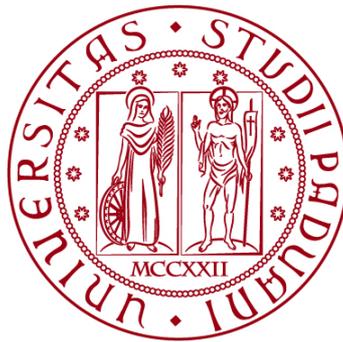


**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE  
*Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering*

Corso di Laurea Magistrale in Strutture



TESI DI LAUREA

**INFLUENZA SULLE PRINCIPALI PROPRIETÀ MECCANICHE,  
DALL'AGGIUNTA DI FIBRE IN BASALTO ALLE MALTE  
CEMENTIZIE**

Relatore:  
Chiar.mo PROF. : CARLO PELLEGRINO

Laureando : ALBAN BEQIRI  
2105705

**ANNO ACCADEMICO 2021-2022**

## Sommario

1 - Introduzione .....	3
2 – Calcestruzzi fibrorinforzati.....	4
2.1 – Cenni storici .....	4
2.3 - Proprietà del calcestruzzo fibrorinforzato .....	5
2.3.1 - Allo stato fresco.....	5
2.3.2 - Allo stato indurito.....	6
2.2 – Fibre .....	9
2.4 – Tipologie di calcestruzzi fibrorinforzati .....	12
2.4.1 - Fibre in acciaio (Steel Fiber Reinforced Concrete) .....	12
2.4.2 - Fibre in vetro (Glass Fiber Reinforced Concrete) .....	17
2.4.3 - Fibre in basalto (Basalt Fibre Reinforced Concrete).....	20
2.4.4 - Fibre naturali (Natural Fibre Reinforced Concrete).....	22
2.4.5 - Fibre sintetiche (Synthetic Fiber Reinforced Concrete) .....	25
2.4.6 - Fibre in carbonio (Carbon Fiber Reinforced Concrete) .....	27
2.5 – Normativa di riferimento.....	30
3 - Determinazione delle resistenze meccaniche su provini di dimensioni 40x40x160 mm.....	31
3.1 - Principio.....	31
3.2 – Materiali impiegati .....	32
3.2.1 - Aggregato .....	32
3.2.2 - Cemento .....	42
3.2.3 - Acqua.....	42
3.2.4 - Fibre in basalto .....	42
3.3 – Realizzazione provini .....	43
3.4 - Condizionamento dei provini .....	44
3.5 – Prova a flessione.....	45
3.5.1 – Descrizione prova .....	45
3.5.2 – Elaborazioni dei dati .....	47
3.6 – Prova a compressione.....	51
3.6.1 – Descrizione prova .....	51
3.6.2 – Elaborazioni dei dati .....	52
4 - Determinazione delle resistenze meccaniche su provini di dimensioni 100x100x500 mm.....	57
4.1 – Principio .....	57
4.2 – Materiali impiegati .....	57
4.2.1 - Aggregato .....	57
4.2.2 - Cemento .....	65

4.2.3 - Acqua.....	65
4.2.4 - Fibre in basalto .....	65
4.3 – Realizzazione dei provini .....	66
4.4 – Condizionamento dei provini .....	69
4.4 – Prova ritiro .....	70
4.4.1 – Descrizione della prova.....	70
4.4.2 – Elaborazione dati .....	71
4.5 – Prova statica modulo elastico secante .....	73
4.5.1 – Descrizione prova .....	74
4.5.2 – Elaborazione dati .....	74
4.6 – Prova dinamica per modulo elastico .....	77
4.6.1 – Descrizione della prova.....	77
4.6.2 – Elaborazione dati .....	82
5 – Conclusioni.....	88
Bibliografia.....	89

## 1 - Introduzione

I compositi cementizi, come il calcestruzzo o la malta, ricoprono un grande interesse nel settore civile delle costruzioni. Sono materiali estremamente versatili, caratterizzati da molteplici pregi tra cui alti valori resistenti, durabilità nel tempo, capacità di definire particolari forme, e molto altro.

Ciò non limita l'interesse nella persecuzione dell'innovazione. I compositi cementizi presentano un principale difetto ovvero la debole resistenza a trazione, la quale solitamente si aggira su valori pari ad un decimo della resistenza a compressione. Risulta perciò di interesse cercare di colmare tale difetto.

Grazie al laboratorio di ricerca EcamRicert si sono analizzati i benefici dell'aggiunta di fibre di basalto nelle malte, realizzando provini al fine di determinare le principali caratteristiche resistenti. Sono state scelte le fibre di basalto, ottenute tramite rocce vulcaniche, per ricercare materie più ecosostenibili; con il fine di ridurre il costo energetico di produzione.

Oltre a ciò, si è indagata la prova per la definizione del modulo elastico dinamico.

## 2 – Calcestruzzi fibrorinforzati

Il calcestruzzo fibrorinforzato, noto anche come *FRC* o *Fiber Reinforce Concrete*, è un materiale composito ottenuto tramite l'aggiunta di fibre, discrete, discontinue all'interno della matrice cementizia al fine di migliorare le caratteristiche prestazionali del composto. Come è noto, il calcestruzzo possiede una resistenza a trazione modesta, circa di un ordine di grandezza inferiore al valore di resistenza a compressione, la quale viene a meno con la nascita e la propagazione delle prime fessure, causando una rottura fragile.

L'aggiunta di fibre, della medesima tipologia o di natura differente (composito ibrido), altera principalmente le caratteristiche resistenti meccaniche nella fase post-fessurativa fornendo un effetto di cucitura alle fessure e sotto l'azione assiale agente un contributo residuo di trazione, portando ad una rottura più duttile; maggiore sarà il contenuto di fibre all'interno della matrice cementizia maggiormente risulterà duttile il composito. Il contributo residuo di trazione prende il nome di tenacità.

### 2.1 – Cenni storici



*Figura 1 Mattoni rinforzati con paglia*

Il concetto di migliorare le prestazioni dei vari materiali adoperati non è di uso recente. È risaputo che circa 3500 anni fa al fine di migliorare le caratteristiche dei mattoni in argilla, essiccati al sole, si impiegavano come rinforzo crine di cavalli, paglia o altre fibre vegetali.

In seguito, una delle fibre maggiormente impiegata per i suoi grandi pregi, tra cui l'elevata resistenza meccanica, al fuoco, al calore, agli agenti chimici e dalle notevoli proprietà fonoassorbenti e

termoisolanti e caratterizzata da una buona capacità di legatura ai conglomerati cementizi fu la fibra di amianto. Ciò permise una produzione industriale fin dai primi anni del '900 portando l'impiego della fibra, non solo nel settore dell'edilizia ma bensì anche in molti altri: nell'impiego per coperture, tubazioni, canne fumarie, pavimentazioni, componenti di macchine, serbatoi, materiale termoisolante e molto altro ancora.

Nonostante fu un materiale impiegato fin dall'antichità, solamente negli ultimi decenni si arrivò a comprendere la tossicità ed i danni che provocava l'impiego di fibre in amianto, portando ad un veloce disuso ed alla ricerca di nuove fibre che potessero prendere il suo posto. Dagli anni 70, si passò all'impiego ed allo studio di nuove fibre (metalliche, minerali, ecc.) anche con il desiderio di ottenere caratteristiche tecniche superiori a quelle ottenute nel corso degli anni.

## 2.3 - Proprietà del calcestruzzo fibrorinforzato

### 2.3.1 - Allo stato fresco

L'aggiunta di fibre all'impasto cementizio comporta una perdita di lavorabilità che tende ad aumentare principalmente sia all'aumentare delle dimensioni della fibra impiegata che nei calcestruzzi rispetto alle malte. Questo è dovuto al fatto che nei calcestruzzi vengono impiegati aggregati di diametro maggiore rispetto alle malte, limitando dunque il volume in cui si possa disperdere, e accentuando una cattiva lavorabilità; con la successiva riduzione delle prestazioni attese. Tutte le fibre risentono del problema sopracitato e risulta doveroso impiegare adeguati accorgimenti al fine di raggiungere una buona lavorabilità, la quale permette di conseguire ad una dispersione ottimale delle fibre, senza ridurre la percentuale di dosaggio. Tra gli accorgimenti che si possono attuare, risultano:

- Impiego di fibre con un rapporto d'aspetto non elevato;
- Impiego di aggregati con diametri ridotti e/o l'aumento della frazione di sabbia nei calcestruzzi;
- Impiego di ceneri volanti ed additivi aeranti, raggiungendo una fluidità e plasticità maggiore nei calcestruzzi;
- Impiego di additivi fluidificanti o superfluidificanti, al fine di ottenere una lavorabilità al pari di calcestruzzi in assenza di fibre. L'aumento di dosaggio degli additivi sopracitati, per far fronte all'aumento di fibre o di fibre con un rapporto d'aspetto elevato, non aumenta progressivamente la fluidità e la plasticità del composito ed oltrepassato un valore limite di dosaggio si giunge ad una segregazione del calcestruzzo;
- Impiego di fumi di silice ed additivi superfluidificanti, utili principalmente nella fase di pompaggio del calcestruzzo fibrato (*spritz - beton*) al fine di ridurre lo sfrido di materiale, garantendo una maggiore coesione ed adesione, aumentando anche le prestazioni meccaniche di resistenza.

### 2.3.2 - Allo stato indurito

#### Resistenza a compressione

La presenza di fibre, generalmente, tende a ridurre la fragilità del composito senza influenzare significativamente il comportamento a compressione. Fino a basse percentuali di dosaggio, tipicamente al di sotto del 1% di volume, non si riscontrano miglioramenti prestazionali e dunque il comportamento a compressione di calcestruzzi fibrorinforzati, tipicamente e per semplicità, viene assimilato al comportamento di calcestruzzi ordinari.

#### Resistenza a trazione e flessione

La presenza delle fibre influenza notevolmente il comportamento a trazione del composito. Esse svolgono sia un compito di cucitura nella fase post-fessurativa che nella distribuzione di nuove microfessure, le quali permettono di ridistribuire le azioni agenti, dalla matrice alle fibre, e di garantire il raggiungimento di valori resistenti maggiori; in base alle loro proprietà.

In assenza delle fibre, il solo conglomerato cementizio presenterebbe in fase post-fessurativa una immediata rottura fragile per valori resistenti modesti. L'aggiunta di fibre conferisce una importante resistenza residua a trazione, denominata tenacità, la quale risulta dipendere da più parametri, tra cui:

- La tipologia delle fibre impiegate;
- L'orientamento delle fibre: nota l'azione agente può risultare di interesse indirizzare l'azione resistente in una direzione designata, mediante l'impegno di filamenti di fibre;
- Rapporto di forma: fibre caratterizzate da una maggiore lunghezza incrementano, solitamente, la resistenza a trazione per un effetto di ancoraggio, per aderenza, al conglomerato cementizio;
- Il contenuto del volume di fibre: l'aumento del dosaggio, principalmente, contribuisce all'aumento proporzionale della resistenza a trazione e del comportamento deformativo in fase post-fessurativa;
- Distanza delle fibre: risultando correlato al dosaggio, esso caratterizza un aumento della resistenza a trazione al diminuire della distanza delle fibre.

La flessione e la pura trazione risultano avere comportamenti nettamente differenti; elementi sollecitati a flessione possono essere caratterizzati da un comportamento post-fessurativo di tipo incoerente mentre elementi sollecitati unicamente per trazione pura possono essere caratterizzati da un comportamento post-fessurativo di tipo degradante nonostante presentino il medesimo contenuto in volume di fibre e di caratteristiche. Ciò è dovuto al fatto che, nelle prove a flessione, la fessurazione inizia prima del raggiungimento del carico di picco permettendo in alcuni casi di stabilizzare la propagazione della fessura all'aumentare del carico e generando così un comportamento incoerente per sola flessione.

## Tenacità

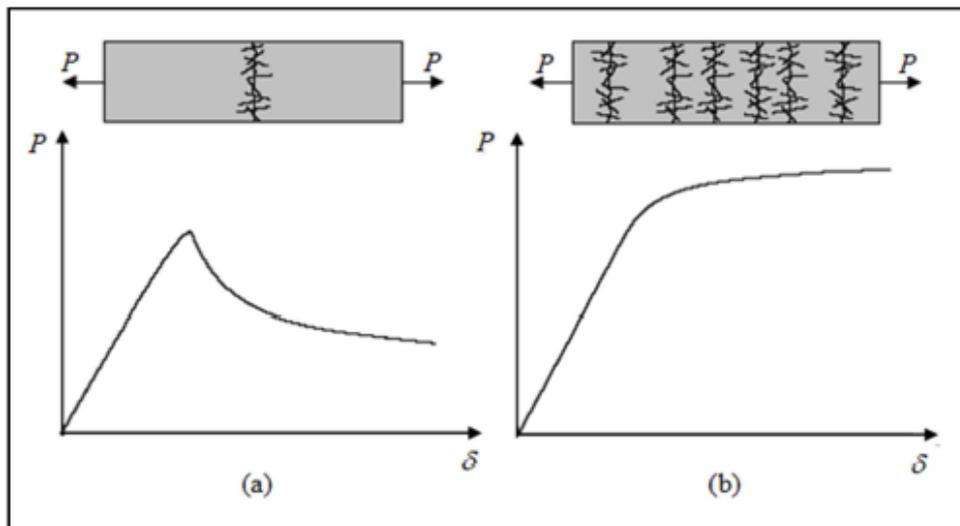


Figura 2 Curva di carico  $P-\delta$  per basse e alte percentuali di fibre

La tenacità, definita come l'energia totale assorbita prima della rottura, permette di definire la tipologia di rottura: se fragile oppure duttile; quest'ultima può presentare un comportamento:

- Incrudente;
- Rigido-Plastico;
- Degradante.

Al fine di definire la tipologia di rottura duttile, dalle istruzioni formulate dal Consiglio Nazionale delle Ricerche, *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato*, viene definito un range del contenuto in volume delle fibre al fine di identificare il comportamento in fase post-fessurativa se risulti degradante oppure incrudente. Per bassi dosaggi, ovvero 0.2-2%, si ha un comportamento degradante mentre per alti dosaggi, ovvero 2-8%, il comportamento potrebbe risultare incrudente; si è detto "potrebbe risultare incrudente" perché un comportamento incrudente dipende anche dagli altri parametri geometrici, fisici e chimici delle fibre impiegate.

La differenza tra i compositi cementizi ordinari e fibrorinforzato risulta che nei calcestruzzi ordinari, la tenacità risulta dipendere dalla capacità della propagazione delle fessure viceversa nei compositi fibrorinforzati le fessure non possono aprirsi fino che non ci sia un allungamento o uno scorrimento o uno strappo delle fibre, garantendo così una energia assorbita maggiore. L'orientamento delle fibre, il contenuto in volume ed il rapporto di forma influenzano la tenacità del composito.

## Duttilità

Dagli anni '60, a partire dalle teorie inerenti gli studi sull'avanzamento e la crescita di una fessura da parte di Griffith e di Irwin, numerosi studiosi hanno contribuito ad analizzare il comportamento deformativo ed a formulare modelli di rottura, i quali potessero rappresentare coerentemente il collasso.

Dalle ipotesi semplificative delle teorie di Irwin, si dimostrò che lo sforzo di prima fessurazione era inversamente proporzionale alla distanza tra le varie fibre, assumendo come ipotesi iniziali che le fibre risultassero fili di rigidità infinita rispetto alla matrice cementizia. Al fine di raggiungere un

comportamento duttile, è necessario non solo ridurre la distanza tra le varie fibre, ovvero aumentare il contenuto in volume, ma anche ridurre il diametro delle fibre stesse; un aumento del diametro non risulterebbe efficiente al fine di vincolare l'apertura delle fessure ed il loro avanzamento.

Tra i vari modelli per analisi del collasso, si ricorda il modello di Romualdi, il quale assumeva l'avanzamento della fessura entro lo spazio circoscritto della fessura, e il modello di Averson-Cooper-Kelly, il quale ipotizzava l'avanzamento della fessura su più fibre. Si ricordano anche gli studi sempre di Averson, Cooper e Kelly inerenti al meccanismo di rottura assumendo come ipotesi iniziale la presenza di una matrice fragile ed una fibra duttile e viceversa con la successiva distinzione tra la formazione di una unica fessura oppure di molteplici.

Si è potuto dunque constatare che i compositi fibrorinforzati risultano più duttili rispetto ai soli compositi cementizi.

### Resistenza alla fatica

La resistenza a fatica risulta aumentare all'aumentare del contenuto delle fibre in volume. Come già detto, l'aggiunta delle fibre permette, tramite un effetto di cucitura, di limitare l'avanzamento delle fessure, ovvero dello stato deformativo, delle azioni agenti, tra queste anche la fatica.

### Durabilità

La durabilità del composito, ovvero la conservazione delle caratteristiche delle resistenze meccaniche a lungo termine, risulta influenzato dalle proprietà fisico-chimiche degli elementi che compongono il composito. In base alle azioni agenti aggressive circostanti, vi è la scelta della fibra da impiegare e le successive attuazioni tecniche per limitare il decadimento dei valori resistenti nel tempo.

## 2.2 – Fibre

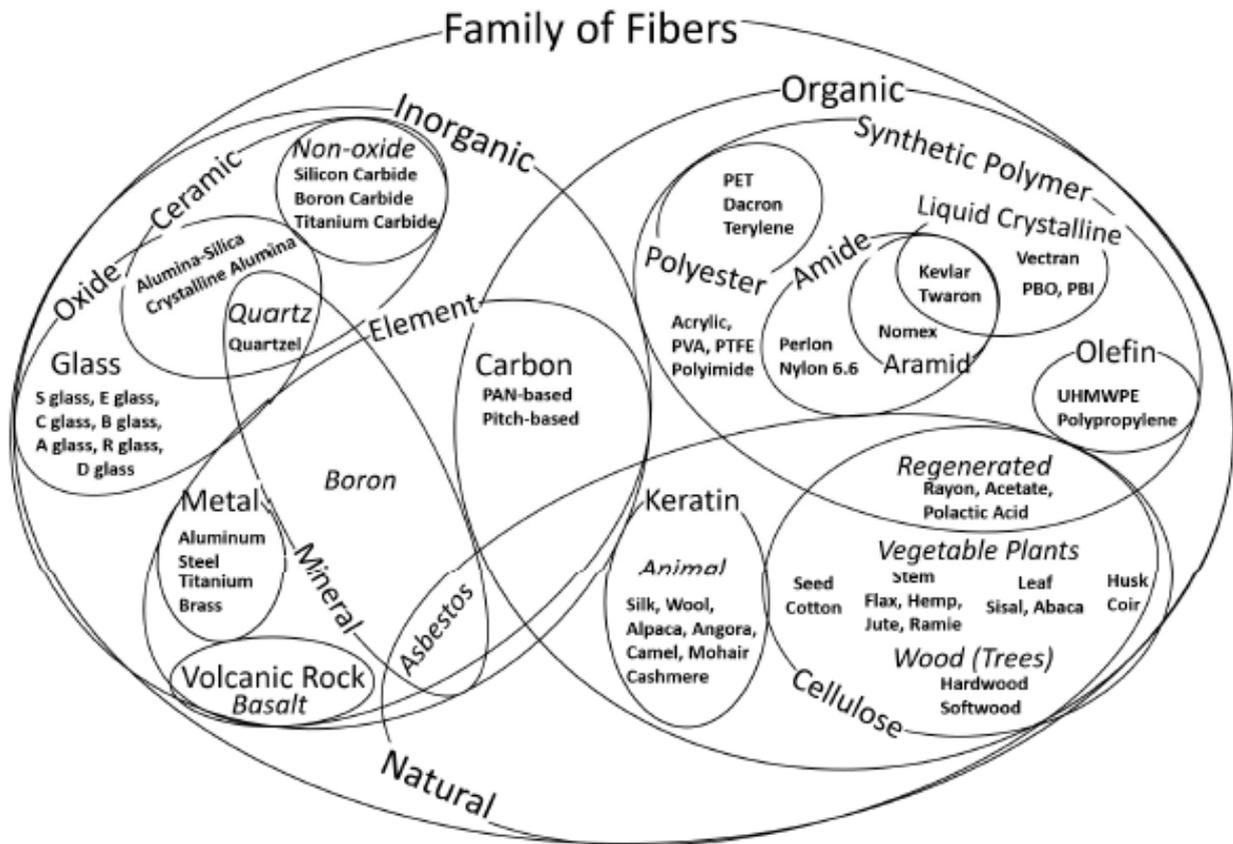


Figura 3 Tipologie di fibre disponibili

Al giorno d'oggi, il mercato fornisce un'ampia scelta sulle differenti tipologie di fibre e sta al progettista scegliere la fibra più adatta allo scopo di interesse ed il suo contenuto in volume ottimale.

