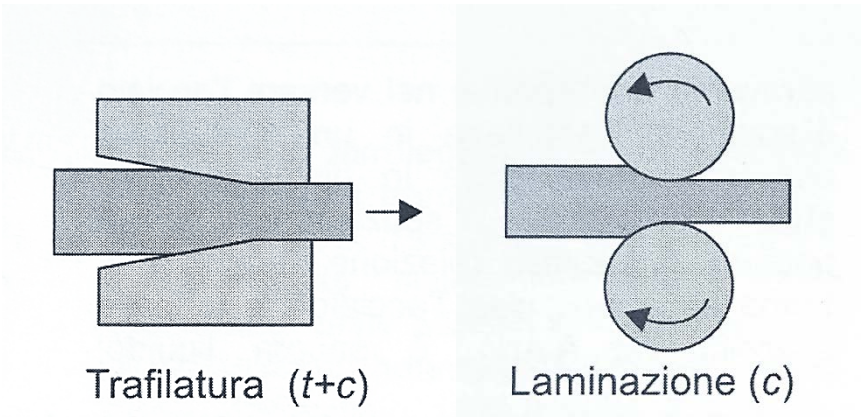


Figura 2.9. Principali processi produttivi delle fibre metalliche.

L'utilizzo delle fibre d'acciaio è diventato standard in specifici campi di applicazione come pavimentazioni industriali, calcestruzzo proiettato ad elementi prefabbricati e per shotcrete (calcestruzzo "spruzzato" su pareti verticali) [11].
Le fibre d'acciaio modificano infatti il comportamento del calcestruzzo da fragile a duttile, con resistenza a trazione post-fessurazione, all'impatto e a fatica (Fig. 2.10).
La fibra deve opporsi all'aumento dell'apertura della fessura, e deve, perciò, deformarsi lentamente durante il processo di fuoriuscita (pull-out), conferendo duttilità al calcestruzzo.

Per realizzare questo obiettivo risultano importanti la distribuzione e omogeneità delle fibre, la resistenza alla trazione della fibra stessa, e la resistenza allo sfilamento.
La resistenza allo sfilamento dipende anche dall'aderenza fibra-matrice.
L'aderenza può essere migliorata sagomando le fibre (fibre ondulate, dentellate o con estremità piegate), oppure chimicamente, rivestendole con zinco o *ottone*.
Un rivestimento in ottone contribuisce, inoltre, ad aumentare la resistenza alla corrosione delle fibre usate per il rinforzo.

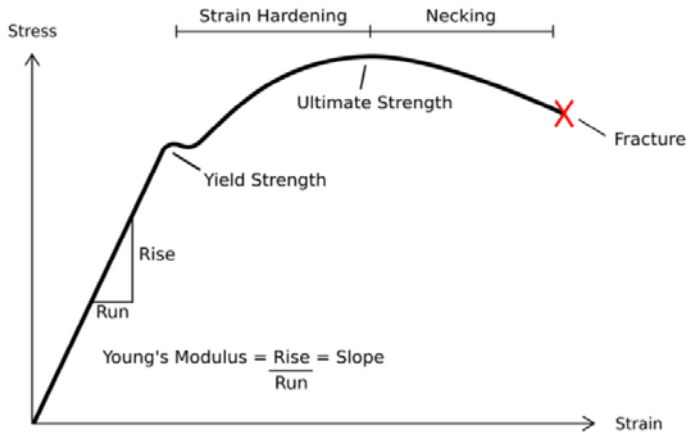


Figura 2.10. Curva sforzo-deformazione di un calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio.

Le fibre metalliche utilizzate in questa sperimentazione sono fibre della BEKAERT, di lunghezza pari a 6 mm, prodotte per trafilatura a freddo di acciaio di alta qualità e duttilità, con rivestimento a base di ottone e con le seguenti caratteristiche (Fig. 2.11).

Tabella 2.4. Caratteristiche delle fibre metalliche in acciaio ottonato utilizzate.

Densità (g/cm^3)	**Diametro (µm)**	**Rapporto d'aspetto**	**Modulo elastico (GPa)**	**Resistenza a trazione (MPa)**	**Resistenza specifica (Ω·cm)**	**Prezzo (€/Kg)**
7,87	160,0	38	230	2600	$1{,}4 \cdot 10^{-6}$	4,00



Figura 2.11. Fibre metalliche in acciaio ottonato.

Bibliografia

[1] Collepardi, Mario, Silvia Collepardi and Roberto Troli. Il nuovo calcestruzzo. Enco Srl, 2014.

[2] S.Vaclav, Making the Modern World: Materials and Dematerialization, Lulu Press. (2016).

[3] V.A. Rossetti, Il calcestruzzo: materiali e tecnologia, 2003.

[4] Luca Bertolini. Materiali da costruzione. Volume primo. Seconda edizione. CittàStudi, 2010.

[5] A.O. Monteiro, P.B. Cachim, P.M.F.J. Costa, Electrical Properties of Cement-based Composites Containing Carbon Black Particles, Mater. Today Proc. 2 (2015) 193–199.

[6] L. Ferrari, J. Kaufmann, F. Winnefeld, J. Plank, Interaction of cement model systems with superplasticizers investigated by atomic force microscopy, zeta potential, and adsorption measurements, J. Colloid Interface Sci. 347 (2010) 15–24.

[7] Fibers, 5. Synthetic Inorganic - Carbon Fibers, Ullmann's Encycl. Ind. Chem. (2002).

[8] Ignazio Crivelli Visconti, Giancarlo Caprino, Antonio Langella. Materiali Compositi. Tecnologie- Progettazione- Applicazioni. HOEPLI, 2009.

[9] L. Ye, K. Friedrich, C. Weimer, Y. Mai, Surface treatment and adhesion bonding between concrete and a CFRP composite, Adv Compos Mater. 7 (1998) 47–91.

[10] Christian Pierini, 2016. Calcestruzzo fibrorinforzato con fibre di acciaio (SFRC), Caratterizzazione del materiale e progettazione strutturale. Ingenio, No 41 p. 46.

[11] ACI 544.3R-93: Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete, ACI Mater. J. (1998).

3. Preparazione degli impasti

3.1. Introduzione

Durante la sperimentazione sono state realizzate malte composte da cemento Portland 52.5R e sabbia silicea, materiali selezionati allo scopo di realizzare impasti dalle proprietà idonee all'utilizzo in applicazioni reali.
Tali malte sono state additivate con l'aggiunta delle tre diverse tipologie di fibre, i cui dosaggi sono stati selezionati in relazione al massimo quantitativo inseribile in fase di miscelazione, senza intaccare eccessivamente la lavorabilità dell'impasto.
Per ciascuna tipologia sono stati testati tre diversi dosaggi in volume, ovvero 0,8%, 1,2% e 1,6% in rapporto al volume totale dell'impasto.
Visti gli elevati quantitativi, sono state effettuate prove preliminari per valutare la lavorabilità degli impasti e il giusto rapporto a/c, con l'obiettivo di inserire un quantitativo elevato di fibre cercando di ottenere un impasto il più possibile omogeneo (e di evitare la propensione delle fibre a raggrupparsi tra di loro) e, al contempo, una buona lavorabilità.

3.2. Stato dell'arte

Diverse sono le sperimentazioni condotte con l'utilizzo di fibre metalliche e/o fibre in carbonio all'interno delle paste cementizie, e la difficoltà nell'ottenere un impasto lavorabile, in particolare con queste ultime, è ormai nota.
La lavorabilità diminuisce notevolmente con l'aumento del contenuto di fibre di carbonio, fino ad un quantitativo limite oltre il quale non è più possibile inglobarle nella matrice in modo efficace.
Ci sono, comunque, diversi altri fattori che influenzano le proprietà di un calcestruzzo fibrorinforzato con fibre in carbonio (CFRC), e tra queste, la dispersione omogenea delle fibre nella matrice di cemento influenza direttamente le proprietà meccaniche ed elettriche.
Importanti, per le proprietà elettriche finali, sono anche il rapporto acqua cemento (a/c), la lunghezza delle fibre e le modalità di stagionatura [5].
Il rapporto acqua cemento (a/c) utilizzato nelle sperimentazioni risulta essere quasi sempre compreso tra lo 0,3 e lo 0,475, con volumi di fibre rispetto al totale compresi tra 0,3% e 0,5% [1-2-3-4-5].
Un rapporto a/c minore dello 0,3 migliora la conducibilità, che diminuisce gradualmente con rapporti più elevati.
D'altra parte, un rapporto a/c più elevato migliora la lavorabilità della miscela e migliora l'uniformità del sistema composito [5].
Per quanto riguarda le proporzioni tra inerte e cemento (i/c), le più utilizzate ricadono tra 1 e 2 [1-2-3-4].
La corretta dispersione delle fibre all'interno della matrice è il tema focale quando si parla di CFRC.
Da uno studio molto recente si evince che la dispersione può essere migliorata aggiungendo, non solo additivi specifici, ma anche del fumo di silice dal 5% al 15% in massa sul cemento [5].
È possibile disperdere preliminarmente le fibre in una parte dell'acqua di impasto da utilizzare con additivi specifici a base di cellulosa, e sottoporre questa soluzione a sonificazione per circa 10 minuti.

Allo stesso tempo, nel processo di miscelazione, è importante mantenere una modesta velocità di mescolamento, per disperdere bene le fibre senza danneggiarle.
È consigliabile alternare bassa e alta velocità per circa due minuti [5].
La presenza di un contenuto molto elevato di fibre ne ostacola la corretta dispersione, e questo può portare alla formazione di numerose bolle d'aria che vanno a penalizzare, in modo particolare, la resistenza a compressione finale.
È quindi consigliabile vibrare i campioni una volta gettati negli stampi per ridurre al minimo questo fenomeno [5].

3.3. Prove preliminari di lavorabilità

Per avere una misura della lavorabilità di ciascun impasto, è stata effettuata su ognuno una prova di spandimento, misurando il diametro medio a cui si porta il calcestruzzo inizialmente compattato all'interno di uno stampo tronco-conico (con diametro inferiore di 100 mm, diametro superiore di 70 mm e altezza 60 mm) dopo essere stato sottoposto a 15 scosse su una tavola di diametro 300 mm (UNI EN 1015-3:2007).
Le miscele preliminari testate sono riportate di seguito.

Tabella 3.1. Prove preliminari di lavorabilità.

Sigla miscela	Sabbia del Po s.s.a. (g)	CEM I 52,5R (g)	Acqua (g)	a/c	i/c	Superfluidificante (g)	Fibre (g)
1,6 CAR 1	954	636	286,2	0,45	1,5	11	29
1,6 CAR 2	954	636	318	0,5	1,5	11	29
1,2 CAR 1	954	636	318	0,5	1,5	8	22
1,2 CAR 2	954	636	349,8	0,55	1,5	8	22
1,6 MET	954	636	318	0,5	1,5	-	128,3

Dove con 1 e 2 si definisce la stessa tipologia di miscela con due differenti rapporti a/c.
Le quantità appena riportate sono state miscelate unendo inizialmente sabbia, cemento e superfluidificante in polvere.
In seguito sono state aggiunte l'acqua e, gradualmente, le fibre, mescolando per circa cinque minuti.
Per entrambe le miscele 1,6 CAR, utilizzando una sabbia con umidità = 5,7%, sono stati aggiunti 45 g di sabbia umida e tolti 45 g di acqua.
Notando immediatamente la scarsa lavorabilità dell'impasto ottenuto, sono stati aggiunti 32 g di acqua per portare quindi il rapporto a/c a 0,5 (Fig. 3.1).



Figura 3.1. Risultato della prova di spandimento della miscela 1,6 CAR 2 con a/c= 0,5 (115 mm).

Gli impasti successivi sono stati realizzati utilizzando da subito un rapporto a/c pari a 0,5. Con la miscela 1,2 CAR 1 sono stati confezionati due litri di impasto per la realizzazione di sei provini necessari per le prove preliminari di resistività elettrica in corrente continua e alternata.
Alla miscela 1,2 CAR 2 (Fig. 3.2), sono stati aggiunti 32 g di acqua per valutare il comportamento della miscela con un rapporto a/c più elevato, pari a 0,55 (Fig. 3.3).



Figura 3.2. Spandimento 1,2 CAR 1 (120 mm).



Figura 3.3. Spandimento 1,2 CAR 2 (120 mm).

La lavorabilità dei due impasti è rimasta pressochè invariata e, vista la presenza di eccessivo bleeding (Fig. 3.4), non si è ritenuto necessario verificare rapporti a/c più elevati.



Figura 3.4. Miscela 1,2 CAR 2 prima della prova di spandimento (bleeding).

Per la miscela 1,6 MET non è stato utilizzato alcun fluidificante, vista la migliore lavorabiltà delle miscele con le fibre metalliche (Fig. 3.5).



Figura 3.5. Risultato della prova di spandimento della miscela 1,6 MET (125 mm).

3.4. Conclusioni

Dalle prove preliminari di lavorabilità sono stati ottenuti importanti dati riguardo all'effetto delle fibre sulla reologia delle matrici cementizie.
In particolare, è stata rilevato che:

- le fibre di carbonio possiedono una propensione all'assorbimento dell'acqua di impasto, che viene sottratta alla miscela, venendo successivamente rilasciata in condizioni di stress (ad esempio durante la fase di getto nei casseri, o durante le prove di spandimento);

- tale fenomeno complica la fase di miscelazione dei composti che contengono le fibre di carbonio, giacché l'aggiunta di acqua (oltre determinati dosaggi) non apporta un miglioramento della lavorabilità, ma solo un'accentuazione dei fenomeni di bleeding (l'acqua viene in gran parte assorbita dalle fibre, per poi essere rilasciata in grandi quantità).

Un rapporto a/c superiore a 0,5 è stato, perciò, ritenuto poco utile all'ottimizzazione della della dispersione delle fibre di carbonio.
Le fibre in acciaio ottonato mostrano, al contrario, una minore interferenza con l'acqua di impasto, permettendo ai composti contenenti le fibre metalliche di raggiungere una maggiore fluidità, a parità di dosaggio di ingredienti.

Bibliografia

[1] Pu-Woei Chen, Xuli Fu and D.D.L. Chung, 1995. Improving the bonding between old and new concrete by adding carbon fibers to the new concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 3 pp. 491-496.

[2] Pu-Woei Chen and D. D. L. Chung, 1995. Concrete as a new strain/stress sensor. Composites: Part B 27B, 11-23.

[3] A. D'Alessandro, F. Ubertini, A.L. Materazzi, S. Laflamme, A. Cancelli, L. Micheli, 2016. Carbon cement-based sensors for dynamic monitoring of structures.

[4] Savaş Erdem, Serap Hanbay, Marva Angela Blankson, 2017. Self-sensing damage assessment and image-based surface crack quantification of carbon nanofibre reinforced concrete. Construction and Building Materials, 134 (2017) 520–529.

[5] Wang Chuanga, Jiao Geng-shengb, Li Bing-lianga, Peng Leia, Feng Yinga, Gao Nia, Li Ke-zhic, 2017. Dispersion of carbon fibers and conductivity of carbon fiber-reinforced cement-based composites. Ceramics International, 43 (2017) 15122–15132.

4. Impasti definitivi

4.1. Mix-design

Il mix-design è il procedimento per il calcolo della composizione del materiale cementizio (in termini di quantità di cemento, di acqua, di inerti e di additivi per m^3 di composto), a partire da:

- le proprietà ingegneristiche del materiale indurito (resistenza meccanica, modulo elastico, ritiro, scorrimento viscoso, durabilità, ecc.) quali risultano dall'esigenza del progetto;
- le esigenze esecutive (lavorabilità, modalità di getto, ecc.);
- i materiali disponibili (tipo di cemento, di inerti e di additivi).

Il calcolo delle varie quantità riguarda il prodotto finale che si vuole ottenere, ed è basato sulle correlazioni sperimentali esistenti tra la pasta cementizia, le caratteristiche fisico-chimiche desiderate e le conseguenti prestazioni che il prodotto confezionato deve garantire.
Si possono riassumere quattro punti fondamentali, dai quali non si può prescindere:

- il quantitativo d'acqua, che dipende dalla lavorabilità dell'impasto fresco oltre che dal tipo di inerte, dalla sua dimensione e dalla presenza di additivi;
- il rapporto tra il quantitativo di acqua e quello del cemento (a/c), che dipende dalla resistenza meccanica dell'impasto indurito oltre che dal tipo e dalla classe del cemento;
- il rapporto a/c che occorre adottare dipende anche dalla durabilità del prodotto indurito in relazione alla classe di esposizione del prodotto confezionato stesso;
- individuato il rapporto a/c, deve essere individuato il volume dell'inerte e la massa dell'inerte stesso con il giusto dosaggio derivante anche dalla curva granulometrica prevista per la miscela da ottenere [1].

Il mix-design è stato utilizzato per conoscere esattamente la quantità di elementi costituenti i vari impasti.
I rapporti fondamentali delle miscele che sono state studiate, sono stati fissati a:

- il rapporto in peso acqua/cemento pari a 0,5;
- il rapporto in peso inerte/cemento pari a 1,5.

Il rapporto inerte/cemento è stato calcolato considerando il peso della sabbia in condizioni di *saturazione con superficie asciutta* (s.s.a.).
La sabbia silicea utilizzata nella sperimentazione si è dimostrata in condizioni si s.s.a. con un'umidità dell'1% rispetto al peso della sabbia essiccata.
Umidità superiori presenti all'interno dell'inerte sono state utilizzate per correggere il quantitativo di acqua inserito nelle miscele.

4.1.1. Composizione delle malte

All'interno della sperimentazione, sono state preparate 22 diverse malte cementizie, inclusa una malta di riferimento senza l'aggiunta di fibre, in modo da poter confrontare la variazione delle prestazioni dovuta alle varie aggiunte.
Ciascun tipo di fibra è stato aggiunto in 7 differenti dosaggi (in volume sul totale): 4 con basse quantità, pari a 0,05, 0,1, 0,2, 0,4% e 3 con quantità elevate, pari a 0,8, 1,2, 1,6%.
Di seguito vengono esplicitate in dettaglio le combinazioni testate (le quantità indicate si riferiscono ad un litro di miscela).

Tabella 4.1. Mix-design definitivi delle malte testate.

Sigla miscela	Legante	Inerte	Acqua (g)	Additivo	Fibre	
	CEM I 52,5R (g)	Sabbia del Po s.s.a. (g)		Superfluidificante (g)	Tipo	g
RIF	720	1080	360	-	-	-
0,05 CAR	720	1080	360	-	Carbonio	0,9
0,1 CAR	720	1080	360	-	Carbonio	1,8
0,2 CAR	720	1080	360	-	Carbonio	3,6
0,4 CAR	720	1080	360	-	Carbonio	7,3
0,8 CAR	720	1080	360	6,6	Carbonio	14,5
1,2 CAR	720	1080	360	9,4	Carbonio	22,0
1,6 CAR	720	1080	360	12,9	Carbonio	29,0
0,05 CAR R	720	1080	360	-	Carbonio riciclate	0,9
0,1 CAR R	720	1080	360	-	Carbonio riciclate	1,8
0,2 CAR R	720	1080	360	-	Carbonio riciclate	3,6
0,4 CAR R	720	1080	360	-	Carbonio riciclate	7,3
0,8 CAR R	720	1080	360	6,6	Carbonio riciclate	14,5
1,2 CAR R	720	1080	360	9,4	Carbonio riciclate	22,6
1,6 CAR R	720	1080	360	12,9	Carbonio riciclate	30,3
0,05 MET	720	1080	360	-	Acciaio	4,0
0,1 MET	720	1080	360	-	Acciaio	8,0
0,2 MET	720	1080	360	-	Acciaio	16,1
0,4 MET	720	1080	360	-	Acciaio	32,2
0,8 MET	720	1080	360	-	Acciaio	64,3
1,2 MET	720	1080	360	-	Acciaio	96,3
1,6 MET	720	1080	360	-	Acciaio	128,3

4.2. Tecniche di impasto

4.2.1. Fase preliminare

Nella fase preliminare al getto, è necessario compiere alcune operazioni di notevole importanza ai fini della riuscita del prodotto finale.
Si deve procedere alla preparazione dei casseri di formatura nei quali verrà gettata la malta.
Operazione indispensabile è l'applicazione di un liquido a matrice oleosa (disarmante) sulla superficie dei casseri.
Il disarmante è fondamentale per riuscire a scasserare i provini dagli stampi, in modo da facilitare l'operazione di estrazione ed evitare la rottura e il danneggiamento degli stessi.
Con l'aiuto di un pennello è stata ricoperta minuziosamente l'intera superficie interna dei casseri.

4.2.2. Esecuzione dei getti

Nella preparazione, le modalità di impasto e di inserimento degli ingredienti hanno un ruolo fondamentale nella buona riuscita della miscela.
Sia le differenti caratteristiche fisico-chimiche dei vari materiali costituenti, sia i dosaggi dei componenti principali con cui le malte sono state prodotte, hanno comportato metodologie di esecuzione differenti.
Le fasi di produzione degli impasti e i relativi strumenti utilizzati restano invariati per ciascuno degli impasti realizzati.
Di seguito sono state approfondite le procedure per la realizzazione dei getti, nonché le tecniche di getto dei provini e le loro condizioni di stagionatura per il tempo necessario richiesto dalle metodologie di prova (e dalle relative norme di riferimento).
Una volta realizzato l'impasto, questo viene gettato e confezionato nei casseri opportuni, a seconda del tipo di prova a cui dovranno essere sottoposti i provini dopo la maturazione e le tempistiche richieste dalla normativa.
Dopo le fasi preliminari precedentemente descritte, si procede con la fase di getto vera e propria (Fig. 4.1).
Inizialmente, in un recipiente di adeguate dimensioni, sono state miscelate manualmente le polveri (sabbia, cemento e superfluidificante quando necessario) opportunamente dosate, e successivamente è stata aggiunta l'acqua.
Le dosi di acqua e sabbia sono state opportunamente corrette per tenere conto dell'umidità già presente all'interno della sabbia utilizzata.
Per ultime, per dare tempo all'additivo di agire, sono state aggiunte le fibre poco per volta e mescolando costantemente per fare in modo di disperderle meglio possibile e, una volta inserite tutte, il composto è stato miscelato per un tempo pari a 5 minuti a modesta velocità.
Terminata la miscelazione è stata eseguita la prova di lavorabilità con l'utilizzo della tavola a scosse (Cap. 5) e successivamente gli impasti sono stati gettati nei casseri.
Durante le operazioni di getto, dato che la miscela introdotta nei casseri contiene sempre una quantità di aria inglobata, la presenza di un contenuto molto elevato di fibre ne ostacola la corretta dispersione e questo può favorire maggiormente la formazione di numerose bolle d'aria che devono essere eliminate per ottenere una malta durevole e di qualità.

Per ottenere una malta omogenea, i casseri sono stati riempiti a strati per agevolare la compattazione, che è stata eseguita sia manualmente che con l'aiuto di una *tavola vibrante*.
Infine è stata effettuata la rasatura della malta in eccesso per ottenere provini di dimensioni il più regolari possibili.

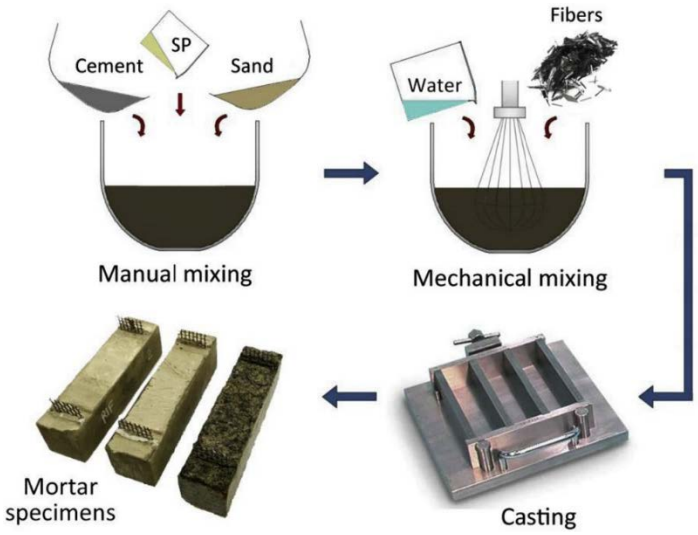


Figura 4.1. Schema del processo di fabbricazione dei provini di malta.

4.3. Provini realizzati e casseri di formatura

Allo scopo di ottenere campioni idonei alle diverse fasi di sperimentazione, sono stati realizzati, per ogni tipologia di impasto, 15 provini prismatici di dimensioni 40x40x160 mm (3 dei quali con l'inserimento di elettrodi per le prove di resistività elettrica).
Per realizzare il numero di provini necessari per tutte le prove previste, sono stati confezionati 4,5 litri di impasto per ciascuna miscela.

4.3.1. Casseri per provini 40x40x160 mm

Per la formatura dei provini prismatici sono stati utilizzati casseri in acciaio da tre provini ciascuno, montati ad incastro (Fig. 4.2).

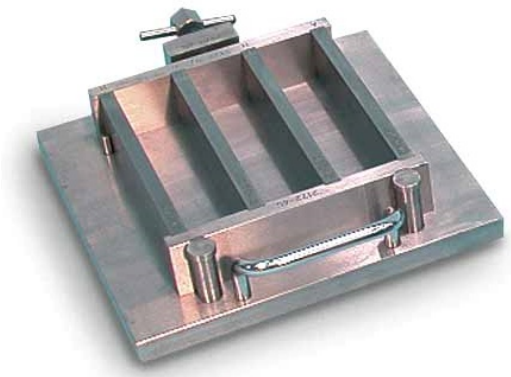


Figura 4.2. Casseri in acciaio ad incastro.

Tramite tale tipologia di campionatura verranno analizzate:

- la resistenza meccanica a flessione a 2, 7, e 28 giorni di stagionatura secondo la UNI EN 1015-11:2007;
- la resistenza meccanica a flessione con controllo di CMOD a 28 giorni di stagionatura secondo la UNI EN 14561:2007 e gli standard RILEM TC-50;
- la resistività elettrica a 2, 7, 14, 21, 28, 49, 70 e 91 giorni di stagionatura.

Dalle prove di flessione effettuate su questa tipologia di provini, si ricavano due provini di circa 40x40x80 mm, grazie ai quali verranno analizzate:

- la resistenza a trazione indiretta a 2, 7, e 28 giorni di stagionatura secondo la UNI EN 12390-6:2010;
- la resistenza a compressione a 2, 7, e 28 giorni di stagionatura secondo la UNI EN 1015-11:2007;
- l'assorbimento d'acqua per capillarità secondo la UNI EN 1015-18:2004 e la UNI EN 15801:2012.

Dalle prove di compressione, a sua volta, si ricavano dei frammenti utili per effettuare:

- l'osservazione al microscopio elettronico a scansione (SEM) a 28 giorni di stagionatura.

Per la formatura dei provini utilizzati per le prove di resistività sono state realizzate delle mascherine in plastica per permettere la corretta immissione di due reti (apertura maglia: 3,50 mm, diametro filo: 0,71 mm) di dimensioni 30x50 mm poste ad una distanza di 120 mm l'una dall'altra, con un'area immersa pari a 30x30 mm (Fig. 4.3 e 4.4).



Figura 4.3. Malta gettata all'interno di un cassero metallico per le prove di resistività.

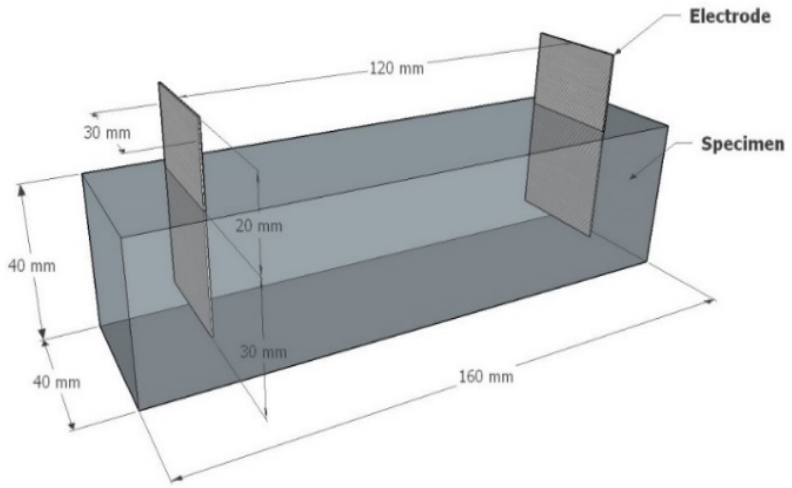


Figura 4.4. Schematizzazione di un provino utilizzato per le prove di resistività.

4.4. Stagionatura

Per le modalità di conservazione e di stagionatura dei provini sono state seguite le indicazioni riportate nelle normative.
Le sopracitate normative che regolano la determinazione delle resistenze meccaniche prevedono la conservazione dei provini a umidità relativa del 95 ± 5% e alla temperatura di 20 ± 2°C all'interno dei casseri utilizzati per la formatura per un tempo di 2 giorni e la conservazione per ulteriori 5 giorni alle stesse condizioni una volta rimossi dai casseri. Trascorsi 7 giorni dal getto, i provini vengono stagionati a temperatura 20 ± 2°C e umidità relativa del 65 ± 5% fino all'esecuzione delle prove.
Tutti i provini sono stati sottoposti a questo tipo di stagionatura.

Bibliografia

[1] Collepardi, Mario, Silvia Collepardi and Roberto Troli. Il nuovo calcestruzzo. Enco Srl, 2014.

5. Caratterizzazione allo stato fresco

5.1. Introduzione

Una delle qualità che la malta deve possedere per essere idoneamente utilizzabile nelle svariate applicazioni edili è quella di avere una buona lavorabilità allo stato fresco, cioè nelle fasi immediatamente successive al getto e precedenti alla fase di presa.
La capacità di una malta di compattarsi (conseguenza di una buona lavorabilità) influenza le proprietà del prodotto finale.
Queste ultime, infatti, dipendono dalle porosità presenti nel composto indurito, causate principalmente dall'aria presente all'interno dell'impasto al momento del getto.
Gli effetti positivi che derivano da una buona lavorabilità sono, dunque, una migliore compattazione che, a sua volta, implica un minore contenuto di aria all'interno dell'impasto fresco e quindi una maggiore densità e minore porosità nella malta.
La determinazione della lavorabilità delle malte analizzate verrà approfondita tramite la misura del loro spandimento e della loro consistenza percentuale in accordo alla normativa UNI EN 1015-3:2007.

5.2. Metodo di rilevazione

Il metodo per determinare la lavorabilità della malta allo stato fresco, gli strumenti utilizzati e la verifica dei dati sono specificati nella normativa.
Il principio della prova consiste nel misurare il valore di fluidità tramite il diametro medio dello spandimento di un campione di prova della malta fresca tramite lo slump test.
Nello slump test o "prova di spandimento", il campione di malta è stato stipato all'interno di uno stampo metallico tronco conico di 60 mm di altezza, 70 mm di diametro superiore e 100 mm di diametro inferiore, cercando di eliminare i vuoti presenti all'interno del provino.
Il campione è stato posto su una superficie vetrosa del diametro di 300 mm posizionata su una tavola a scosse (Fig. 5.1).
Una volta rimossa la forma metallica il piano è stato percosso dalla tavola elettro-meccanica alla velocità di un colpo al secondo alzandosi e abbassandosi bruscamente, per un tempo complessivo di 15 secondi (15 colpi in 15 secondi).
Successivamente è stato misurato il diametro finale del campione di malta.
Lo spandimento ricercato si è ottenuto dalla differenza tra il diametro del campione di malta successivo alle 15 scosse nello slump test e il diametro alla base della malta formata all'interno del tronco di cono appena rimosso (100 mm).
La norma UNI EN 1015-3:2007 classifica i materiali testati secondo gli intervalli di misura per il diametro finale delle malte dopo 15 colpi della tavola a scosse misurati in mm in:

- malte rigide (<140 mm);
- malte plastiche (da 140 mm a 200 mm);
- malte leggere (>200 mm).

Le malte analizzate nella seguente sperimentazione rientrano nelle prime due categorie.

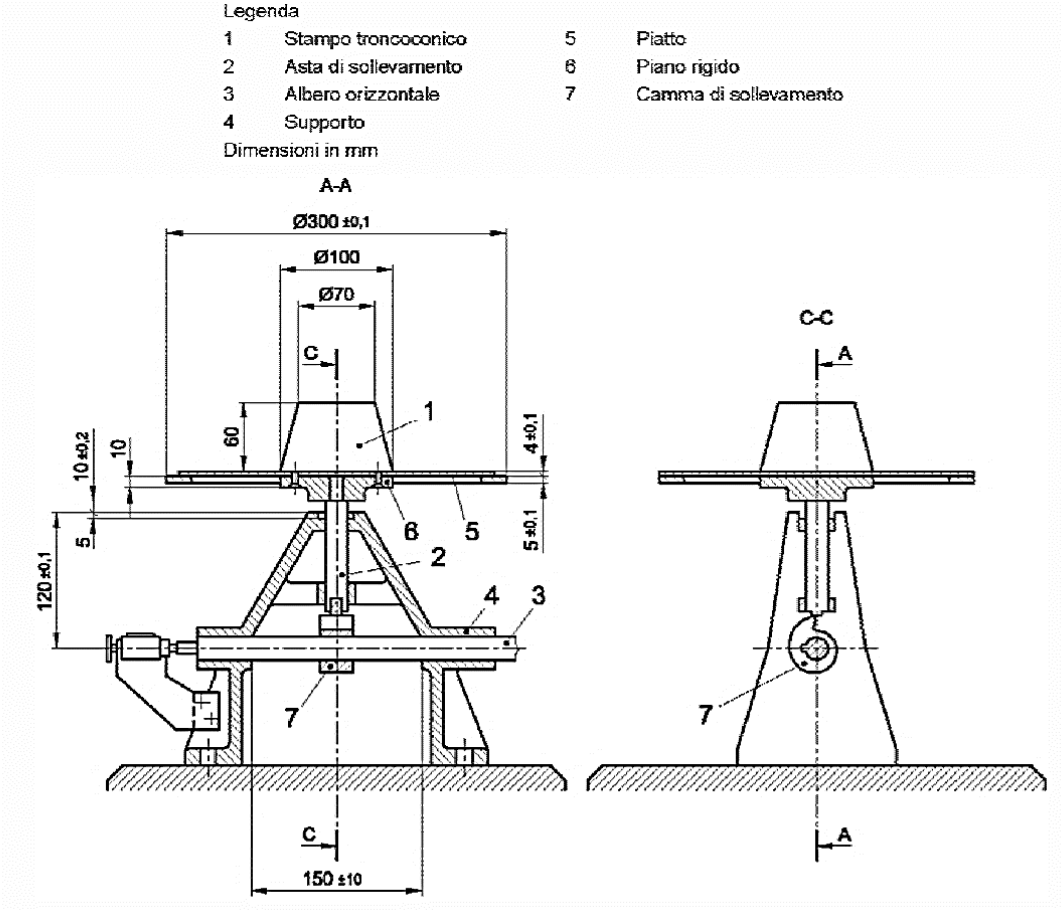


Figura 5.1. Tavola a scosse.

Sempre nella UNI EN 1015-3:2007 si ottengono i criteri per il calcolo della consistenza percentuale delle malte allo stato fresco.
Tale parametro viene utilizzato sia come misura della fluidità della malta fresca sia per stimare la deformabilità della stessa malta quando sottoposta a determinati tipi di stress. In questo modo è possibile stimare le condizioni in cui la malta si trova al momento in cui viene lavorata dall'operatore.
La consistenza, espressa in percentuale, si ottiene dalla seguente relazione:

$$C\ (\%) = \frac{d_f - d_i}{d_i} \cdot 100$$

dove:

- d_f è il diametro alla base del campione di malta dopo 15 scosse allo slump test, espresso in mm;
- d_i è il diametro iniziale del campione tronco-conico di malta (100 mm).

5.3. Risultati della prova

La lavorabilità delle malte ottenute risulta essere un parametro importante da verificare ai fini della caratterizzazione del prodotto, in quanto ne determina la facilità di messa in opera.
Nella tabella seguente sono riportate le lavorabilità misurate in fase di getto.

Tabella 5.1. Valori dei diametri finali e delle consistenze delle malte testate.

Sigla miscela	Diametro finale (mm)	Consistenza (%)
RIF	199	99
0,05 CAR	150	50
0,1 CAR	151	51
0,2 CAR	149	49
0,4 CAR	144	44
0,8 CAR	137	37
1,2 CAR	122	22
1,6 CAR	114	14
0,05 CAR R	182	82
0,1 CAR R	165	65
0,2 CAR R	139	39
0,4 CAR R	126	26
0,8 CAR R	130	30
1,2 CAR R	122	22
1,6 CAR R	116	16
0,05 MET	149	49
0,1 MET	145	45
0,2 MET	162	62
0,4 MET	158	58
0,8 MET	160	60
1,2 MET	150	50
1,6 MET	143	43

5.4. Confronto e considerazioni

Dai risultati ottenuti di lavorabilità e consistenza delle varie malte testate, si può notare che:

- la malta di riferimento, le malte con l'aggiunta di fibre metalliche (sia a bassi che ad alti dosaggi) e le malte con l'aggiunta di fibre di carbonio a bassi dosaggi, rientrano nella medesima classe di consistenza, ovvero quella di malte plastiche, con un diametro finale compreso tra 140 e 200 mm;
- le malte sopracitate mostrano tutte una buona lavorabilità e una buona consistenza (C% ≥ 40);
- una maggiore aggiunta di fibre (≥ 0,8 vol%) comporta una minore lavorabilità della malta, e valori di spandimento più bassi (a prescindere dalla tipologia di fibra utilizzata).

Le malte con elevati dosaggi di fibre di carbonio risultano, dunque, le meno lavorabili, con evidenti difficoltà in fase di getto nell'ottenere provini omogenei e regolari, a causa del comportamento igrometrico delle fibre.
Infatti, gli agglomerati di fibre di carbonio tendono ad assorbire l'acqua d'impasto, peggiorando la lavorabilità della malta durante l'impasto.
Successivamente, quando la malta fresca subisce sollecitazioni meccaniche (es. durante il getto), i ciuffi di fibre rilasciano l'acqua assorbita, creando effetti di bleeding e segregazione (Fig. 5.2-5.3).
Questo problema è stato parzialmente risolto aggiungendo SP.
Tuttavia, oltre una certa soglia, l'aggiunta di SP non fornisce alcun effetto ulteriore.



Figura 5.2. Miscela 0,8 MET (senza bleeding).



Figura 5.3. Miscela 0,8 CAR (con bleeding).

6. Caratterizzazione meccanica allo stato indurito

6.1. Introduzione

La meccanica dei materiali è la disciplina che studia il comportamento meccanico dei composti, al fine di poterli utilizzare razionalmente in ambito strutturale.
Tale scienza studia il comportamento degli oggetti solidi sottoposti a stress e tensioni. Una delle proprietà fondamentali che un materiale da costruzione deve possedere risulta, quindi, essere la resistenza meccanica.
La resistenza meccanica è una proprietà che indica il massimo sforzo che un materiale è in grado di sopportare prima di raggiungere lo stato di rottura.
Essa può essere misurata con differenti prove specifiche: a seconda che lo sforzo applicato sia di flessione, trazione o compressione si parlerà rispettivamente di resistenza meccanica a flessione, trazione o compressione.
Le malte (come per calcestruzzi, pietre e laterizi) rientrano nella categoria dei materiali fragili, tendenti cioè a rompersi bruscamente, con precedenti fasi di deformazione o snervamento trascurabili o del tutto assenti.
L'aggiunta di fibre contribuisce a rendere il materiale meno fragile, consentendo maggiori deformazioni in casi di stress, prima di giungere alla rottura definitiva.
Le normative prese in considerazione nella seguente tesi per la caratterizzazione meccanica allo stato indurito sono la UNI EN 1015-11:2007 per quanto riguarda la resistenza a flessione e la resistenza a compressione, la UNI EN 12390-6:2010 per quanto riguarda le prove meccaniche di trazione indiretta, la UNI EN 14651:2007 e la RILEM TC-50 per le prove di resistenza residua a flessione in controllo di CMOD.

6.2. Resistenza meccanica a flessione

La flessione è una delle sollecitazioni elementari cui può essere soggetto un corpo, insieme alla compressione, la trazione, il taglio e la torsione.
Per semplicità, si può dire che un corpo è soggetto ad uno sforzo di flessione quando, per effetto dei vincoli cui è sottoposto, reagisce opponendosi ad un sistema di forze ad esso applicate che tenderebbero a farlo ruotare attorno ad un proprio punto.
La prova per valutare la resistenza meccanica a flessione consiste in una prova di flessione su tre punti, in cui i provini vengono vincolati con due appoggi nella parte inferiore e caricati in mezzeria nella parte superiore da un cuneo solidale alla cella di carico.
L'applicazione della forza genera una sollecitazione di trazione nella parte inferiore del provino e, in contemporanea, una sollecitazione di compressione nella parte superiore.

6.2.1. Campionamento e stagionatura

Per la rottura e la rilevazione della resistenza a flessione sono stati utilizzati provini di dimensione 40x40x160 mm.
I provini sono stati mantenuti nel cassero di formazione per i 2 giorni successivi al getto, conservati a una temperatura di 20 ± 2°C e un'umidità relativa di 95 ± 5%.
Successivamente i provini sono stati scasserati, ricoperti con pellicola di cellulosa trasparente e mantenuti alle stesse condizioni di temperatura e umidità per i successivi 5 giorni.

Dopo 7 giorni dall'esecuzione del getto, i provini sono stati mantenuti per i 21 giorni successivi ad una temperatura costante di 20 ± 2°C e un'umidità relativa del 65 ± 5% nella cella climatizzata.

6.2.2. Metodo di rilevazione

La metodologia di prova e la strumentazione sono descritte nella normativa UNI EN 1015-11:2007.
Per la determinazione dei dati relativi al collaudo della resistenza a flessione dei provini in esame è stata utilizzata (come da normativa) una pressa idraulica munita di cella di carica e collegata ad un terminale per la registrazione dei risultati ottenuti (Fig. 6.1).
I dati ottenuti si riferiscono alla forza opposta dal provino rispetto a quella esercitata dal pistone della pressa.



Figura 6.1. Strumentazione utilizzata per effettuare le prove meccaniche.

I provini sono stati posti su un supporto costituito da due appoggi metallici di forma cilindrica del diametro di 10 mm.
Al di sopra del provino vi è un carico di punta costituito da un cuneo metallico di forma semicilindrica anch'esso del diametro di 10 mm.
Il provino viene vincolato all'interno del supporto con le superfici più regolari poggianti sui cilindri metallici e il carico di punta agente, più o meno, in mezzeria (Fig.6.2).
La pressa agisce sul supporto aumentandone gradualmente il carico applicato perpendicolarmente alla superficie superiore del prisma, fino a portarlo a rottura.



Figura 6.2. Prova meccanica a flessione.

La rottura avviene per la formazione di una crepa in mezzeria, che si innesca nella parte inferiore sollecitata a trazione, e si propaga, con l'aumentare del carico applicato, verso la superficie superiore.
Tramite il terminale collegato alla pressa idraulica sono stati ricavati i valori di carico sul provino e, di conseguenza, è stata ricavata la resistenza a flessione R_f (espressa in MPa) mediante la relazione:

$$R_f = 1{,}5\ \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2}$$

dove:

- R_f è la resistenza a flessione (MPa);
- F è il carico massimo applicato (N);
- l è la distanza tra i due appoggi in metallo, pari a 100 mm;
- b è la larghezza del provino, pari a 40 mm;
- h è l'altezza del provino, pari a 40 mm.

I risultati ottenuti con la metodologia e con la strumentazione precedentemente descritta sono stati utilizzati per la realizzazione di grafici in cui sono evidenziate le proprietà di resistenza meccanica a flessione.
Le prove di rottura sono state effettuate a 2, 7 e 28 di stagionatura, così da analizzare al meglio l'incremento delle prestazioni meccaniche in funzione del tempo di maturazione.

6.2.3. Risultati della prova

Di seguito sono riportati, per ogni tipologia di impasto, i valori medi della resistenza a flessione, ottenuti dalle prove di resistenza meccanica.

Tabella 6.1. Misurazione resistenza a flessione media delle malte testate.

Sigla miscela	Giorni di maturazione		
	2	7	28
	R_f (MPa)		
RIF	5,4	6,0	6,9
0,05 CAR	6,0	7,0	7,5
0,1 CAR	6,9	7,0	8,0
0,2 CAR	6,8	7,5	8,5
0,4 CAR	7,2	7,3	9,2
0,8 CAR	8,6	9,1	11,2
1,2 CAR	8,0	10,6	11,5
1,6 CAR	6,3	10,6	11,8
0,05 CAR R	6,2	6,8	7,6
0,1 CAR R	6,2	6,9	7,4
0,2 CAR R	7,3	8,5	8,7
0,4 CAR R	8,5	8,9	9,7
0,8 CAR R	6,8	7,5	7,9
1,2 CAR R	9,0	10,8	12,0
1,6 CAR R	10,4	11,3	13,9
0,05 MET	7,1	8,0	8,3
0,1 MET	6,8	7,4	9,0
0,2 MET	6,9	7,2	8,8
0,4 MET	6,8	7,8	9,1
0,8 MET	8,0	8,6	8,8
1,2 MET	8,4	8,8	9,0
1,6 MET	9,7	9,9	10,6

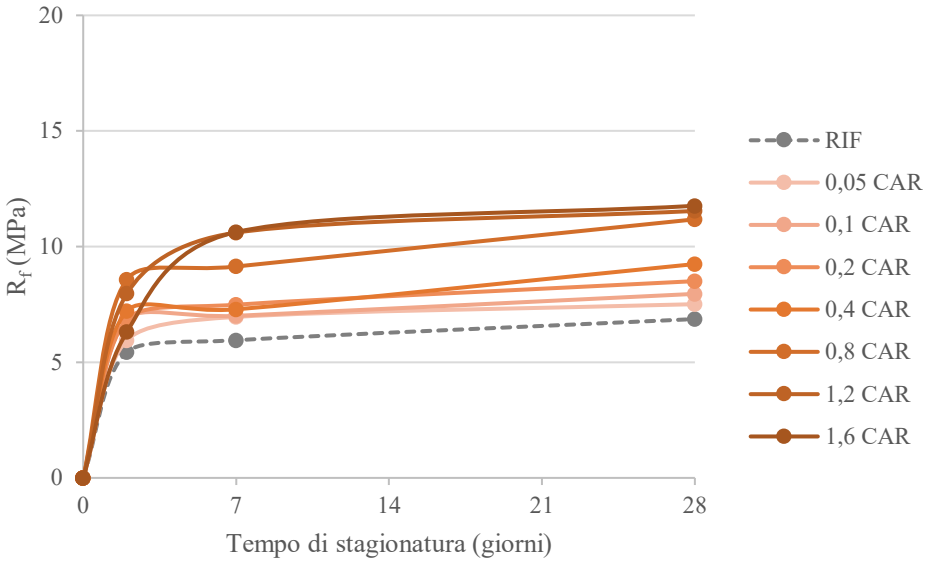


Figura 6.3. Andamento resistenza a flessione media dei provini CAR.

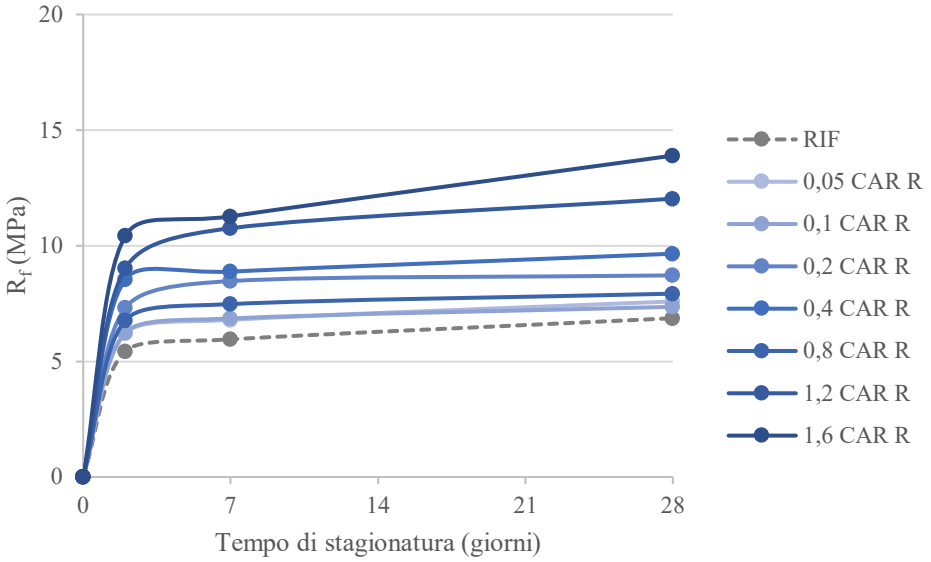


Figura 6.4. Andamento resistenza a flessione media dei provini CAR R.

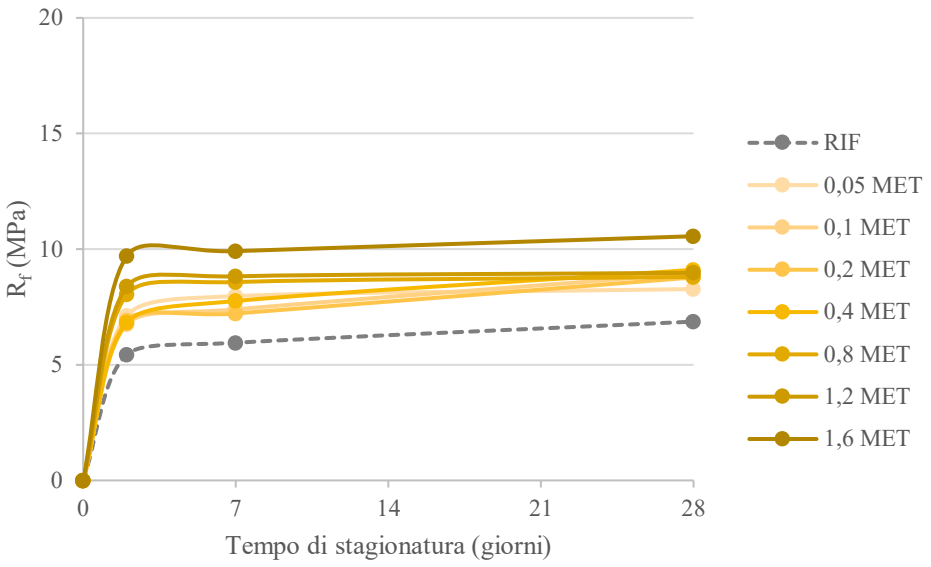


Figura 6.5. Andamento resistenza a flessione media dei provini MET.

6.2.4. Confronto e considerazioni

Di seguito è riportato il grafico complessivo di tutti i dati finali ottenuti per permettere un confronto tra le malte testate in termine di resistenza meccanica a flessione.

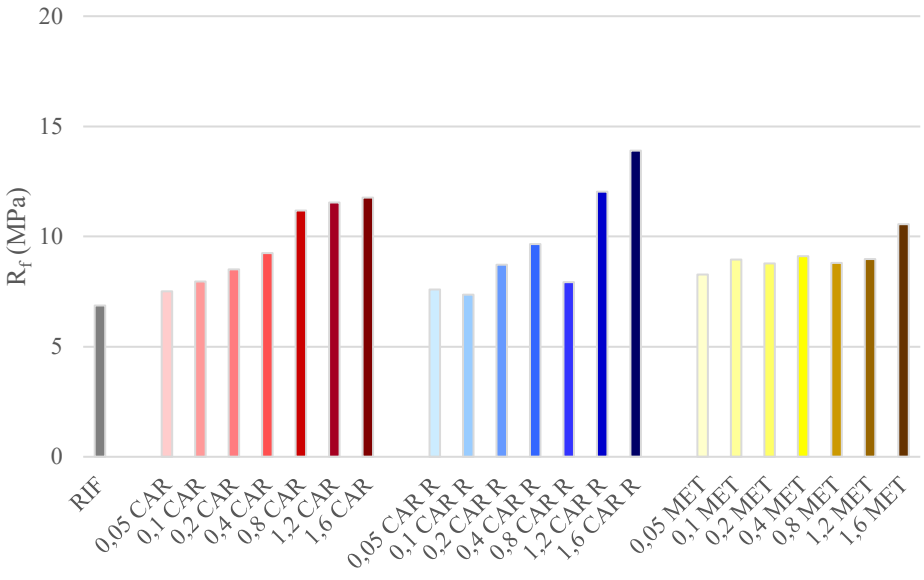


Figura 6.6. Resistenza a flessione media delle malte testate a 28 giorni di maturazione.

Dai risultati ottenuti si può affermare che:

- tutti i tipi di fibre forniscono un aumento della resistenza meccanica a flessione in relazione alla quantità di aggiunta (maggiore è la concentrazione di fibre, maggiore è il valore di resistenza), anche se questo effetto è meno evidente nelle miscele con fibre metalliche (Fig. 6.6);

- tutte le miscele realizzate sviluppano gran parte delle loro prestazioni meccaniche nei primi giorni di maturazione, con un valore medio del 80% a 2 giorni e del 90% a 7 giorni, rispetto a quello finale (Fig. 6.3-6.4-6.5);

- i valori di resistenza a flessione più alti sono stati raggiunti dalle malte con fibre di carbonio, in particolare quelle riciclate (1,6 CAR R), con incrementi fino al 200% rispetto alla malta di riferimento;

- i migliori risultati delle fibre di carbonio (sia vergini che riciclate), rispetto alle fibre metalliche, sono dovuti al maggiore rapporto d'aspetto dei filamenti, che, a parità di volume di aggiunta, permettono di creare più connessioni amplificando così le forze di adesione e l'effetto di cucitura.

In generale, dalla prova di resistenza meccanica a flessione si evince che tutte le aggiunte permettono di avere delle prestazioni migliori rispetto alla miscela di riferimento e che l'aumento della resistenza meccanica è direttamente proporzionale alla percentuale di fibre presenti.

6.3. Resistenza meccanica a trazione indiretta

La prova per valutare la resistenza meccanica a trazione indiretta consiste nel sollecitare a compressione, su due generatrici opposte, un provino di forma prismatica. L'applicazione della forza di compressione genera uno stato tensionale di trazione su gran parte del piano diametrale contenente il carico.

6.3.1. Campionamento e stagionatura

I provini utilizzati in questa fase di sperimentazione meccanica sono gli stessi utilizzati per le prove di rottura a flessione.
In particolare, le due metà di uno stesso provino, ottenute dalla prove di flessione, sono state successivamente sottoposte ad una rottura a trazione ed una a compressione.
Le modalità di stagionatura e formatura dei provini sono pertanto le medesime descritte per le prove di flessione.

6.3.2. Metodo di rilevazione

La metodologia di prova e la strumentazione sono descritte nella normativa UNI EN 12390-6:2010.
La strumentazione utilizzata nella prova è la medesima utilizzata nella prova di resistenza a flessione, con la differenza che, in questo caso, la cella di carico è costituita da un supporto con un appoggio metallico a forma cilindrica del diametro di 20 mm e il carico di punta è costituito da un cilindro anch'esso del diametro di 20 mm.

Il provino viene inserito all'interno del supporto con le superfici più regolari poggianti sui cilindri metallici in modo che il carico venga applicato nel baricentro e perpendicolarmente alla faccia del prisma, fino a portarlo a rottura per trazione indiretta (Fig. 6.7).