Una prima distinzione può essere svolta differenziando le fibre in funzione del modulo elastico:

- Fibre dal modulo elastico più basso rispetto alla matrice cementizia, denominate duttili, tra cui cellulosa, nylon, polipropilene, poliacrilonitrile, ecc., le quali mediante una azione di cucitura delle microfessurazioni da ritiro prevengono e migliorano la durabilità del composito e la resistenza agli urti;
- Fibre dal modulo elastico maggiore rispetto alla matrice cementizia, denominate rigide, tra cui amianto, vetro, acciaio, carbonio, kevlar, ecc., le quali aumentano la resistenza a compressione e tutte le restanti resistenze correlate.

Tipo di fibra	Diametro equivalente [10 <sup>-3</sup> mm]	Densità [g/mm]	Resistenza a trazione [MPa]	Modulo di elasticità [GPa]	Deformazione ultima [%]
Acrilica	12.7 - 104.14	1.16 - 1.18	269 - 1000	13.8 - 19.3	7.5 - 50
Arammide	10.16 - 11.94	1.44	2344 - 2930	62	4.4
Carbonio	7.62 - 17.78	1.6 - 2.15	2482 - 3999	27.5 - 482.6	0.5 - 2.4
Nylon	22.86	1.14	965	5	20
Poliestere	19.81	1.34 - 1.39	227 - 1103	17	12 - 150
Polietilene	25.4 - 1016	0.93 - 0.96	76 - 586	5	3 - 80
Polipropilene	-	0.90 - 0.91	138 - 689	3.4 - 4.8	15
Polivinilalcol	14 - 600	1.30	880 - 1600	25 - 40	6 - 10
Amianto	0.02 - 0.04	2.6	3200	160	2 - 3
Vetro	8 - 15	2.78	2400	70 - 80	2
Cellulosa	20 - 120	1.5	500 - 900	4 - 70	-
Acciaio	100 - 500	7.8	500 - 2000	200	0.5 - 3.5

*Figura 4 Proprietà delle fibre*

Successivamente altri parametri che influenzano la scelta, risultano:

- La disponibilità: anche se il mercato presenta un'ampia scelta e di rado ci sono dei blocchi nella disponibilità, ciò influenza principalmente i paesi in via di sviluppo, i quali prediligono l'uso di fibre naturali autoctone con il vantaggio di avere prezzi modesti;
- Dalle caratteristiche fisico-chimiche-meccaniche: le quali definiscono le caratteristiche resistenti e la durabilità a lungo termine;
- Dalla disperdibilità nella matrice cementizia: la quale dipende principalmente sia dalla forma che dalle caratteristiche della fibra;
- Caratteristiche geometriche.

Le principali caratteristiche geometriche risultano:

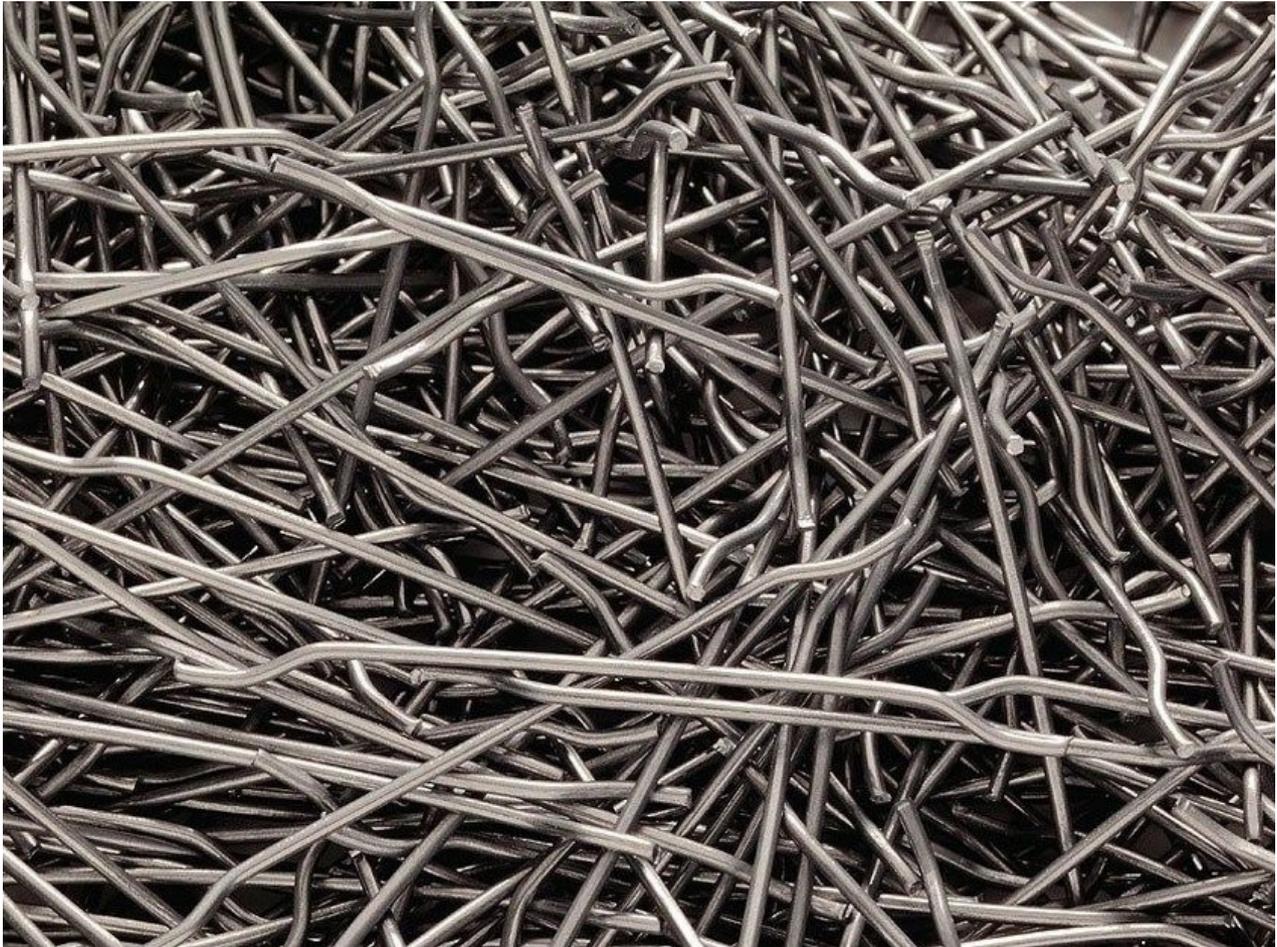
- La forma: la quale può risultare di differente tipologia: rettilinea, ondulata, uncinata, nervata, con le estremità schiacciate ecc. Dalla tipologia scelta, si migliorano le prestazioni di adesione ed ancoraggio della fibra alla matrice cementizia, andando a discapito di una possibile difficoltà nella miscelazione;
- La lunghezza: in genere si preferiscono dimensioni ridotte, qualche decina di millimetro, al fine di garantire una adeguata miscelazione del composito;
- Il diametro equivalente: risulta il diametro di un cerchio avente la medesima area della sezione trasversale della fibra;
- Il rapporto d'aspetto: ovvero il rapporto tra la lunghezza della fibra ed il diametro equivalente, il quale risulta un parametro molto rilevante. Solitamente le fibre maggiormente adoperate, le quali sono caratterizzate da una lunghezza variabile tra 1 e 80 mm, presentano un rapporto d'aspetto tra 50 e 400. All'aumentare del rapporto, ovvero all'aumentare della lunghezza della fibra, risulterà molto più difficile ottenere un composito omogeneo privo di grovigli e nidificazioni anche con l'aiuto meccanico della vibrazione. Se da un lato riducendo il rapporto d'aspetto si ottiene una maggiore lavorabilità dalla altra

parte si ha una riduzione delle resistenze dovuto alla riduzione della lunghezza di aderenza tra la matrice e la fibre, comportando la richiesta di un aumento del contenuto in volume al fine di garantire le prestazioni necessarie.

- L'origine, ovvero come possono essere classificate le fibre:
  - Fibre metalliche;
  - Fibre di carbonio;
  - Fibre di vetro;
  - Fibre minerali tra cui impropriamente le fibre di basalto, la quale rientra nelle rocce vulcaniche;
  - Fibre naturali: fibre di cellulosa, vegetali, di semi, di lino, di canapa, di iuta, di foglia, di sisal, di buccia o frutto, di legno, di cheratina, di lana, di seta, ecc.;
  - Fibre polimeriche sintetiche: fibre di poliestere, polietilene, polipropilene, acriliche, aramidiche, ecc.

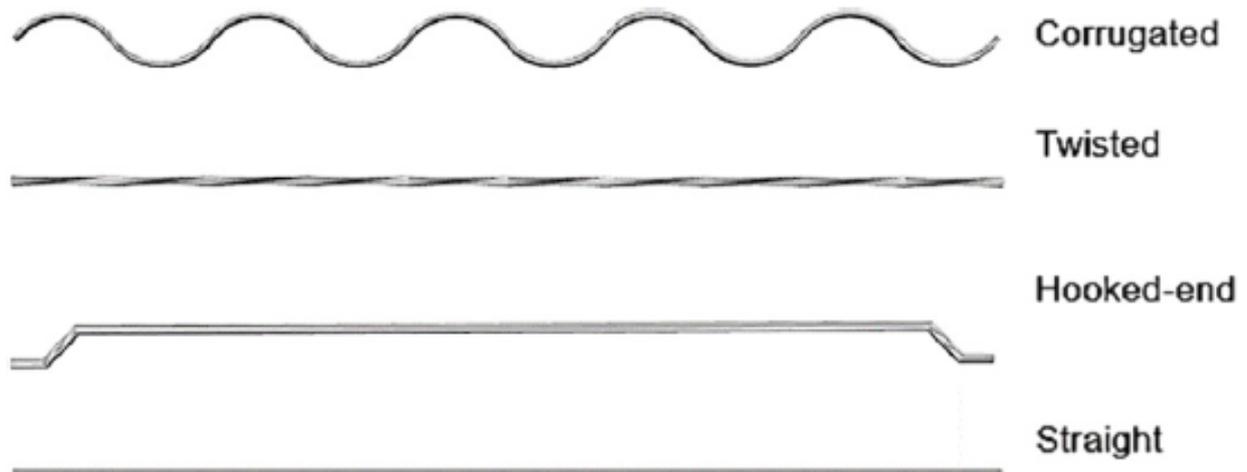
## 2.4 – Tipologie di calcestruzzi fibrorinforzati

### 2.4.1 - Fibre in acciaio (Steel Fiber Reinforced Concrete)



*Figura 5 Fibre in acciaio uncinata*

La nascita e l'evoluzione dell'uso delle fibre di acciaio nei calcestruzzi risale al 1847 con i brevetti di Lambot, il quale aveva previsto l'impiego di fibre continue di acciaio al conglomerato, e Berard, all'impiego di frammenti di scarti ferrosi come rinforzo. In seguito ci sono stati ulteriori brevetti, i quali si sono focalizzati sulla alterazione della forma al fine di ottenere capacità resistenti migliori, tra cui: l'impiego di piccole fibre a superficie scabra con l'estremità inclinate o annodate, le quali miglioravano l'adesione tra le fibre e la matrice cementizia, all'uso di anelli in acciaio, proposto da Etheridge nel 1933 al fine di incrementare la resistenza a fessurazione ed a fatica e all'impiego di fibre arrotolate continue o elicoidali, proposto da Costantinesco nel 1954, al fine di migliorare la resistenza a fessurazione e l'assorbimento di energia da parte del calcestruzzo. Se fino al 1960 vi è stata una fase di sperimentazione, con i brevetti del 1962, acquisto dalla Battelle Development Corporation, e del 1973, appartenente alla multinazionale belga Bekaert, si raggiunse una produzione di calcestruzzi fibrorinforzati a livello industriale.



**Fig. 1. Some frequently used steel fibres.**

*Figura 6 Alcune forme disponibili per fibre in acciaio*

Il mercato offre al giorno d'oggi numerose tipologie di fibre, di lunghezza variabile tra 6 e 70 mm e un diametro equivalente compreso tra 0.15 e 1.20 mm, le quali differiscono per:

- Processo produttivo: fibre ottenute per lavorazione meccanica, fibre ottenute da filo trafilato oppure per taglio di lamiera;
- Forma: possono risultare rettilinee, ondulate o di differenti tipologie (per tutta la lunghezza o semplicemente lungo le estremità) al fine di incrementare l'adesione al composito cementizio;
- Materiale, in funzione del contenuto di carbonio (acciai ad alto e a basso contenuto di carbonio) oppure mediante l'impiego di differenti tipologie di acciai come ad esempio acciai inox.

### Campi di impiego

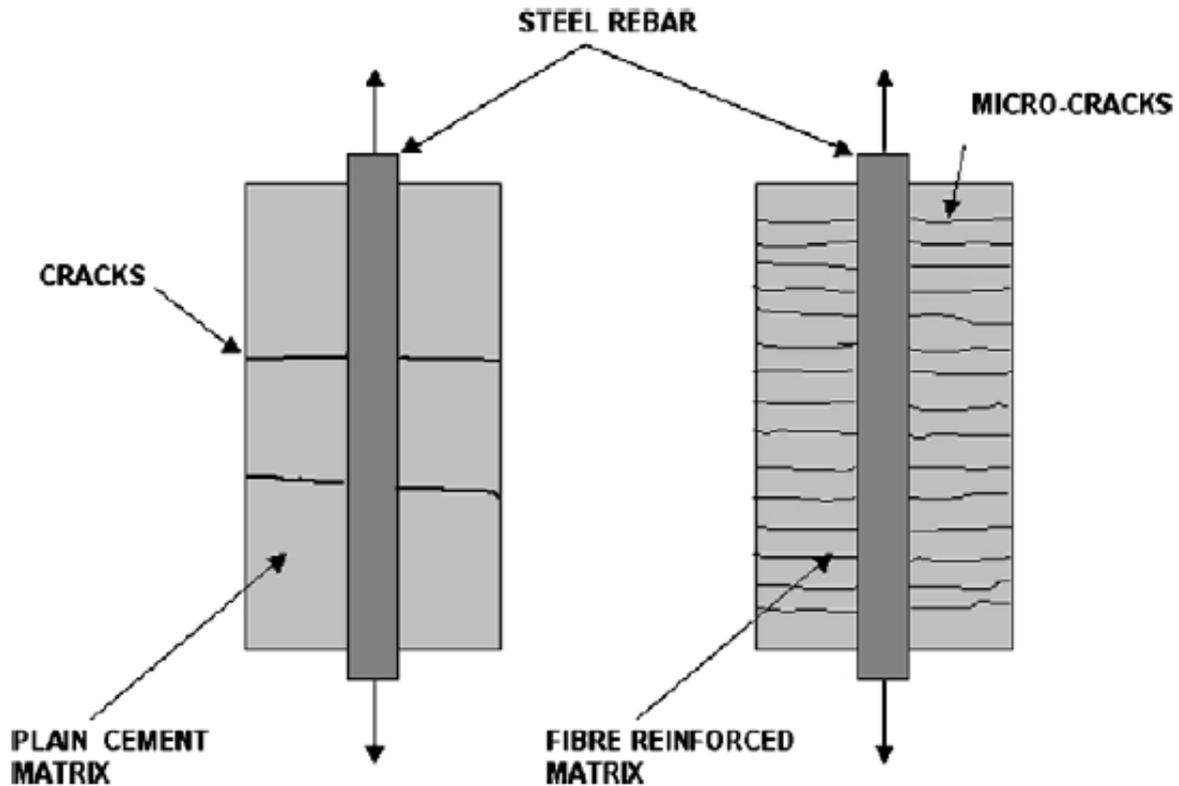
Risultando una fibra facilmente reperibile, dal basso prezzo e dalle ottime prestazioni, viene impiegata largamente per solai e pavimentazioni industriali, ma anche in strutture esposte ad urti e/o a fatica, in colonne/pilastri soggetti ad azioni sismiche, assieme ad armatura ordinaria, in strade, in travi pretese per ponti, e molto altro.

### Dosaggio

Solitamente, bassi contenuti in volume, inferiori al 1%, vengono impiegati al fine di limitare le fessurazioni plastiche da ritiro con un aumento minimo di resistenza mentre valori medi, tra l'1 e il 2%, vengono impiegati come supplemento dell'armatura principale senza dover integrare tecniche speciali di lavorazione ed infine contenuti alti, ovvero superiori al 2%, forniscono miglioramenti notevoli nella tenacità, duttilità e nell'incrudimento.

## Pregi

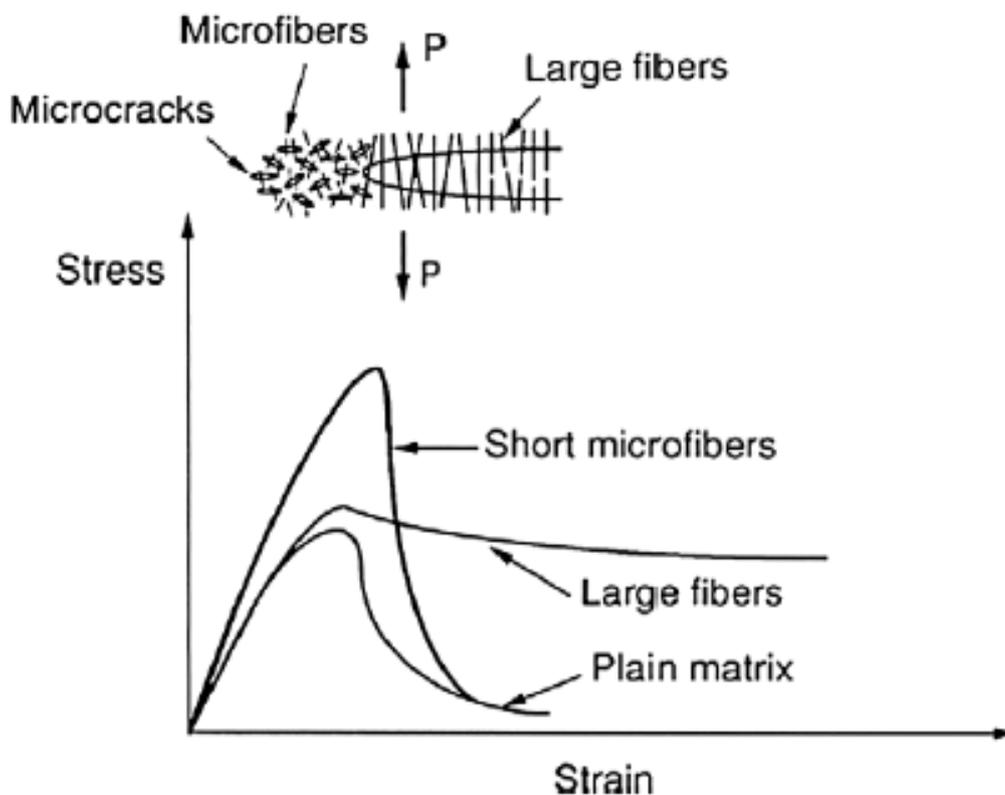
Nonostante, si sia evidenziato da numerosi studi che l'aggiunta di fibre in acciaio non incrementi considerevolmente la resistenza a compressione o di pura trazione, esse ricoprono un ruolo decisivo nella duttilità dell'elemento; il loro impiego permette di distribuire le fessure omogeneamente, limitando la profondità e garantendo una resistenza residua di trazione in fase post-fessurativa.