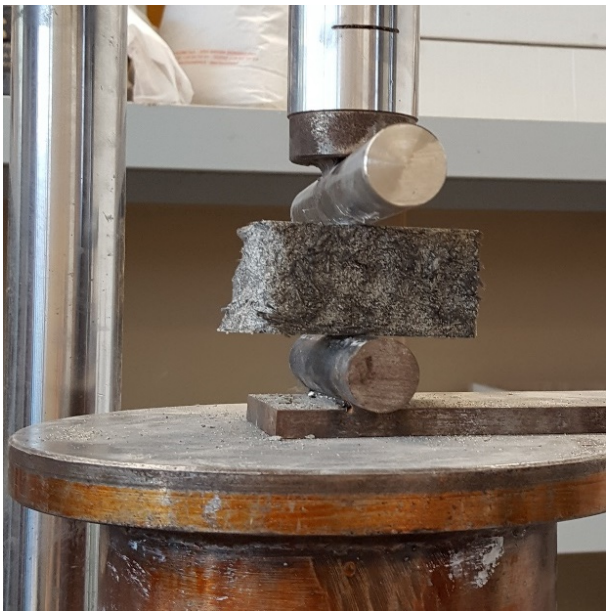


Figura 6.7. Prova meccanica a trazione indiretta.

La resistenza a trazione indiretta f_{ct} (espressa in MPa) è data dalla seguente formula:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot l \cdot d}$$

dove:

- f_{ct} è la resistenza a trazione indiretta (MPa);
- F è il carico massimo applicato (N);
- l è la lunghezza della linea di contatto del provino, pari a 40 mm;
- d è la dimensione nominale della sezione trasversale, pari a 40 mm.

I risultati ottenuti con la metodologia e con la strumentazione precedentemente descritta sono stati utilizzati per la realizzazione di grafici in cui sono evidenziate le proprietà di resistenza meccanica a trazione indiretta.
Le prove di rottura sono state effettuate a 2, 7 e 28 di stagionatura, così da analizzare al meglio l'incremento delle prestazioni meccaniche in funzione del tempo di maturazione.

6.3.3. Risultati delle prove

Di seguito sono riportati, per ogni tipologia di impasto, i valori medi della resistenza a trazione indiretta, ottenuti dalle prove di resistenza meccanica.

Tabella 6.2. Misurazione resistenza a trazione indiretta media delle malte testate.

Sigla miscela	Giorni di maturazione		
	2	7	28
	f_{ct} (MPa)		
RIF	2,0	2,6	2,8
0,05 CAR	2,8	3,7	3,9
0,1 CAR	2,6	3,7	4,0
0,2 CAR	2,5	3,9	4,7
0,4 CAR	3,7	3,9	4,0
0,8 CAR	4,2	4,3	4,7
1,2 CAR	3,4	4,4	4,7
1,6 CAR	2,4	4,1	5,0
0,05 CAR R	3,2	3,4	4,6
0,1 CAR R	3,8	4,6	4,9
0,2 CAR R	3,4	3,5	4,4
0,4 CAR R	4,2	4,4	4,4
0,8 CAR R	3,6	4,1	4,4
1,2 CAR R	4,0	4,7	5,4
1,6 CAR R	4,0	5,2	5,3
0,05 MET	3,3	3,6	4,5
0,1 MET	3,2	4,5	4,9
0,2 MET	3,9	4,4	4,6
0,4 MET	3,8	4,5	4,7
0,8 MET	3,5	4,5	5,1
1,2 MET	3,6	5,0	5,5
1,6 MET	5,1	5,4	6,0

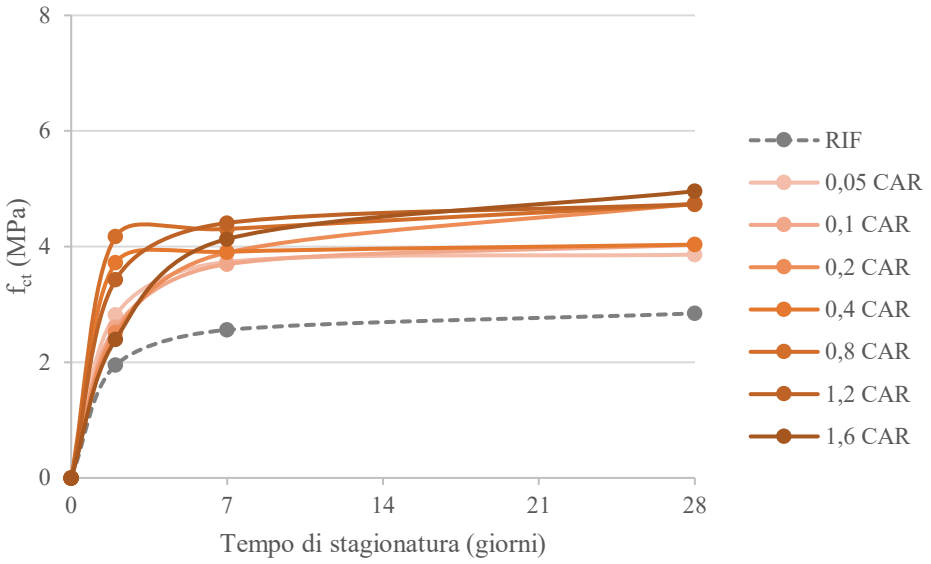


Figura 6.8. Andamento resistenza a trazione indiretta media dei provini CAR.

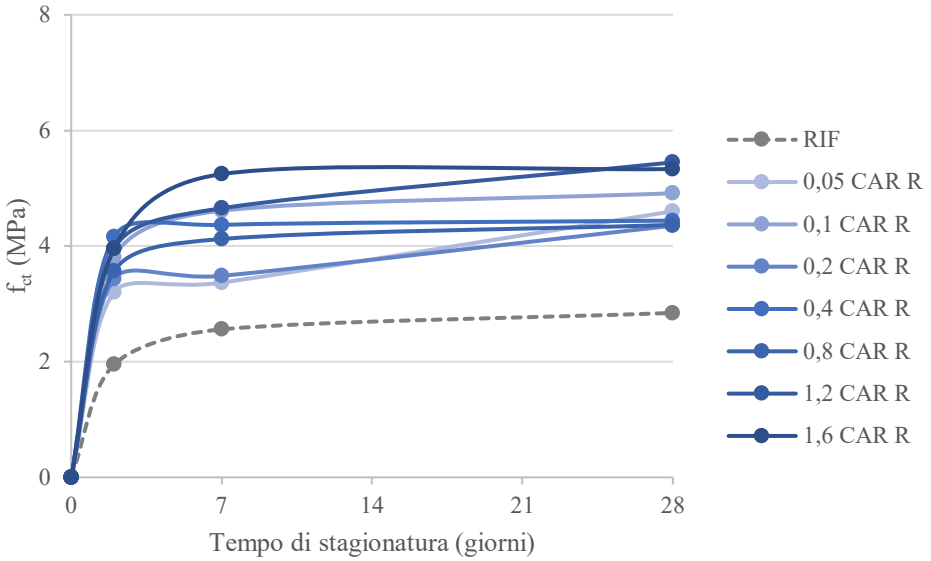


Figura 6.9. Andamento resistenza a trazione indiretta media dei provini CAR.

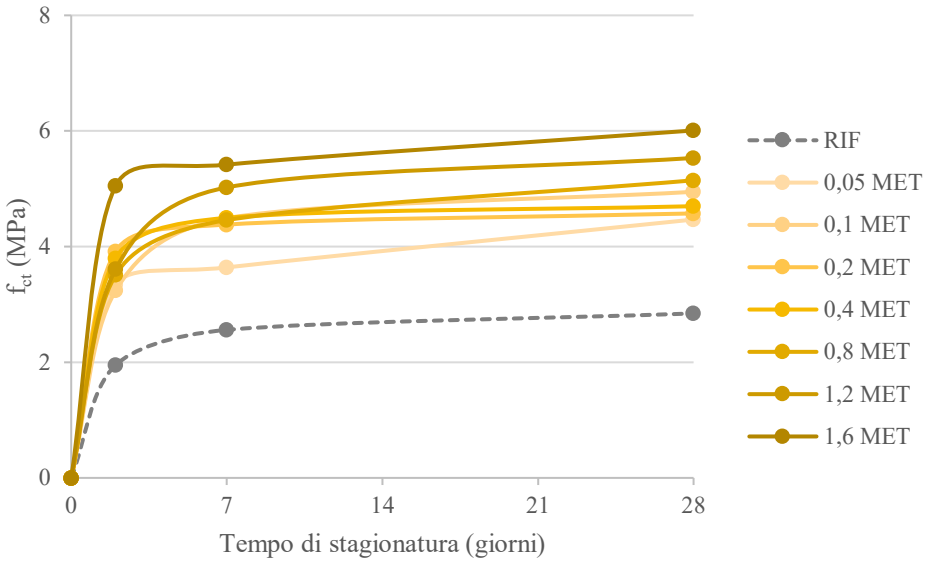


Figura 6.10. Andamento resistenza a trazione indiretta media dei provini MET.

6.3.4. Confronto e considerazioni

Di seguito è riportato il grafico complessivo di tutti i dati finali ottenuti per permettere un confronto tra le malte testate in termine di resistenza meccanica a trazione indiretta.

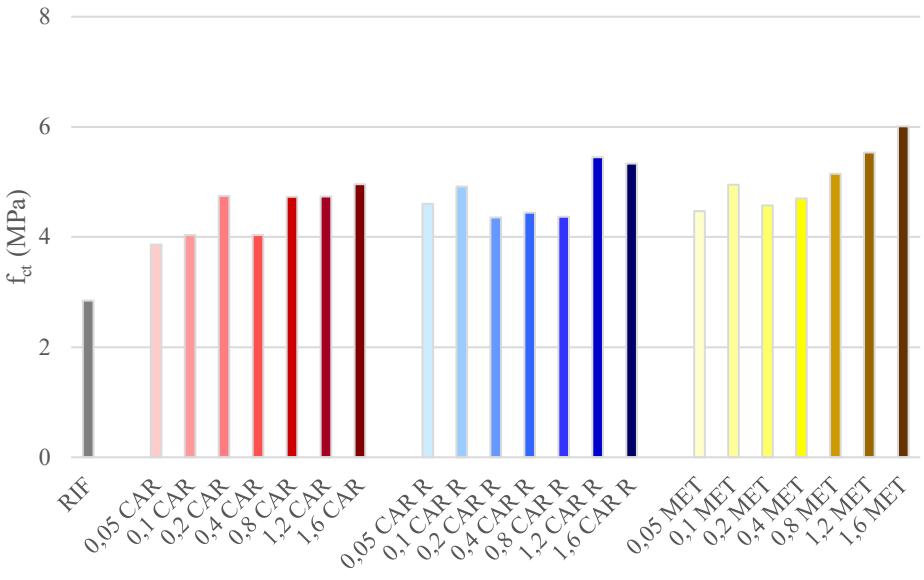


Figura 6.11. Resistenza a trazione indiretta media delle malte testate a 28 giorni di maturazione.

Dai risultati ottenuti si può affermare che:

- tutti i tipi di fibre forniscono un aumento della resistenza meccanica a trazione indiretta in relazione alla quantità di aggiunta (maggiore è la concentrazione di fibre, maggiore è il valore di resistenza), sebbene questo effetto sia meno evidente rispetto alle prove di resistenza a flessione (Fig. 6.8-6.9-6.10);

- tutte le miscele con aggiunta di fibre (anche a bassi dosaggi) presentano prestazioni meccaniche superiori alla malta di riferimento (Fig. 6.11);

- i valori di resistenza a trazione indiretta più alti sono stati raggiunti dalle malte con fibre metalliche, con incrementi fino al 211% (1,6 MET) rispetto alla malta di riferimento;

- le malte contenenti fibre di carbonio riciclate mostrano prestazioni di resistenza alla trazione indiretta migliori di quelle rilevate sulle malte contenenti fibre di carbonio vergini, con valori paragonabili a quelli delle malte contenenti fibre metalliche.

In generale, dalla prova di resistenza meccanica a trazione indiretta si evince che tutte le aggiunte permettono di avere delle prestazioni migliori rispetto alla miscela di riferimento.
Inoltre, ad un'aggiunta maggiore di fibre corrisponde un miglioramento della resistenza meccanica a trazione indiretta.

6.4. Resistenza meccanica a compressione

La resistenza meccanica a compressione di un composto cementizio rappresenta una delle proprietà più importanti dal punto di vista ingegneristico.
La compressione è uno degli sforzi elementari monoassiali perpendicolari alla superficie di riferimento al quale può essere sottoposto un corpo, che, a causa del carico, tende prima a contrarsi e poi a rompersi.

6.4.1. Campionamento e stagionatura

I provini utilizzati in questa fase di sperimentazione meccanica sono gli stessi utilizzati per le prove di rottura a flessione.
In particolare, le due metà di uno stesso provino, ottenute dalla prove di flessione, sono state successivamente sottoposte ad una rottura a trazione ed una a compressione.
Le modalità di stagionatura e formatura dei provini sono pertanto le medesime descritte per le prove di flessione.

6.4.2. Metodo di rilevazione

La metodologia di prova e la strumentazione sono descritte nella normativa UNI EN 1015-11:2007.
La strumentazione utilizzata nella prova è la medesima utilizzata nella prova di resistenza a flessione, con la differenza che, in questo caso, la cella di carico è costituita da una piastra metallica di dimensione 40x40 mm sulla quale agisce il pistone della pressa ed è munita di elementi di contenimento laterali per evitare movimenti del provino sottoposto a compressione.

Il provino si dispone all'interno del supporto in modo che il carico venga applicato perpendicolarmente alla faccia del prisma fino a portarlo a rottura (Fig. 6.12).



Figura 6.12. Prova meccanica a compressione.

La rottura avviene per espulsione a trazione delle parti laterali del provino, che al termine della prova assume la caratteristica forma a "clessidra".
Tramite il terminale collegato alla pressa idraulica sono stati ricavati i valori di carico e la deformazione assiale del provino, e, di conseguenza, è stata ricavata la resistenza a compressione R_c (espressa in MPa) mediante la relazione:

$$R_c = \frac{F_n}{A}$$

dove:

- R_c è la resistenza a compressione (MPa);
- F_n è la forza massima applicata al provino (N);
- A è l'area della sezione trasversale di carico del provino, pari a 1600 mm^2.

I risultati ottenuti con la metodologia e con la strumentazione precedentemente descritta sono stati utilizzati per la realizzazione di grafici in cui sono evidenziate le proprietà di resistenza meccanica a compressione.
Le prove di rottura sono state effettuate a 2, 7 e 28 di stagionatura, così da analizzare al meglio l'incremento delle prestazioni meccaniche in funzione del tempo di maturazione.

6.4.3. Risultati della prova

Di seguito sono riportati, per ogni tipologia di impasto, i valori medi della resistenza a compressione, ottenuti dalle prove di resistenza meccanica.

Tabella 6.3. Misurazione resistenza a compressione media delle malte testate.

Sigla miscela	Giorni di maturazione		
	2	7	28
	R_c (MPa)		
RIF	32,6	43,3	48,1
0,05 CAR	43,3	47,5	54,4
0,1 CAR	42,5	47,3	55,7
0,2 CAR	38,3	44,4	56,6
0,4 CAR	35,5	48,2	51,2
0,8 CAR	30,2	37,6	45,1
1,2 CAR	25,7	31,5	40,0
1,6 CAR	15,2	35,7	44,4
0,05 CAR R	40,9	49,3	59,0
0,1 CAR R	41,1	51,0	53,3
0,2 CAR R	39,5	47,7	53,5
0,4 CAR R	37,6	47,4	54,7
0,8 CAR R	33,8	37,7	50,5
1,2 CAR R	29,6	40,1	46,2
1,6 CAR R	30,7	37,4	46,7
0,05 MET	46,6	54,4	64,6
0,1 MET	44,3	56,6	63,3
0,2 MET	43,2	54,3	66,1
0,4 MET	42,9	48,9	63,8
0,8 MET	46,2	55,2	65,3
1,2 MET	45,1	55,0	65,3
1,6 MET	46,2	58,5	64,6

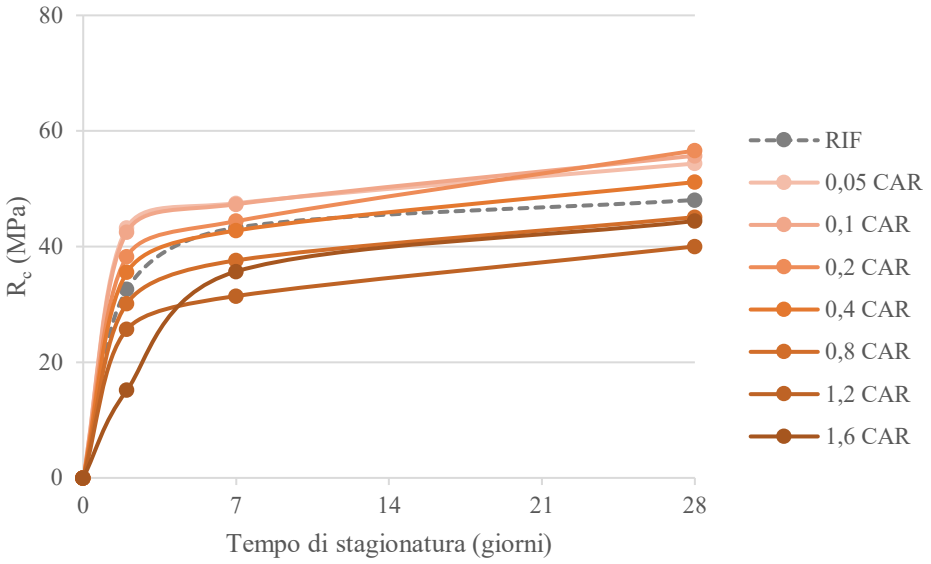


Figura 6.13. Andamento resistenza a compressione media dei provini CAR.

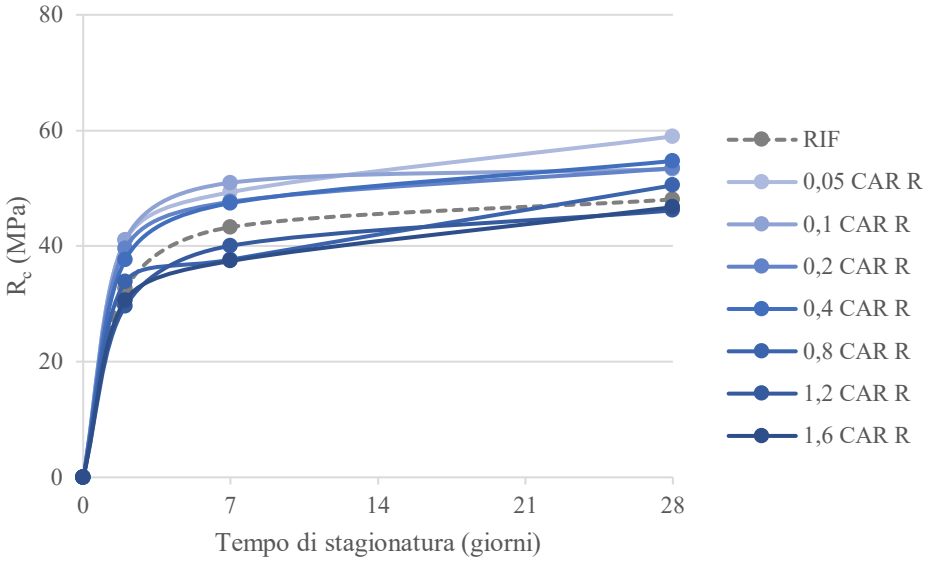


Figura 6.14. Andamento resistenza a compressione media dei provini CAR R.

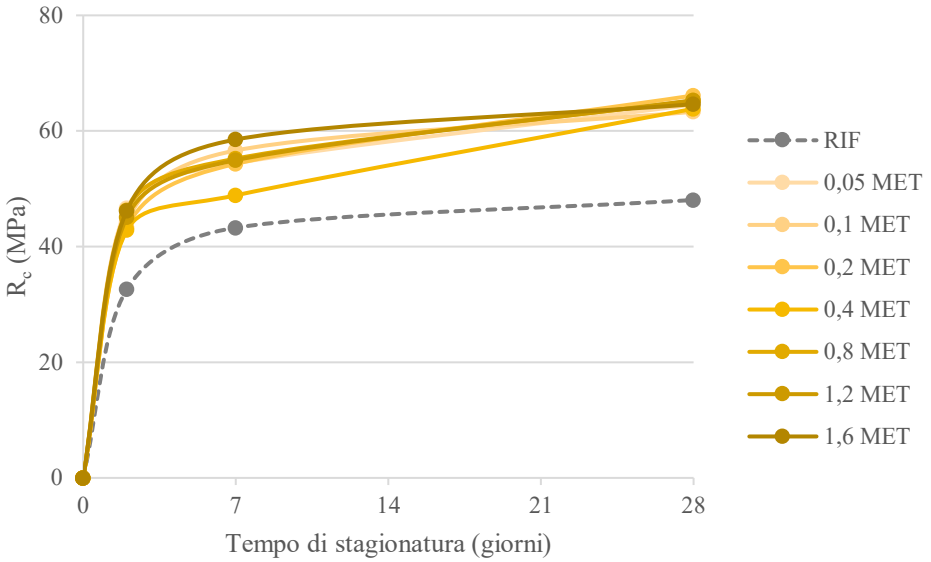


Figura 6.15. Andamento resistenza a compressione media dei provini MET.

6.4.4. Confronto e considerazioni

Di seguito è riportato il grafico complessivo di tutti i dati finali ottenuti per permettere un confronto tra le malte testate in termine di resistenza meccanica a compressione.

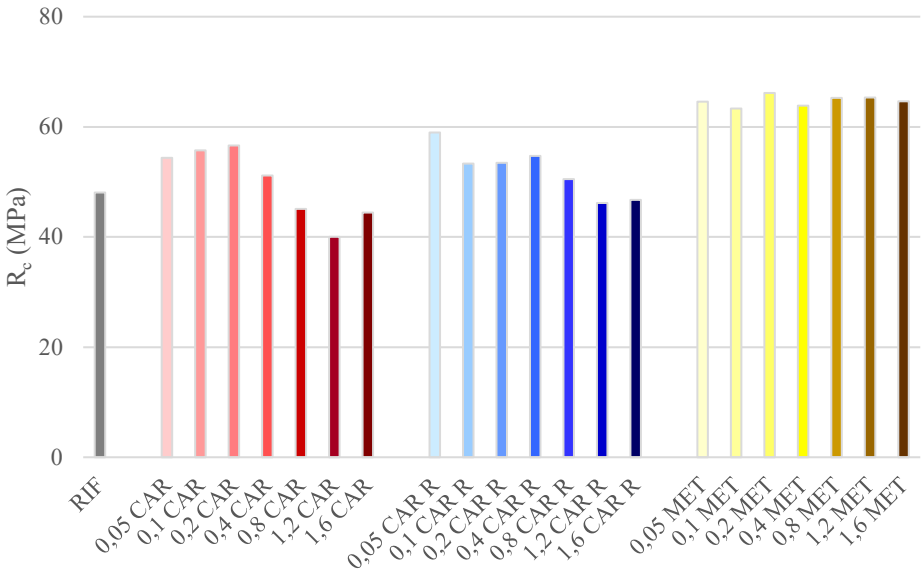


Figura 6.16. Resistenza a compressione media delle malte testate a 28 giorni di maturazione.

Dai risultati ottenuti si può affermare che:

- i valori di resistenza a compressione nelle malte con fibre di carbonio (sia vergini che riciclate) a bassi dosaggi sono differenti, in maniera evidente, rispetto alle malte ad alti dosaggi (Fig. 6.13-6.14);

- una bassa quantità di fibre di carbonio (fino a 0,4 vol.% per quelle vergini e fino a 0,8 vol.% per quelle riciclate) porta ad un miglioramento della resistenza a compressione, mentre nelle malte contenenti alte concentrazioni si rilevano diminuzioni fino al 17% (1,2 CAR);

- tutte le miscele con aggiunta di fibre metalliche presentano prestazioni meccaniche superiori alla malta di riferimento, indipendentemente dal contenuto di fibre (Fig. 6.15);

- i valori di resistenza a compressione più alti sono stati raggiunti dalle malte con fibre metalliche, con incrementi fino al 38% (0,2 MET) rispetto alla malta di riferimento (Fig. 6.16);

- i migliori risultati delle fibre metalliche, rispetto alle fibre di carbonio, sono dovuti al minore rapporto d'aspetto dei filamenti, che, a parità di volume di aggiunta, sono meno numerosi e consentono una migliore dispersione all'interno della matrice.

In generale, dalla prova di resistenza meccanica a compressione si evince che l'aggiunta di fibre in carbonio nella malta cementizia, fino ad una certa concentrazione, ne esalta le proprietà meccaniche grazie alla sua capacità di contenere la crescita di microfessurazioni.
Tuttavia, quando il contenuto di fibre di carbonio è troppo elevato, si aggregano portando alla formazione di numerose bolle d'aria che vanno a penalizzare la resistenza a compressione finale.
Al contrario, l'aggiunta di fibre metalliche, grazie al minor rapporto d'aspetto e alla minor interferenza con l'acqua di impasto, consente un evidente miglioramento della resistenza meccanica a compressione, anche se aggiunte superiori allo 0,2% non sembrano apportare incrementi significativi in termini di prestazioni.

6.5. Resistenza residua a flessione in controllo di CMOD

La dispersione di fibre in un composito cementizio ne modifica le proprietà meccaniche e fisiche e, in particolare, ne migliora il comportamento a trazione contrastando l'apertura progressiva delle fessure.
Una volta raggiunta la fessurazione del conglomerato, le fibre sono in grado di manifestare il proprio contributo, conferendo al composito una resistenza post-fessurazione assente nella matrice senza fibre (comportamento fragile in assenza di fibre).
La presenza delle fibre, dunque, conferisce al composito, delle significative prestazioni in termini di resistenza residua a trazione, di tenacità, di durabilità, di resistenza all'urto, alla fatica e all'abrasione.
Il comportamento di un composito fibrorinforzato è individuato attraverso le resistenze residue a trazione per flessione che il conglomerato è in grado di assicurare dopo la comparsa della prima fessurazione.

La resistenza residua è stata valutata eseguendo una prova di flessione su tre punti, come la precedente, con la differenza che i provini sono stati pre-intagliati in modo da realizzare una fessurazione artificiale, ed è stata misurata la progressiva apertura della fessura (*Crack Mouth Opening Displacement* o *CMOD*) in funzione del carico crescente applicato.

6.5.1. Campionamento e stagionatura

Per la prova sono stati utilizzati provini di dimensione 40x40x160 mm.
I provini sono stati mantenuti nel cassero di formazione per i 2 giorni successivi al getto, conservati a una temperatura di 20 ± 2°C e un'umidità relativa di 95 ± 5%. Successivamente i provini sono stati scasserati, ricoperti con pellicola di cellulosa trasparente e mantenuti alle stesse condizioni di temperatura e umidità per i successivi 5 giorni.
Dopo 7 giorni dall'esecuzione del getto, i provini sono stati mantenuti per i 21 giorni successivi ad una temperatura costante di 20 ± 2°C e un'umidità relativa del 65 ± 5% nella cella climatizzata.
Le prove sono state effettuate a 28 giorni di stagionatura.

6.5.2. Metodo di rilevazione

La metodologia di prova e la strumentazione sono descritte nelle normative UNI EN 14651:2007 e RILEM TC-50.
La strumentazione utilizzata nella prova è costituita da un supporto con due appoggi metallici su cui viene adagiato il provino e da un cilindro di 10 mm di diametro come carico di punta.
Il provino viene posizionato con le superfici più regolari poggianti sui supporti metallici e il carico di punta agente nel baricentro del provino.
Per questa prova nei provini è stato praticato nella parte inferiore, in mezzeria, un solco con una profondità di 10 mm (1/4 dell'altezza della sezione) e 1 mm di larghezza.
In corrispondenza del solco, si dispongono due piastrine metalliche per l'inserimento della sonda per la misurazione dell'apertura della fessura durante la prova (Fig. 6.17-6.18).

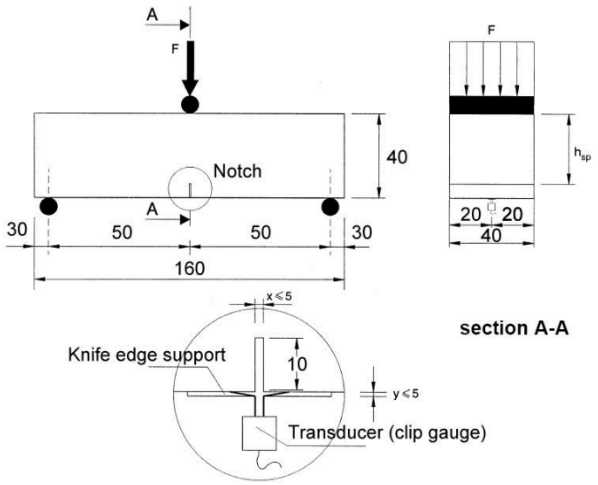


Figura 6.17. Configurazione schematica e strumentazione della prova.



Figura 6.18. Prova meccanica a flessione in controllo di CMOD.

Sono stati ottenuti dalla prova i valori dell'apertura dell'intaglio (mm) in funzione della tensione a flessione F (N) applicata, e, con il valore del carico massimo applicato (F_k) è stata ricavata la resistenza a flessione residua $f_{R,k}$ (espressa in MPa) mediante la relazione:

$$f_{R,k} = \frac{3}{2}\frac{F_k \cdot l}{b \cdot {h_{sp}}^2}$$

dove:

- $f_{R,k}$ è la resistenza residua a flessione corrispondente al carico massimo (MPa);
- F_k è il carico massimo (N);
- l è la distanza tra i due appoggi in metallo, pari a 100 mm;
- b è la larghezza del provino, pari a 40 mm;
- h_{sp} è l'altezza del provino dalla sommità dell'intaglio, pari a 30 mm.

È stato, inoltre, rilevato il valore di apertura della fessura in corrispondenza del carico massimo ottenuto dal campione ($CMOD_k$).
I valori dei moduli elastici (E_f), relativi alla resistenza alla fessurazione dei materiali fibrorinforzati, sono stati ricavati dalla pendenza del tratto iniziale delle curve del grafico F-CMOD restituite dalla prova.
Infine, misurando l'area sottostante le curve ottenute, è stata calcolata la *tenacità* alla fessurazione per ciascuna miscela.

6.5.3. Risultati della prova

Di seguito sono riportati, per ogni tipologia di impasto, i valori medi della resistenza residua a flessione, dell'apertura della fessura in corrispondenza del carico massimo, dei moduli elastici e della tenacità alla fessurazione, ottenuti dalle prove di resistenza meccanica.

Tabella 6.4. Misurazione parametri post-fessurazione medi delle malte testate.

Sigla miscela	$f_{R,k}$ (MPa)	$CMOD_k$ (mm)	E_f (MPa)	Tenacità (MPa)
RIF	6,0	0,020	22,9	-
0,05 CAR	6,2	0,017	19,8	3,1
0,1 CAR	7,4	0,033	16,5	3,9
0,2 CAR	7,9	0,026	20,7	5,0
0,4 CAR	9,2	0,060	20,3	11,7
0,8 CAR	13,2	0,155	20,6	8,8
1,2 CAR	15,2	0,170	17,7	15,2
1,6 CAR	16,0	0,190	15,7	14,7
0,05 CAR R	6,0	0,014	23,7	0,0
0,1 CAR R	7,9	0,014	25,5	0,0
0,2 CAR R	8,3	0,014	24,2	0,1
0,4 CAR R	7,8	0,015	23,6	0,0
0,8 CAR R	12,1	0,106	16,8	7,2
1,2 CAR R	14,8	0,132	17,8	9,0
1,6 CAR R	15,1	0,113	18,1	11,2
0,05 MET	7,1	0,018	21,9	4,6
0,1 MET	7,1	0,017	21,0	6,8
0,2 MET	6,9	0,016	22,2	3,8
0,4 MET	8,8	0,019	21,3	7,9
0,8 MET	11,7	0,641	20,7	37,1
1,2 MET	16,7	0,724	24,2	52,5
1,6 MET	16,3	0,719	20,9	53,6

6.5.4. Confronto e considerazioni

Di seguito sono riportati i grafici complessivi di tutti i dati finali per permettere un confronto tra le malte testate in termini di parametri post-fessurazione.

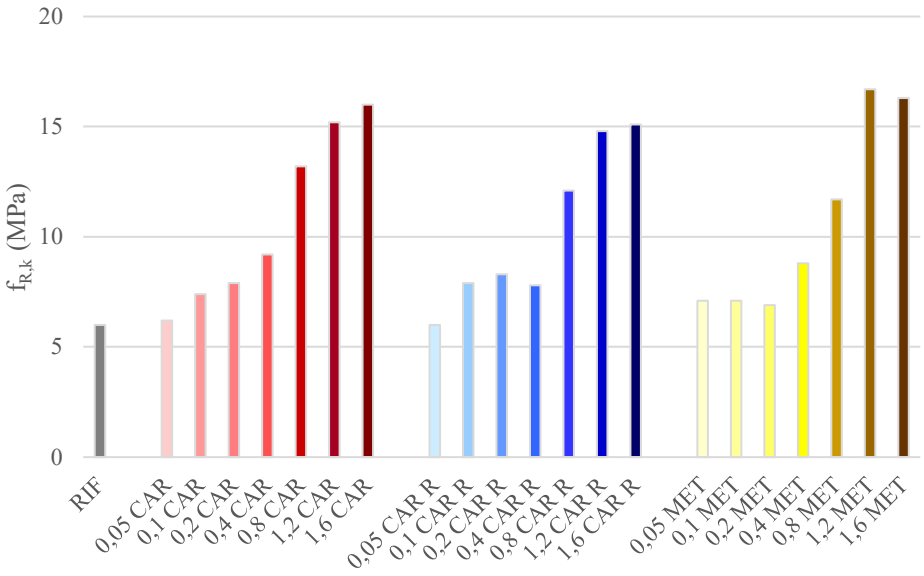


Figura 6.19. Resistenza residua a flessione media delle malte testate.

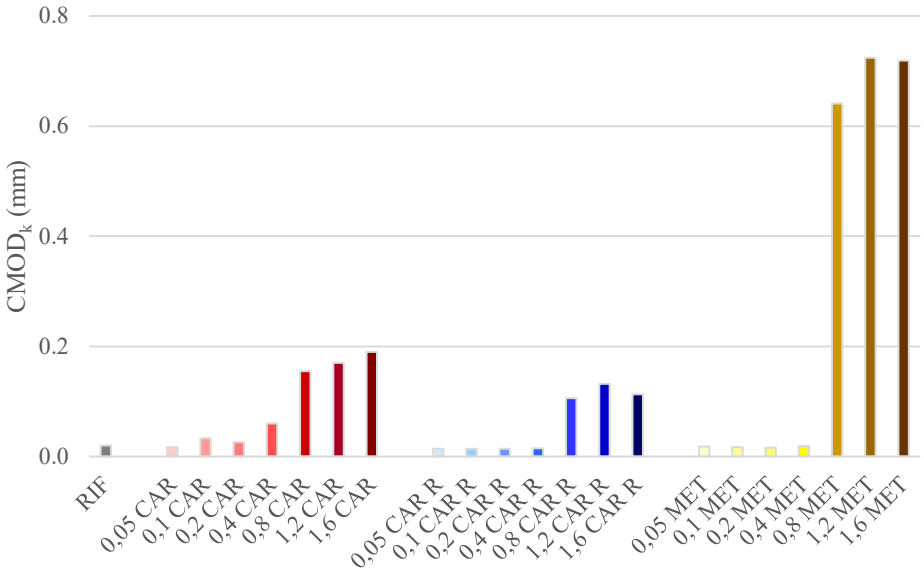


Figura 6.20. Apertura della fessura media delle malte testate.

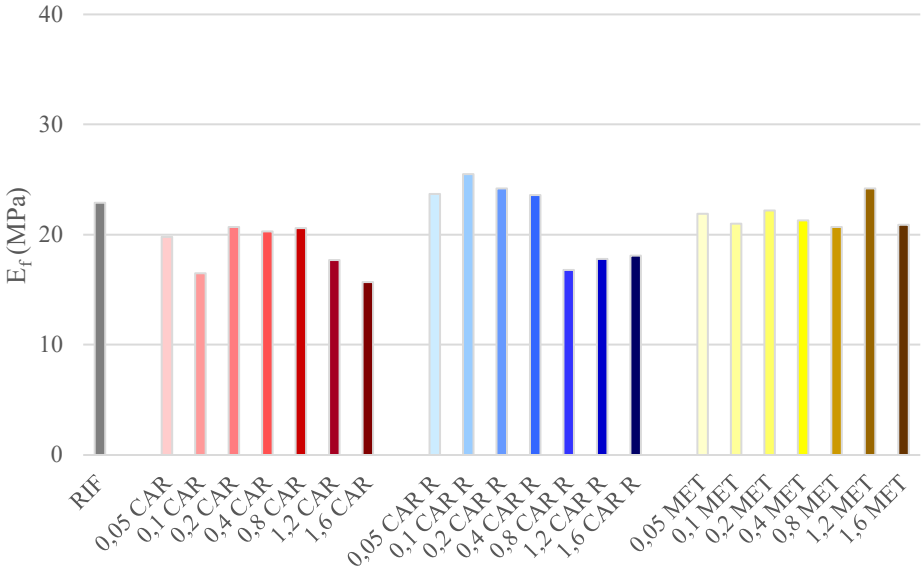


Figura 6.21. Modulo elastico medio delle malte testate.

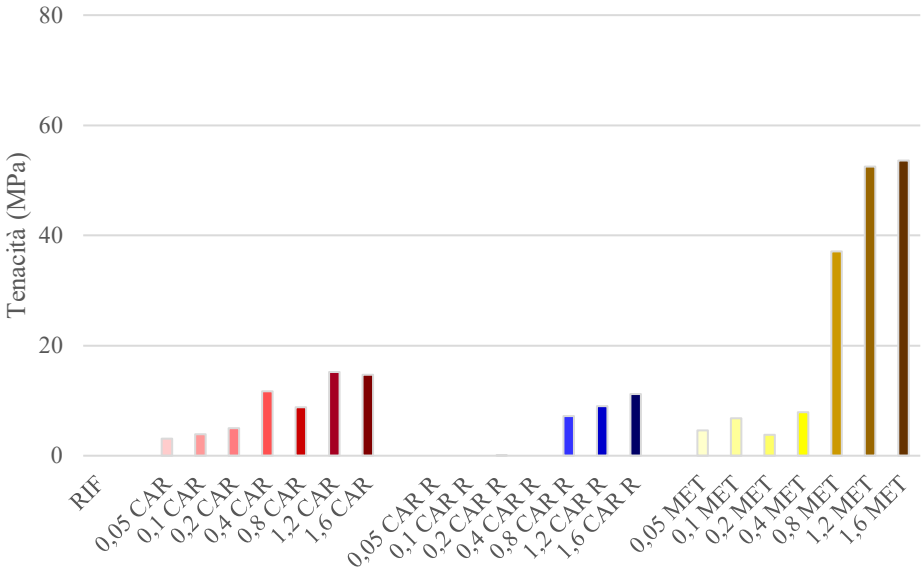


Figura 6.22. Tenacità media delle malte testate.

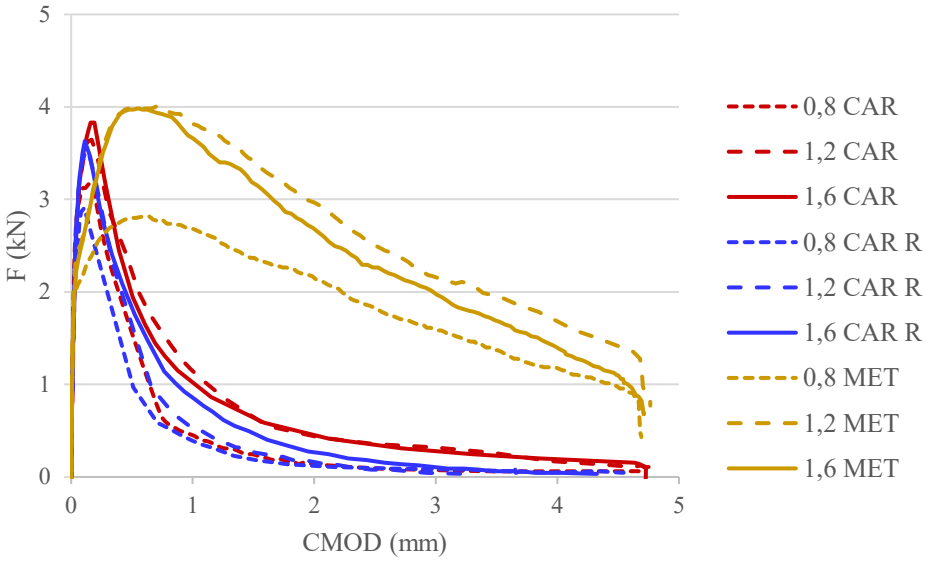


Figura 6.23. Curve tensione a flessione-apertura fessura nelle malte con alte concentrazioni di fibre.

Dai risultati ottenuti si può affermare che:

- i valori dei parametri post-fessurazione sono molto differenti tra malte con basse e malte con alte concentrazioni di fibre, nonché tra malte rinforzate con fibre di carbonio e malte rinforzate con fibre metalliche (Fig. 6.19-6.20-6.21-6.22);

- nelle malte a basso contenuto di fibre (≤ 0,4 vol.%), a causa del ridotto effetto ponte, si registra un comportamento fragile simile alla malta di riferimento, con elevati moduli elastici fessurativi, valori di tenacità molto bassi e di conseguenza ridotti valori di apertura ultima della fessura;

- le miscele con alti contenuti di fibre (≥ 0,8 vol.%) mostrano valori più alti per quanto riguarda la tenacità e l'apertura ultima della fessura, rispetto alla malta di riferimento;

- le migliori prestazioni meccaniche post-fessurazione sono state ottenute dalle malte rinforzate con alti dosaggi di fibre metalliche, mostrando incrementi della tenacità fino al 350% (rispetto alle malte con fibre di carbonio) e valori di apertura ultima della fessura pari a circa 0,7 mm (Fig. 6.23).

In generale, dalla prova a flessione in controllo di CMOD si evince che tutte le aggiunte permettono di avere delle prestazioni meccaniche migliori, in termini di tensione residua a flessione post-fessurazione, rispetto alla malta di riferimento.
I risultati più significativi (in termini di tenacità e apertura finale della fessura prima della rottura) sono stati raggiunti dalle malte con alte concentrazioni di fibre, e in particolare da quelle rinforzate con fibre metalliche, a causa del loro diametro maggiore e alla loro elevata rigidità flessionale.

7. Proprietà elettriche

7.1. Introduzione

Per la realizzazione di un materiale "self-monitoring" una delle proprietà fondamentali è la capacità di condurre corrente elettrica.
La caratteristica di "automonitoraggio" si ottiene, infatti, correlando la variazione delle condizioni di integrità e di sollecitazione con la variazione del comportamento elettrico.
Pertanto il materiale stesso diventa un sensore che permette di controllare la salute dell'intera struttura.
L'aggiunta di fibre ad elevata conducibilità migliora non solo le prestazioni meccaniche, ma, rende anche la malta un materiale conduttivo.
Nella seguente sperimentazione, le caratteristiche elettriche delle malte testate sono state valutate tramite misurazioni di resistività specifica.
Per conducibilità elettrica (σ) o conduttività elettrica si intende la misura della capacità di un materiale di condurre una corrente elettrica quando è immerso in un campo elettrico.
È definita, per un corpo *ohmico* (ossia, che rispetta la legge di Ohm), come l'inverso della resistività.
La resistività elettrica (ρ), infatti, è l'attitudine di un materiale ad opporre resistenza al passaggio di cariche elettriche.
Per la valutazione della resistività elettrica viene utilizzata la seconda legge di Ohm:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

dove:

- R è la resistenza elettrica (Ω);
- ρ è la resistività elettrica (Ω·cm);
- L è la lunghezza del conduttore (cm);
- S è la sezione del conduttore (cm^2).

Dalla formula è chiaro come la resistenza di un elemento conduttore è legata al tipo di materiale e alle sue caratteristiche geometriche, quali lunghezza e sezione.
Dall'inverso della legge di Ohm appena vista, è possibile ricavare un'espressione della conducibilità elettrica:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{S}{L}$$

dove $1/R$ rappresenta la conduttanza elettrica C (un indicatore quantitativo dell'attitudine di un conduttore ad essere percorso da corrente elettrica), e $1/\rho$ è, appunto, la conducibilità elettrica, quindi:

$$\sigma = C \cdot \frac{L}{S}$$

7.2. Stato dell'arte

Recenti studi, hanno dimostrato che la resistività di una malta base, senza alcuna aggiunta conduttiva, si aggira intorno ai 10^4 Ω·cm, e può aumentare fino a 10^{11} Ω·cm nel caso di totale perdita d'acqua dei provini [1-2].
L'aggiunta di fibre conduttive aumenta notevolmente la conducibilità della malta, ma i valori che si possono raggiungere dipendono comunque da molti fattori, quali: la percentuale di volume di fibre presenti, la lunghezza delle fibre, l'idratazione e la stagionatura, il rapporto inerte/cemento.
In generale, l'aumento della percentuale di volume di fibre presenti porta ad una diminuzione della resistività elettrica.
Tuttavia è stato dimostrato che frazioni di volume superiori ad una certa soglia, detta soglia di percolazione, causano un aumento non significativo della conducibilità elettrica.
La frazione di volume delle fibre di carbonio che provoca la transizione da un materiale isolante ad un materiale conduttivo, denominato valore di soglia, è inferiore nel caso di fibre di carbonio lunghe 6 mm rispetto a quelle di lunghezza 3 mm: questo perché le fibre di lunghezza 6 mm sono in grado di creare una rete più fitta e continua rispetto alle fibre più corte.
Di conseguenza anche la soglia di percolazione è più bassa con fibre di carbonio lunghe 6 mm (0,2% in volume sul totale), rispetto alle fibre di lunghezza 3 mm (circa 0,3% in volume sul totale) [3].
L'idratazione e la stagionatura della malta portano ad una riduzione di conducibilità, che si è visto essere molto piccola nel caso di fibre di carbonio da 6 mm e molto maggiore nelle fibre da 3 mm.
Pertanto, se le fibre formano una rete conduttiva continua, la conducibilità non dipende più molto dal processo di idratazione della matrice.
Rapporti di inerte cemento (i/c) oltre 1,5 penalizzano la conducibilità delle malte con l'aggiunta di fibre.
La presenza dell'inerte tra le fibre interrompe la continuità della rete conduttiva formata dalle fibre, riducendone l'effetto [3].
Alcuni studi effettuati ipotizzano l'uso congiunto di fibre e nanoparticelle sia per un interesse economico sia perché la presenza di particelle tra fibre adiacenti può migliorare l'elettroconnettività del composito, ottenendo in tal modo un effetto sinergico [4].
Gli studi riguardanti le proprietà elettriche dei compositi con aggiunta di fibre conduttive, si sono focalizzati sulla realizzazione di idonei provini per la valutazione delle proprietà.
Si distinguono principalmente due diversi metodi (Fig. 7.1) di indagine di seguito illustrati:

- metodo dei 4 elettrodi;
- metodo dei 2 elettrodi.

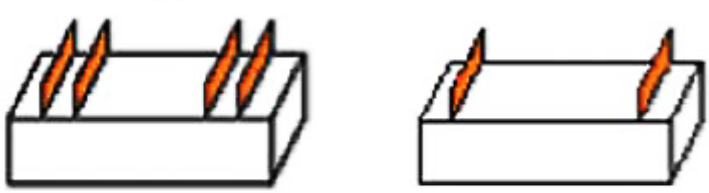


Figura 7.1. Metodo di indagine dei 4 elettrodi (a sinistra), dei 2 elettrodi (a destra).

Il metodo dei 4 elettrodi consiste in un metodo che si basa su quello noto come metodo di Wenner, usato per misurare la resistività dei terreni.
Quattro lamine metalliche sono inserite all'interno del provino immediatamente dopo la vibrazione: le lamine esterne sono utilizzate per il passaggio della corrente mentre le lamine interne sono utilizzate per la misurazione con un voltmetro della differenza di potenziale prodotta da tale corrente.
La distanza tra gli elettrodi può essere o 40 mm tra gli interni e 60 mm tra gli esterni [5-6] o 40 mm di distanza tra ogni elettrodo [7].
Il metodo dei 2 elettrodi prevede, invece, prevede l'utilizzo solamente di due lamine metalliche, che vengono inserite nel provino immediatamente dopo la vibrazione ad una distanza di 120 mm [3].
Per quanto riguarda il metodo di indagine, gli studi hanno dimostrato la diversa efficienza dei materiali conduttivi utilizzati per gli elettrodi.
In particolare vengono utilizzati principalmente rame [3-6-7], acciaio inossidabile e piombo [8].

7.3. Indagini preliminari

Prima di procedere alla valutazione delle proprietà elettriche dei provini definitivi, è stato necessario effettuare indagini preliminari per scegliere il tipo di configurazione da utilizzare durante le prove e per ottenere il valore della costante di cella.
Con la miscela 1,2 CAR 2, descritta nel capitolo 3, sono stati realizzati 6 provini prismatici 40x40x160 mm, per testare la variazione di resistività elettrica di tre differenti tipologie di reti metalliche in acciaio inossidabile utilizzate come elettrodi (rete 1 con apertura maglia pari a 1,03 mm; rete 2 con apertura maglia 3,50 mm; rete 3 con apertura maglia 5,45 mm).
Le reti, di dimensioni 30x50 mm, sono state poste, in coppia, ad una distanza di 120 mm, con un'area immersa pari a 30x30 mm.
Per ogni tipologia di rete sono state realizzate due differenti configurazioni:

- 2 reti di dimensioni 30x50 mm poste ad una distanza di 120 mm, con un'area immersa pari a 30x30 mm, e 2 sonde (cavo in acciaio inossidabile di diametro 3 mm, lungo 30 mm e immerso per 20 mm) poste ad una distanza dalle reti di 20 mm (Fig. 7.2);

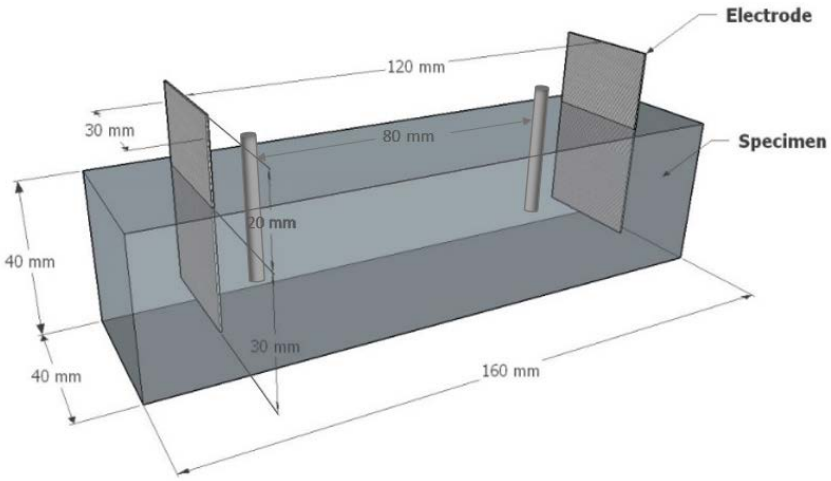
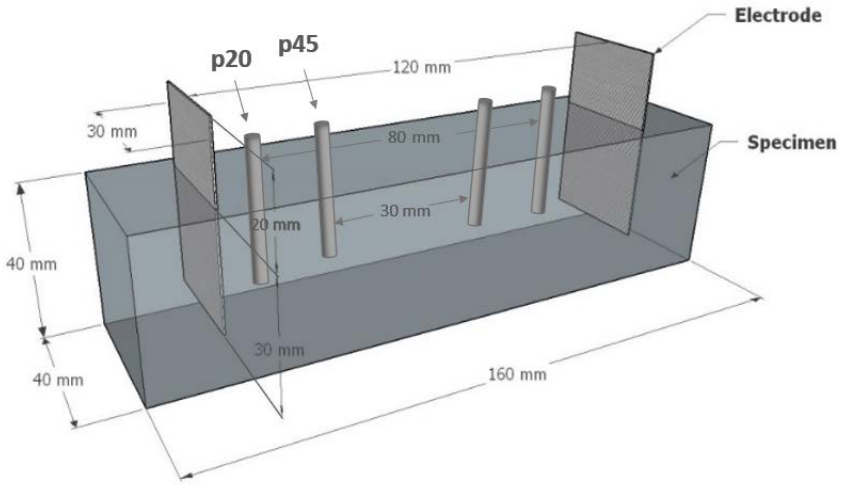


Figura 7.2. Configurazione 1 (C1).

- stessa configurazione precedente, con l'aggiunta di 2 sonde poste a 45 mm di distanza dalle reti (Fig. 7.3).



3. Configurazione 2 (C2).

Le sonde sono state poste per effettuare prove in corrente continua (DC), oltre che in corrente alternata (AC).

7.3.1. Calcolo costanti di cella

Qualsiasi cella conduttimetrica è caratterizzata dalla propria costante di cella *L/S* (cm^{-1}) che nel caso di forme geometriche particolarmente semplici, teoricamente, potrebbe essere calcolata dal rapporto tra lunghezza *L* e sezione attiva *S* del conduttore.
In realtà, a causa soprattutto della geometria non ideale delle linee di corrente e dell'uso di superfici conduttrici complesse, è molto meglio determinare la costante di cella (*K*) misurando la resistenza (*R)* di una soluzione standard con conducibilità (*σ)* nota, ricavando quindi la costante di cella dalla seconda legge di Ohm:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

Sapendo che $\sigma = 1/\rho$ si ottiene:

$$R \cdot \sigma = \frac{L}{S} = K$$

Sono state utilizzate due soluzioni di KCl con due differenti concentrazioni: 0,01 M e 0,001 M (quindi due valori di σ diversi), ad una temperatura compresa tra i 20-25 °C.
Con le misurazioni di R ottenute in corrente continua e alternata sono state ricavate le costanti di cella riportate in tabella 7.1 e in tabella 7.2 rispettivamente per la misura in corrente continua (DC) e alternata (AC).

Tabella 7.1. Calcolo costanti di cella in DC (p20 e p45 indicano le misure effettuate in configurazione C2, come mostrato in figura 7.3).

Sigla configurazione	Resistenza (Ω)	Conducibilità ($S \cdot cm^{-1}$)	Costante di cella (cm^{-1})
KCl 0,001-rete 1-p20	2589	0,0001925	0,4985
KCl 0,01-rete 1-p20	300	0,0015470	0,4646
			0,4816
KCl 0,001-rete 2-p20	2582	0,0001925	0,4971
KCl 0,01-rete 2-p20	316	0,0015470	0,4895
			0,4933
KCl 0,001-rete 3-p20	2580	0,0001925	0,4967
KCl 0,01-rete 3-p20	331	0,0015470	0,5117
			0,5042
KCl 0,001-rete 1-p45	983	0,0001925	0,1892
KCl 0,01-rete 1-p45	120	0,0015470	0,1864
			0,1878
KCl 0,001-rete 2-p45	1016	0,0001925	0,1957
KCl 0,01-rete 2-p45	120	0,0015470	0,1861
			0,1909
KCl 0,001-rete 3-p45	1007	0,0001925	0,1938
KCl 0,01-rete 3-p45	120	0,0015470	0,1858
			0,1898

Tabella 7.2. Calcolo costanti di cella in AC.