**Fig. 2.** Crack pattern in reinforced concrete (RC) and fibre reinforced concrete (FRC) elements subjected to tension.

*Figura 7 A sinistra un calcestruzzo non rinforzato ed a destra un calcestruzzo fibrorinforzato con una dispersione adeguata delle fessure*

Se da un lato l'impiego di fibre corte (*short microfibers*) svolge una funzione di controllo dell'apertura e della propagazione delle microfessure, grazie alla loro dispersione ottimale all'interno della matrice cementizia, l'impiego di fibre lunghe (*large fibers*), tra i 50 e 80 mm, svolge sia una funzione di controllo dell'apertura delle macrofessurazioni e all'incremento dei valori resistenti in fase post-fessurativa.



**Fig. 3.** Structures of long and short fibres controlling the crack propagation; after Betterman et al. [8].

*Figura 8 Distinzione del contributo nel conglomerato cementizio tra le fibre fine e le fibre lunghe*

Oltre a ciò, si sono riscontrati miglioramenti nella resistenza agli sbalzi termici, all'usura, nella durabilità del composito ed infine agli urti e alle azioni dinamiche; queste ultime sono state analizzate mediante numerosi prove con l'ausilio di una massa battente, di massa e altezza nota a priori, contando il numero di colpi necessari per fratturare il provino. Si è notato che il numero di colpi necessari per raggiungere la frattura era di un ordine maggiore rispetto ai compositi ordinari, se non di più in alcuni casi particolari, mantenendo un grado di compattazione a deformazione avvenuta, tipicamente dei materiali duttili.

La presenza di fibre al composto aumenta al più, oppure in alcuni casi diminuisce, del 5% il valore della resistente a compressione mentre considerando un contenuto alto in volume pari al 3%, valore limite dato che oltre si richiedono tecniche speciali di lavorazione, si è riscontrato un aumentò della resistenza a trazione del 30%, valori che risultano non significativi. È da dire che i dati sopra riportati, risultano ottenuti da indagini risalenti agli anni '90 ma non perciò perdono validità. Anche le norme attuali inerenti ai calcestruzzi fibrorinforzati, a base di fibre in acciaio, consigliano di assumere il valore resistente a compressione del solo composito non rinforzato e in generale non si ha interesse nel raggiungere valori elevati di pura resistenza a trazione.

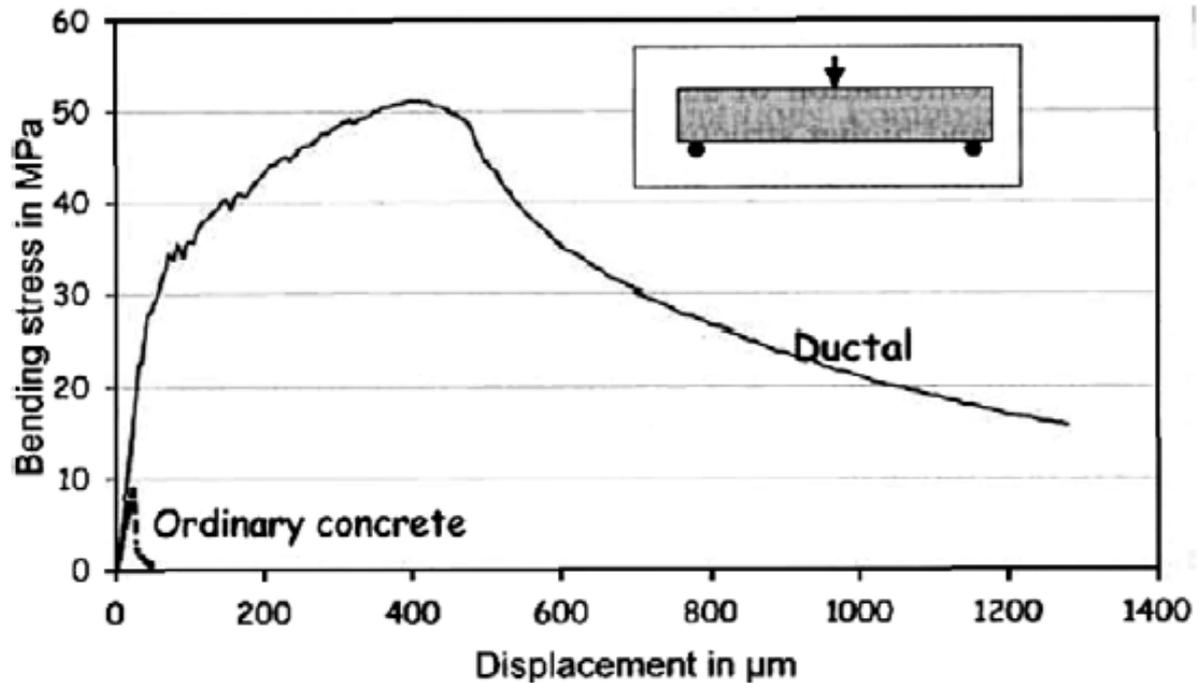


Figura 9 Confronto del comportamento tra un conglomerato ordinario ed uno fibrorinforzato mediante un grafico carico-spostamento

Viceversa, nella resistenza a flessione si è notato che l'aumento del contenuto in volume portasse ad un aumento importante della resistenza ultima a flessione con il raggiungimento di elevate rotazioni angolari, prima del collasso. Come si può notare nell'immagine soprastante, l'incremento di resistenza risulta elevato nonostante si abbia un comportamento leggermente degradante. Da un altro lato, la capacità di arrivare a grandi deformazioni permette una redistribuzione delle sollecitazioni, definendo un comportamento duttile a livello strutturale.

In fine, il valore di tensione di prima fessure non varia al variare del contenuto di fibre dato che dipende dalla sola matrice cementizia.

### Difetti

Le fibre, derivando dall'acciaio, sono soggette a corrosione e necessitano di una adeguata impermeabilizzazione di fronte agli agenti aggressivi. Dopo uno studio perdurato per 10 anni, su travi esposte in zone marine degli Stati Uniti d'America ed in Australia, si è potuto constatare che se il composito fibrorinforzato non presentasse fessure, da poter esporre le fibre interne all'ambiente aggressivo, non vi era pericolo nella perdita di resistenza; a parte per elementi di dimensioni minori di 20 mm ma considerando le modeste dimensioni non ricoprono interesse rilevante.

Invece, nei calcestruzzi fibrorinforzati che presentavano fibre emergenti all'esterno oppure calcestruzzi fessurati ove le fibre risultavano esposte agli agenti, aggressivi, atmosferici e marini erano soggetti a corrosione unicamente se si verificava l'esposizione. Le fibre inglobate all'interno della matrice cementizia integra non presentavano alcun difetto e ciò è dovuto al fatto che le fibre risultano difese dalla soluzione alcalina che riempie i pori del conglomerato.

Al fine di sicurezza, si sono svolte ulteriori prove in laboratorio cercando di aggravare le condizioni circostanti, con la presenza di alte quantità di ioni cloruro, ma ciò ha confermato quanto detto perciò risulta sufficiente garantire un minimo copriferro.

#### 2.4.2 - Fibre in vetro (Glass Fiber Reinforced Concrete)



*Figura 10 Fibre in vetro rettilinee*

Un primo utilizzo delle fibre in vetro risale agli anni '30 per la realizzazione di isolanti elettrici e resine termoindurenti e solamente negli anni '40 si è giunto all'impiego nei compositi cementizi, scoprendo la debole resistenza all'attacco alcalino; il quale ne comprometteva le caratteristiche meccaniche e la durabilità del composito. Per ovviare al difetto intrinseco, le fibre vennero impiegate assieme a cementi a bassa alcalinità, tra cui i cementi alluminosi, fino alla scoperta delle fibre di vetro alcalino-resistenti, denominate AR. Grazie agli studi di A. J. Majumdar, si arrivò alla produzione industriale, a partire dal 1971, di fibre alcalino-resistenti impiegando vetro contenente ossido di zirconio. In seguito, per ovviare a problemi di durabilità e del calo delle caratteristiche resistenti, dovute allo stoccaggio in ambiente umido, si ridusse la alcalinità della matrice riducendo il contenuto in volume del cemento Portland con aggiunte pozzolaniche. In fine, negli anni '80 vennero analizzate l'aggiunta di polimeri (quantitativi di lattici polimerici) alla matrice e l'immersione delle fibre di vetro in melme di silica-fumo (microsilice) prima dell'inserimento nel composito al fine di migliorare sia la durabilità che il decadimento delle caratteristiche meccaniche nel tempo. L'aggiunta dei polimeri ha mostrato miglioramenti in ambiente asciutto grazie alla formazione, da parte dei polimeri, di una pellicola protettiva la quale però non era in grado di ricoprire completamente le fibre e risultava dunque perforabile, invece, l'aggiunta di fumo di silice ha mostrato grandi miglioramenti grazie sia all'attività pozzolanica intrinseca che per le ridotte dimensioni, di circa  $0.1\ \mu\text{m}$ , permettono un rivestimento delle fibre ottimale.

## Dosaggio e sistema di produzione

I compositi cementizi fibrorinforzati con l'aggiunta di fibre in vetro sono caratterizzati da rapporti a/c minori, tipicamente 0.3 - 0.38, e da contenuti in volume tra 3.5- 5 % del peso totale.

In base al metodo di produzione, se pre-mix oppure spray-mix, si prevedono lunghezze di impiego delle fibre e dosaggi differenti. Il metodo *pre-mix*, a premiscelazione, prevede la miscelazione del fibre, con una lunghezza tipica di 12 mm ed un contenuto in volume pari al 3,5%, assieme al conglomerato cementizio. Si possono impiegare anche lunghezze maggiori fino ai 25 mm ma ciò comporta una considerevole perdita di lavorabilità. Invece, il metodo *spray-mix*, a spruzzo, prevede la miscelazione del conglomerato cementizio con l'aggiunta successiva delle fibre, di lunghezza generalmente 25-50 mm e con un contenuto in volume pari al 5%, mediante l'uso di una pistola.

## Campi di impiego

Le fibre in vetro sono impiegate maggiormente per la realizzazione di pannelli e rivestimenti di facciate ma anche per elementi di finitura in ambito edilizio e per solai e coperture leggere in ambito strutturale.

## Pregi

Inizialmente si potrebbe dedurre che le fibre di vetro, le quali derivano da un materiale fragile, possano al più migliorare le caratteristiche resistenti meccaniche nella sola fase elastica ma ciò non risulta corretto. Le fibre, le quali presentano tipicamente diametri dell'ordine dei micron ( $10^{-6}$  m), non presentano un comportamento fragile e contribuiscono ad incrementare la tenacità dei compositi ove viene impiegata. Non di meno, si hanno ulteriori pregi nell'impiego dei compositi cementizi, tra cui:

- Leggerezza: solitamente vengono impiegate assieme ad inerti fini ad alto contenuto di silice (circa al 96%).
- Durabilità: se vengono implementati tutti gli accorgimenti necessari, in funzione della tipologia dell'opera e dell'ambiente circostante, si arriva a vantare una bassa manutenzione nel tempo ed una impermeabilità sia all'acqua che ad agenti chimici;
- Impiego Architettonico: ottimale per restauri o ristrutturazioni di edifici;
- Prestazionali: come già detto, l'aggiunta di fibre discrete permette di incrementare la resistenza a trazione e la correlata capacità di sviluppare fessurazioni, riducendo la fragilità del solo conglomerato cementizio ordinario, ma anche di migliorare la resistenza agli urti;

## Difetti

Se da un lato il composito a base di fibre di vetro può vantare una buona resistenza ad attacchi chimici ciò è dovuto ai numerosi accorgimenti considerati ad hoc, i quali purtroppo complicano l'impiego delle fibre; tra cui:

- L'aggiunta di ossido di zirconio (ovvero biossido di zirconio  $ZrO_2$  e di torio), con un contenuto minimo del 16%, al fine di contrastare l'attacco chimico. Si possono anche prevedere aggiunte di cromo, silice, allumina, ittrio, ceneri di combustibili o fumi di silice al fine di incrementare la resistenza alcalina ma purtroppo ciò comporta costi elevati e difficoltà nella lavorazione;

- Impiego di cementi scelti i quali limitino la generazione di alcali e calce libera, tra cui, cemento ordinario Portland, cemento Alluminoso, oppure cementi a rapido indurimento.

Un ulteriore difetto delle fibre in vetro risulta il suo basso modulo elastico, generalmente tra 10 e i 25 GPa.

### 2.4.3 - Fibre in basalto (Basalt Fibre Reinforced Concrete)



*Figura 11 Fibre in basalto*

Le fibre di basalto derivano dalla lavorazione del basalto, una roccia vulcanica, composta da un contenuto di ossido di silice al 43 - 47%, ossido di alluminio al 11 – 13%, ossido di calcio al 10 – 12%, ossido di magnesio al 8 – 11% e differenti ossidi al restante 15%.

Le rocce basaltiche furono impiegate fin dall'antichità, grazie alla loro ampia disponibilità e durezza, per la realizzazione di strade. In seguito, dopo essere state estruse per la prima volta da Paul Dhe nel 1923, vennero impiegate unicamente nella ricerca a fini militari e solamente verso gli anni '90 si è arrivati ai primi utilizzi in differenti campi.

Il processo produttivo delle fibre in basalto risulta simile a quello per la realizzazione delle fibre in vetro con l'unica differenza che si necessita il raggiungimento di temperatura maggiori. Le fibre vengono ottenute da una prima fase di fusione, ad una temperatura di circa 1400-1450°C, e successivamente mediante un processo di estrusione si formano filamenti di diametro compreso tra i 9 e i 13 µm.

#### Campi di impiego

La fibra di basalto, la quale può vantare eccellenti caratteristiche meccaniche chimico-fisiche, risulta impiegata:

- Nei rinforzi per ponti, nelle gallerie, nella realizzazione di pannelli in aggiunta a fibre di carbonio, ecc.;
- Per l'isolamento acustico, termico ed in ambiente ad alte temperature;
- Nel settore chimico, per l'isolamento ad agenti acidi e alcalini;
- Nello sport, per la realizzazione di racchette da tennis, scii ecc.;
- Come sostituto per differenti fibre al fine di ridurre l'impatto ambiente.

## Pregi

Al fine di comprendere il loro potenziale risulta adatto confrontarle con le fibre di vetro. Entrambe migliorano le caratteristiche resistenti meccaniche del composito nonostante derivino da minerali, ovvero materie fragili, e le fibre di basalto presentano, come dimostrato in questi ultimi anni, caratteristiche nettamente migliori del vetro che la portano ad essere scelta anche di fronte ad altre fibre. Tra i numerosi pregi, si hanno:

- Leggerezza, presentano un peso specifico di circa  $2640 \text{ kg/m}^3$  nettamente inferiori al peso delle fibre metalliche;
- Durabilità, le fibre non risentono di alcun tipo di attacco chimico che sia dovuto ad un ambiente corrosivo, acido, alcalino o con la presenza di acqua a contatto;
- Prestazionali, l'aggiunta di fibre permette di incrementare la tenacità del composito, sia grazie ai valori a trazione resistenti, pari a circa  $4100 - 4800 \text{ MPa}$ , che alla durezza conferita dalle fibre, con il modulo elastico che risulta pari a circa  $100 \text{ GPa}$ . Inoltre, si è dimostrato un aumento della resistenza agli urti, alla fatica e ai cicli di gelo - disgelo.

Risultando resistenti ad azioni termiche, svolgono un ruolo eccellente anche nell'isolamento termico e ciò permette anche di conservare le caratteristiche fisiche meccaniche anche ad alte temperature. Oltre a ciò, presentano ottime caratteristiche di isolamento acustico ed elettriche;

Proprietà	Valori
Densità [ $\text{kg/m}^3$ ]	1850 - 2750
Modulo elastico [GPa]	80-115
Resistenza a trazione [MPa]	2600 - 4800
Punto di fusione [ $^{\circ}\text{C}$ ]	1400 - 1450
Allungamento [%]	2,4 - 3,15
Conducibilità termica [W/mk]	0,031 - 0,0038

*Figura 12 Proprietà meccaniche delle fibre di basalto*

- Ecosostenibilità, le fibre permettono di ridurre l'impatto ambientale del processo produttivo e di poter essere riciclate senza mostrare una perdita dei valori resistenti. In aggiunta al loro basso costo risultano una ottima variante, dato che presentano valori resistenti alti.

## Difetti

Le fibre di basalto, non sono in grado di superare i valori resistenti che l'acciaio e il carbonio sono in grado di raggiungere ed inoltre in base alla composizione chimica della roccia basaltica si hanno caratteristiche resistenti differenti.

#### 2.4.4 - Fibre naturali (Natural Fibre Reinforced Concrete)

Le fibre naturali sono state fin dall'antichità largamente impiegate per la realizzazione di opere civili, come per la costruzione della ziggurat di Dur-Kurigalzu in Mesopotamia, oltre 3500 anni fa, mediante l'aggiunta di crine di cavallo ai mattoni essiccati al fine di migliorare le caratteristiche resistenti. Con il passare dei secoli, il loro uso è perdurato in molte regioni del mondo, principalmente povere in via di sviluppo, per colmare la necessità, sempre più alta, di costruire nuove abitazioni dalle caratteristiche tecniche sufficienti e dai costi modesti. In seguito, le fibre naturali hanno avuto un grande interesse, in più settori, grazie alle loro proprietà meccaniche ed al ridotto impatto ambientale; con lo scopo iniziale di rimpiazzare le fibre di amianto ed in seguito con l'interesse di abbattere le emissioni di CO<sub>2</sub> e di concentrarsi sull'uso di fonti rinnovabili. Nell'ultimo anno, si è registrato un incremento della produzione, a livello mondiale, del 7,5% non solo nel settore civile ma anche in differenti settori: automobilistico, navale, ecc.