Sigla configurazione	Resistenza (Ω)	Conducibilità ($S \cdot cm^{-1}$)	Costante di cella (cm^{-1})
KCl 0,001-rete 1	4038	0,0001925	0,7774
KCl 0,01-rete 1	471	0,0015470	0,7287
			0,7530
KCl 0,001-rete 2	4124	0,0001925	0,7940
KCl 0,01-rete 2	480	0,0015470	0,7421
			0,7681
KCl 0,001-rete 3	4193	0,0001925	0,8073
KCl 0,01-rete 3	490	0,0015470	0,7584
			0,7829

Con questi valori delle costanti di cella è stata ricavata la resistività elettrica (ρ):

$$\rho = \frac{R}{K}$$

con R misurata per ogni singolo provino.

7.3.2. Misure preliminari in corrente continua

Le misure sono state effettuate sui provini descritti in precedenza, dopo due giorni (stagionatura a 20°C e U.R. 100%), dopo sette giorni e dopo 19 giorni (successivi 17 giorni di stagionatura a 20°C e U.R. pari al 65%) dal getto.
Di seguito sono riportati i valori di resistività media ottenuti dalle prove in corrente continua.

Tabella 7.3. Misure di resistività media in DC.

Sigla configurazione	Giorni di maturazione		
	2	7	19
	ρ (Ω·cm)		
rete 1-p20 (C1)	51,0	12,9	22,1
rete 2-p20 (C1)	17,9	33,6	21,1
rete 3-p20 (C1)	51,6	37,4	18,0
rete 1-p20 (C2)	42,6	30,8	29,1
rete 2-p20 (C2)	40,6	27,7	25,9
rete 3-p20 (C2)	35,3	24,0	26,6
rete 1-p45 (C2)	47,5	94,0	26,0
rete 2-p45 (C2)	125,3	33,7	21,1
rete 3-p45 (C2)	47,5	33,3	29,5

In figura 7.4 è riportato l'andamento della resistività nel tempo.
Si può in questo caso notare che la resistività, in corrente continua, per la maggior parte dei provini, diminuisce nel tempo.
Questo andamento risulta piuttosto insolito, giacché si suppone che la resistività tenda ad aumentare con l'idratazione della pasta cementizia.

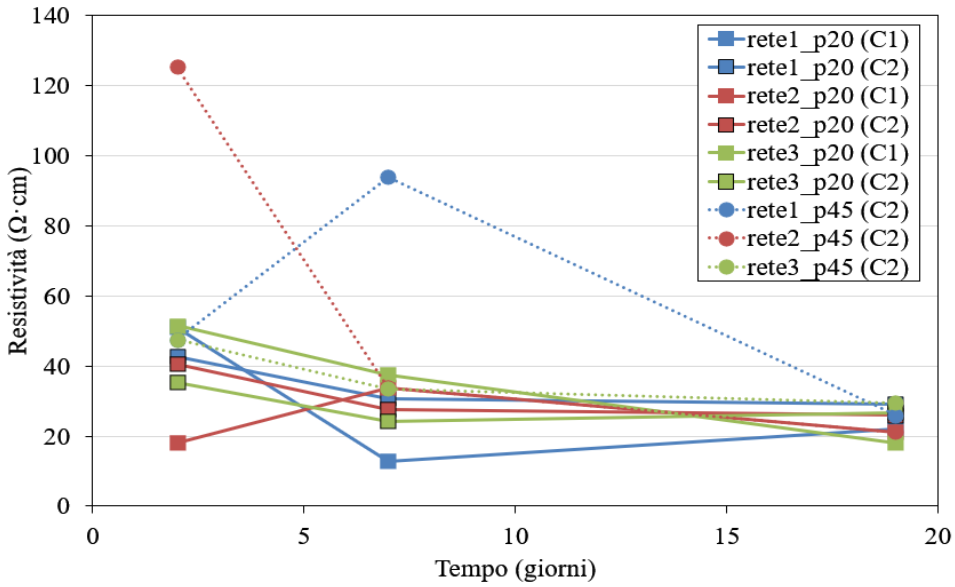


Figura 7.4. Andamento resistività media in DC.

7.3.3. Misure preliminari in corrente alternata

I valori di resistività media ottenuti in corrente alternata sono riportati in tabella 7.4:

Tabella 7.4. Misure di resistività media in AC.

Sigla configurazione	Giorni di maturazione		
	2	7	19
	ρ (Ω·cm)		
rete 1 (C1)	11,4	24,3	33,4
rete 2 (C1)	10,7	24,2	35,7
rete 3 (C1)	10,7	27,3	39,9
rete 1 (C2)	13,3	24,6	30,0
rete 2 (C2)	13,2	25,5	38,6
rete 3 (C2)	15,2	56,3	85,3

Nel grafico mostrato in figura 7.5 si può notare, in questo caso, un andamento regolare della resistività, nonché un aumento dei valori nel tempo.

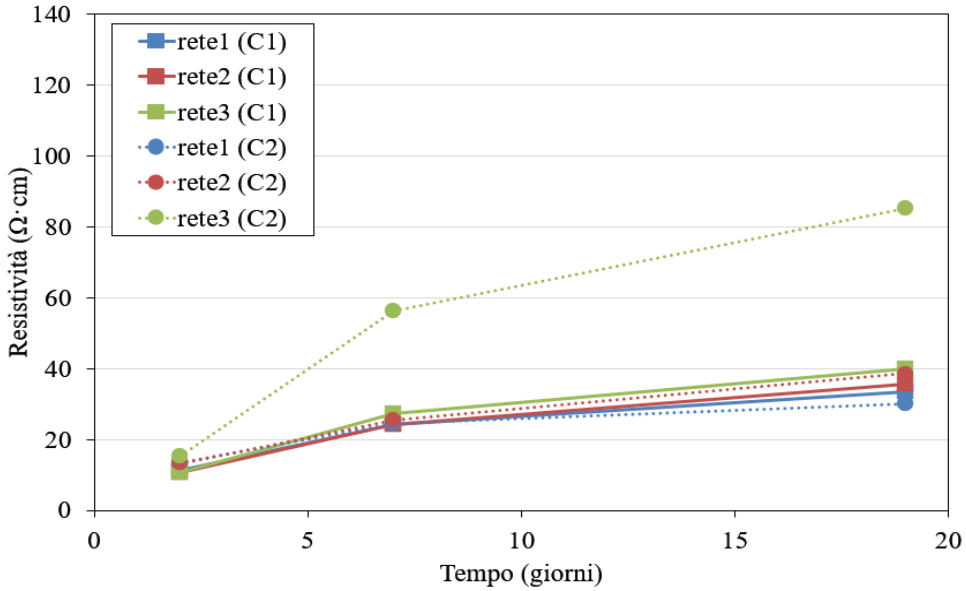


Figura 7.5. Andamento resistività media in AC.

7.3.4. Conclusioni

Dai dati ricavati dalle indagini preliminari si evince che:

- le prove effettuate in corrente alternata hanno portato risultati più attendibili rispetto a quelle effettuate in corrente continua, pertanto i provini definitivi sono stati analizzati con misurazioni in corrente alternata e, di conseguenza, sono stati realizzati inserendo solamente le due reti con funzione di elettrodi ad una distanza di 120 mm tra loro (Fig. 7.6);

- per quanto riguarda le tre differenti aperture di maglia delle reti testate, non sono state riscontrate grandi differenze di comportamento, pertanto è stata scelta la rete intermedia (rete 2 con apertura maglia 3,50 mm) per ragioni di praticità in fase di inserimento all'interno delle mascherine in plastica;

- come conseguenza di quanto appena detto, la costante di cella utilizzata nelle prove successive è la seguente:

Tabella 7.5. Costante di cella definitiva.

Sigla configurazione	Resistenza (Ω)	Conducibilità ($S \cdot cm^{-1}$)	Costante di cella (cm^{-1})
KCl 0,001-rete 2	4124	0,0001925	0,7940
KCl 0,01-rete 2	480	0,0015470	0,7421
			0,7681

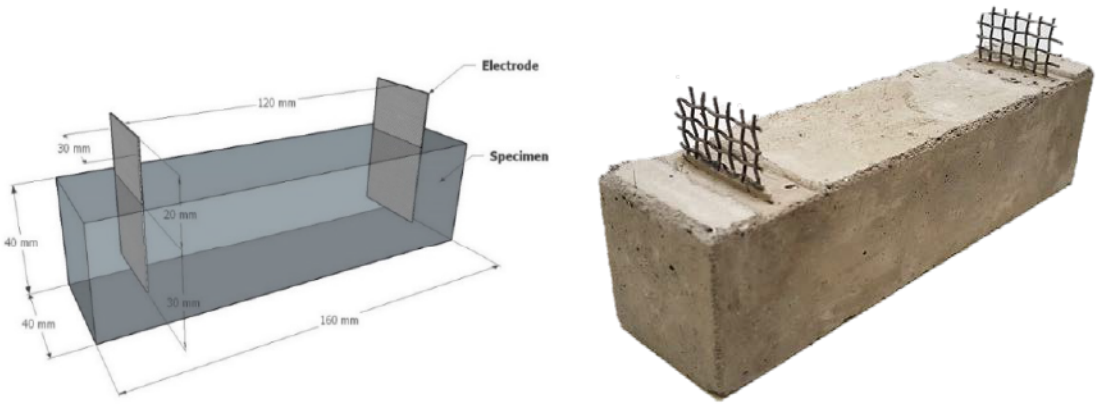


Figura 7.6. Configurazione dei provini definitivi (rete 2 con funzione di elettrodi ad una distanza di 120mm tra loro).

7.4. Campionamento e stagionatura

Per poter analizzare le proprietà elettriche, le malte sono state gettate nei casseri metallici e, sopra di essi, sono state fissate delle mascherine in plastica appositamente preparate per poter inserire le reti metalliche con funzione di elettrodi negli impasti alla distanza e alla profondità richiesta (Fig. 7.7).



Figura 7.7. Malta gettata all'interno di un cassero metallico attraverso l'utilizzo di mascherine in plastica per le prove di resistività.

Le reti metalliche sono state pretrattate con acetone e sono state immerse nella malta per una profondità di 30 mm.
I provini sono stati mantenuti nei casseri di formatura e conservati ad una temperatura di 20 ± 2°C e un'umidità relativa di 95 ± 5% per i primi due giorni dal getto, successivamente sono stati scasserati, le mascherine in plastica sono state rimosse e i provini sono stati mantenuti nelle stesse condizioni di temperatura e umidità per i successivi 5 giorni.
Dopo 7 giorni dal getto, i provini sono stati mantenuti ad una temperatura di 20 ± 2°C e un'umidità relativa del 65 ± 5% per i successivi 84 giorni di misurazione.

7.5. Metodo di rilevazione

Per la misurazione delle proprietà elettriche delle malte fibrorinforzate è stata utilizzata la metodologia in corrente alternata.
Le misure sono state eseguite con un approccio analogo a quello impiegato nelle misure di impedenza elettrochimica (EIS).
Allo scopo, è stato utilizzato un potenziostato (*GAMRY Reference 600*): i cavi relativi all'elettrodo di lavoro (W e WS) sono stati collegati ad una delle due reti metalliche inserite nel provino, mentre i cavi relativi al controelettrodo (C) e al riferimento (R) sono stati connessi alla rete metallica opposta (Fig. 7.8).
Tra le due reti è stato applicato un segnale di tensione di ampiezza pari a 10 mV, in un intervallo di frequenza variabile a partire da 1 MHz fino a un limite inferiore di 10 Hz, impostando 10 punti/decade: per ogni frequenza il software fornisce un valore di impedenza Z, in termini di modulo log |Z| e fase θ, con cui sono stati ottenuti i diagrammi di Bode, accorpati in un unico grafico (Fig. 7.9).
Attraverso un algoritmo appositamente sviluppato, la resistività del campione è stata determinata facendo una media dei valori di log |Z| (valori cerchiati in blu nel diagramma di Bode) a cui corrisponde una fase, in valore assoluto, al di sotto di una soglia prefissata (1-5°) e, comunque prossima a 0° (valori cerchiati in rosso nel diagramma di Bode).
A meno dell'errore sperimentale, questi valori del log |Z| sono quelli che chiaramente indicano un comportamento elettrico puramente resistivo del campione testato.

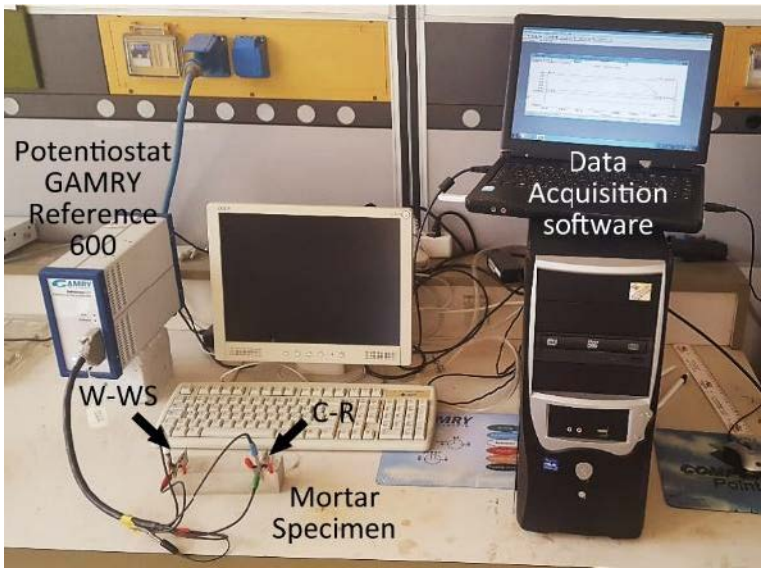


Figura 7.8. Strumentazione per le misure AC.

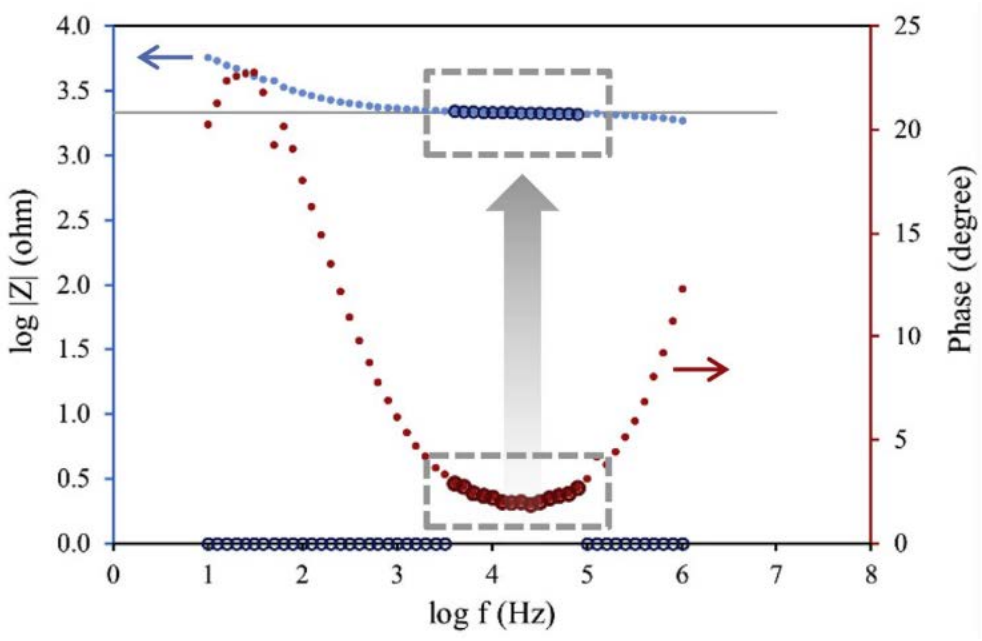


Figura 7.9. Curve di Bode-|Z| e Bode-fase ottenute dalle misure AC eseguite su un campione.

Dalla media dei valori di log |Z|, è stata calcolata la resistenza elettrica (R) del campione utilizzando l'equazione:

$$R = 10^{\overline{\log|Z|}}$$

La resistività elettrica (ρ) è stata quindi calcolata dal rapporto tra la resistenza R e la costante di cella K, precedentemente definita.
Il comportamento multifase dei compositi cementizi fibrorinforzati richiede un'analisi approfondita degli spettri di impedenza ottenuti dalle misurazioni EIS sui provini.

Infatti, nelle misurazioni in corrente alternata, i meccanismi conduttivi (elettrolitici ed elettronici) presenti in questi compositi portano a notevoli differenze tra i valori di impedenza Z misurati alle basse frequenze e quelli misurati alle alte frequenze.
Nel primo caso, l'effetto della polarizzazione della matrice cementizia è maggiore a causa del tempo di carica più lungo; nel secondo caso l'effetto di polarizzazione viene eliminato ed è più evidente il contributo elettrico delle fibre [9].
Questa differente risposta è chiaramente visibile attraverso l'uso della tecnica EIS.
Nel diagramma di *Nyquist*, in cui viene mostrata la relazione tra la parte immaginaria ($-Z_{Im}$) e la parte reale (Z_{Re}) dell'impedenza, lo spettro di impedenza di un composito cementizio semplice è determinato intorno ad una cuspide (Fig. 7.10) formata da due archi, che descrivono il comportamento elettrico del materiale cementizio ("*arco del materiale*", ad alte frequenze), dove solo le caratteristiche elettrolitiche di questo materiale rispondono alle perturbazioni della corrente alternata durante le misurazioni EIS, e gli effetti di polarizzazione sulle interfacce degli elettrodi ("*arco dell'elettrodo*", a basse frequenze) [10].
In corrispondenza di tale cuspide, si può determinare il valore medio della resistenza elettrica del composito cementizio semplice (R_m).

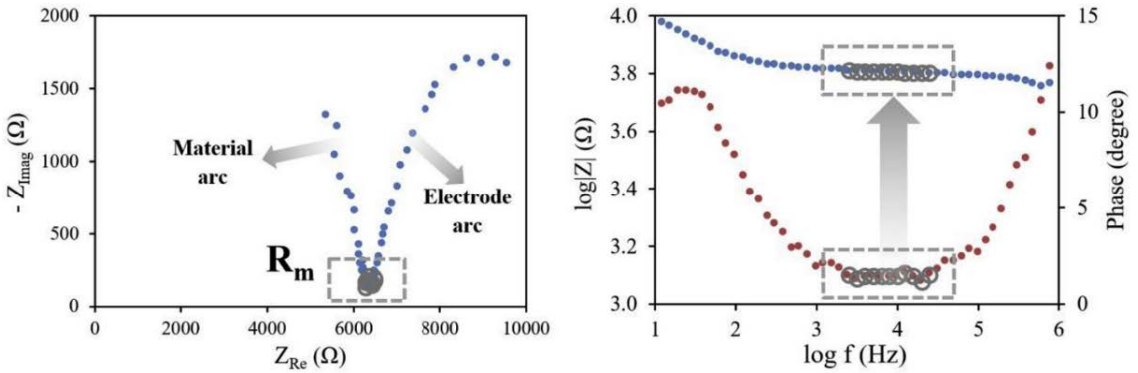


Figura 7.10. Diagrammi di Nyquist (a sinistra) e di Bode (a destra) di un composito semplice.

L'aggiunta di fibre conduttive nella matrice cementizia comporta l'apparizione di un terzo arco nel diagramma di Nyquist dello spettro di impedenza del nuovo materiale composito, nonché la comparsa di due cuspidi (Fig. 7.11): la prima, ad alte frequenze, è associata alla resistenza del materiale composito con le fibre (R_c), in cui sono presenti sia il meccanismo di conduzione elettrolitico (ioni nella matrice) sia il meccanismo di conduzione elettronico (elettroni nelle fibre); la seconda, a medie frequenze, è associata alla resistenza della matrice (R_m), come quella descritta per il composito cementizio semplice [9].
Questo effetto delle fibre sul materiale composito è chiaramente visibile anche nel diagramma di Bode (Fig. 7.11), dove i diversi valori di impedenza, dopo aver fissato per la fase un valore di soglia vicino a 0°, sono relativi a due diverse gamme di frequenza, e corrispondenti a due distinti insiemi di punti, dove si possono ottenere i valori di R_c e di R_m.

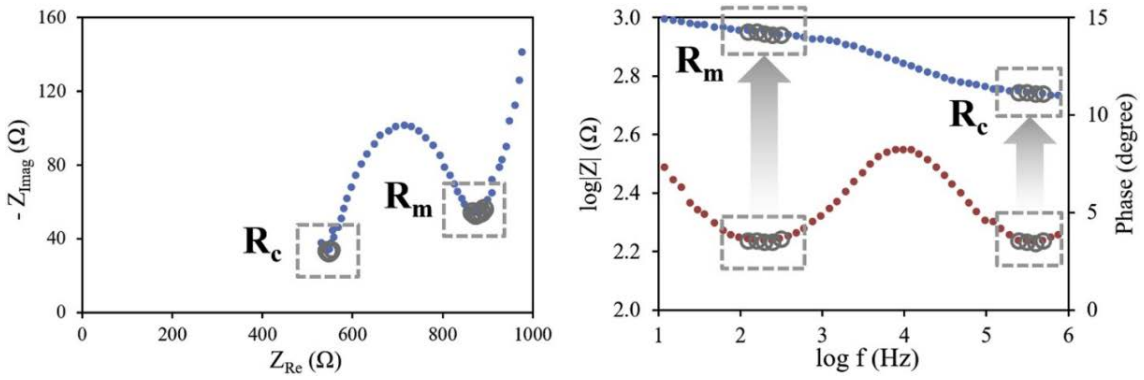


Figura 7.11. Diagrammi di Nyquist (a sinistra) e di Bode (a destra) di un composito fibrorinforzato.

Sulla base di questi risultati sperimentali, per la determinazione della resistività elettrica delle malte esaminate sono stati valutati solo i valori di impedenza ottenuti ad alte frequenze, ovvero i valori che mostrano il contributo delle fibre nel comportamento elettrico del composito.

7.5.1. Risultati della prova

Di seguito sono riportati, per ogni tipologia di impasto, i valori medi della resistività ottenuti dalle prove effettuate in corrente alternata a 2, 7, 14, 21, 28, 49, 70 e 91 giorni di maturazione.

Tabella 7.6. Misurazione resistività media delle malte testate.

Sigla miscela	Giorni di maturazione							
	2	**7**	**14**	**21**	**28**	**49**	**70**	**91**
	ρ (Ω·cm)							
RIF	901	1382	2258	2469	3144	4332	5493	7265
0,05 CAR	694	107	1152	1893	2344	4100	5368	8907
0,1 CAR	460	686	958	1120	1456	2578	3482	5941
0,2 CAR	174	260	358	426	550	914	1277	2070
0,4 CAR	108	158	217	253	329	532	707	1167
0,8 CAR	12	13	18	20	24	28	28	33
1,2 CAR	7	10	12	14	16	21	24	28
1,6 CAR	6	8	12	13	15	19	22	25
0,05 CAR R	194	306	490	581	704	1004	1476	1934
0,1 CAR R	163	227	373	441	530	751	1064	1392
0,2 CAR R	80	101	146	164	184	232	303	355
0,4 CAR R	48	56	74	81	89	106	126	142
0,8 CAR R	7	12	12	15	16	19	20	20
1,2 CAR R	7	10	11	13	16	18	19	20
1,6 CAR R	6	8	10	10	13	15	16	16
0,05 MET	1295	1904	2269	3137	4357	5554	7659	11202
0,1 MET	1276	1819	2116	3071	4122	5164	7480	10565
0,2 MET	1070	1502	1756	2613	3414	4349	6312	9506
0,4 MET	765	1180	1431	2132	2842	3507	5303	8573
0,8 MET	504	862	1165	1505	1527	2465	3336	4089
1,2 MET	404	666	933	1138	1121	1777	2387	2953
1,6 MET	309	535	733	860	908	1413	2103	2609

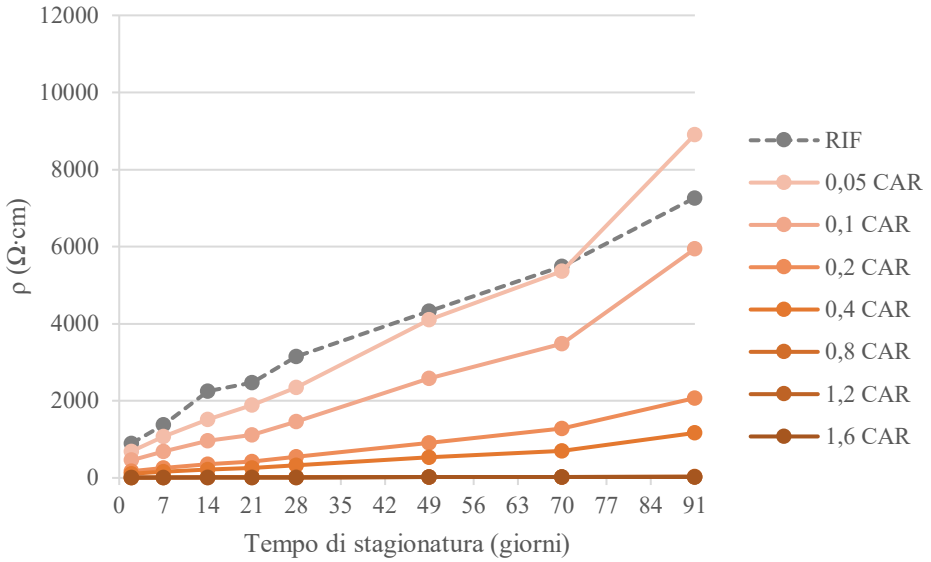


Figura 7.12. Andamento resistività media dei provini CAR.

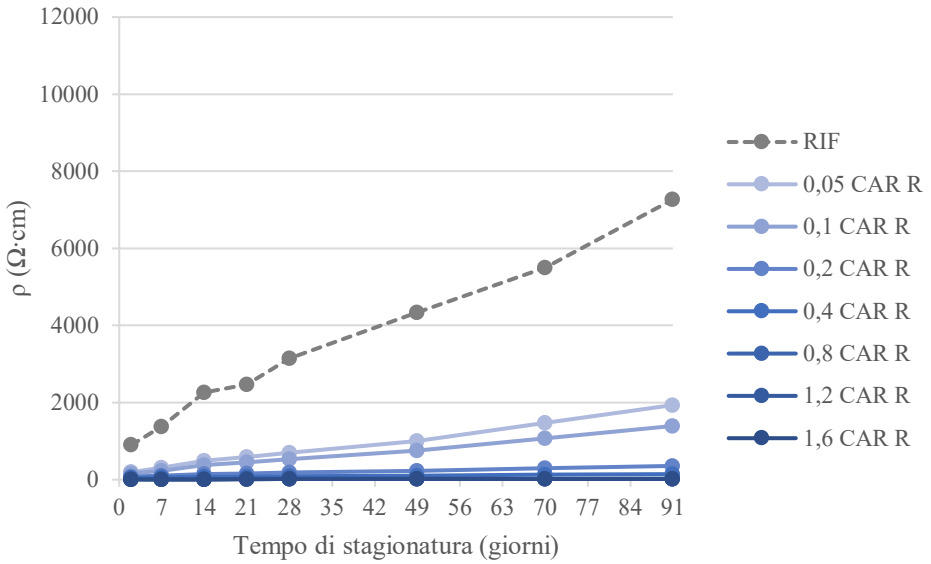


Figura 7.13. Andamento resistività media dei provini CAR R.