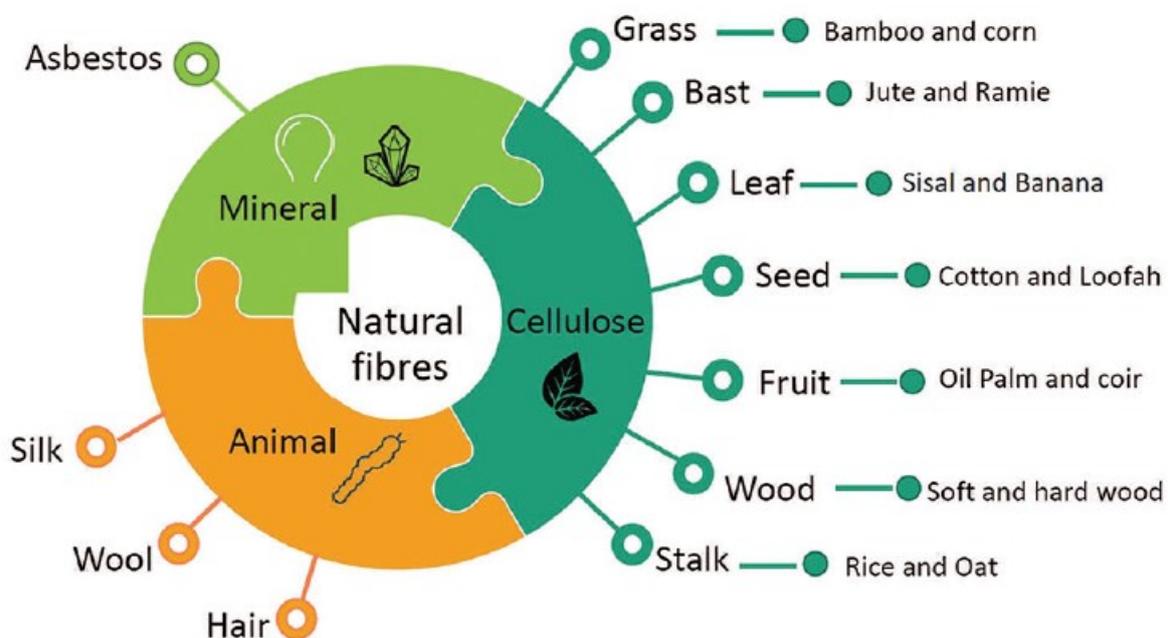


Figura 13 Classificazione fibre naturali

Le fibre naturali comprendono numerose sottocategorie, le quali possono essere raggruppate in tre macrogruppi in funzione dell'origine:

- Fibre Minerali: principalmente la fibra di amianto, la quale non può essere impiegata;
- Fibre Animali: setole (seta) oppure ottenute da bulbi piliferi (lana);
- Fibre Cellulosiche: da seme, da legno, dalle foglie e da frutto;

#### Campi di impiego e dosaggio

Fino ad ora, oltre per fini termoisolanti, le fibre sono state maggiormente impiegate per la realizzazione di pannelli di rivestimento per soffitti e pareti interne nel settore civile. Il dosaggio risulta dipendere principalmente dal tipo di fibra scelta e dalle sue dimensioni. Anche se da un lato si può contare su una maggiore leggerezza, superati certi valori di dosaggio si incombe a grovigli e nidificazioni delle fibre.

## Pregi

Le fibre naturali, le quali presentano buoni valori resistenti sia meccanici che termo-acustici, garantiscono un incremento considerevole della tenacità nei compositi fibrorinforzati. L'aumento di resistenza flessionale e il correlato aumento di energia assorbita in fase di deformazione, sono dovute alla resistenza a trazione: la quale raggiunge in alcune fibre i 1000 MPa, valori simili alle fibre sintetiche. Oltre alle caratteristiche tecniche, le fibre naturali vantano un basso costo di produzione, un'elevata disponibilità ed un elevato abbattimento delle emissioni nocive all'ambiente.

Fibra	Densità	Lunghezza	Diametro	Allungamento	Res. a trazione	Modulo elastico	Contenuto di Cellulosa
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm]	[μm]	[%]	[MPa]	[Gpa]	[% in peso]
Iuta	1230	0,8-6	5-25	1,5-3,1	187-773	20-55	45-63
Sisal	1200	0,8-8	7-47	1,9-3	507-855	9-22	50-73
Canapa	1350	5-55	10-51	1,6-4,5	580-1110	30-60	30-77
Cocco	1200	0,3-3	7-30	15-25	175	6	15-51,4
Kenaf	1200	1,4-11	12-36	2,7-6,9	295-930	22-60	45-57
Banana	1500	0,4-0,9	12-30	5-6	529-914	27-32	63
Ananas	1500	1-8	8-41	1-3	170-1627	60-82	81
Abaca	1500	4,6-5,2	10-30	2,9	430-813	31,1-33,6	56-63
Bamboo	600-1100	1,5-4	88-25	1,3-8	140-441	11-36	74
Ortica	1510	5,5	20-80	1,7	650	38	53-73
Lino	1500	5-900	-	2-4	300-800	30-60	30-77
Palma	700-1500	0,59-142	150-500	17-25	150-500	3,24	30
Legno tenero	1500	2,8-4,1	28-47	-	1000	18-40	-
Legno duro	1200	2,67-3,98	31	-	-	37,9	-

*Figura 14 Caratteristiche tecniche delle principali fibre naturali*

## Difetti

I compositi fibrorinforzati hanno mostrato un comportamento fragile all'invecchiamento dovuto ai numerosi attacchi: alle fibre naturali, di tipo chimico (attacchi alcalini principalmente) e biologico (attacchi di funghi e batteri). Risulta perciò doveroso attuare una serie di trattamenti fisico-chimici sia sulla fibra, al fine di proteggerle, che sulla matrice cementizia, mirando a ridurre il pH della matrice. Tra i numerosi accorgimenti che si possono attuare sono riportati:

- Sostituzione del 40-50% del cemento Portland ordinario con fumi di silice oppure ceneri volanti;
- Uso di particolari cementi, tra cui, cementi Pozzolatici oppure Solfato-resistenti;
- Impiego di loppa da altoforno come sostituzione al cemento ordinario;
- Impregnazione delle fibre con agenti idrorepellenti;
- Trattamento con cloruri di polivinile, formaldeide o altro per gli resistere agli attacchi biologici;
- Trattamento plasma, mediante gas ionizzati, al fine di rimuovere i contaminanti ed aumentare l'adesione sulla superficie della fibra;
- Trattamento di alcalinizzazione al fine di rimuovere impurità, aumentare l'adesione superficiale e di ridurre l'assorbimento d'acqua;
- Trattamento termico, le fibre vengono soggette a temperatura di 100-200 °C al fine di ridurre l'assorbimento d'acqua;
- Ecc.

Oltre al rischio di decomposizione delle fibre nei pori alcalini d'acqua, i valori resistenti delle fibre presentano una forte dipendenza dal processo produttivo, dalle condizioni ambientali, dal contenuto di cellulosa e di lignina e se non trattate, mostrano un'eccessiva capacità di assorbimento d'acqua che comporta la perdita della resistenza a cicli di gelo e disgelo. In fine, in base alla fibra scelta e se non trattata, non si può contare su buone resistenze ad alte temperature.

#### 2.4.5 - Fibre sintetiche (Synthetic Fiber Reinforced Concrete)



Figura 15 Fibre in polipropilene

Tipologia	Peso specifico [kg/m <sup>3</sup> ]	Resistenza a trazione [MPa]	Modulo elastico [GPa]	Allungamento [%]
Acriliche	1170	207-1000	14,6-19,6	7,5-50
Aramide I	1440	3620	62	4,4
Aramide II	1440	3620	117	2,5
Nylon	1160	965	5,17	20
Poliestere	1340-1390	896-1100	17,5	-
Polietilene	960	200-300	5	3
Polipropilene	900-910	310-760	3,5-4,9	15

Figura 16 Caratteristiche meccaniche di alcune fibre sintetiche

Le fibre sintetiche, ottenute da processi chimico-fisici, presentano parametri resistenti differenti in base alla tipologia e al processo produttivo. Sono caratterizzate da un basso peso specifico e dalla perdita dei parametri caratteristici tra i 100 – 300 °C. Le fibre di nylon, polietilene e polipropilene perdono i loro valori resistenti ad una temperatura di 100-200 °C.

- Fibre aramidiche
  - Elevata resistenza a trazione pari a 3600 MPa circa;
  - Elevato modulo elastico, in grado di superare i 130 GPa in alcuni casi;
  - Buona resistenza all'acqua ed agli attacchi alcalini;
  - Progressiva perdita dei valori resistenti ad una temperatura di 200 °C;
  - Perdita totale dei valori resistenti ad una temperatura di 400-500 °C.
- Fibre di polipropilene (PP)
  - Presentano una buona resistenza agli attacchi chimici (alcali ed acidi) ed all'acqua;
  - Elevata resistenza a trazione;
  - Basso modulo elastico con una limitata resistenza a fessurazione;
  - Debole aderenza fibra-matrice cementizia la quale comporta una limitata resistenza a pull-out. Sono necessari trattamenti chimico-fisici al fine di aumentare la aderenza delle fibre oltre alla necessità di rendere la fibra idrofila (capace di legarsi con l'acqua e di trattenerla);
  - Elevata sensibilità alla luce solare, principalmente ai raggi ultravioletti, ed all'ossigeno. Risulta necessario attuare adeguati accorgimenti al fine di perdurare nel tempo le caratteristiche meccaniche;
  - Elevata energia assorbita in fase deformativa, conferendo un comportamento più duttile al composito cementizio, ed ottima resistenza all'urto durante la fase iniziale di maturazione;
  - Elevata leggerezza, in confronto alle fibre di acciaio il peso risulta circa 9 volte inferiore;
  - Riduzione delle segregazione, bleeding e del ritiro plastico grazie ad una riduzione della permeabilità della matrice;
  - Debole resistenza al fuoco, oltre i 100 °C si ha una riduzione delle caratteristiche resistenti;
  - Perdita totale dei valori resistenti ad una temperatura di 150 °C.
- Fibre polivinilalcol (PVA)
  - Risultano idrofile;
  - Presentano una buona resistenza agli alcali ed all'acqua;
  - Presentano alti valori resistenti a trazione, di circa 2000 MPa, ed un modulo elastico di circa 70 GPa;
  - Progressiva perdita dei valori resistenti ad una temperatura di 100 °C;
  - Perdita totale dei valori resistenti ad una temperatura di 200-240 °C;
  - Obbligo di impiego di differenti fibre in aggiunta al fine di ottenere adeguate prestazioni.
- Fibre di Poliacrilonitrile (PAN)
  - Presentano una discreta resistenza a trazione 400 -200 MPa ed un modulo elastico di 14-20 GPa;
  - Buon allungamento pari a 8-11%;
  - Buona aderenza tra fibra e matrice cementizia sia grazie alla presenza di striature superficiali che per la composizione chimica che lega adeguatamente con i silicati idrati;
  - Buona resistenza agli attacchi chimici o atmosferici (alcali, cloruri, acqua ed ultravioletti);
  - Conferisce principalmente una durabilità maggiore al composito;
  - Riduzione del ritiro plastico;
  - Progressiva perdita dei valori resistenti ad una temperatura di 300-350 °C;
  - Perdita totale dei valori resistenti ad una temperatura di 500-600 °C.
- Ecc.

#### 2.4.6 - Fibre in carbonio (Carbon Fiber Reinforced Concrete)



Figura 17 Fibre in carbonio

Le fibre di carbonio sono ottenute mediante processi di sintesi su composti chimici, tra cui: poliacrilonitrile (PAN), rayon o pece. La scelta della materia prima ricopre un ruolo fondamentale dato che ne determina sia il costo delle fibre che le caratteristiche resistenti dato che, in base al processo produttivo, si altera la struttura cristallina e la composizione chimica. Solitamente, si raggiunge un contenuto di carbonio superiore al 92% con diametri dell'ordine del micron: tra i 6 e i 10  $\mu\text{m}$ .

In base alle caratteristiche meccaniche, le fibre possono essere distinte in:

- Fibre ad alte prestazioni (*HP – High Performance*):
  - HT (*High Tensile Strength – Fibre ad alta resistenza a tensione*) caratterizzata da alti valori resistenti a trazione, solitamente superiori ai 3000 MPa e da un modulo elastico tra 150 e 300 GPa;
  - IM (*Intermediate Modulus – Fibre dal modulo elastico intermedio*) caratterizzate da valori del modulo elastico tra 275 e 350 GPa;
  - HM (*High Modulus – Fibre ad alto modulo elastico*) caratterizzate tipicamente da valori del modulo elastico superiori ai 300 GPa;
  - UHM (*Ultra High Modulus - Fibre ad altissimo modulo elastico*) caratterizzate tipicamente da valori del modulo elastico superiori ai 600 GPa;
- Fibre di medie prestazioni (*GP – General Performance*) caratterizzate da valori resistenti a trazione inferiori alle fibre ad alte prestazioni con moduli elastici non superiori ai 200 GPa;
- Fibre dal modulo elastico standard (*SM – Standard Modulus*) caratterizzate da un modulo elastico inferiore ai 250 GPa.

## Cenni storici

Una prima scoperta delle fibre in carbonio può essere attribuita a Thomas Edison, nel 1879, per la realizzazione della lampadina ad incandescenza mediante la carbonizzazione di fili di cotone e schegge di bambù. In seguito negli anni '50 si giunse alla scoperta che si potevano ottenere fibre di carbonio mediante la carbonizzazione del rayon, grazie ad Abbot, ad una temperatura di 1000 °C circa e dal riscaldamento della poliacrilonitrile (PAN), da parte di R. C Houtz, ad una temperatura di 300 °C circa. Successivamente, nel 1959 Akio Shindo perfezionò lo studio svolto da Houtz portando la poliacrilonitrile a carbonizzazione, nel 1963 Sugio Otani definì la possibilità di ottenere fibre di carbonio dalla pece e nel 1966 E. Fitzer - H. Schlesinger produssero la prima fibra carbonica da fase gassosa. Con il passare degli anni ci furono miglioramenti sia nel processo produttivo che nella produzione di fibre ad alte caratteristiche resistenti.

## Campi di impiego

La fibra di carbonio può vantare eccellenti caratteristiche meccaniche chimico-fisiche, le quali la rendono una eccellente fibra da poter impiegare in differenti settori: dal trasporto con la realizzazione di componenti per aerei allo sport con la realizzazione di macchine da corsa e molto altro. Negli ultimi anni ha visto il suo impiego anche nel settore civile (principalmente delle fibre SM, HT, HM e UHM) sia mediante l'aggiunta nei conglomerati di fibre corte o filamenti (Carbon Fiber Reinforced Concrete - CFRC) o anche come rinforzo esterno di elementi strutturali esistenti (Carbon Fiber Reinforced Polymer - CFRP).

## Pregi

L'aggiunta di fibre di carbonio ha mostrato un notevole incremento della:

- Resistenza a trazione, flessione e compressione. L'aumento dei valori resistenti risulta proporzionale all'aumento del contenuto in volume delle fibre, portando ad un comportamento più duttile (grazie alla crescita della tenacità) e più rigido (dovuto all'aumento del modulo elastico);
- Resistenza ad urti, usura, abrasione ed a carichi dinamici;
- Riduzione del ritiro plastico;
- Resistenza a cicli gelo-disgelo.

Le fibre di carbonio vantano ulteriori pregi, tra cui:

- Leggerezza: le fibre in carbonio sono contraddistinte da un peso specifico di circa 1750 kg/m<sup>3</sup> rispetto ai circa 7800 kg/m<sup>3</sup> dell'acciaio;
- Facilità e rapidità nella posa;
- Impermeabilità da parte dell'acqua e assenza di *bleeding* (ovvero la risalita dell'acqua di impasto in superficie comportando un deterioramento del composito ed una riduzione delle caratteristiche resistenti);
- Resistenza in ambiente aggressivo: il composito ha mostrato una grande resistenza dinanzi attacchi chimici da parte dei solfati, cloruri, piogge acide e dall'anidride carbonica; ciò definisce una ottima durabilità nel tempo assieme all'ottima resistenza ai cicli gelo-disgelo.

## Difetti

Nonostante il composito a base di fibre di carbonio mostri numerosi pregi, anche egli presenta alcuni difetti, tra cui principalmente due:

- Il primo è dovuto al costo elevato, il quale porta a preferire differenti fibre;
- Il secondo è legato al contenuto di fibre in volume. Se da un lato all'aumentare del contenuto si raggiungono valori resistenti maggiori da un altro lato si può incorrere all'incremento dei vuoti d'aria; i quali compromettono i valori resistenti del composito. Al fine di ottenere una dispersione ottimale delle fibre, una buona lavorabilità ed una assenza di vuoti d'aria si richiede l'aggiunta di fumi di silice, pari al 15% del peso in cemento, e di metilcellulosa, pari al 0,4% del peso in cemento. Al posto dei fumi di silice, si può prevedere l'aggiunta di lattice, per un contenuto pari al 15-20% del peso in cemento, al fine di incrementare la lavorabilità, la resistenza a flessione, la tenacità, la resistenza agli urti, la resistenza al gelo ed agli acidi, diminuendo la disperdibilità delle fibre.

## 2.5 – Normativa di riferimento

Le principali normative non trattano le fibre naturali e lasciano la determinazione dei valori resistenti ai produttori. Ciò limita in parte il loro utilizzo.

Si sono consultate le seguenti normative di riferimento:

- UNI 11039-1-2 calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio: Definizioni, classificazioni e designazione
- CNR-DT 204/2006 Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato;
- UNI EN 12390-13 Prova sul calcestruzzo indurito – Parte 13: Determinazione del modulo di elasticità secante in compressione;
- NTC18 - Norme tecniche per le costruzioni;
- UNI 9771:1990 Calcestruzzo indurito. Determinazione della frequenza fondamentale di risonanza flessionale, estensionale e torsionale;
- UNI EN 12390-16 Prove sul calcestruzzo indurito – Parte 16: Determinazione del ritiro del calcestruzzo;
- UNI EN 196-1 Metodi di prova dei cementi – Parte 1: Determinazione delle resistenze meccaniche
- UNI 11104 Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione a conformità – Specificazioni complementari per l'applicazione della EN 206;
- UNI EN 206 Specificazione, prestazione, produzione e conformità;
- UNI EN 12620 Aggregati per calcestruzzo;
- UNI EN 13139 2003 Aggregati per malta.

### 3 - Determinazione delle resistenze meccaniche su provini di dimensioni 40x40x160 mm

#### 3.1 - Principio

Al fine di determinare la variazione delle resistenze meccaniche al variare del contenuto di fibre, si sono svolte le prove di flessione e di compressione su provini prismatici di malta, di dimensioni 40x40x160 mm, in accordo alla UNI 196-1. La normativa specifica non solo le dimensioni dei provini ma anche le quantità dei singoli componenti ovvero una parte di cemento, tre parti di sabbia ed in fine mezza porzione di acqua; definendo un rapporto acqua-cemento di 0.5, il quale garantisce una buona lavorabilità del conglomerato. La preparazione è stata svolta mediante processo meccanicizzato, sia per la miscelazione dei componenti che per la fase di compattazione ed in totale si sono confezionati 60 provini, 30 destinati a rottura a 7 giorni di maturazione e 30 destinati a rottura a 28 giorni.

I provini sono stati confezionati mediante degli stampi, in ferro ed in plastica rigida, a gruppi di 3 con il seguente dosaggio:

- $1350 \pm 5$  g di sabbia;
- $450 \pm 2$  g di cemento;
- $225 \pm 1$  g di acqua;
- Contenuto di fibre variabile, da un minimo di 0 g ad un massimo di 16 g.



Figura 18 Provini di malta 40x40x160 mm

Sia per i provini a 7 giorni che a 28 si sono preparati:

- 6 provini bianchi ovvero in assenza di fibre;
- 6 provini con una aggiunta di 4 g di fibre, ovvero  $5,21 \text{ kg/m}^3$ , pari al 0,19% della massa totale;
- 6 provini con una aggiunta di 8 g di fibre, ovvero  $10,42 \text{ kg/m}^3$ , pari al 0,39% della massa totale;
- 6 provini con una aggiunta di 12 g di fibre, ovvero  $15,63 \text{ kg/m}^3$ , pari al 0,59% della massa totale;
- 6 provini con una aggiunta di 16 g di fibre, ovvero  $20,83 \text{ kg/m}^3$ , pari al 0,78% della massa totale.

### 3.2 – Materiali impiegati

#### 3.2.1 - Aggregato

Mediante la UNI EN 13139, si sono definite le proprietà del aggregato, naturale, normale impiegato per la preparazione dei prismi di malta, di dimensione 40x40x160 mm.