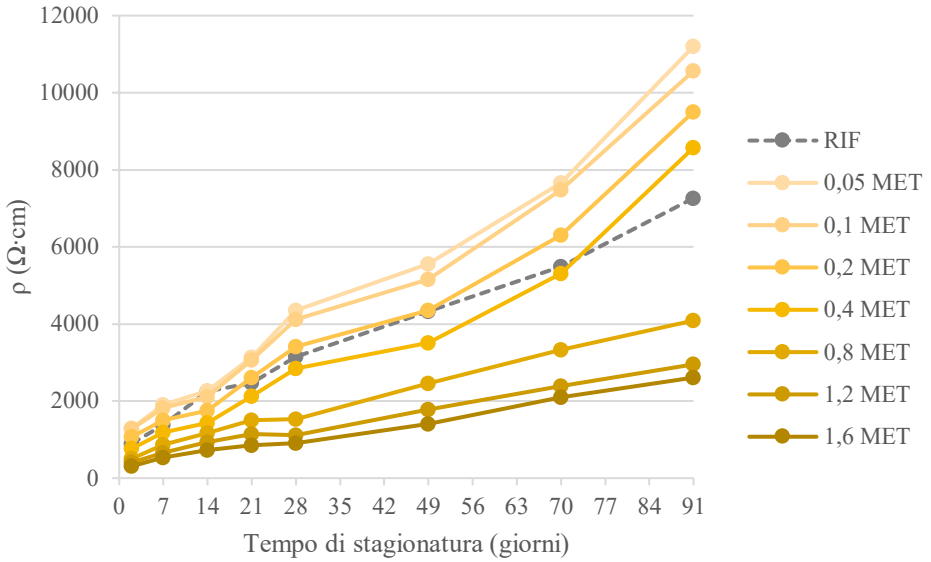


Figura 7.14. Andamento resistività media dei provini MET.

7.5.2. Confronto e considerazioni

I risultati ottenuti mostrano chiaramente l'elevata capacità dell'aggiunta di fibre conduttive nel ridurre la resistività elettrica delle malte già nei giorni successivi al getto e l'andamento della resistività media risulta sempre inversamente proporzionale alla quantità di fibre presenti (Fig. 7.12-7.13-7.14).
Si può, inoltre, osservare come tutte le miscele mostrino un aumento graduale della resistività durante il periodo di maturazione a causa della graduale perdita d'acqua.
Tuttavia, questi aumenti sono più bassi nelle malte con un dosaggio maggiore di fibre perché la conducibilità elettronica delle fibre supera la conducibilità elettrolitica della soluzione all'interno dei pori.
In particolare, le fibre di carbonio riciclate (anche a basse concentrazioni) producono un'elevata diminuzione della resistività già nei primi giorni di maturazione, e i valori rimangono quasi gli stessi fino al termine delle misurazioni (Fig. 7.13).
Le malte testate presentano però comportamenti elettrici estremamente diversi tra loro per quanto riguarda i valori di resistività finali (a 91 giorni di maturazione): perciò, per permettere una migliore lettura dei risultati ottenuti, nel grafico seguente è stata utilizzata una scala logaritmica di numerazione per l'asse delle ordinate (Fig. 7.15).

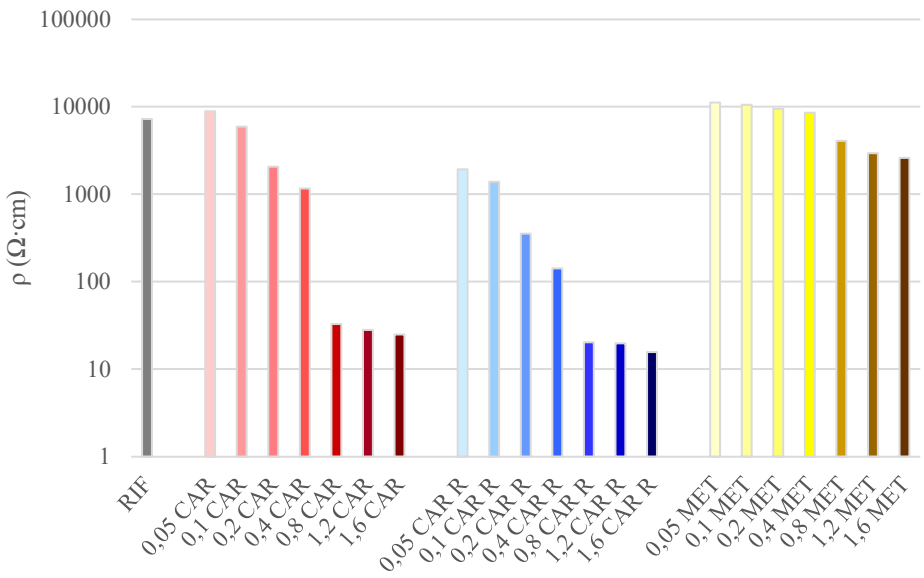


Figura 7.15. Resistività media delle malte testate a 91 giorni di maturazione.

Il fatto più evidente, visibile dal grafico, è l'altissima efficacia delle fibre di carbonio nell'aumentare la conducibilità elettrica delle miscele.
Le malte ad alto contenuto di fibre di carbonio (≥ 0,8 vol.%), sia vergini che riciclate, mostrano valori di resistività di due ordine di grandezza inferiori alla malta di riferimento.
Anche a concentrazioni intermedie (0,2-0,4 vol.%) l'aggiunta di fibre di carbonio risulta molto efficace: le malte 0,2 CAR e 0,2 CAR R mostrano valori di resistività inferiori rispettivamente del 72% e del 95% rispetto alla malta RIF.
Al contrario, le fibre metalliche richiedono dosi elevate per ridurre significativamente la resistività della miscela, poiché la malta 1,6 MET mostra una diminuzione solo del 64%.
Dai valori di resistività finali (a 91 giorni di maturazione) è stata anche valutata la cosiddetta "soglia di percolazione", ovvero la quantità di fibre che trasforma il composito cementizio da un isolante ad un semiconduttore e conduttore, grazie ad una notevole diminuzione della resistività elettrica [11].
Le curve, basate sulla relazione tra la concentrazione di fibre e la resistività elettrica (Fig. 7.16), mostrano una notevole diminuzione della resistività elettrica delle malte con fibre di carbonio tra lo 0,1 e lo 0,2 vol.%, che sono considerati gli estremi della zona di percolazione per questo tipo di fibre [12].
In questo intervallo, le fibre di carbonio vergini riducono la resistività della miscela da 5941 Ω·cm (0,1 CAR) a 2070 Ω·cm (0,2 CAR), che corrisponde ad una diminuzione del 65%.
L'effetto delle fibre di carbonio riciclate è ancora più evidente, passando da 1392 Ω·cm della malta 0,1 CAR R a 355 Ω·cm della malta 0,2 CAR R, con un calo approssimativo di un ordine di grandezza.
Per quanto riguardo invece le fibre metalliche, la soglia di percolazione per questo tipo di fibre è posta tra lo 0,4 e lo 0,8 vol.% (Fig. 7.16).
In questo intervallo, le fibre metalliche portano la resistività della miscela da 8573 Ω·cm (0,4 MET) a 4089 Ω·cm (0,8 MET), con un decremento del 52%.

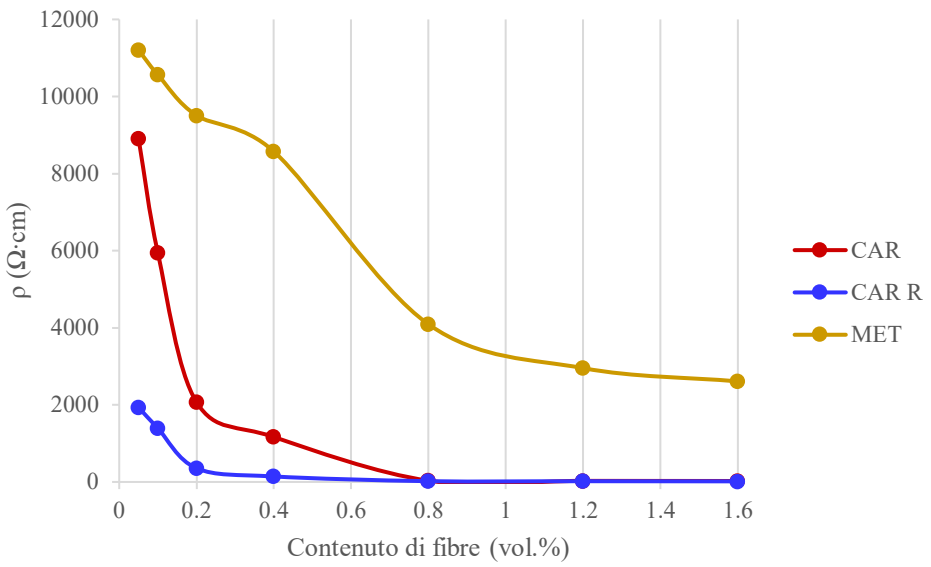


Figura 7.16. Curve resistività media-contenuto di fibre.

Tuttavia, queste concentrazioni di fibre non sono le uniche che causano una marcata diminuzione della resistività elettrica.
Le curve in scala logaritmica (7.17) mostrano infatti che il maggiore abbassamento della resistività è stata ottenuta con un aggiunta di fibre di carbonio tra lo 0,4 e lo 0,8 vol.%.
In questo intervallo, le fibre di carbonio vergini portano ad una riduzione da 1167 Ω·cm (0,4 CAR) a 33 Ω·cm (0,8 CAR), ovvero due ordini di grandezza in meno.
Analogamente, con le fibre di carbonio riciclate si passa da 142 Ω·cm (0,4 CAR R) a 20 Ω·cm (0,8 CAR R), con un decremento del 86%.

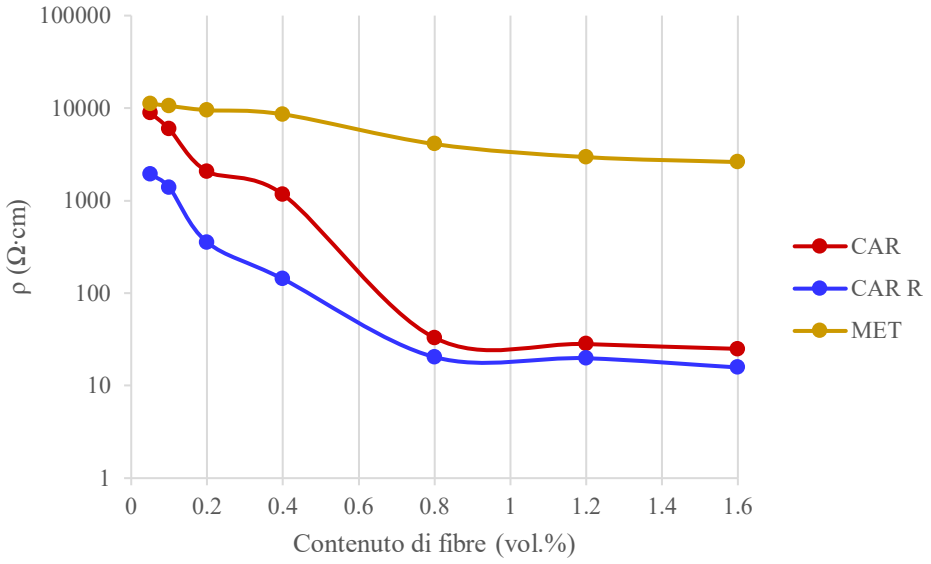


Figura 7.16. Curve resistività media-contenuto di fibre (in scala logaritmica).

Questo effetto è legato ad una soglia di percolazione in cui l'elevatissima quantità di fibre conduce al dominio della conducibilità elettronica sulla conducibilità elettrolitica della matrice cementizia [13].
Ciò è dimostrato anche dalla scarsa influenza della perdita d'acqua sulle proprietà elettriche delle malte rinforzate con alti dosaggi di fibre di carbonio (≥ 0,8 vol.%) durante il periodo di stagionatura, con valori di resistività che passano da 6-12 Ω·cm a 2 giorni, a soli 16-33 Ω·cm a 91 giorni.
Alla luce di tutte le misurazioni di resistività effettuate si può affermare che:

- le malte contenenti fibre metalliche hanno mostrato buone caratteristiche di conducibilità, anche se non accentuate come quelle contenenti fibre di carbonio;
- la malta, contenente fibre metalliche, più conduttiva si è dimostrata la 1,6 MET, con una resistività media a 91 giorni di 2609 Ω·cm, il 65% in meno rispetto alla malta di riferimento;
- la resistività media minore è stata misurata nelle malte con aggiunta di fibre carboniose, con valori inferiori di due ordini di grandezza rispetto al riferimento (circa 16-33 Ω·cm di resistività media per le malte con fibre di carbonio, contro i 7265 Ω·cm della malta senza alcun tipo di fibra);
- le fibre di carbonio riciclate offrono prestazioni di conducibilità migliori rispetto alle fibre in carbonio vergini, indipendentemente dal quantitativo di aggiunta e dal periodo di maturazione;
- la malta che ha mostrato un comportamento più conduttivo è la 1,6 CAR R, con una resistività finale (a 91 giorni di maturazione) di 16 Ω·cm;
- la malta 0,05 CAR R , con una concentrazione di fibre di soli 0,9 g/L, ha manifestato una resistività finale di 1934 Ω·cm, il 73% in meno rispetto alla malta di riferimento;
- l'elevata funzionalità delle fibre di carbonio riciclate, anche a bassi dosaggi, può portare ad un forte incentivo per lo sviluppo di compositi fibrorinforzati, grazie alla diminuzione dei costi (il prezzo delle fibre di carbonio riciclate è inferiore del 66% rispetto a quello delle fibre di carbonio vergini) e la maggiore sostenibilità.

Bibliografia

[1] Whittington HW, McCarter J, Forde MC, 1981. The conduction of electricity through concrete. Magaz Concr; 33 (114): 48‑59.

[2] Monfore GE, 1968. The electrical resistivity of concrete. J PCA Res Develop Laborat; 10 (2): 35‑48.

[3] Manuela Chiarello, Raffaele Zinno, 2004. Electrical conductivity of self-monitoring CFRC. Cement & Concrete Composites; 27 (2005): 463‑469.

[4] Han, Baoguo, et al, 2015. Review of nanocarbon-engineered multifunctional cementitious composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing; 70 (2015): 69-81.

[5] Li, Geng Ying, Pei Ming Wang, and Xiaohua Zhao. Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites. Cement and Concrete Composites; 29.5 (2007): 377-382.

[6] Cao, J. & Chung D. D. L. (2002). Damage evolution during freeze-thaw cycling of cement, mortar, studied by electrical resistivity measurement. Cement and Concrete Research; 32 (10): 1657-1661.

[7] Monteiro, A. O., P. B. Cachim, and P. M. F. J. Costa. Electrical properties of cement-based composites containing carbon black particles. Materials Today: Proceedings; 2.1 (2015): 193-199.

[8] Le, Jia-Liang, Hongjian Du, and Sze Dai Pang. Use of 2D Graphene Nanoplatelets (GNP) in cement composites for structural health evaluation. Composites Part B: Engineering; 67 (2014): 555-563.

[9] C.G. Berrocal, K. Hornbostel, M.R. Geiker, I. Lofgren, K. Lundgren, D.G. Bekas, Electrical resistivity measurements in steel fibre reinforced cementitious materials, Cement Concr. Compos. 89 (2018) 216–229.

[10] R. Coverdale, B. Christensen, H. Jennings, T. Mason, D. Bentz, E. Garboczi, Interpretation of impedance spectroscopy of cement paste via computer modelling, J. Mater. Sci. 30 (1995) 712–719.

[11] P. Xie, P. Gu, J.J. Beaudoin, Electrical percolation phenomena in cement composites containing conductive fibres, J. Mater. Sci. 31 (1996) 4093–4097.

[12] B. Han, S. Ding, X. Yu, Intrinsic self-sensing concrete and structures: a review, Meas. J. Int. Meas. Confed. 59 (2015) 110–128.

[13] J. Donnini, T. Bellezze, V. Corinaldesi, Mechanical, electrical and self-sensing properties of cementitious mortars containing short carbon fibers, J. Build. Eng. 20 (2018) 8–14.

8. Assorbimento d’acqua per capillarità

8.1. Introduzione

La capillarità è l'insieme di quei fenomeni dovuti alle interazioni fra le molecole di un liquido e un solido (per esempio le pareti di un recipiente) sulla loro superficie di separazione.
Le forze in gioco che si manifestano in tale fenomeno sono la coesione, l'adesione e la tensione superficiale.
Essa, ad esempio, si manifesta sulla superficie del liquido in contatto col solido che può presentarsi sollevata (nel caso dell'acqua), poiché le forze di adesione tra l'acqua ed il recipiente che la contiene sono maggiori delle forze di coesione tra le molecole d'acqua, o infossata rispetto al resto della superficie, perché in questo caso sono le forze di coesione a prevalere rispetto alle forze di adesione.
Quando le forze di adesione prevalgono sulle forze di coesione si verifica il fenomeno della risalita capillare di acqua.
Il fenomeno della capillarità interessa le porosità di ridotte dimensioni (microporosità), poiché la quantità di liquido interessata deve essere minore rispetto alla superficie di contatto con il solido per permettere la risalita capillare di acqua.
Le porosità, normalmente presenti all’interno della pasta cementizia indurita, permettono le interazioni tra le molecole di acqua e le molecole solide della pasta.
Tutti i manufatti in malta realizzati a contatto con il terreno, in ambiente ad elevata umidità o esposti ai fenomeni atmosferici, sono soggetti a risalita capillare di acqua.
In questo senso, un’elevata tendenza alla risalita capillare di una determinata malta è ritenuta nociva per le caratteristiche di durabilità poiché l’acqua che viene assorbita potrebbe contribuire a veicolare sostanze solubili che risalendo in superficie possono contribuire alla formazione di efflorescenze all’esterno del manufatto [1].
Se invece queste sostanze cristallizzassero all’interno del materiale potrebbero provocare fenomeni espansivi danneggiando l’integrità strutturale del manufatto.
Risulta quindi di fondamentale importanza studiare l’assorbimento dell’acqua per capillarità dei vari impasti.
La normativa europea attualmente in vigore descrive diversi processi di valutazione dell’assorbimento d’acqua per risalita capillare nei materiali porosi, a seconda della destinazione d’uso e del loro utilizzo.
Nella presente sperimentazione verranno utilizzate due differenti metodologie di rilevazione derivanti da due diverse normative: la UNI EN 1015-18:2004 e la UNI EN 15801:2012.

8.2. Campionamento e stagionatura

I provini utilizzati per la prova di assorbimento sono le metà dei provini prismatici di dimensione 40x40x160 mm utilizzati per le prove di caratterizzazione meccanica.
In particolare dopo aver eseguito le prove di resistenza meccanica a flessione e dopo aver quindi portato a rottura il provino prismatico, sono state prelevate due metà di due provini differenti per ogni tipologia di impasto.
Come descritto precedentemente, i provini prismatici 40x40x160 mm sono stati mantenuti nel cassero di formazione per i 2 giorni successivi al getto, conservati ad una temperatura di 20 ± 2°C e un’umidità relativa di 95 ± 5%.

Successivamente i provini sono stati scasserati, ricoperti con pellicola di cellulosa trasparente e mantenuti alle stesse condizioni di temperatura e umidità per i successivi 5 giorni.
Dopo 7 giorni dall’esecuzione del getto, i provini stati mantenuti per i 21 giorni successivi ad una temperatura costante di 20 ± 2°C e un’umidità relativa di 65 ± 5% nella cella climatizzata.
Prima di iniziare la prova di assorbimento d’acqua, i provini sono stati sottoposti a essiccamento in un forno a ventilazione forzata alla temperatura di 60 ± 2°C fino al raggiungimento di una massa costante.
La massa costante è stata considerata raggiunta nel momento in cui due pesate consecutive, effettuate a distanza di 24 ore, non mostravano differenze superiori allo 0,2% della massa totale del campione (relativa alla prima pesata).

8.3. Metodo di rilevazione

La UNI EN 1015-18:2004, che specifica le metodologie per la “determinazione del coefficiente di assorbimento d’acqua per capillarità nelle malte indurite”, è la normativa di riferimento per la valutazione della capacità di assorbimento d’acqua nel breve periodo (90 minuti).
I campioni e la strumentazione utilizzati sono gli stessi descritti dalla normativa.
Una volta sottoposti ad essiccatura, i provini sono stati immersi in una bacinella, opportunamente distaccati dal fondo del contenitore grazie a dei supporti cilindrici in plastica precedentemente fissati sul fondo (Fig. 8.1-8.2).
L’altezza del campione immersa nell’acqua demineralizzata è compresa tra 5 e 10 mm (Fig. 8.3).
La superficie interessata dalla prova (40x40 mm) è stata precedentemente abrasa con carta vetrata e successivamente immersa mantenendo il campione in assetto inclinato per evitare l’intrappolamento di bolle d’aria sulla superficie.



Figura 8.1. Recipiente con supporti.



Figura 8.2. Recipiente con provini prismatici.

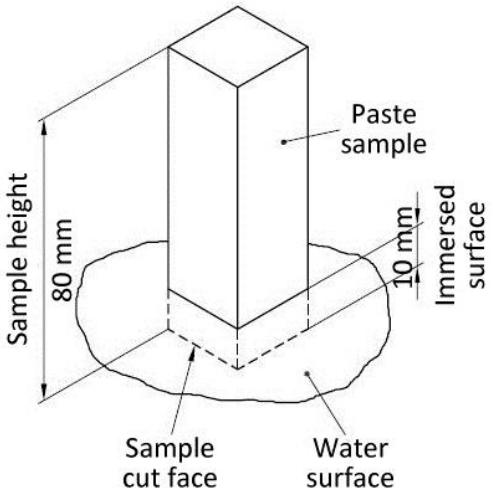


Figura 8.3. Sistema di prova.

Inizialmente i provini sono stati pesati con una bilancia di precisione in modo da rilevare la massa a secco (M_0) e successivamente sottoposti a immersione in acqua distillata con le caratteristiche sopra descritte.
La bacinella è stata quindi opportunamente chiusa con un coperchio per favorire il mantenimento di un'umidità costante al suo interno, e la prova è stata cronometrata.
Trascorsi 10 minuti dall'inizio della rilevazione, i provini sono stati rimossi dal recipiente, asciugati rapidamente con un panno inumidito, pesati (massa M_{10}) e ricollocati immediatamente nella bacinella.
Dopo 90 minuti dalla prima immersione l'operazione è stata ripetuta, i provini sono stati nuovamente pesati (massa M_{90}) e la prova è terminata.
Dopo aver effettuato le misurazioni, le masse dei provini sono state utilizzate allo scopo di calcolare il coefficiente di assorbimento d'acqua C misurato in g/(m^2·√min).
Questo equivale, per definizione, alla pendenza della retta che unisce i punti rappresentativi delle misurazioni a 10 e a 90 minuti.
Il coefficiente è misurato secondo normativa tramite l'equazione:

$$C = 0{,}1 \cdot (M_{90} - M_{10})$$

dove:

- M_{90} è la massa del provino rilevata dopo 90 minuti di immersione, misurata in g;
- M_{10} è la massa del provino rilevata dopo 10 minuti di immersione, misurata in g.

Invece, la UNI EN 15801:2012, che specifica le modalità di esecuzione, gli strumenti e l'elaborazione dei risultati per la "determinazione dell'assorbimento d'acqua per capillarità nei materiali porosi inorganici", è la normativa di riferimento per la valutazione della capacità di assorbimento d'acqua nel lungo periodo (8 giorni).
La norma europea specifica un metodo per la misurazione del potenziale assorbimento determinando la quantità e la velocità con cui il campione assorbe l'acqua per capillarità attraverso la sua superficie a contatto con l'acqua distillata.

I provini utilizzati per la prova sono gli stessi provini prismatici (40x40x80 mm) specificati nella prova di assorbimento precedente.
Una volta sottoposti a essiccatura, i provini sono stati pesati su una bilancia di precisione in modo da rilevare il peso a secco (m_0).
Sul fondo della bacinella, destinata al contenimento dei provini, è stato collocato un multistrato di fogli di carta da filtro dello spessore di circa 10 mm.
In seguito è stata aggiunta gradualmente acqua distillata all'interno del contenitore, fino al raggiungimento di una condizione di saturazione dei fogli di carta, ma evitando che il livello dell'acqua superasse il bordo superiore del multistrato.
Infine i campioni sono stati collocati sul foglio multistrato con la superficie precedentemente abrasa con carta vetrata a diretto contatto con la carta (Fig. 8.4-8.5).



Figura 8.4. Pesata dei provini prismatici.



Figura 8.5. Recipiente con provini prismatici.

A intervalli di tempo opportuni (10 min, 20 min, 30 min, 60 min, 4 ore, 6 ore, 24 ore e a intervalli successivi di 24 ore) si è proceduto alla pesatura dei provini con una bilancia di precisione, previa opportuna tamponatura della superficie soggetta ad assorbimento tramite un panno umido.
La prova è stata considerata terminata dopo 8 giorni.
I dati, ottenuti a seguito delle pesate dei provini, sono stati elaborati per determinare la quantità d'acqua assorbita per capillarità Q_i al tempo t_i ($\sqrt{s}$) misurata in mg/cm^2.
La quantità d'acqua è misurata secondo normativa tramite l'equazione:

$$Q_i = \frac{(m_0 - m_i)}{A} \cdot 1000$$

dove:

- m_0 è la massa a secco del provino, espressa in g;
- m_1 è la massa del provino rilevata dopo 10 minuti di immersione, espressa in g;
- A è la superficie del provino a contatto col foglio multistrato, espressa in cm^2.

8.4. Risultati della prova

8.4.1. Assorbimento d'acqua per capillarità (UNI EN 1015-18:2004)

Di seguito sono riportati, per ogni tipologia di impasto, i valori medi del coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità (*C*), ottenuti dalle prove effettuate nel breve periodo (90 minuti).

Tabella 8.1. Misurazione coefficiente di assorbimento d'acqua medio delle malte testate.

Sigla miscela	C (g/(m²·√min))
RIF	0,692
0,05 CAR	0,562
0,1 CAR	0,534
0,2 CAR	0,596
0,4 CAR	0,565
0,8 CAR	0,538
1,2 CAR	0,603
1,6 CAR	0,604
0,05 CAR R	0,723
0,1 CAR R	0,560
0,2 CAR R	0,514
0,4 CAR R	0,480
0,8 CAR R	0,651
1,2 CAR R	0,669
1,6 CAR R	0,513
0,05 MET	0,554
0,1 MET	0,493
0,2 MET	0,602
0,4 MET	0,583
0,8 MET	0,636
1,2 MET	0,498
1,6 MET	0,552

8.4.2. Assorbimento d'acqua per capillarità (UNI EN 15801:2010)

Di seguito sono riportati, per ogni tipologia di impasto, i valori medi della quantità d'acqua assorbita per capillarità (Q_i), ottenuti dalla prove effettuate nel lungo periodo (8 giorni).

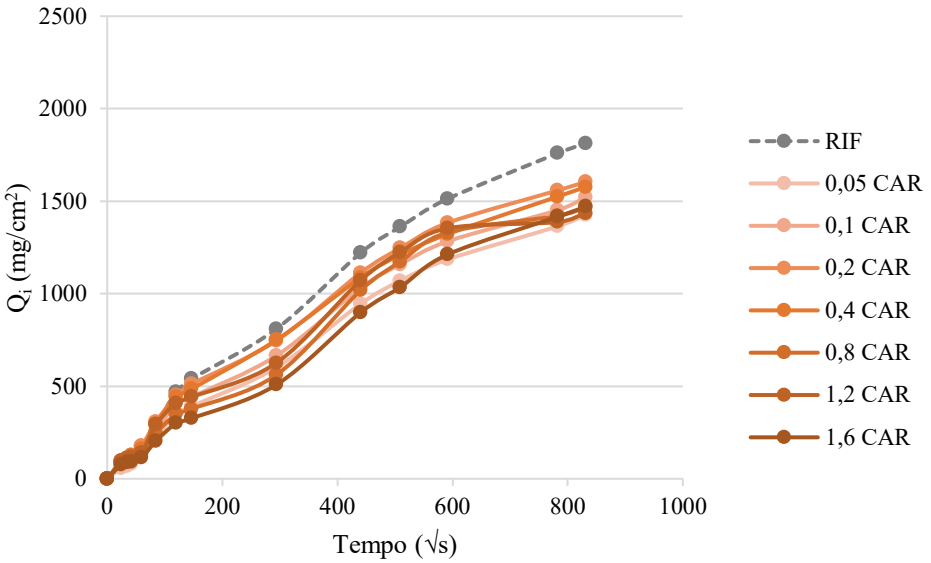


Figura 8.6. Andamento quantità d'acqua assorbita media dei provini CAR.