Dall'analisi granulometrica, si riporta che si tratta di un aggregato di dimensioni 0/4 mm con un contenuto di fini rientrante nella categoria 2, dato che:

- Al setaccio di dimensione  $2 \cdot D$ , ovvero di 8 mm, si ha una frazione passante del 100%, pari a quanto richiesto;
- Al setaccio di dimensione  $1,4 \cdot D$ , ovvero di 5,6 mm, si ha una frazione superiore passante del 95% pari a quanto richiesto;
- Al setaccio di dimensione  $D$ , ovvero di 4 mm, si ha una frazione passante del 95%, superiore al 85% ed inferiore al 99%;
- Il contenuto di fini totale risulta pari a 3,6% della massa totale, inferiore al 5%, definito dalla categoria 2.

Dimensioni dell'aggregato mm	Limiti per la percentuale in massa del passante				
	Sopravaglio			Sottovaglio	
	$2 D^{a)}$	$1,4 D^{b)}$	$D^{c)}$	$d'$	$0,5 d'^{b)}$
0/1	100	da 95 a 100	da 85 a 99	-	-
0/2	100	da 95 a 100	da 85 a 99	-	-
0/4	100	da 95 a 100	da 85 a 99	-	-
0/8	100	da 98 a 100	da 90 a 99	-	-
2/4	100	da 95 a 100	da 85 a 99	da 0 a 20	da 0 a 5
2/8	100	da 98 a 100	da 85 a 99	da 0 a 20	da 0 a 5

a) Se necessario, per fini particolari, lo staccio su cui passa il 100% può essere specificato per un valore minore di  $2 D$ . Per malta a strato sottile (0/1) il 100% deve passare a  $D$

b) Qualora gli stacci calcolati come  $0,5 d'$  e  $1,4 D$  non siano esattamente corrispondenti ai numeri indicati nella serie ISO 565:1990/R20 deve essere adottata la dimensione più prossima di staccio successiva.

c) Se la percentuale di passante a  $D$  è >99 % in massa, il produttore deve documentare e dichiarare la granulometria tipica includendo gli stacci identificati nel prospetto 2.

Figura 19 Estratto UNI EN 13139 – Limite sopravaglio e sottovaglio

Frazione granulometrica mm	Percentuale massima in massa di passante allo staccio 0,063 mm				
	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4	Categoria 5
0/1 <sup>a)</sup>	3	5	8	30	>30 <sup>a)</sup>
0/2	3	5	8	30	-
0/4; 2/4 <sup>b)</sup>	3	5	8	30	-
0/8; 2/8 <sup>b)</sup>	3	5	8	11	-
a)	Valore da dichiarare da parte del produttore.				
b)	Gli aggregati di dimensioni 2/4 e 2/8 sono utilizzati nelle malte solo in combinazione con le dimensioni 0/1; 0/2; 0/4 e 0/8. Le combinazioni delle dimensioni devono essere conformi ai limiti per il contenuto di fini della relativa dimensione dell'aggregato combinato.				

Figura 20 Estratto UNI EN 13139 – Limite per il contenuto di fini

Si tratta di un aggregato normale siccome la massa volumica dei granuli essiccati, pari a 2679 kg/m<sup>3</sup>, risulta superiore a 2000 kg/m<sup>3</sup> ed inferiore a 3000 kg/m<sup>3</sup>, in accordo alla UNI EN 206.

### 3.2.1.1 - Determinazione della granulometria

La distribuzione granulometrica dell'aggregato è stata definita mediante la UNI EN 933-1.

#### Procedura prova

La prova consiste principalmente nella pesatura delle masse trattenute ai rispettivi setacci di interesse al fine di definire la dimensione delle granuli. Inizialmente, il campione di sabbia umido è stato essiccato mediante l'uso di un forno industriale ad una temperatura di 110 °C e pesato per ottenere la massa totale essiccata M<sub>1</sub>. Successivamente, si è ricoperto il campione con dell'acqua corrente e mediante scuotimento si è cercato di rimuovere la porzione di fine, frazione granulometrica passante al setaccio di 0,063 mm, del campione di sabbia; tale procedura è stata svolta più volte ma non garantisce una rimozione completa. Il campione è stato essiccato, ad una temperatura di 110°C, e pesato nuovamente per ottenere la massa essiccata precedentemente lavata M<sub>2</sub>. Dalla sottrazione tra M<sub>1</sub> ed M<sub>2</sub> si ottiene la massa della porzione fine rimossa.

In seguito, il campione è stato setacciato meccanicamente mediante l'ausilio di una batteria di setacci con una dimensione di apertura della maglia in via decrescente, da 6,3 mm a 0,063 mm, e pesando le varie frazioni trattenute R<sub>i</sub>. In fine, la frazione fine P, il residuo non rimosso durante la fase di lavaggio e scuotimento, è stata scartata.

## Elaborazione dati

Definite le varie masse trattenute ai vari setacci  $R_i$  si è in grado di formulare la curva granulometrica e mediante la formulazione sotto riportata la percentuale di fine totale del campione.

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \quad [\%]$$

I risultati ottenuti risultano validi se lo scarto tra la massa totale finale, somma delle masse trattenute ad ogni setaccio  $R_i$  assieme alla frazione fine  $P$ , e la massa totale essiccata iniziale  $M_1$  risulta minore del 1%.

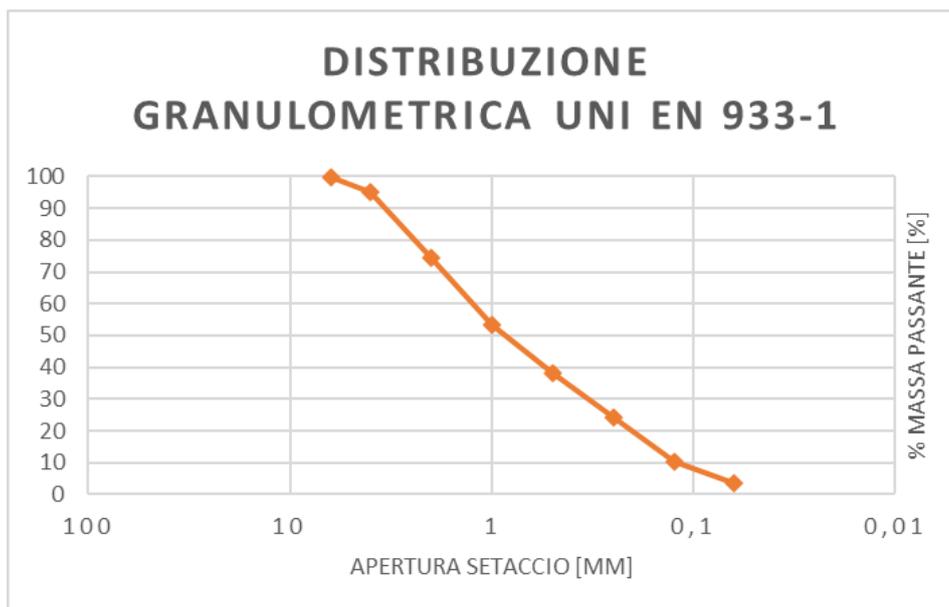
$$\text{Scarto} = \frac{M_2 - [(\sum R_i) + P]}{M_2} < 1 \quad [\%]$$

Distribuzione granulometrica - UNI EN 933-1		
Massa essiccata (10/01/22)	$M_1$ [g]	1351,6
Massa essiccata (prec. lavata) (11/01/22)	$M_2$ [g]	1318,1
Fini romosso (11/01/22)	$M_2 - M_1$ [g]	33,5
% Fine passante vaglio 0,063 mm	$f$ [%]	3,58094111
Somma Massa trattenuta	$\sum R_i + P$ [g]	1315,7
Limite scarto vaglio 1%	$R$ [%]	0,18208027

Figura 21 Dati iniziali di calcolo

Distribuzione granulometrica - UNI EN 933-1					
Apertura setaccio [mm]		Massa trattenuta [g]	Massa passante [g]	% Massa trattenuta [%]	% Massa passante [%]
6,3	$R_1$	0,5	1351,1	0,036993193	99,9630068
4	$R_2$	67,1	1284	4,964486534	94,9985203
2	$R_3$	275,9	1008,1	20,41284404	74,5856762
1	$R_4$	287,5	720,6	21,27108612	53,3145901
0,5	$R_5$	202	518,6	14,94525007	38,36934
0,25	$R_6$	193,8	324,8	14,3385617	24,0307783
0,125	$R_7$	182,6	142,2	13,50991418	10,5208642
0,063	$R_8$	91,4	50,8	6,762355727	3,75850843
Fondo	$P$	14,9			

Figura 22 Calcolo % masse trattenute



*Figura 23 Andamento distribuzione granulometrica*

#### *3.2.2.1.2 - Equivalente in sabbia*

La prova dell'equivalente in sabbia per la frazione 0/2 mm con un contenuto massimo di fine del 10%, valutato nella distribuzione granulometrica, impiegata al fine della determinazione del contenuto della frazione limo-argillosa all'interno della sabbia, è stata svolta mediante la UNI EN 933-8.

La prova consiste nell'uso di una soluzione di lavaggio e flocculante al fine di rimuovere i rivestimenti argillosi dai granuli, calcolando il valore di equivalente in sabbia SE come l'altezza del sedimento espressa come percentuale dell'altezza totale del sedimento e della sospensione nel cilindro.

#### Procedura prova

Inizialmente, si sono determinati due provini da 120 g ciascuno, dalla frazione granulometrica 0,063/2 mm, mediante setacciatura manuale. In seguito, si è versata la soluzione di lavaggio e flocculante, preparata diluendo 125 ml di soluzione concentrata su 5 l di acqua, fino al raggiungimento del livello inferiore segnato sul cilindro, ad una altezza di 100 mm dalla base; versando nei due cilindri i due rispettivi provini, mediante l'uso di un imbuto. Al fine di rimuovere le bolle d'aria, inumidire ed impregnare l'aggregato correttamente, prima si è battuto diverse volte con il palmo della mano e poi si sono lasciati riposare 10 minuti i due cilindri. Terminato il periodo di attesa di 10 minuti, i due provini, sigillati in sommità mediante l'ausilio di un tappo in gomma, sono stati agitati meccanicamente per 30 secondi. Successivamente, si è riversata la soluzione di lavaggio sia per risciacquare i due tappi e le pareti dei due cilindri, accertandosi che tutto il materiale tornasse all'interno della soluzione del provino, sia per raggiungere il livello superiore segnato, ad una altezza di 380 mm dalla base, mediante un movimento lento circolare, alzando ed abbassando il tubo rigido di metallo, per indurre i fini ed i componenti argillosi a salire verso l'alto. I provini sono stati lasciati a riposare per 20 minuti e successivamente si sono misurate le due altezze di interesse. L'altezza  $H_1$  del livello superiore della sospensione dell'aggregato è stata misurata dalla base del cilindro mentre l'altezza  $H_2$  del sedimento è stata determinata inizialmente inserendo all'interno

dei cilindri il gruppo stantuffo e successivamente misurando la distanza tra la faccia inferiore della testa dello stantuffo e la faccia superiore del collare.

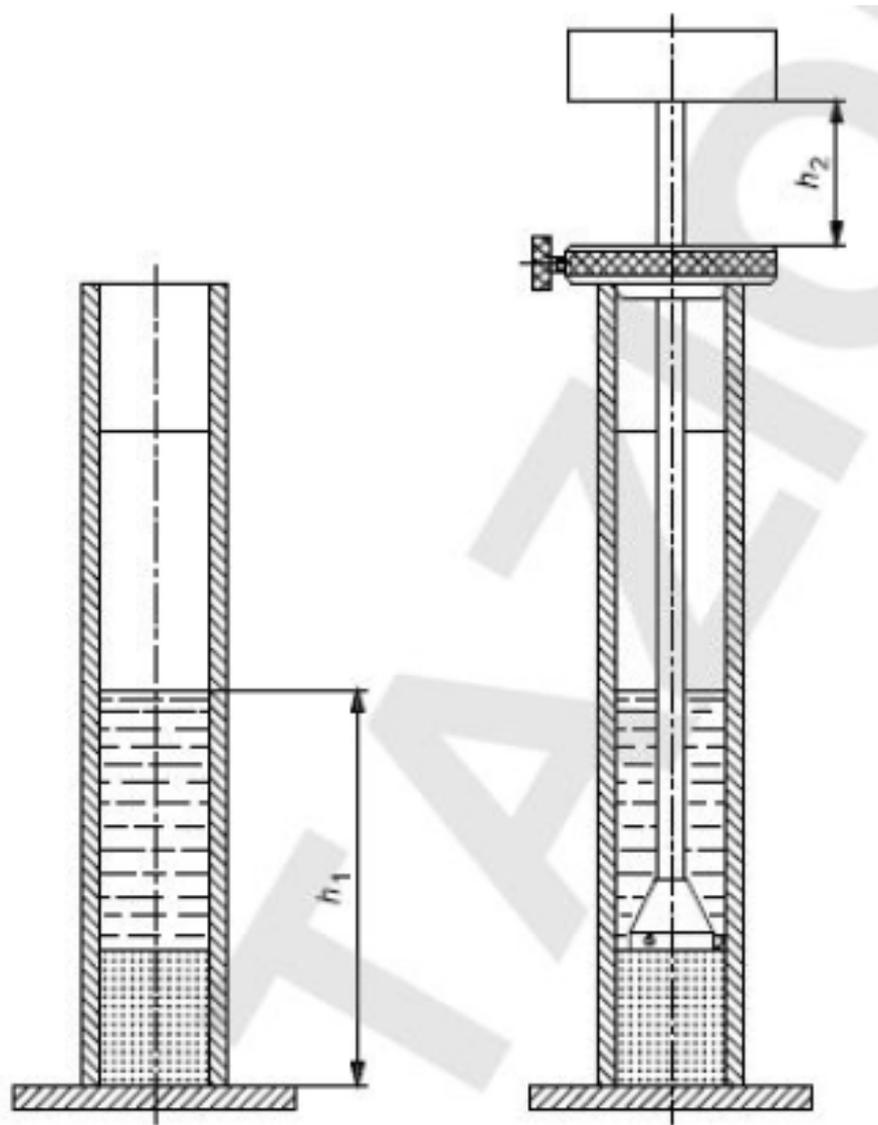


Figura 24 Estratto UNI EN 933-3 - Misurazione di  $H^1$  e  $H_2$

## Elaborazione dati

Per determinare il valore dell'equivalente in sabbia  $SE_{(10)}$ , si è calcolato il rapporto  $(H_2/H_1) \cdot 100$ , per ambedue i cilindri; se la differenza tra i due valori dell'equivalente in sabbia non risulta superiore a 4 unità allora l'esito della prova risulta accettabile e il valore finale, da considerare, risulterà la media tra i due valori  $SE_{(10)}$ .

$$SE = \frac{SE_{(Provino\ 1)} + SE_{(Provino\ 2)}}{2} = 75,93\%$$

Prova dell'equivalente in sabbia - UNI EN 933-8			
Altezza superiore sospensione p. n°1	$H_{1,Prv1}$	11,0	[mm]
Altezza sedimento p. n°1	$H_{2,Prv1}$	8,3	[mm]
Equivalente in sabbia n°1	$SE_1$	75,45455	[%]
Altezza superiore sospensione p. n°2	$H_{1,Prv2}$	10,6	[mm]
Altezza sedimento p. n°2	$H_{2,Prv2}$	8,1	[mm]
Equivalente in sabbia n°2	$SE_2$	76,41509	[%]
Differenza Equivalente in sabbia	$ SE_1 - SE_2 $	0,960549	[%]
Valore limite diff. Equivalente in sabbia	$ SE_1 - SE_2 _{lim}$	4	[%]
Esito	Esito accettabile!		
Equivalente in sabbia valore finale	SE	75,93482	[%]
Massa essiccata (10/01/22)	$M_1$	1351,6	[g]
Massa essiccata (prec. lavata)	$M_2$	1318,1	[g]
Contenuto fine	f	2,478544	[%]
Contenuto limite fine	$f_{lim}$	10	[%]

Figura 25 Estratto di calcolo - Tabella valori di calcolo

### 3.2.2.1.3 - Massa volumica ed assorbimento d'acqua

La prova per la determinazione della massa volumica dei granuli e dell'assorbimento d'acqua è stata svolta mediante la UNI EN 1097-6.

La massa volumica risulta determinata dal rapporto tra massa e volume. Il valore della massa è determinato dalla pesatura dell'aggregato nelle condizioni di saturazione a superficie asciutta e nelle condizioni essiccate mentre il volume viene determinato dalla massa d'acqua spostata, sia mediante il metodo del cestello a rete che con il metodo con picnometro.

#### Procedura prova

Avendo una frazione granulometria che varia tra 0,063 mm a 6,3 mm risulta doveroso applicare entrambi i metodi sopracitati. Questo è dovuto al fatto che il metodo con picnometro è applicabile per una frazione 0,063/4 mm mentre il metodo del cestello con rete per una frazione 4/31,5 mm.

#### Metodo con picnometro

Inizialmente si determina la massa  $M_3$ , ovvero la massa del picnometro traboccante d'acqua assieme al tappo, evitando possibili vuoti d'aria presenti. Poi, determinata la frazione

granulometrica 0,063/4 mm, si sono porzionati due campioni da versare all'interno dei due picnometri con l'aggiunta di acqua, fino a ricoprire gli aggregati. Sia l'aggregato, nelle sue condizioni iniziali secche, che i due picnometri vuoti sono stati pesati precedentemente. Successivamente, si è cercato di far fuoriuscire possibili vuoti d'aria, mediante scuotimento e rotazione dei due campioni, ed in seguito si sono lasciati a riposo, all'interno di un bagno d'acqua, per 24 ore. Terminata l'attesa, si sono riempiti fino a traboccare i due strumenti con acqua, posizionando anche il tappo, e misurando il peso totale  $M_2$  ovvero la massa del picnometro contenente l'aggregato saturo con acqua.

In fine, il contenuto dei due strumenti è stato versato all'interno di una bacinella e portato ad essiccazione fino a quando l'umidità superficiale non fosse più visibile, misurando il peso totale  $M_1$  ovvero la massa in aria dell'aggregato saturo, a superficie asciutta. Al fine di verificare che le condizioni di essiccazione risultassero adeguate, una porzione del campione è stato versato all'interno di un stampo metallico, a forma conica, e applicando 25 colpi in sommità, mediante un pestello metallico facendolo cadere liberamente per forza di gravità, e verificando che una volta rimosso lo stampo si avesse un collasso come riportato nella figura F.2 ovvero di aggregato sensibilmente umido.

figura F.1 **Aggregato umido; conserva in modo pressoché completo la forma dello stampo metallico**



figura F.2 **Aggregato sensibilmente umido; si comincia ad apprezzare un certo abbassamento al cono**

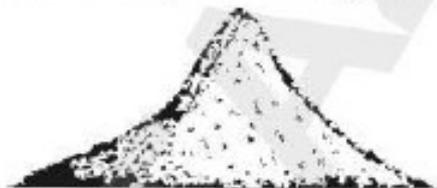


figura F.4 **Aggregato quasi completamente secco; non si distingue un picco centrale, la superficie è pressoché curvilinea**



### Elaborazione dati – Metodo con picnometro

Dalle formulazioni riportate all'interno della normativa si sono calcolate le masse volumiche dei granuli e l'assorbimento d'acqua per una immersione di 24 ore.

- Massa volumica apparente dei granuli

$$\rho_a = \rho_w \cdot \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]} = 2,76 \frac{Mg}{m^3}$$

- Massa volumica dei granuli essiccati in forno

$$\rho_{rd} = \rho_w \cdot \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]} = 2,66 \frac{Mg}{m^3}$$

- Massa volumica dei granuli in condizioni di saturazione a superficie asciutta

$$\rho_{ssd} = \rho_w \cdot \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]} = 2,70 \frac{Mg}{m^3}$$

- Assorbimento d'acqua per un'immersione di 24 ore

$$WA_{24} = \frac{100 \cdot (M_1 - M_4)}{M_4} = 1,38 \%$$

Dove:

- $\rho_w$  : massa volumica dell'acqua alla temperatura di 20 °C, tratto dall'appendice D;
- $M_1$  : massa in aria dell'aggregato saturo a superficie asciutta;
- $M_2$  : massa del picnometro contenente l'aggregato e l'acqua;
- $M_3$  : massa del picnometro riempito con acqua;
- $M_4$  : massa in aria dell'aggregato essiccato in forno.

Determinazione massa volumica ed assorbimento d'acqua per frazione granulometrica 0,063/4 mm - UNI EN 1097-6				
Peso picnometro	a	139,52	146,78	[g]
Peso picnometro + Inerti	b	420,33	449,82	[g]
Peso picnometro + inerti + acqua	$M_2$	617,50	634,72	[g]
Temperatura	T	20,00	20,00	[°C]
Peso picnometro + acqua	$M_3$	439,14	440,72	[g]
Massa in aria aggregato essiccato in stufa	$M_4$	280,81	303,04	[g]
Massa in aria aggregato saturo a superficie asciutta	$M_1$	591,90		[g]
Massa volumica acqua a T = 20°C	$\rho_w$	0,9982		[Mg/m <sup>3</sup> ]
Massa volumica apparente dei granuli	$\rho_a$	2,74	2,78	[Mg/m <sup>3</sup> ]
	$\rho_{a,medio}$	2,76		[Mg/m <sup>3</sup> ]
Massa volumica dei granuli essiccati in stufa	$\rho_{rd}$	2,66		[Mg/m <sup>3</sup> ]
Massa volumica dei granuli in condizioni di saturazione a superficie asciutta	$\rho_{ssd}$	2,70		[Mg/m <sup>3</sup> ]
Assorbimento d'acqua a 24 ore	$WA_{24}$	1,38		[%]

Figura 27 Estratto di calcolo – determinazione massa volumica ed assorbimento d'acqua

### Metodo con cestello a rete

Si è determinata la restante frazione granulometrica, pesata nelle condizioni secche, e versata all'interno del cestello, il quale è stato in seguito immerso in un recipiente d'acqua, ad una temperatura di 20°C. Il recipiente è stato sollevato e successivamente lasciato cadere per 25 volte al fine di rimuovere possibili vuoti d'aria presenti. L'aggregato, all'interno del cestello, è stato lasciato a riposare poi per 24 ore e in seguito si è misurato, mediante una bilancia tarabile, il peso del solo aggregato saturo in acqua. In fine, l'aggregato è stato asciugato mediante un panno assorbente fino a quando ogni visibile film d'acqua superficiale non fosse scomparso, permanendo uno stato umido; l'aggregato è stato poi pesato in aria.

### Elaborazione dati – Metodo con cestello a rete

Dalle formulazioni riportate all'interno della normativa si sono calcolate le masse volumiche dei granuli e l'assorbimento d'acqua per una immersione di 24 ore.

- Massa volumica apparente dei granuli

$$\rho_a = \rho_w \cdot \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]} = 2,84 \frac{Mg}{m^3}$$

- Massa volumica dei granuli essiccati in forno

$$\rho_{rd} = \rho_w \cdot \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]} = 2,76 \frac{Mg}{m^3}$$

- Massa volumica dei granuli in condizioni di saturazione a superficie asciutta

$$\rho_{ssd} = \rho_w \cdot \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]} = 2,78 \frac{Mg}{m^3}$$

- Assorbimento d'acqua per un'immersione di 24 ore

$$WA_{24} = \frac{100 \cdot (M_1 - M_4)}{M_4} = 1,05 \%$$

Dove:

- $\rho_w$  : massa volumica dell'acqua alla temperatura di 20 °C, tratto dall'appendice D;
- $M_1$  : massa in aria dell'aggregato saturo a superficie asciutta;
- $M_2 - M_3$  : massa apparente in acqua dell'aggregato;
- $M_4$  : massa in aria dell'aggregato essiccato in forno.

Determinazione massa volumica ed assorbimento d'acqua per frazione granulometrica 4/31,5 mm - UNI EN 1097-6			
Massa in aria aggregato essiccato in stufa	$M_4$	86,1	[g]
Massa in acqua dell'aggregato	$M_2-M_3$	55,81	[g]
Massa in aria aggregato saturo a superficie asciutta	$M_1$	87	[g]
Massa volumica acqua a $T = 20^\circ\text{C}$	$\rho_w$	0,9982	[Mg/m <sup>3</sup> ]
Massa volumica apparente dei granuli	$\rho_a$	2,84	[Mg/m <sup>3</sup> ]
Massa volumica dei granuli essiccati in stufa	$\rho_{rd}$	2,76	[Mg/m <sup>3</sup> ]
Massa volumica dei granuli in condizioni di saturazione a superficie asciutta	$\rho_{ssd}$	2,78	[Mg/m <sup>3</sup> ]
Assorbimento d'acqua a 24 ore	$WA_{24}$	1,05	[%]

Figura 28 Estratto di calcolo – determinazione massa volumica ed assorbimento d'acqua

### Elaborazione dati finali

Mediante una media ponderata, considerando la massa dell'aggregato nelle condizioni essiccate, sia nella prova con picnometro che con cestello a rete, si sono definiti valori finali di interesse.

- Massa volumica apparente dei granuli

$$\rho_{a,medio} = 2,77 \frac{Mg}{m^3}$$

- Massa volumica dei granuli essiccati in forno

$$\rho_{rd,medio} = 2,67 \frac{Mg}{m^3}$$

- Massa volumica dei granuli in condizioni di saturazione a superficie asciutta

$$\rho_{ssd,medio} = 2,70 \frac{Mg}{m^3}$$

- Assorbimento d'acqua per un'immersione di 24 ore

$$WA_{24,medio} = 1,34 \%$$

### 3.2.2 - Cemento

Come cemento è stato impiegato un Portland bianco 52,5R tipo I ad altissima resistenza normalizzata ed a resistenza iniziale elevata. La scelta è ricaduta nel seguente cemento al fine di distinguere le fibre, a rottura avvenuta del provino, definendone il comportamento.

Il cemento risulta conforme alle indicazioni della UNI EN 197-1.

REQUISITI CEMENTI UNI EN 197-1	
Requisiti chimici - valori caratteristici	
Perdita a fuoco	≤ 5,0%
Residuo insolubile	≤ 5,0%
Solfati (come SO <sub>3</sub> )	≤ 4,0%
Cloruri	≤ 0,1%
Requisiti fisici - valori caratteristici	
Tempo di inizio presa	≥ 45 min
Espansione	≤ 10 min
Requisiti meccanici - valori caratteristici	
Resistenza a compressione a 2 giorni	≥ 30 MPa
Resistenza a compressione a 28 giorni	≥ 52,5 MPa

Figura 29 Requisiti cemento Portland impiegato

### 3.2.3 - Acqua

La normativa UNI 196-1 richiede unicamente che l'acqua adoperata per l'impasto cementizio risulti potabile.

### 3.2.4 - Fibre in basalto

Sono state impiegate microfibre naturali in basalto, denominate MasterFiber 050, ottenute mediante un processo di fusione di roccia basaltica, successiva filatura in fibra ed in fine taglio alla lunghezza desiderata. Tale fibra può vantare di:

- Una elevata stabilità al calore;
- Caratteristiche isolanti;
- Elevati valori di resistenza e durezza;
- Non risultare tossica.

CARATTERISTICHE CHIMICO-FISICHE FIBRE IN BASALTO	
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	2,65
Punto di fusione [°C]	1,35
Diametro [mm]	0,013
Lunghezza fibra [mm]	16
Rapporto lunghezza/diametro	1,23
Colore	Marrone
Resistenza a trazione [MPa]	2800
Modulo elastico [MPa]	84000
Allungamento alla rottura [%]	2,8
Assorbimento d'acqua	Nulla

Figura 30 Caratteristiche chimi-fisiche fibre in basalto

Le dimensioni fisiche delle fibre scelte permettono un'ottima disperdibilità rispetto ad altre fibre all'interno della miscela cementizia, garantendo una distribuzione omogenea al fine di massimizzare l'efficienza.

### 3.3 – Realizzazione provini

Inizialmente, la sabbia umida in possesso è stata essiccata mediante un forno industriale a 110 °C per circa 24 ore, al fine di evitare di avere un rapporto acqua-cemento superiore a quanto descritto dalla norma. In seguito si è porzionato l'aggregato, mediante una bilancia, in sacchetti da  $1350 \pm 5$  g per facilitare il successivo dosaggio nella fase di miscelazione e per non alterare le condizioni di umidità interne. In seguito, si sono inseriti i vari dosaggi, precedentemente pesati, all'interno della bacinella in acciaio del miscelatore meccanizzato, avviando i vari cicli di miscelazione, a velocità elevata e di arresto.



*Figura 31 A sinistra il miscelatore ed a destra la tavola a scosse*

Durante la fase di miscelazione, si è preparato lo stampo, in ferro o in plastica, rivestendo le pareti a contatto con il conglomerato cementizio con del disarmante al fine di facilitare il futuro scasseramento evitando un possibile danneggiamento o rottura dei provini.

Terminata la fase di miscelazione e vincolato lo stampo sulla tavola a scosse si è proceduto a versare uniformemente metà composto all'interno dello stampo, per circa 300 g per ogni scomparto, e si è avviato lo strumento per le prime 60 scosse per garantire un'adeguata compattazione. Terminati i primi 60 colpi, si livellato a livello lo stampo inserendo la restante dose e si avviata una successiva compattazione per ulteriori 60 colpi.

Poi, si è rimosso lo stampo dalla tavola a scosse e in caso di necessità, mediante l'ausilio di uno spatolina e di una cazzuola, si sono livellati correttamente i tre provini ed in fine, si è disposto lo stampo all'interno di una busta trasparente, in seguito sigillata con del nastro adesivo, con lo scopo sia di isolare i provini dall'ambiente circostante che di imprimere le caratteristiche con un pennarello dei tre provini. L'ambiente dove sono stati confezionati i provini risultava, come espresso da normativa, ad una temperatura controllata di 20 °C.

Il processo sopra indicato è stato applicato nuovamente per i restanti provini previo lavaggio della paletta di miscelazione, della cazzuola, della spatolina e della bacinella in acciaio al fine di non contaminare i successivi campioni.

Si è riscontrato che all'aumentare della percentuale di fibre, la lavorabilità del conglomerato cementizio è risultata assai difficoltosa nonostante le fibre scelte presentino dimensioni ridotte, per una ottima lavorabilità; è risultato doveroso svolgere non solo due cicli di compattazione meccanica, per 60 colpi, ma bensì più, fino a 4.

### 3.4 - Condizionamento dei provini

I vari provini sono stati conservati, al fine di maturare un certo indurimento minimo, per 24 ore all'interno del locale di confezionamento e successivamente si è proceduto alla sfornatura mediante un martellino per i stampi in acciaio e mediante un getto di aria compressa per i stampi in plastica.

Una volta estratti i provini dai rispettivi stampi, si è inciso con un pennarello le caratteristiche per l'identificazione dei vari campioni ed in seguito si sono adagiati all'interno delle vasche d'acqua, a temperatura controllata di 20 °C , per maturare fino alla data di rottura prestabilita, di 7 e 28 giorni.



*Figura 32 Condizionamento provini in locale a temperatura e umidità controllata*

### 3.5 – Prova a flessione

#### 3.5.1 – Descrizione prova



*Figura 33 Prova di flessione su provino con ausilio di compressore*

I provini sono stati sottoposti alla prova di flessione a tre punti, come indicata nella UNI 196-1, mediante l'ausilio della pressa Control per prove a flessione e compressione su cementi con un carico massimo di 15 kN, superiore ai 10 kN prestabiliti dalla normativa.

Inizialmente, si è posto il compressore per prove a flessione tra le piastre della pressa ed in seguito si è collocato il provino all'interno del compressore, appoggiandolo su due rulli in acciaio ad una distanza di 100 mm e di diametro di 10 mm. Lo sforzo di flessione è stato applicato da un terzo rullo posto in posizione centrale, in sommità, con lo scopo di applicare lo sforzo derivante dalla pressa.

Mediante il software, fornendo le caratteristiche geometriche del provino e la velocità di incremento del carico pari a 50 N/s, si sono definiti i valori di resistenza di picco a flessione.

La prova risulta conclusa quando il provino non è più in grado di resistere alla sollecitazione con la nascita di una fessura principale al lembo inferiore in posizione centrale. In seguito le due metà del provino vengo impiegate nella prova a compressione.

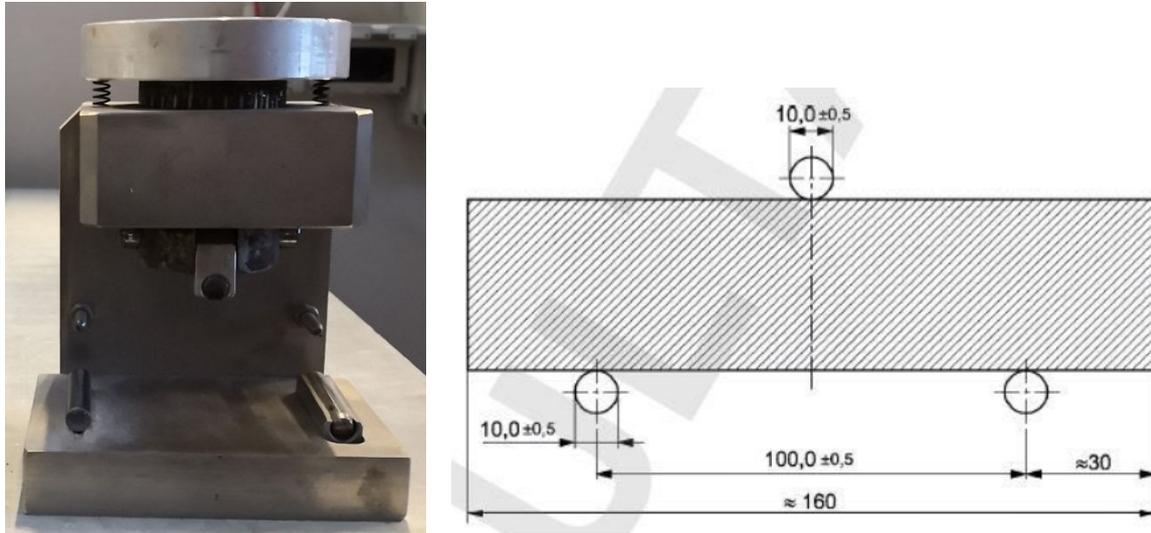


Figura 34 A sinistra la rappresentazione comprimatore per prove a flessione ed a destra la configurazione di carico estratto dalla Uni 196-1

### 3.5.2 – Elaborazioni dei dati

L'aggiunta di fibre ha mostrato un incremento della resistenza a trazione all'aumentare del contenuto di fibre presente. A 7 giorni di maturazione si è notato un aumento massimo del 13.20%, considerando i provini con un contenuto di fibre pari a 15.6 kg/m<sup>3</sup>. I provini con un'aggiunta di 20.8 kg/m<sup>3</sup> hanno mostrato una resistenza a trazione minore del valore atteso a causa di inadeguata miscelazione.

Viceversa, a 28 giorni si è riscontrato un aumento massimo del 17.50% considerando i provini con un contenuto di fibre pari a 20.8 kg/m<sup>3</sup>.

Si deduce che l'aggiunta di fibre di basalto ha beneficiato l'incremento di resistenza a trazione.