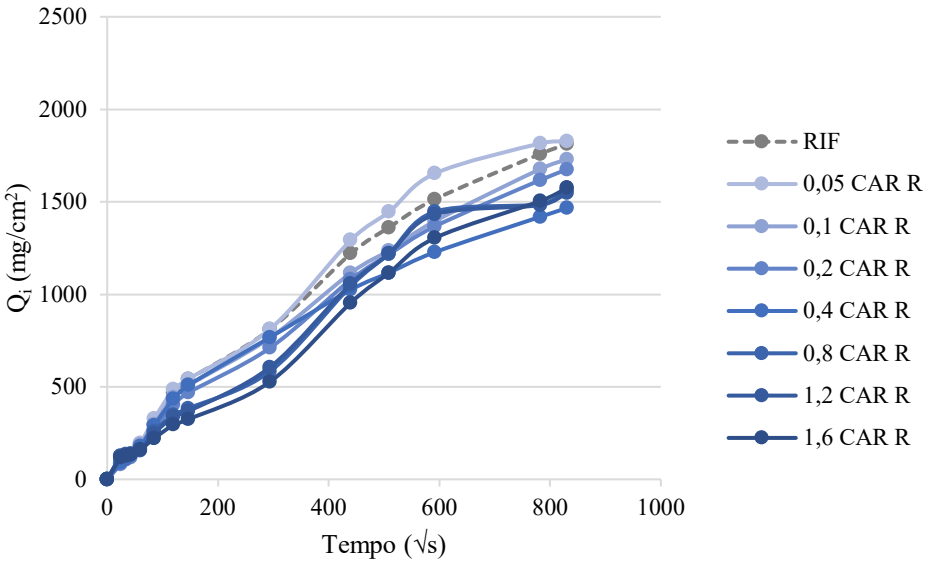


Figura 8.7. Andamento quantità d'acqua assorbita media dei provini CAR R.

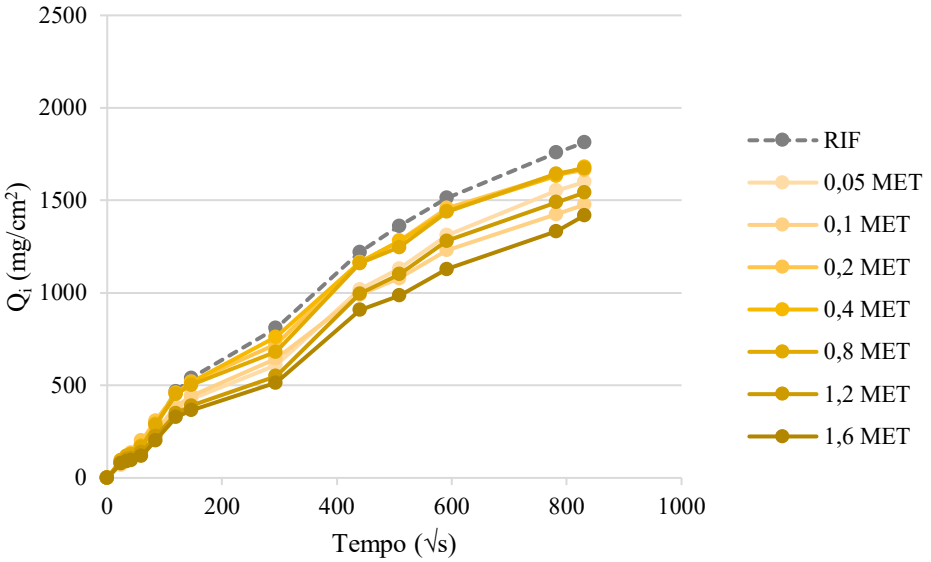


Figura 8.8. Andamento quantità d'acqua assorbita media dei provini MET.

8.5. Confronto e considerazioni

Di seguito sono riportati i grafici complessivi di tutti i dati finali per permettere un confronto tra le malte testate sia in termini di coefficiente di assorbimento d'acqua sia in termini di quantità d'acqua assorbita.

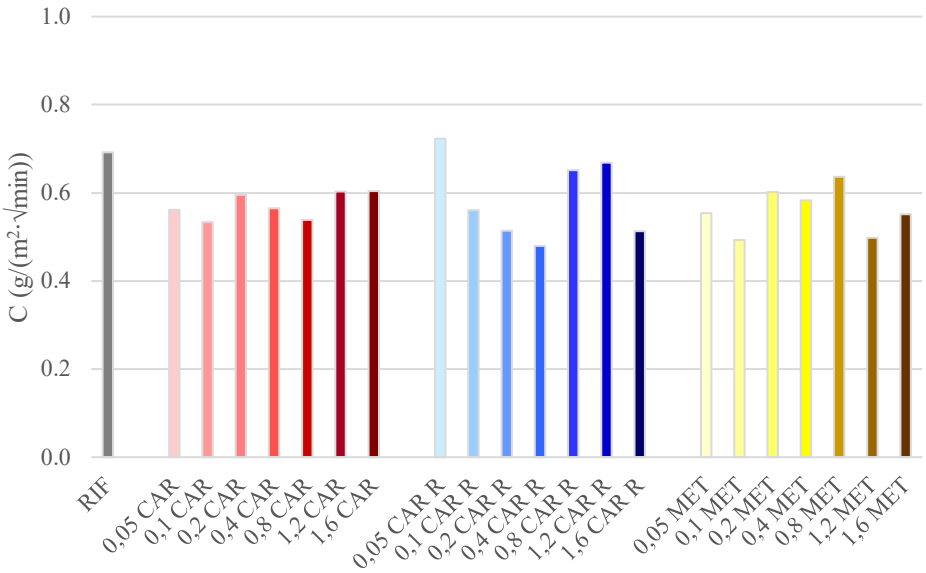


Figura 8.9. Coefficiente di assorbimento d'acqua medio delle malte testate.

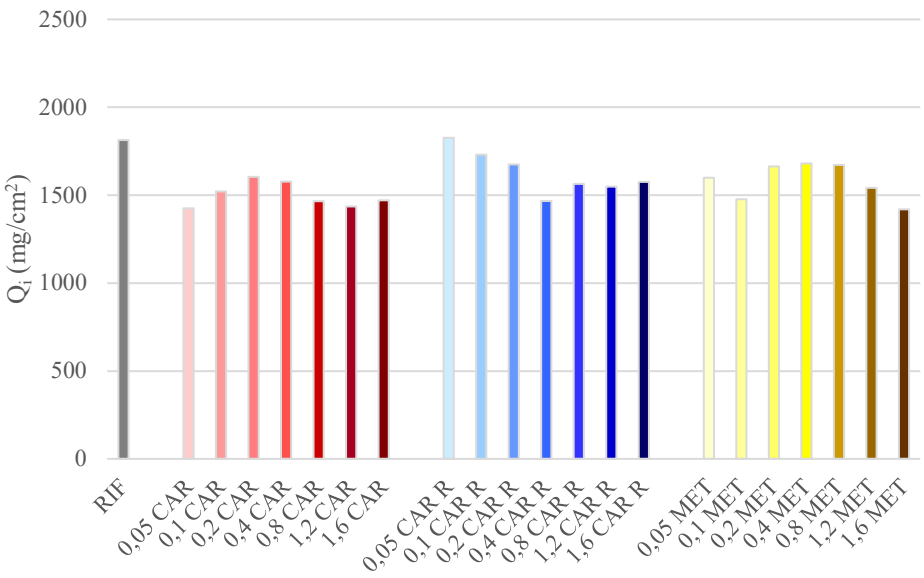


Figura 8.10. Quantità d'acqua assorbita media delle malte testate.

Dai risultati ottenuti è possibile affermare che:

- l'aggiunta di fibre determina chiaramente una riduzione dell'assorbimento d'acqua, sia nel breve che nel lungo periodo;

- tutte le malte fibrorinforzate mostrano coefficienti d'assorbimento C inferiori rispetto alla malta di riferimento, sebbene i valori non siano in alcun modo correlati al tipo e alla quantità di fibre (Fig. 8.9);

- i migliori risultati sono stati ottenuti dalle miscele 0,4 CAR R e 0,1 MET, con una diminuzione del coefficiente C fino al 30%;

- l'effetto del contenuto di fibre è più evidente nelle prove di assorbimento nel lungo periodo, dove tutte le malte fibrorinforzate mostrano una maggiore resistenza all'assorbimento capillare rispetto alla malta di riferimento e dove una maggiore concentrazione di filamenti porta, in media, ad un abbassamento del volume di acqua assorbita (Fig. 8.10);

- le miscele con quantità massime di fibre (1,6 CAR e 1,6 MET) sono le più impermeabili, con una diminuzione della quantità d'acqua assorbita pari al 22%.

La maggiore impermeabilità delle malte fibrorinforzate è correlata alla loro minore quantità volumetrica di pori capillari, in particolare quelli con diametri < 1 μm, che sono i vuoti che favoriscono maggiormente l'assorbimento d'acqua [1].
Numerosi studi, presenti in letteratura, hanno dimostrato la relazione tra aumento della quantità di fibre e diminuzione della microporosità dei compositi cementizi [2-3-4].
Le fibre, infatti, migliorano la microstruttura del composito poiché i filamenti mostrano una buona adesione con la matrice cementizia e fungono da punti di nucleazione per la formazione di prodotti di idratazione, riducendo così i micropori.
Per questo motivo le malte ad alto contenuto di fibre (≥ 0,8 vol.%) mostrano un'elevata resistenza all'assorbimento capillare.

Bibliografia

[1] Whittington HW, McCarter J, Forde MC, 1981. The conduction of electricity through concrete. Magaz Concr; 33 (114): 48–59.

[2] B. Wang, Y. Zhang, H. Ma, Porosity and pore size distribution measurement of cement/carbon nanofiber composites by 1H low field nuclear magnetic resonance, J. Wuhan Univ. Technol.-Materials Sci. Ed. 29 (2014) 82–88.

[3] W. Baomin, Z. Yuan, M.A. Hainan, Porosity and Pore Size Distribution Measurement of Cement/Carbon Nanofiber Composites by Low Field Nuclear Magnetic Resonance, J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed. 29 (2014) 82–88.

[4] O.C. Sola, C.D. Atis, B. Sayin, Investigation of mechanical properties of mortars with carbon fiber using multi slice computed tomography, Rev. La Construcción, Esc. Construcción Civ. Pontif. Univ. Católica Chile. 16 (2017) 167–173.

9. Microscopia elettronica a scansione

9.1. Introduzione

Il microscopio elettronico a scansione (*SEM*) è uno strumento elettro-ottico che permette, in seguito all'emissione di un fascio di elettroni, di analizzare i vari segnali prodotti dall'interazione degli elettroni del fascio con il campione in esame.
L'elaborazione di questi segnali consente di ottenere un'ampia gamma di informazioni non solo morfologiche, ma anche composizionali e strutturali relative alle varie parti di cui è costituito il campione.
I principi che regolano il funzionamento del SEM sono stati originariamente formulati da H. Stintzing nel 1929 che ne provò la fondatezza teorica.
Il primo prototipo di SEM venne realizzato da M. Von Ardenne nel 1937 (Fig. 8.1), mentre il primo SEM commerciale fu prodotto e distribuito dalla Cambridge Instrument Company Inc. agli inizi degli anni '60.

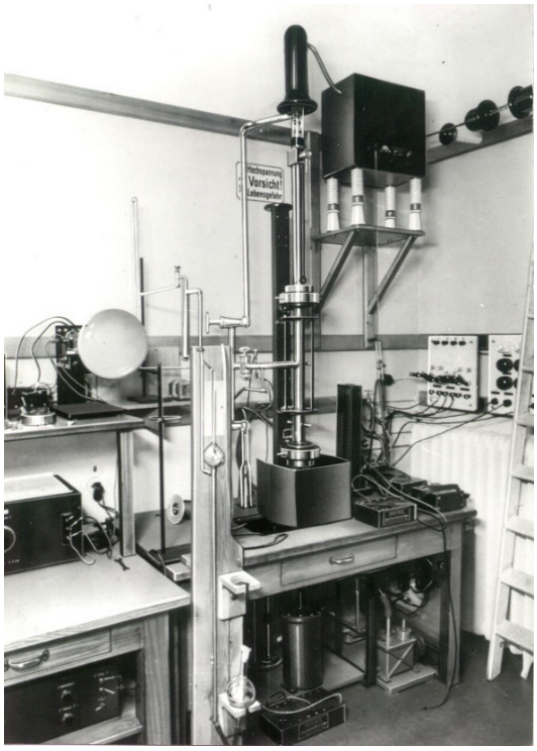


Figura 8.1. Primo prototipo di SEM, M. Von Ardenne 1937.

Il microscopio elettronico a scansione è costituito dai seguenti elementi (Fig. 8.2):

- una colonna elettronica, dove viene creato il fascio di elettroni;
- una camera da vuoto, dove il fascio di elettroni interagisce con il campione;
- vari tipi di rilevatori, che acquisiscono i segnali dell'interazione fascio-campione e li trasferiscono agli elaboratori;
- uno schermo, in cui si ricostruisce l'immagine segnale.

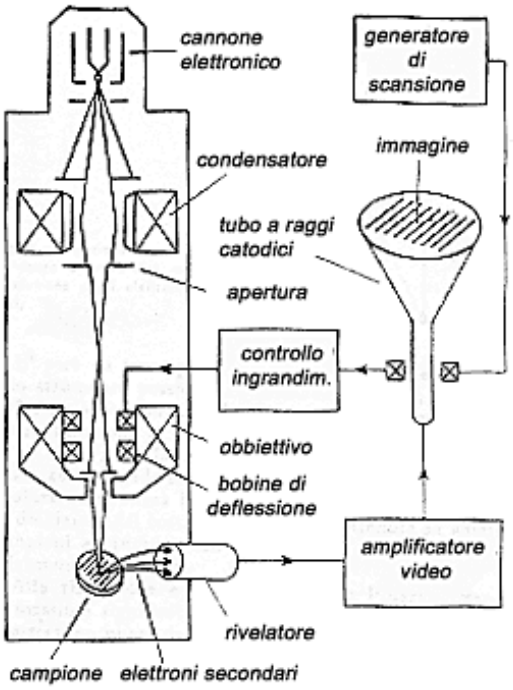


Figura 8.2. Funzionamento SEM.

La sorgente elettronica in cima alla colonna genera un fascio elettronico, mediante un filamento (comunemente di tungsteno) che, portato ad elevata temperatura, produce elettroni per effetto termoionico.
Il fascio ottenuto risulta essere divergente, e per questo deve essere fatto convergere e focalizzato da una serie di lenti di condensazione elettromagnetiche e di fenditure all'interno della colonna.
All'estremità inferiore della colonna, una serie di bobine di scansione deflette il fascio fornendogli un movimento alternato lungo linee parallele ed equidistanti, in modo che, una volta raggiunta la superficie del campione, vada a ricoprire un'area predefinita.
Il fascio infine, focalizzato dalla lente finale, esce dalla colonna e va a colpire il campione all'interno della camera da vuoto.
Nel momento in cui gli elettroni del fascio penetrano all'interno del campione perdono energia che viene riemessa dal campione sotto varie forme, ed ogni tipo di emissione generata è potenzialmente un segnale dal quale creare un'immagine.
I segnali solitamente utilizzati in microscopia elettronica a scansione sono essenzialmente due: gli elettroni secondari e quelli retrodiffusi.
Gli elettroni secondari provengono da una profondità di pochi nanometri e sono quelli che permettono di ottenere la massima riduzione, mentre gli elettroni retrodiffusi forniscono informazioni riguardo al numero atomico medio della zona di provenienza.
A parità di voltaggio di accelerazione, la penetrazione del fascio elettronico varia in funzione del numero atomico dell'elemento, o meglio, è maggiore in materiali più leggeri e minore in materiali più pesanti.
Di conseguenza anche la quantità di elettroni riemessi dal campione, e rilevati da uno specifico detector, sarà proporzionale alla durezza del materiale stesso.

Per questa ragione le immagini ottenute al SEM mostrano una scala di grigi che può essere connessa alla tipologia di materiale in questo modo:

- immagini più scure per materiali leggeri (gli elettroni penetrano di più e quindi ne vengono riemessi pochi);
- immagini più chiare per materiali pesanti (gli elettroni penetrano meno e quindi ne vengono riemessi molti.

L'ingrandimento della rilevazione è, quindi, funzione della tipologia di materiale sottoposto ad analisi, ovvero dalla sua capacità di relazionarsi con il fascio di elettroni incidenti.
Oltre che dal tipo di materiale, il massimo ingrandimento ottenibile è controllato dalla corrente fornita alle bobine di scansione e dalla tensione fornita ai deflettori, e, non dipende dalla potenza della lente obbiettivo, come invece accade per i microscopi elettronici e ottici tradizionali.
Questo perché la funzione dell'analisi SEM non è quella di focalizzare l'immagine del campione, bensì quella di focalizzare il fascio di elettroni prodotto in un dato punto.
Tramite la microscopia elettronica a scansione è possibile ottenere ingrandimenti di svariati ordini di grandezza, variabili da decine a centinaia di migliaia di volte la dimensione originale del campione, a seconda dello strumento utilizzato.
Durante lo scansionamento dei campioni in analisi SEM è stata effettuata l'analisi elementare e la caratterizzazione chimica delle malte utilizzate mediante spettroscopia EDX (*Energy Dispersive X-ray analysis*).
Con tale spettrometro l'analisi e la rappresentazione dei raggi X rilevati è fatta in funzione della loro energia e gli spettri ottenuti sono diagrammi delle intensità del segnale in funzione delle energie.
La capacità di caratterizzazione di questa tecnologia si basa sul principio fondamentale secondo il quale ogni elemento chimico possiede una struttura atomica unica, che comporta una singolare successione di picchi all'interno del suo spettro di emissione dei raggi X.
In tal modo è possibile rilevare informazioni sulla tipologia degli elementi chimici presenti nel materiale analizzato, unitamente alla loro quantità [1].

9.2. Campionamento

Dai provini di malta realizzati durante la fase di sperimentazione, sono stati prelevati dei campioni, di dimensioni tali da permettere l'alloggiamento nella camera di campionatura del macchinario, successivamente montati rigidamente su un supporto.
Per effettuare la scansione, i campioni devono risultare elettricamente conduttivi, ed elettricamente "messi a terra", così da prevenire l'accumulo di cariche elettrostatiche sulla loro superficie.
Tali accumuli, potrebbero causare errori di scansione e artefatti durante la riproduzione dell'immagine.
Per tale motivo, i campioni di materiali non conduttivi vengono ricoperti con un rivestimento ultrasottile di un materiale conduttore (la grafite) tramite rivestimento a polverizzazione (Fig. 8.3).



Figura 8.3. Campioni di malta sottoposti ad analisi SEM.

9.3. Metodo di rilevazione

Nella seguente sperimentazione, l'analisi dei campioni per mezzo del microscopio elettronico a scansione è stata effettuata per ottenere informazioni più approfondite riguardo la composizione morfologica e le proprietà micro-strutturali delle malte sviluppate.
Lo strumento utilizzato per le prove è uno *ZEISS NEON High Resolution SEM* (Fig. 8.4-8.5).

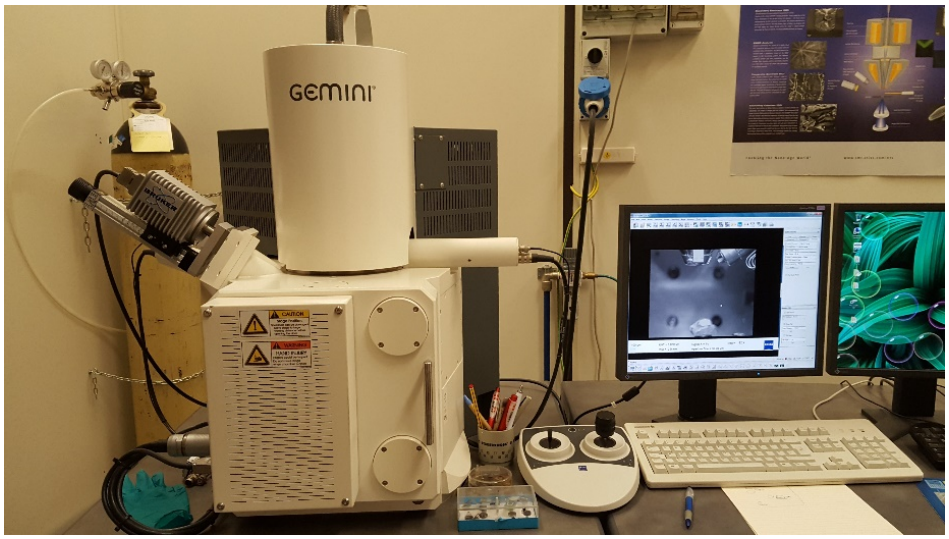


Figura 8.4. ZEISS NEON High Resolution SEM.

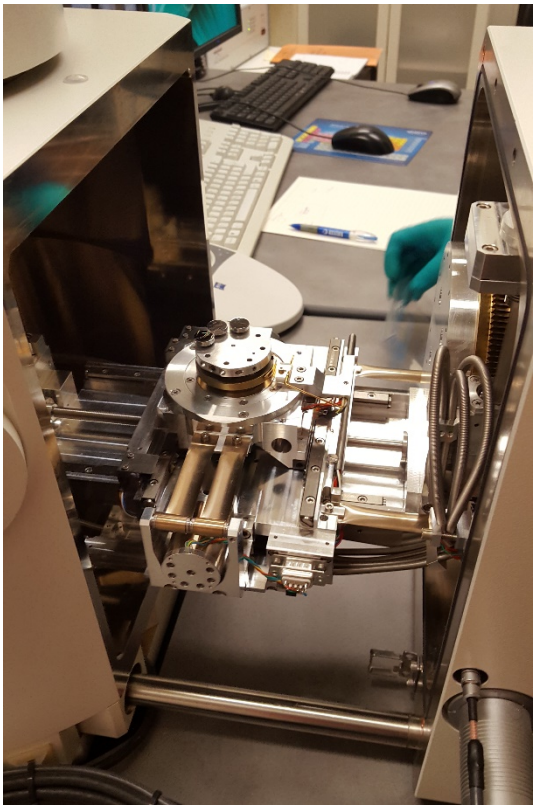


Figura 8.5. Campioni posizionati nella camera da vuoto del SEM.

9.4. Risultati delle prova

9.4.1. Microscopia elettronica a scansione sulle fibre

Per ottenere maggiori informazioni riguardo le proprietà micro-strutturali delle fibre utilizzate, sono state effettuate analisi in microscopia SEM sulle tre tipologie di fibre utilizzate, esaminando in particolare le superfici e le estremità di ciascuna fibra.
In questo modo, è stato possibile notare le differenze morfologiche non rilevabili da un'indagine visiva.
Dalle immagini SEM si può notare come le fibre di carbonio vergini presentino una superficie regolare e priva di imperfezioni (Fig. 8.6).
Le fibre di carbonio riciclate presentano, sulla superficie, un maggiore quantitativo di frammenti e polveri di carbonio, dovuti probabilmente ai processi produttivi (Fig. 8.7).
Sulla superficie delle fibre metalliche si possono notare delle piccole imperfezioni o graffi, dovuti a naturali stress meccanici, mentre sulle estremità si possono osservare delle imprecisioni causate dalla fase di taglio durante il processo di produzione delle fibre (Fig. 8.8).
Dalle ulteriori analisi in spettroscopia EDX si può invece osservare la composizione delle varie fibre (Fig. 8.9-8.10-8.11).
Le fibre di carbonio risultano composte principalmente da carbonio puro (C ≥ 92%), mentre le fibre metalliche da acciaio (Fe, C) e ottone (Zn, Cu).

- Fibre di carbonio vergini:

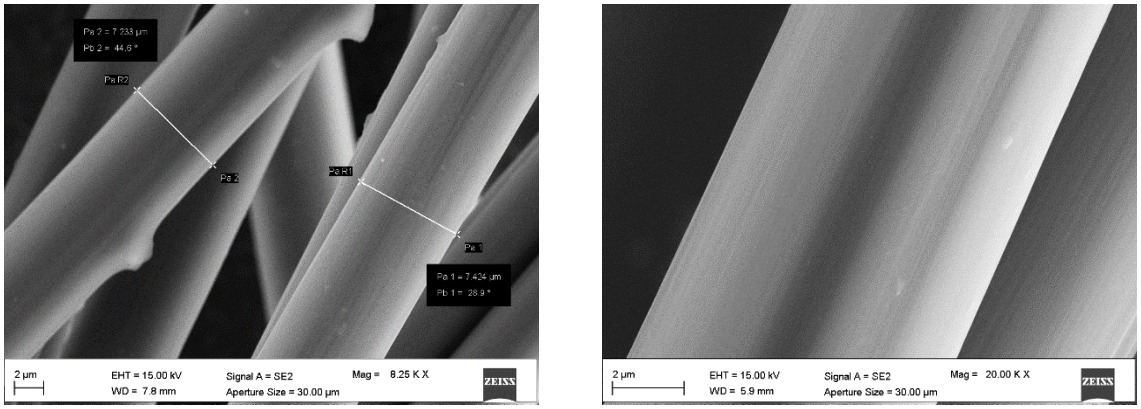


Figura 8.6. Analisi SEM sulle fibre di carbonio vergini.

- Fibre di carbonio riciclate:

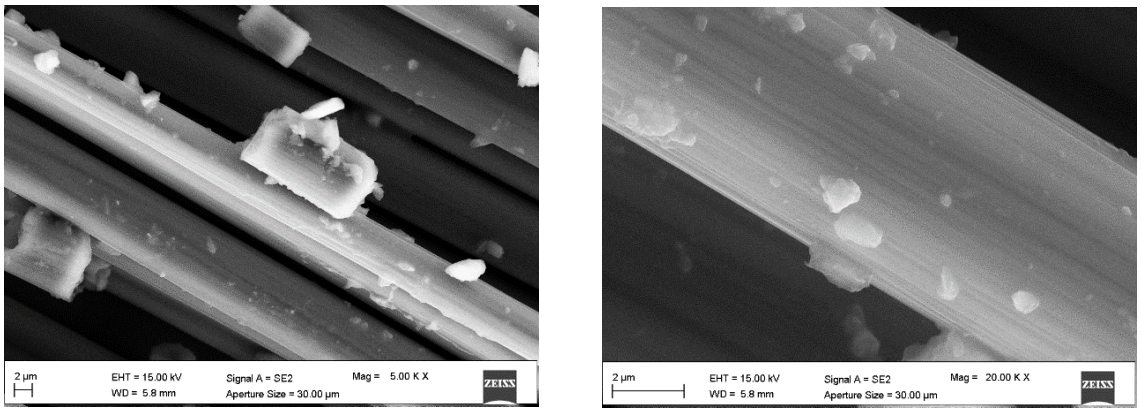


Figura 8.7. Analisi SEM sulle fibre di carbonio riciclate.