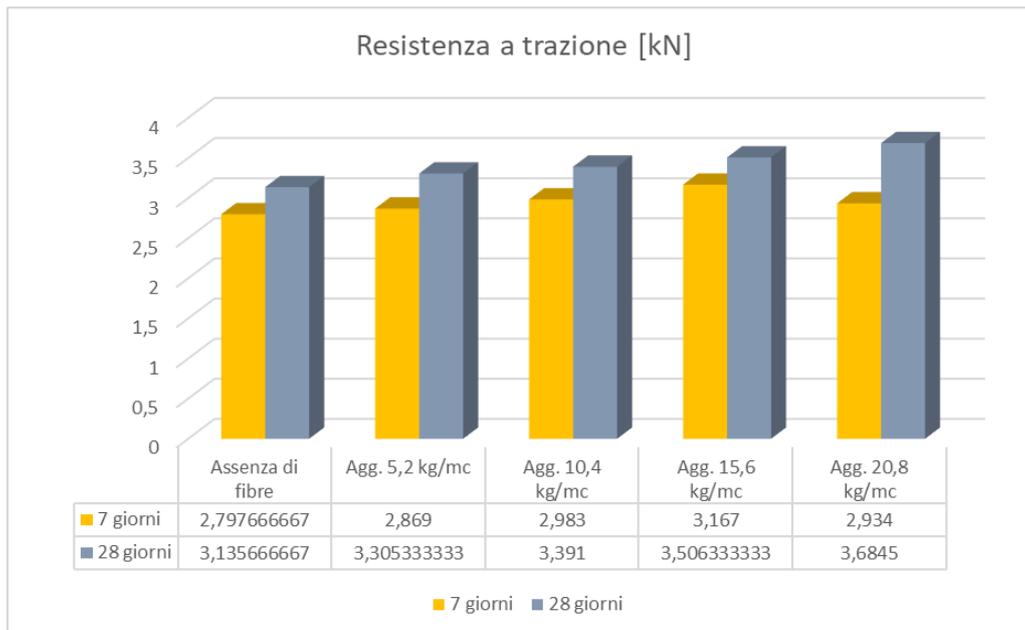


Figura 35 Andamento resistenza media a trazione dei vari contenuti di fibre

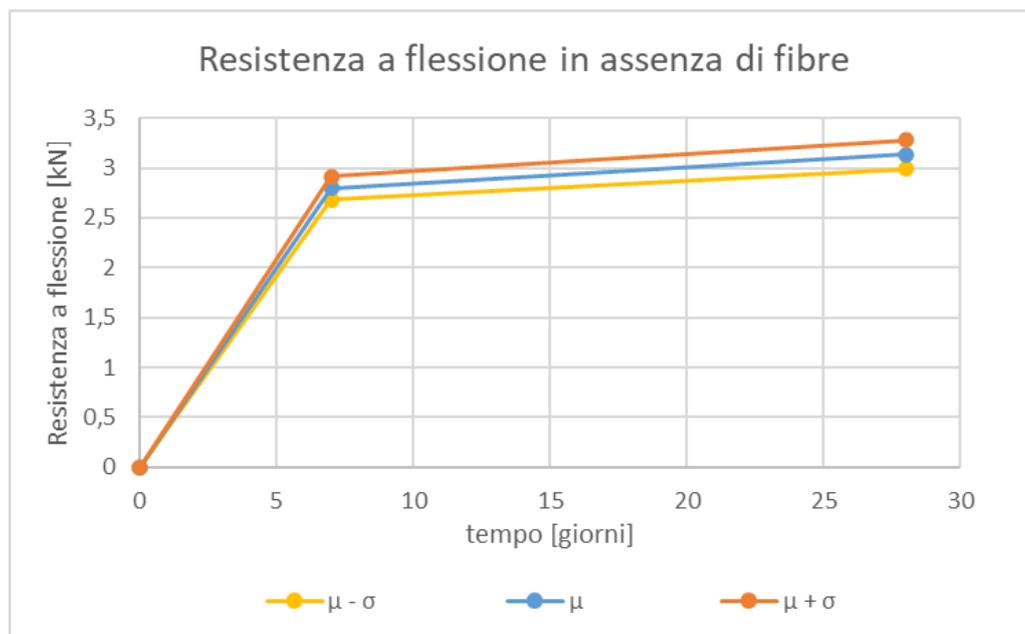


Figura 36 Andamento resistenza media a flessione dei provini in assenza di fibre

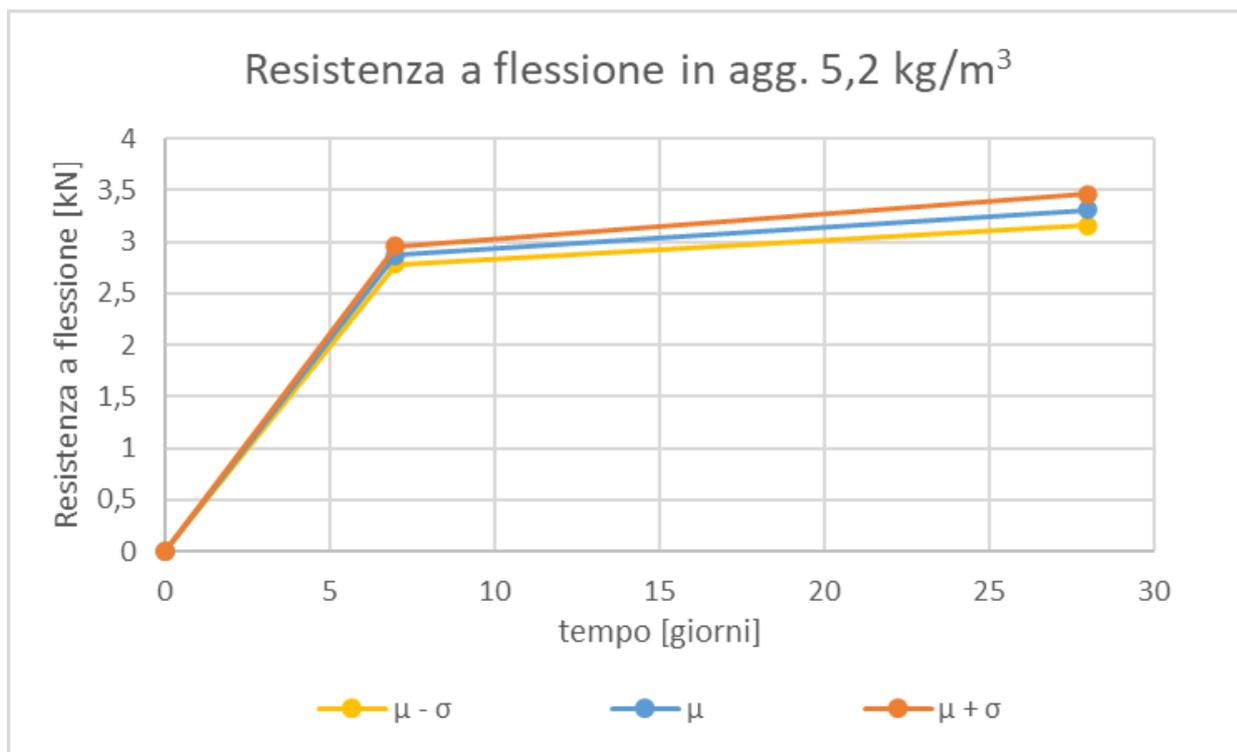


Figura 37 Andamento resistenza media a flessione dei provini in aggiunta di 5.2 kg/m<sup>3</sup>

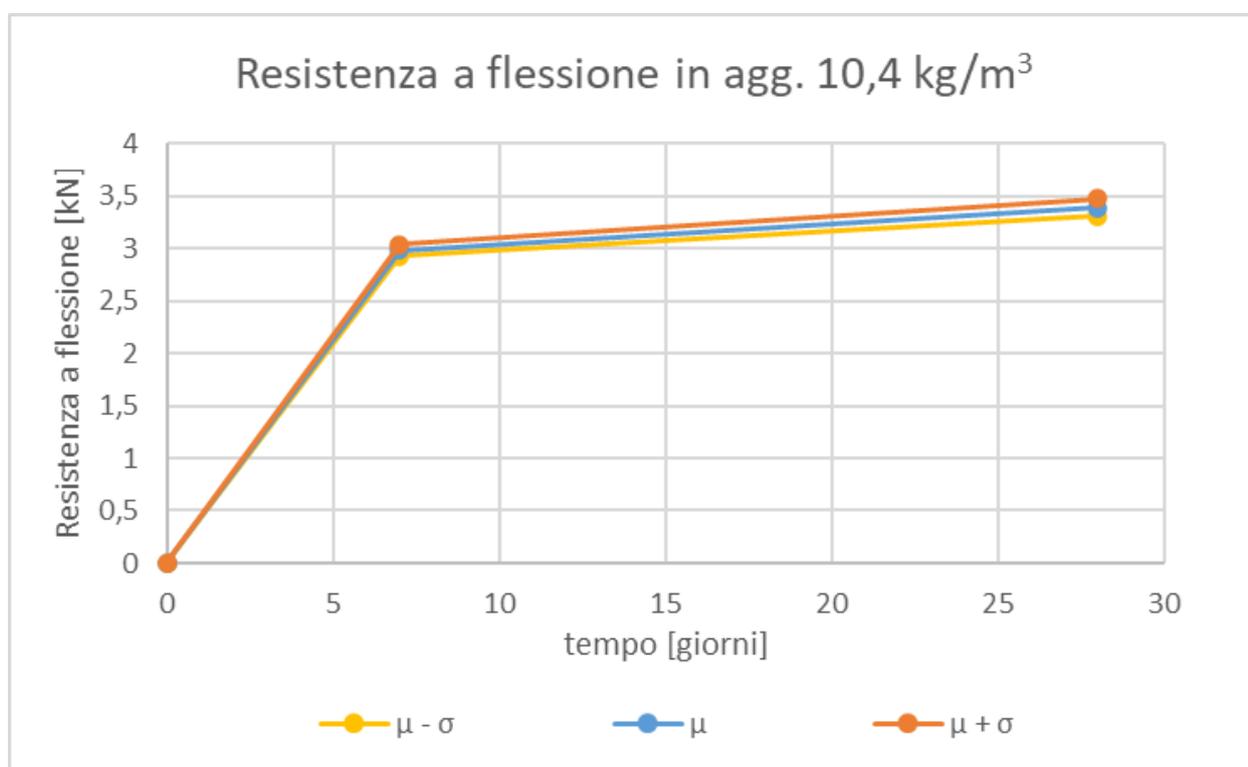


Figura 38 Andamento resistenza media a flessione dei provini in aggiunta di 10.4 kg/m<sup>3</sup>

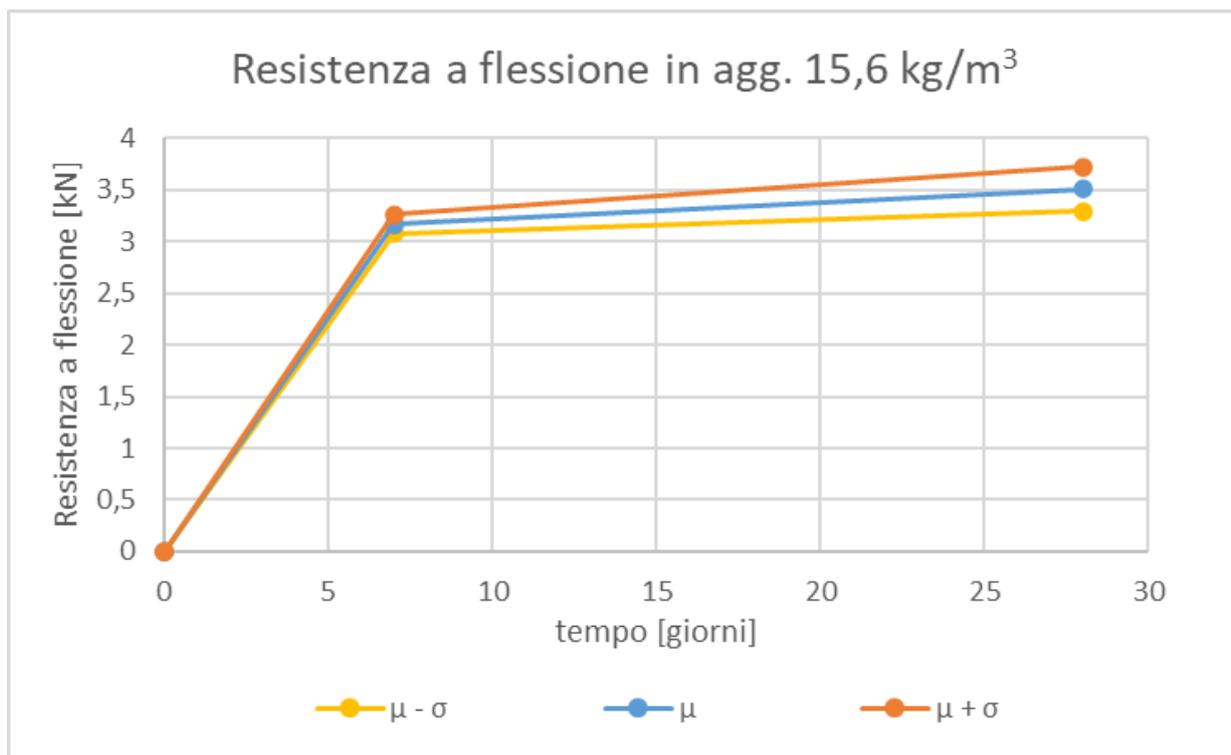


Figura 39 Andamento resistenza media a flessione dei provini in aggiunta di 15.6 kg/m<sup>3</sup>

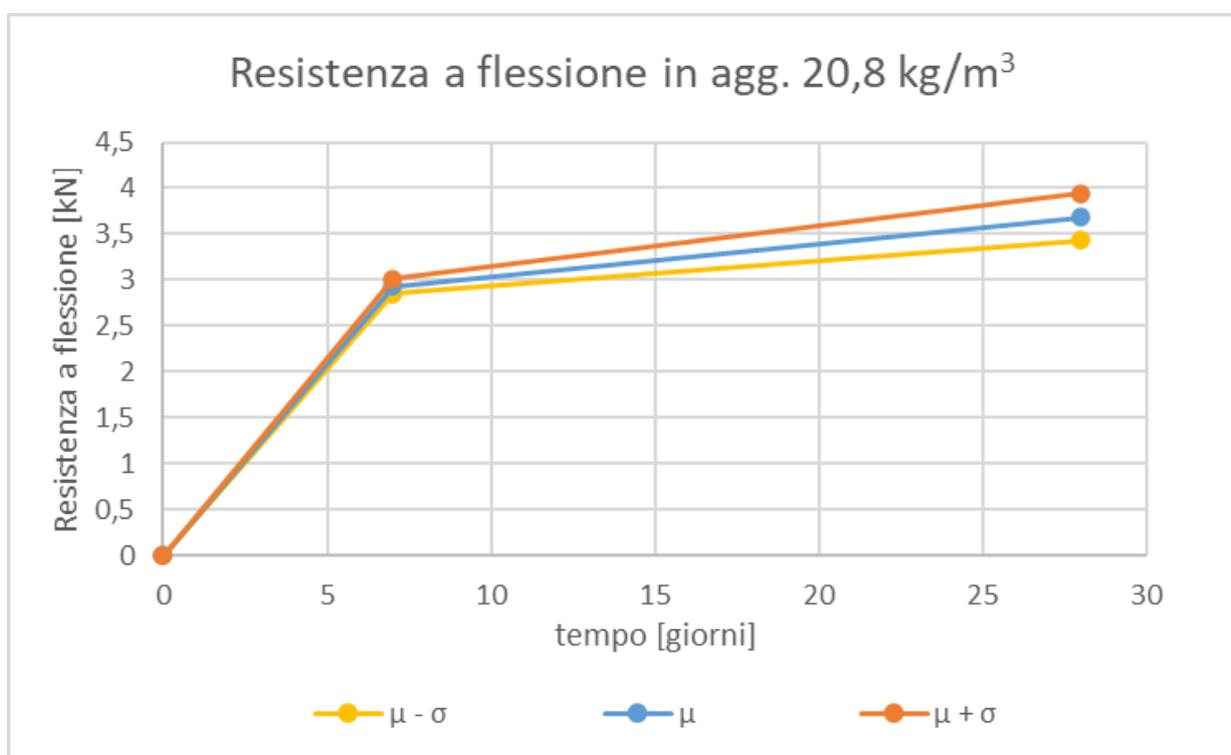


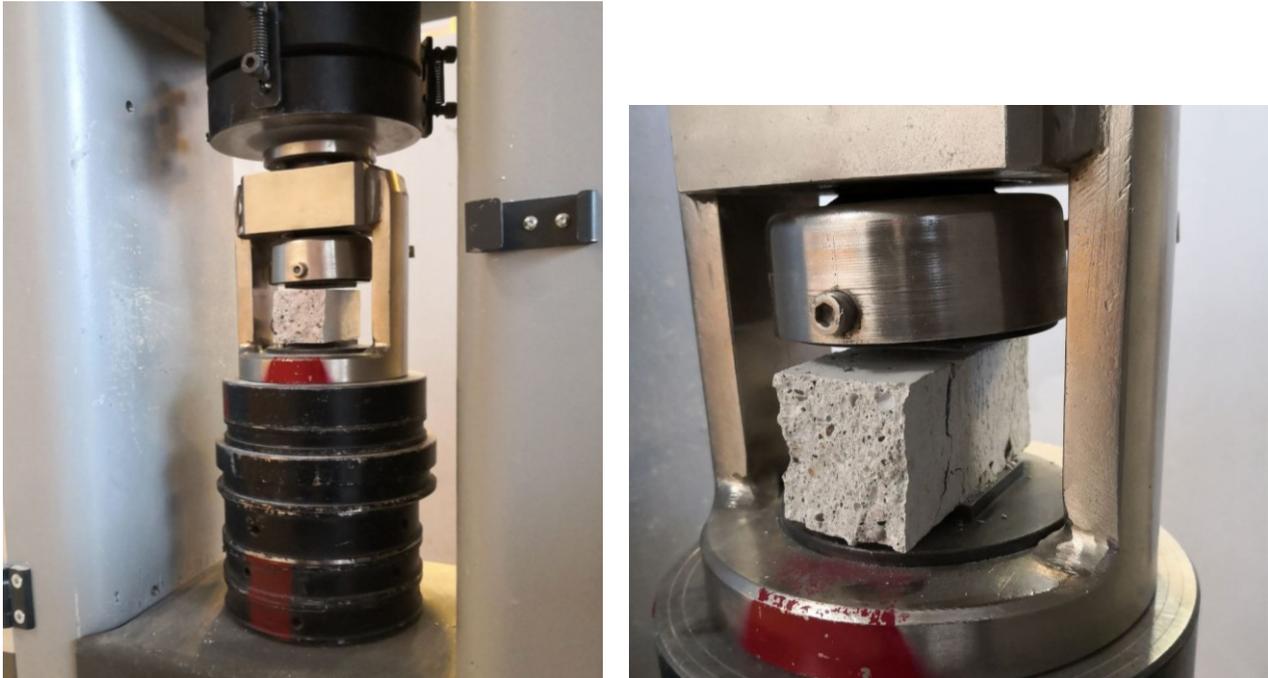
Figura 40 Andamento resistenza media a flessione dei provini in aggiunta di 20.8 kg/m<sup>3</sup>

Nome	Volume [mm <sup>3</sup> ]	Peso [g]	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	R <sub>Fless</sub> [kN]	R <sub>fless,media</sub> [kN]
Assenza di fibre a 7 giorni	271184,9	589	2,17195E-09	2,678	2,8
	251700,1	590	2,34406E-09	2,911	
	277572,1	594	2,13998E-09	2,804	
Assenza di fibre a 28 giorni	269415,5	623	2,31241E-09	3,263	3,1
	263495,9	619	2,34918E-09	3,203	
	263268,6	617	2,34361E-09	2,906	
	266462,6	611	2,29301E-09	3,039	
	268382,9	608	2,26542E-09	3,115	
	264122,2	610	2,30954E-09	3,288	
Agg. 5,21 kg/m <sup>3</sup> a 7 giorni	265686,2	590	2,22066E-09	2,784	2,9
	263336,2	588	2,23289E-09	2,867	
	261672,3	586	2,23944E-09	2,956	
Agg. 5,21 kg/m <sup>3</sup> a 28 giorni	269678,4	610	2,26195E-09	3,176	3,3
	264191,5	600	2,27E-09	3,363	
	268007,2	608	2,27E-09	3,426	
	259791,4	603	2,32109E-09	3,519	
	264186,9	609	2,30519E-09	3,186	
	257442,6	600	2,33062E-09	3,162	
Agg. 10,42 kg/m <sup>3</sup> a 7 giorni	267152,5	588	2,20099E-09	2,953	3,0
	268494,2	604	2,24958E-09	2,952	
	267311,9	596	2,22961E-09	3,044	
Agg. 10,42 kg/m <sup>3</sup> a 28 giorni	267258,4	624	2,33482E-09	3,393	3,4
	275063,8	624	2,26856E-09	3,328	
	269478,4	619	2,29703E-09	3,285	
	262487,7	598	2,2782E-09	3,365	
	257504,7	581	2,25627E-09	3,457	
	262548,9	583	2,22054E-09	3,518	
Agg. 15,63 kg/m <sup>3</sup> a 7 giorni	266022,4	588	2,21034E-09	3,168	3,2
	266874,2	591	2,21453E-09	3,074	
	264018,2	584	2,21197E-09	3,259	
Agg. 15,63 kg/m <sup>3</sup> a 28 giorni	263879,4	618	2,34198E-09	3,729	3,5
	273209,2	614	2,24736E-09	3,546	
	264065,9	618	2,34033E-09	3,779	
	270199,3	590	2,18357E-09	3,316	
	262354,4	597	2,27555E-09	3,393	
	257003,3	592	2,30347E-09	3,275	
Agg. 20,83 kg/m <sup>3</sup> a 7 giorni	267943,1	580	2,16464E-09	2,887	2,9
	266918,1	581	2,1767E-09	3,027	
	263287	576	2,18773E-09	2,888	
Agg. 20,83 kg/m <sup>3</sup> a 28 giorni	269993,5	586	2,17042E-09	3,952	3,7
	263164,7	580	2,20394E-09	3,677	
	267620,5	580	2,16725E-09	3,943	
	257763,1	578	2,24237E-09	3,452	
	261833,5	574	2,19223E-09	3,76	
	263533,3	574	2,17809E-09	3,323	

Figura 41 Estratto di calcolo – Resistenza a flessione provini 40x40x160 mm, a 7 e 28 giorni

### 3.6 – Prova a compressione

#### 3.6.1 – Descrizione prova



*Figura 42 Prova a compressione su provino con ausilio di comprimitore*

I provini sono stati sottoposti alla prova di compressione, come indicata nella UNI 196-1, mediante l'ausilio della pressa Control per prove a flessione e compressione su cementi con un carico massimo di 600 kN.

Inizialmente, si è posto il comprimitore per prove a compressione tra le piastre della pressa ed in seguito si è collocato una delle due metà del provino iniziale all'interno del comprimitore. Il comprimitore è caratterizzato da due piastre di base 40x40 mm le quali ridistribuiscono lo sforzo normale derivante dalla pressa.

Mediante il software, fornendo le caratteristiche geometriche, ovvero le dimensioni delle piastre del comprimitore, e la velocità di incremento del carico pari a 2400 N/s, si sono definiti i valori di resistenza di picco a compressione.

La prova risulta conclusa quando il provino non è più in grado di resistere alla sollecitazione assiale.