- Fibre metalliche:

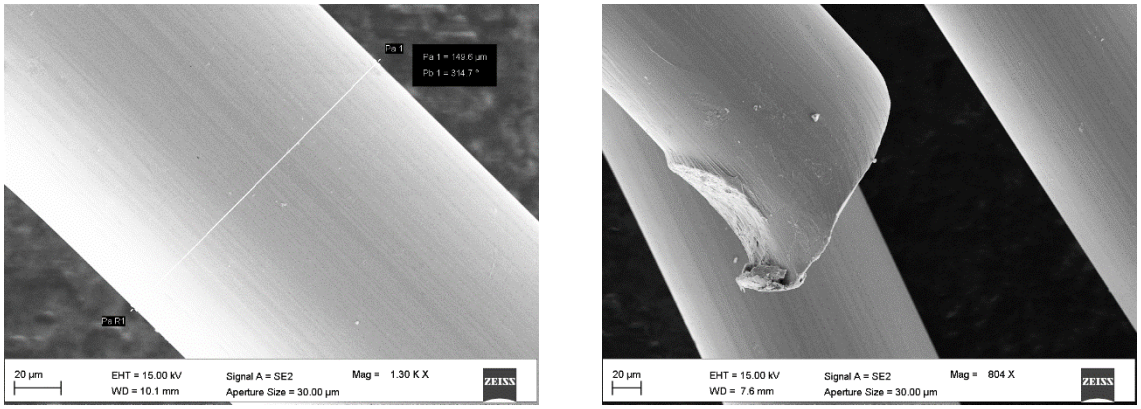


Figura 8.8. Analisi SEM sulle fibre metalliche.

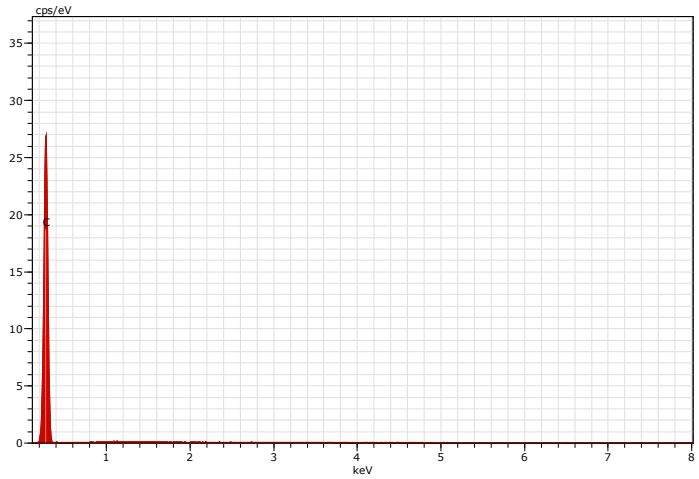


Figura 8.9. Analisi in spettroscopia EDX delle fibre di carbonio vergini.

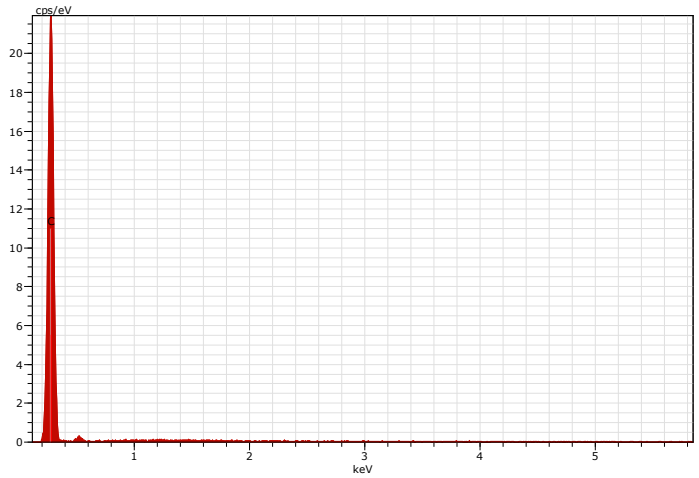


Figura 8.10. Analisi in spettroscopia EDX delle fibre di carbonio riciclate.

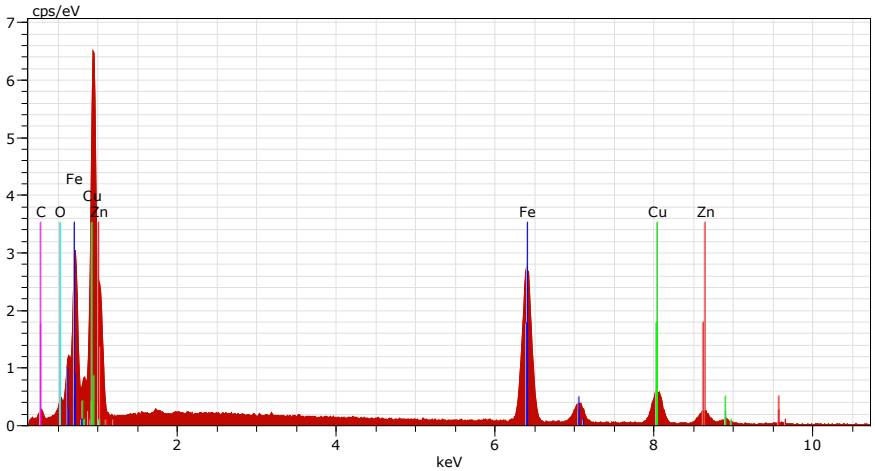


Figura 8.11. Analisi in spettroscopia EDX delle fibre metalliche.

Tabella 8.1. Analisi in spettroscopia EDX delle fibre metalliche.

	Zn	Cu	Fe	O	C
% peso	15,4	27,8	52,4	1,3	3,10

9.4.2. Microscopia elettronica a scansione sulle malte

- Malta con aggiunta di fibre di carbonio vergini:

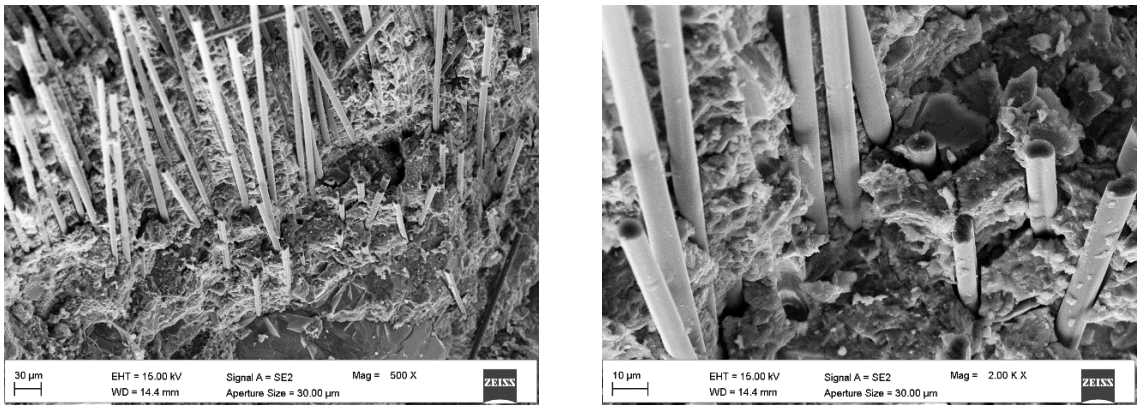


Figura 8.12. Analisi SEM sulle malte con fibre di carbonio vergini.

- Malta con aggiunta di fibre di carbonio riciclate:

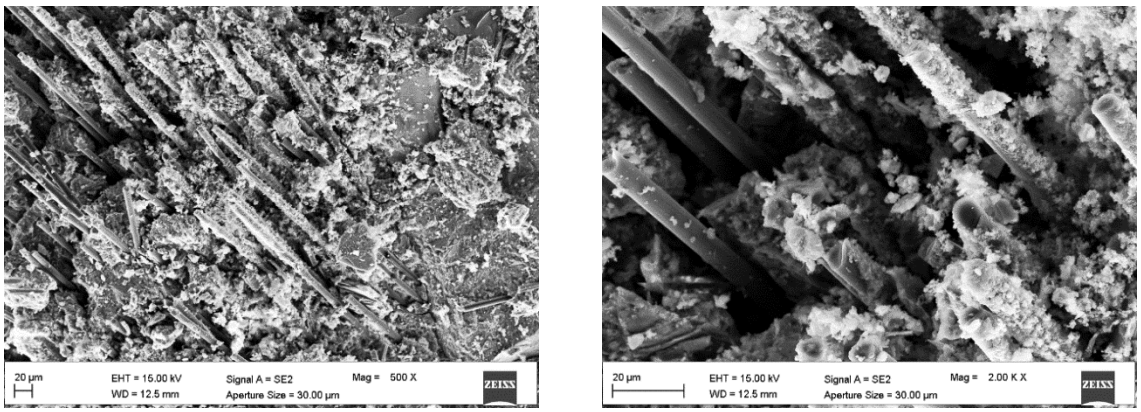


Figura 8.13. Analisi SEM sulle malte con fibre di carbonio riciclate.

- Malta con aggiunta di fibre metalliche:

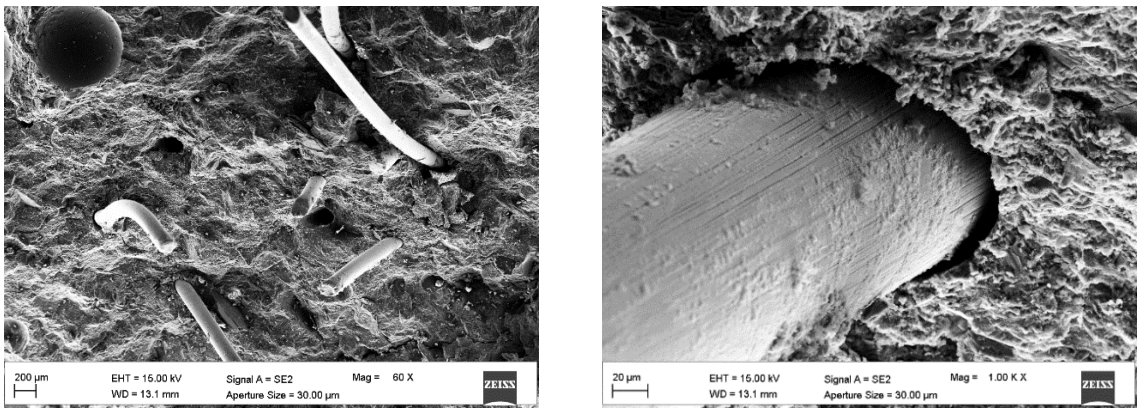


Figura 8.14. Analisi SEM sulle malte con fibre metalliche.

9.5. Confronto e considerazioni

Dalle scansioni effettuate sui campioni di malta analizzati si può dire che:

- le fibre di carbonio risultano ben inglobate nella matrice (Fig. 8.12-8.13);

- in particolare, le numerose impurità e particelle sulla superficie delle fibre di carbonio riciclate, che le rendono più scabre e con una migliore adesione alla matrice, spiegano le elevate prestazioni meccaniche, soprattutto a flessione, delle malte rinforzate con questo tipo di fibre;

- la considerevole quantità di impurità e particelle è anche il motivo della bassa microporosità, dell'elevata superficie conduttiva specifica, e quindi della bassa resistività delle malte rinforzate con fibre di carbonio riciclate;

- le fibre metalliche non risultano perfettamente inglobate nella matrice (Fig. 8.14), e questo è il motivo dei valori inferiori per quanto riguarda la resistenza meccanica a flessione delle malte rinforzate con fibre metalliche rispetto a quelle rinforzate con fibre di carbonio;

- la bassa coesione tra matrice e fibre metalliche, e il loro minor rapporto d'aspetto, sono la causa dell'aumento della microporosità e della maggiore resistività elettrica delle malte rinforzate con questo tipo di fibre;

- d'altra parte, il minor numero di filamenti (a parità di percentuale in volume), a causa del minor rapporto d'aspetto, porta ad una maggiore omogeneità, ad una maggiore resistenza meccanica a compressione e ad una maggiore tenacità alla fessurazione delle malte rinforzate con fibre metalliche.

Bibliografia

[1] Microscopia Elettronica a Scansione, Principi di funzionamento del SEM. Unitn, Ingegneria.

10. Conclusioni

In linea con le recenti scoperte in ambito edilizio, nella presente sperimentazione sono state realizzate e testate malte cementizie per lo sviluppo di un nuovo materiale composito multifunzionale, che permetta di combinare capacità portanti e capacità diagnostiche.
L'obiettivo principale era quello di fornire uno studio completo sull'ottimizzazione compositiva di malte cementizie rinforzate con fibre ad alta conducibilità.
Per questo motivo, sono stati analizzati gli effetti di 3 diversi tipi di fibre in termini di lavorabilità, proprietà meccaniche, elettriche e di durabilità delle malte.
Fibre di carbonio vergini (CAR), fibre di carbonio riciclate (CAR R) e fibre metalliche in acciaio ottonato (MET) sono state aggiunte alle miscele in 7 differenti dosaggi, da 0,05% a 1,6% sul volume totale di malta prodotta.
I risultati ottenuti durante la sperimentazione, suggeriscono le seguenti conclusioni:

- le prove di *resistenza meccanica* hanno dimostrato l'elevata efficacia dell'aggiunta di fibre nell'aumentare la resistenza a flessione delle malte, grazie al loro effetto di cucitura. In particolare, le fibre di carbonio riciclate hanno mostrato incrementi dei valori di R_f fino al 202% rispetto alla malta di riferimento. Tutti i tipi di fibre hanno inoltre migliorato la resistenza a trazione indiretta delle malte. I valori più alti sono stati ottenuti dalla miscela 1,6 MET, che ha incrementato i valori di f_{ct} del 214% rispetto alla malta semplice. La resistenza meccanica a flessione e a trazione indiretta sono legate al contenuto di fibre, poiché maggiori sono le concentrazioni, maggiori sono le prestazioni meccaniche. L'aggiunta di fibre ha evidenziato un aumento anche nella resistenza meccanica a compressione, ma elevate concentrazioni di fibre di carbonio hanno portato a delle diminuzioni dei valori di R_c (fino al 17%), poiché la scarsa lavorabilità delle miscele causa un aumento del volume dei macropori all'interno del composito. L'uso di grandi quantità di fibre ha invece mostrato notevoli miglioramenti per quanto riguarda la tenacità post-fessurazione delle malte fibrorinforzate. In particolare, le miscele con fibre metalliche, grazie alle loro caratteristiche dimensionali, hanno manifestato notevoli prestazioni, con valori di tenacità superiori a 50 MPa (350% in più rispetto alle miscele con fibre di carbonio) e valori di apertura finale della fessura fino a 0,72 mm;

- le misurazioni della *resistività elettrica* hanno evidenziato l'elevata efficacia delle fibre di carbonio nell'aumentare la conducibilità elettrica del composito cementizio. Attraverso le misure di impedenza EIS in corrente alternata, sono state individuate 2 soglie di percolazione (la prima tra 0,1-0,2 vol.% e la seconda tra 0,4-0,8 vol.%) in cui i valori di resistività delle malte diminuiscono fino a diversi ordini di grandezza rispetto alla malta di riferimento. In particolare, le fibre di carbonio riciclate hanno dimostrato una notevole fruttuosità anche nel caso di bassi dosaggi, grazie all'elevato numero di particelle che ne aumentano la superficie conduttiva specifica. Gli spettri di impedenza delle malte rinforzate con fibre di carbonio hanno anche evidenziato la natura multifase del composito, con una netta distinzione tra resistenza elettrica della matrice cementizia (R_m) e la resistenza del sistema fibra-matrice (R_c), rilevati rispettivamente alle basse e alle alte frequenze;

- le prove di *assorbimento d'acqua per capillarità* hanno dimostrato che una quantità crescente di fibre conduttive porta ad un miglioramento della durabilità delle malte fibrorinforzate, a causa di una minore quantità volumetrica di pori capillari. L'effetto dell'aggiunta di fibre è stato evidente sia nel breve che nel lungo periodo, con valori

del coefficiente C e del volume d'acqua Q_i inferiori all'aumentare del contenuto di fibre. La miscela 0,4 CAR R ha raggiunto la maggiore resistenza all'assorbimento d'acqua, con valori di C e Q_i rispettivamente del 31% e del 19% inferiori rispetto alla malta di riferimento;

- le analisi in *microscopia ottica a scansione (SEM)* hanno mostrano una scarsa adesione tra matrice cementizia e fibre metalliche, al contrario delle fibre di carbonio che invece risultano ben inglobate. La migliore adesione fibra-matrice è stata riscontrata per le malte con le fibre di carbonio riciclate, e ciò è dovuto all'elevata presenza di impurità e particelle sulla superficie, che ne aumenta la rugosità fungendo da punti di nucleazione per la crescita dell'agglomerato C-S-H.

Alla luce di questi risultati, si può affermare che l'aggiunta di fibre conduttive non sono migliora le proprietà elettriche dei compositi cementizi, ma anche la loro resistenza meccanica e la loro durabilità.
In particolare, la sperimentazione fornisce risultati relativi ad un'ampia gamma di diverse concentrazioni di fibre, utili per l'ottimizzazione di compositi cementizi fibrorinforzati multifunzionali, con l'obiettivo di ottenere il miglior compromesso tra proprietà elettriche e prestazioni meccaniche.
Il risultato più importante ottenuto dai test è l'elevata efficienza elettrica dell'aggiunta di fibre di carbonio riciclate, che portano grandi aumenti di conducibilità anche a bassi dosaggi.
Questi dati potrebbero promuovere la produzione di materiali compositi più economici con cui poter realizzare sensori intelligenti per il monitoraggio strutturale.
Le notevoli proprietà conduttive delle fibre in carbonio, unitamente alle loro elevate caratteristiche meccaniche, le rendono indubbiamente idonee per la realizzazione di tali sensori.
Possiamo perciò evidenziare il raggiungimento di uno dei principali obiettivi prefissatosi all'inizio del processo di ricerca relativo a questa tesi, ovvero il confezionamento di malte con potenziali caratteristiche di *self-sensing* e la ricerca di un'alternativa meno costosa, con minore impatto ambientale e, per di più, con proprietà superiori rispetto alle fibre in carbonio vergini.
Indagando ancora, sul comportamento e le caratteristiche di malte confezionate con l'utilizzo delle fibre di carbonio *riciclate*, si potrebbe arrivare all'ampia implementazione di questi materiali innovativi.

Schede tecniche

- Fibre di carbonio vergini

YOUR PARTNER IN FIBRES.

PRODUCT DATA SHEET

CARBON - SHORT CUT — SFC ... GLB

Fibre Type	carbon
shape in section	round
fibre coarseness in µm ca.	7,0
fibre coarseness in dtex ca.	0,8
specific gravity in g/ cm³	1,78
heat resist. inert atmosphere	2000°C
heat resist. air beg.of oxidat	400°C
wet content on delivery max	2 %
Color	black

PHYSICAL CHARACTERISTICS

cut length in mm	3	6
average fibre length in mm ca.	3,0	6,0
fibre surface in m²/ g ca.	0,299	0,229
number of fibres per g ca.	4.167.000	2.083.500

page 1 / 2

YOUR PARTNER IN FIBRES.

PRODUCT DATA SHEET

GENERAL TECHNICAL INFORMATION

resitance to light	good
weather resistance	good
resistance to ageing	good
acid resistance	good
alkali resistance	good
solvent resistance	good
diametrical strength in cN/tex	225
tensile strength in N/ mm²	4.000
elongation at break in %	1,7
modulus in cN/ tex	12.900 - 14.000
modulus in N/ mm²	230.000 - 250.000
spec. resistance in Ohm*cm	0,0015
surface coating	Glycerin
surface coating in % ca.	2,0 - 6,0
durability from delivery dt.	24 months

Store unopened at +5°C to +30°C as well as protected from moisture, drafts and UV-radiation.
All product data sheets can also be downloaded from www.stw-faser.de/login

Schwarzwälder Textil-Werke Heinrich Kautzmann GmbH
Aue 3 • 77773 Schenkenzell
Germany
Fon +49 78 36 57 - 0
Fax +49 78 36 57 - 37
Mail info@stw-faser.de
Web stw-faser.de

- Fibre di carbonio riciclate

APPLY.CARBON sa contact@apply-carbon.fr
Z.A. Lanveur F-56440 LANGUIDIC tel +33 2 97 65 10 89 fax +33 2 97 65 11 20

CFG-6mm glyceroled cut carbon fibres n°13007 TECHNICAL DATA SHEET

FICHE TECHNIQUE

mise à jour / up dated February 2013

- CFG-6mm : mixture **of all origins** carbon and graphite ex-PAN fibres, obtained from spools of pure carbon fibres, cut for the widest range of short fibres applications. Underneath added glycerol overcoating, its original sizing, which can vary, is generally compatible with the widest range of thermoplastic and thermosetting matrixes (polymers and elastomers), also: rubbers, papers, concretes, paints etc ; **its compatibility needs to be checked on each new batch and for each new application**.

*- **CFG-6mm** : mélange de fibres de carbone et graphite ex-PAN **de toutes origines**, obtenu de bobines de fibres de carbone pures, coupées pour le plus large éventail d'applications fibres courtes. Sous le surensimmage glycérol, son ensimage originel, variable, est généralement compatible avec le plus large éventail de matrices thermodurcissables et thermoplastiques (polymères et élastomères) mais aussi : caoutchoucs, papiers, bétons, paints etc ; **sa compatibilité doit être vérifiée à chaque lot et pour toute nouvelle application**.*

PROPRIETES VALEURS MOYENNES *(val. Mini.)*(1) Les propriétés chimiques et physiques sont celles d'origine.		PROPERTIES AVERAGE VALUES *(minimum values)*(1) Chemical and physical properties are unchanged.
Teneur en fibres de carbone ˅ dont fibres exPAN ˅ *˅ avant ajout glycérol*	**100% *(100%)*** **100% *(100%)***	Carbon fibres content˅ from whitch exPAN fibres˅ ˅ before glycerol addition
Teneur en carbone	**94% *(>92%)***	Carbon content
Taux d'ensimage ***(avant glycérol)*** ***Surensimage glycérol***	**1.4 % ± 0.6** **3,5% ± 0,2**	Sizing level **(before glycerol addition)** **glycerol oversizing**
Densité (fibre continue)	**1.7 < d < 2.**	Density (continuous fibre.)
∅ monofilaments	**7 µm ± 2**	Mono filament diameter
Résistivité volumique *˅˅ : résistivité volumique moyenne de n (n > 1000) monofilaments*	**15 µΩm (20 maxi)˅˅**	Volume resistivity ˅˅ : average volume resistivity of n (n > 1000) monofilaments.
Résistance en traction *Allongement à rupture* *Module de Young (traction)*	**3.5Gpa *(3.)*** **1.5% *(1.2)*** **230Gpa *(200.)***	Tensile strength Elongation at break Young's modulus (tensile)
Longueur moyenne	**6mm ± 0.5**	mean length
Distribution	***95% en masse en 6mm ±0.3*** **95% in mass inside 6mm ±0.3**	Distribution
Densité apparente	**≈ 0.55kg/dm³ ±0.05**	Bulk density
Contamination métallique (2)	**< 0.001g/1000g**	Metal contamination (2)

(1) except for grey marked fields, average values excerpt from the technical data sheets of the ex.PAN "high strength" fibres that we use in our mixture for more than 90%. The ≤10% remaining are "high modulus" fibres from same various producers : TORAY-SOFICAR ,TOHO-TEIJIN-TENAX, HEXCEL, CYTEC.... All these values, in the same way for length, distribution, bulk density, metal contamination, **are given as a rough guide and do not in any way engage APPLY.CARBON's responsibility**.

*(1) sauf lignes grisées, valeurs moyennes relevées dans les fiches techniques des producteurs des fibres ex.PAN haute résistance qui sont utilisées dans notre mélange pour plus de 90%. Les ≤10% restants sont des "hauts modules" des mêmes divers producteurs: TORAY-SOFICAR ,TOHO-TEIJIN-TENAX, HEXCEL, CYTEC.... Toutes ces valeurs, de même que longueur, distribution, densité apparente, contamination métallique, **sont données à titre indicatif et ne sauraient pas engager APPLY.CARBON contractuellement**.*

(2) all our cut or milled fibres are purified through powerful magnets separators. Although very rare, some non magnetic metal particles stay possible. An Xrays control permits to eliminate particles from 1mm³ (Pb, Cu) to 6mm³ (Al) depending on metal density ; aluminium chips or sheets, even of several cm² , can't be detected.

(2) toutes nos fibres coupées ou broyées sont purifiées par passage dans de puissants séparateurs magnétiques. Des inclusions de métaux amagnétiques, bien que rarissimes, restent possibles. Un contrôle par rayons X permet d'éliminer des particules à partir de 1mm³ (Pb, Cu) à 6mm³ (Al) selon la densité du métal ; des copeaux ou feuilles d'aluminium très minces, même de plusieurs cm², sont indétectables.

Health and Safety : Carbon fibres are not dangerous for health. However, as short fibres and dusts, they cause irritation on skin, eyes, tract ; the sizing sometimes causes allergies. People will have to wear dust protections as face masks, spectacles, light overalls, gloves. Carbon fibres are **conductive of electricity**.

***Santé, Sécurité** : Les fibres de carbone ne sont pas dangereuses pour la santé. Toutefois, sous forme de fibrettes courtes et de poussières, elles sont irritantes pour la peau, les yeux, les voies respiratoires ; les produits d'ensimage peuvent parfois provoquer des allergies. On devra s'en protéger avec masques à poussières, combinaisons légères, lunettes, gants. Les fibres de carbon sont **conductrices de l'électricité**.*

- Fibre metalliche in acciaio ottonato

Dramix®

BEKAERT
better together



SCHEDA TECNICA OL 6/.16



Che cos'è Dramix®?

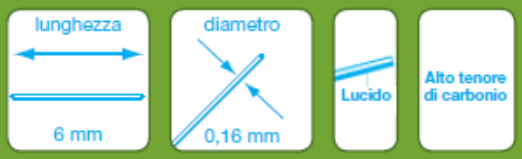
Le fibre di acciaio Dramix® prodotte da Bekaert, leader del settore, fissano un nuovo standard per il rinforzo del calcestruzzo grazie alla combinazione esclusiva di flessibilità ed efficienza dei costi.

Dramix® è un fibra (filo) di acciaio trafilata a freddo con estremità ricurve per garantire un ottimo ancoraggio.
Il calcestruzzo rinforzato con Dramix® è estremamente duttile ed offre un'elevata capacità portante. Una soluzione efficiente in termini di costi ed un'applicazione semplice e rapida.

OL 6/.16 vi offre:

Dramix® Hi Perform
Dramix® Hi Perform fibres are providing high performance and crack resistance. These are products of choice to create optimal ductility in high strength but brittle concretes from 100 N/mm² onwards.

GEOMETRIA E PRESTAZIONI



1.060.000 Fibre/kg

PROPRIETÀ DEI MATERIALI

Resistenza alla trazione: Rm min: 2.600 N/mm²

IMBALLAGGIO



36 Casse (25kg)
900 kg

STOCCAGGIO



Conservare in un luogo asciutto

Non impilare

Maneggiare con cura: Seguire le nostre raccomandazioni in termini di manipolazione, miscelazione e dosaggio.

OMOLOGAZIONI

ISO 9001

CE

- **Marchio CE:** Dramix® è certificato secondo il sistema 1 della marcatura CE: fibre di acciaio per impieghi strutturali. Per maggiori informazioni: Foglio illustrativo disponibile su richiesta.
- **Certificazione ISO 9001:** Dramix® è certificato ISO 9001. Stabilimento di produzione:
  - Slovacchia

Bekaert vi terrà informati sulle fibre più idonee alle vostre applicazioni. Riguardo alle nostre raccomandazioni in termini di manipolazione, miscelazione e dosaggio, visitare il sito: www.bekaert.com/dosingdramix
infobuilding@bekaert.com

Tutti i nomi delle società Bekaert sono marchi di fabbrica di NV Bekaert SA Zwevegem – Belgio. Ci riserviamo eventuali modifiche. Le informazioni fornite descrivono i nostri prodotti solo in forma generica. Per maggiori informazioni, sono disponibili su richiesta le specifiche dei prodotti.

© 2010 Bekaert

Progettato da apuntabe - 7.10.09 - 09/2010