### 3.6.2 – Elaborazioni dei dati

L'aggiunta di fibre non ha mostrato un incremento della resistenza a compressione all'aumentare del contenuto di fibre presente. Il valore resistente a 7 giorni risulta stabile intorno a 54 MPa mentre il valore medio resistente a 28 giorni risulta stabile a 64 MPa a meno dei provini con un contenuto di fibre pari a 20.8 kg/m<sup>3</sup>: i quali hanno mostrato un decadimento dei valori resistenti a causa di una inadeguata miscelazione.

Si deduce che l'aggiunta di fibre di basalto non ha beneficiato l'incremento di resistenza a compressione e che per contenuti maggiori a 15.8 kg/m<sup>3</sup> si presenti una maggiore difficoltà nella miscelazione del composito; comportando una possibile perdita dei valori resistenti.

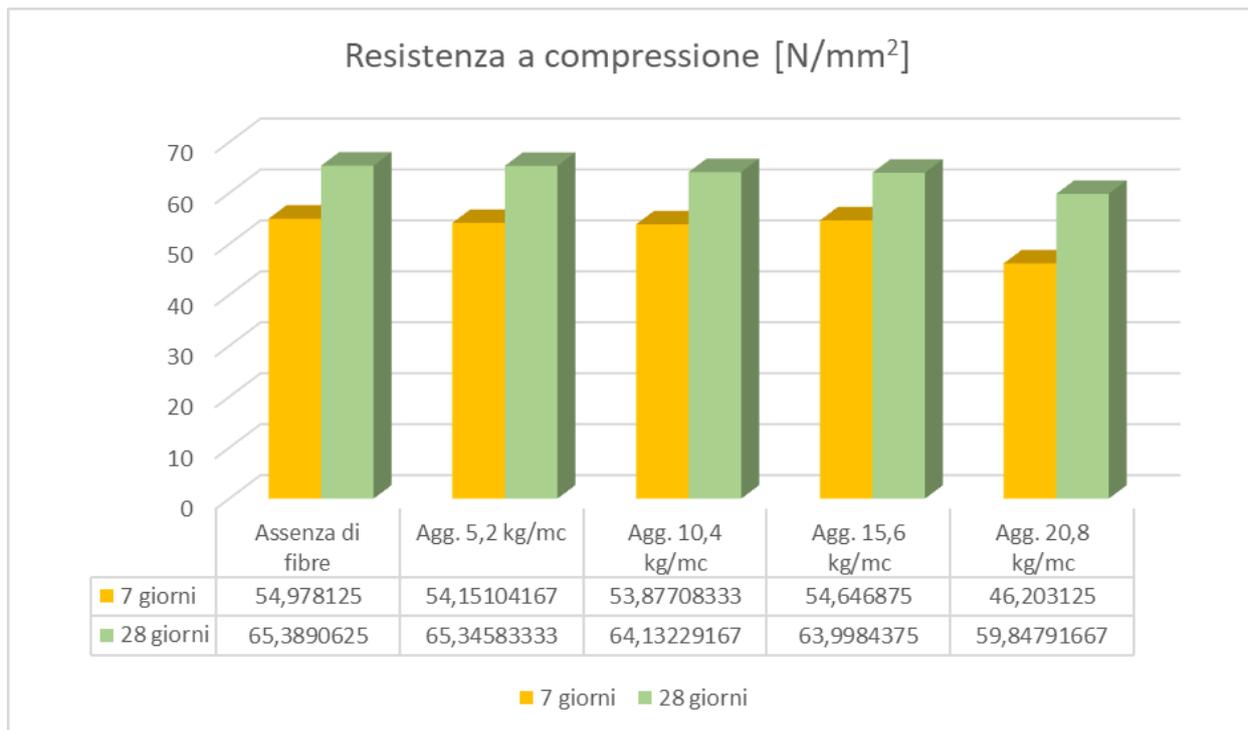


Figura 43 Andamento resistenza media a compressione dei vari contenuti di fibre

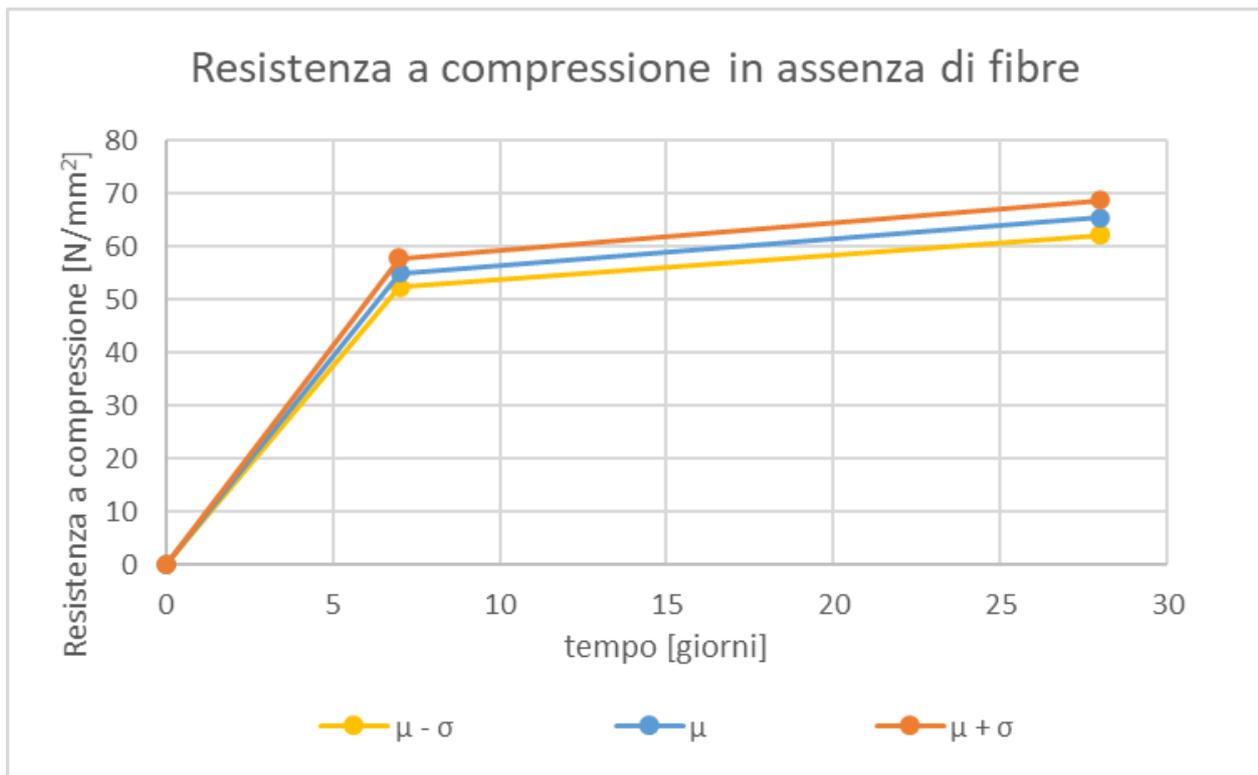


Figura 44 Andamento resistenza media a compressione dei provini in assenza di fibre

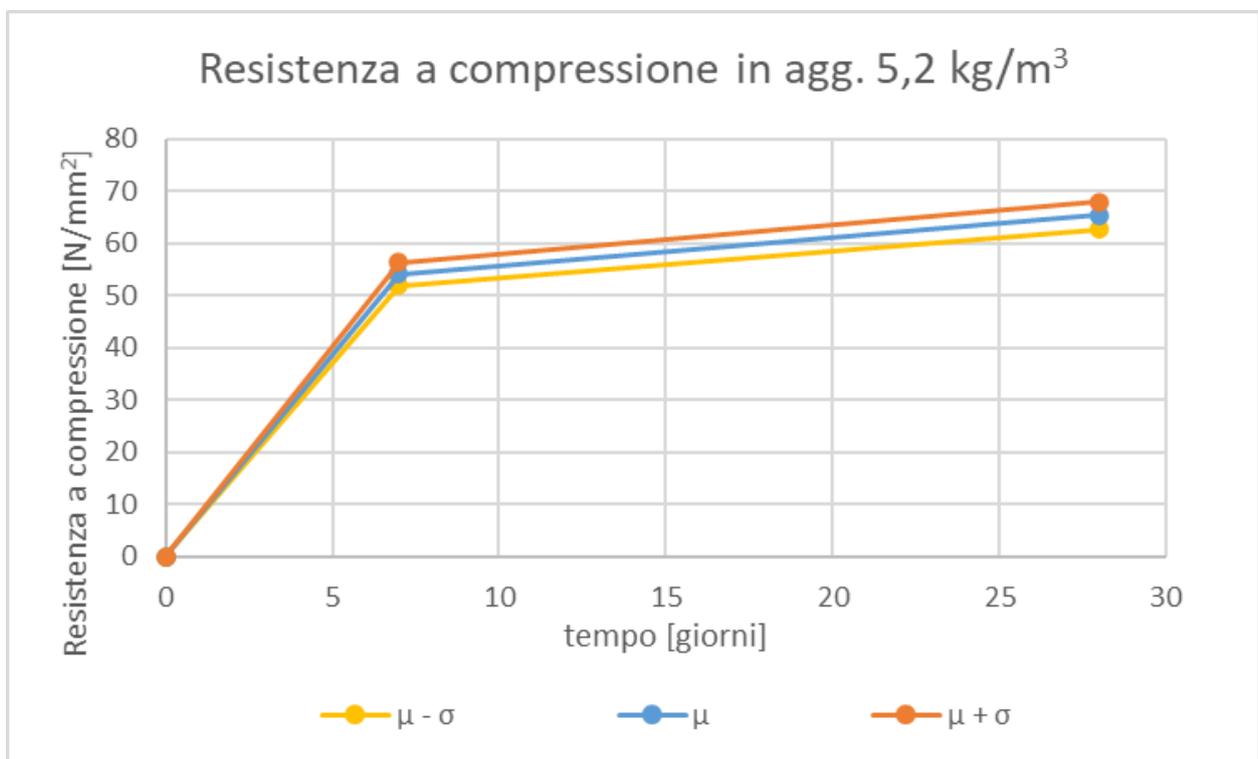


Figura 45 Andamento resistenza media a compressione dei provini in aggiunta di 5.2 kg/m<sup>3</sup>

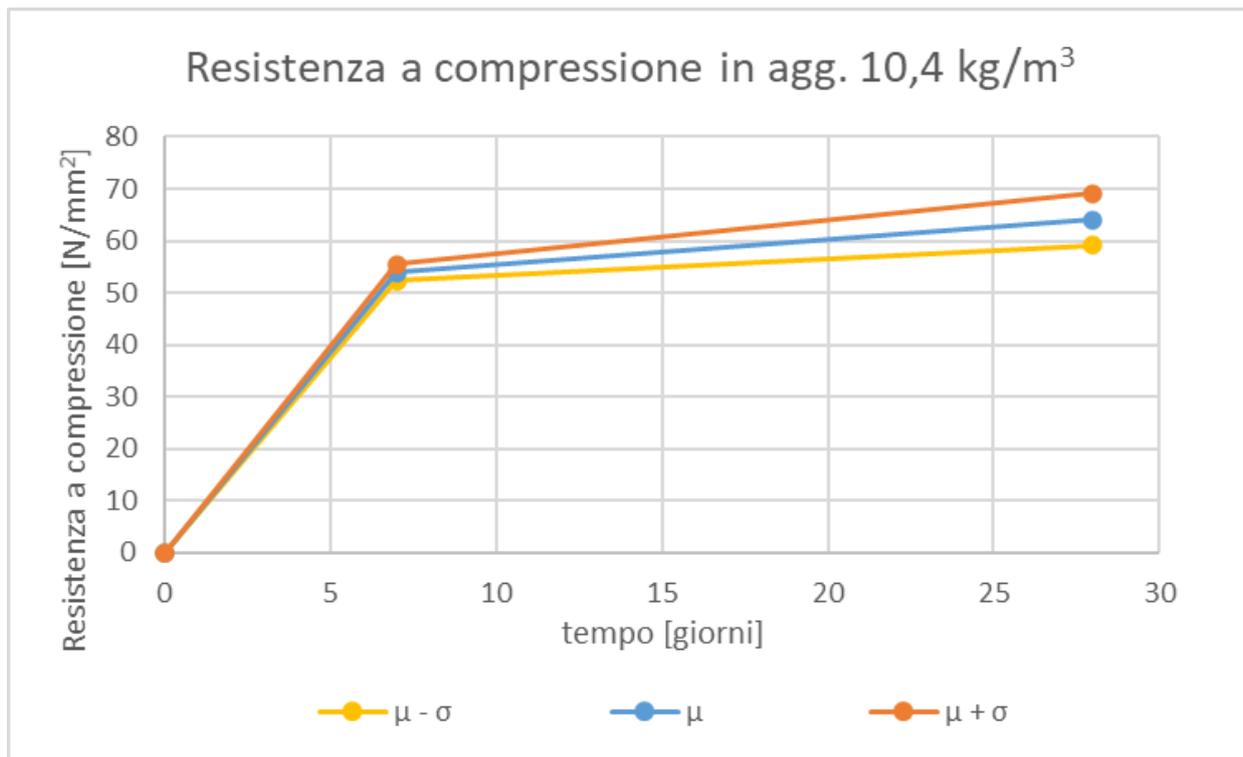


Figura 46 Andamento resistenza media a compressione dei provini in aggiunta di 10.4 kg/m<sup>3</sup>

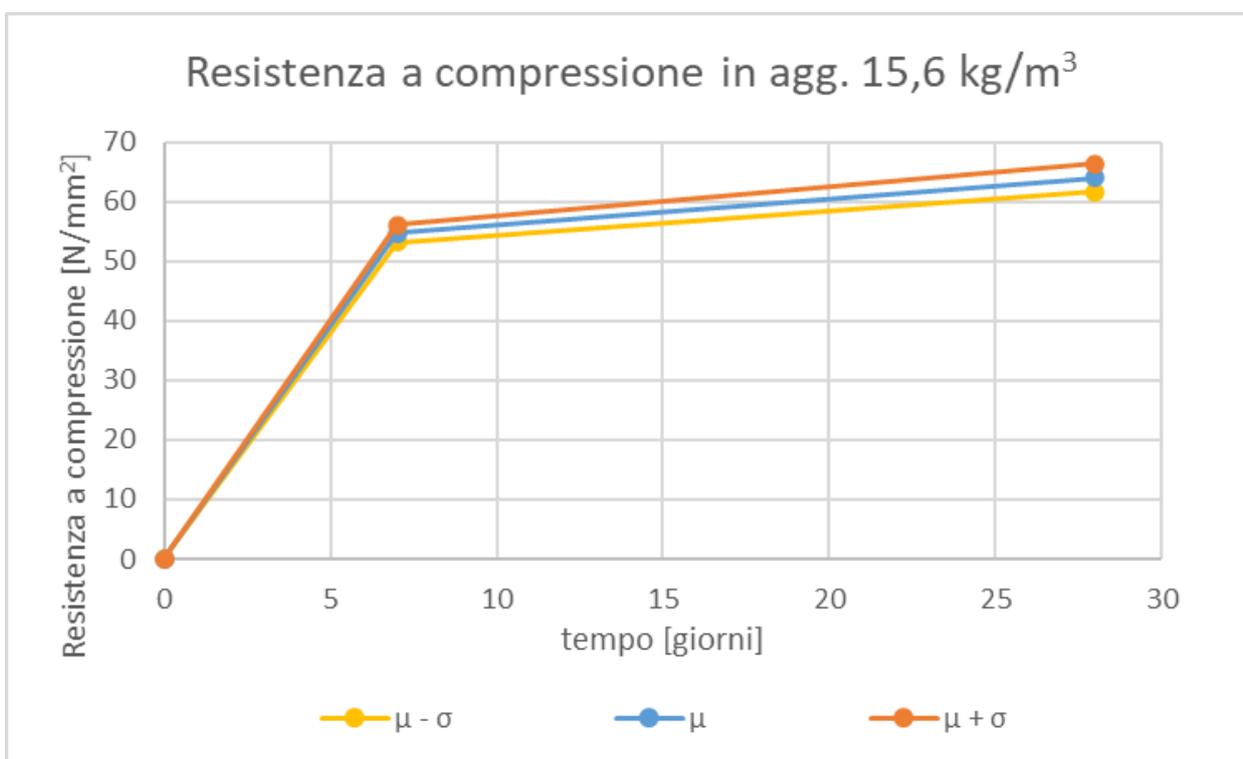


Figura 47 Andamento resistenza media a compressione dei provini in aggiunta di 15.6 kg/m<sup>3</sup>

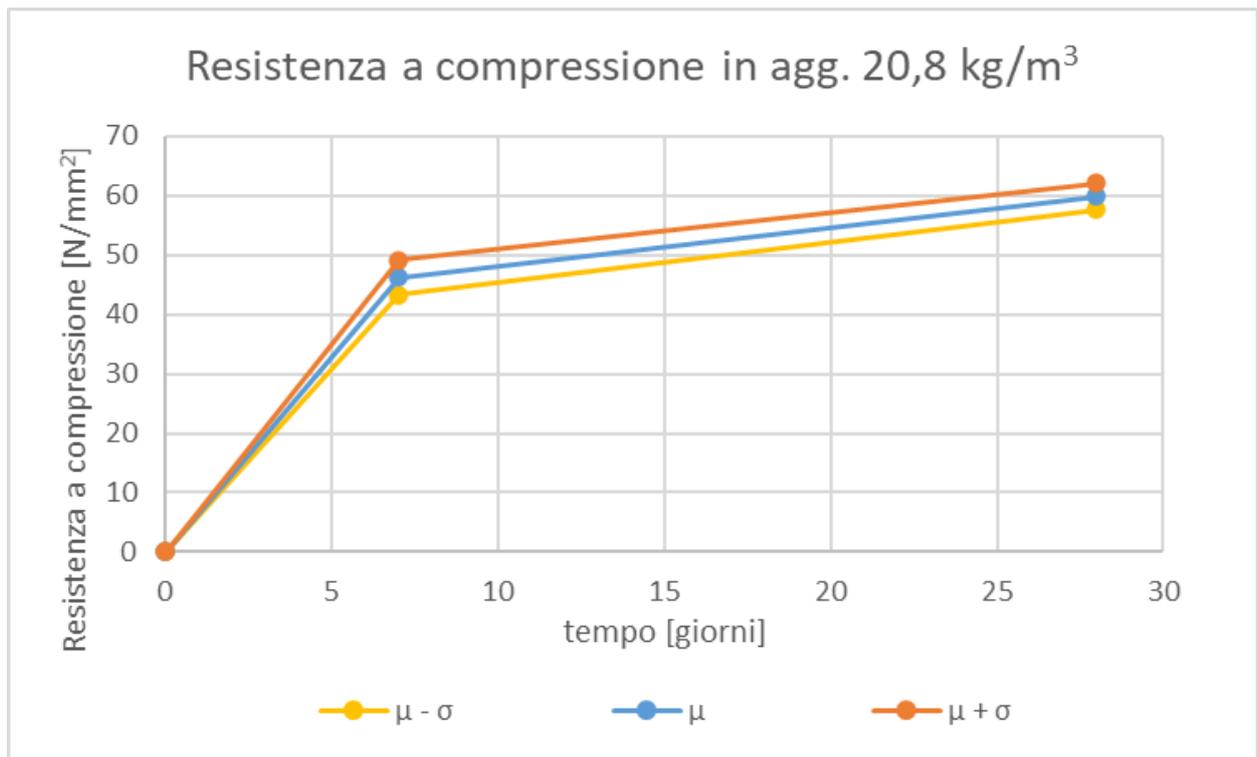


Figura 48 Andamento resistenza media a compressione dei provini in aggiunta di 20.8 kg/m<sup>3</sup>

Nome	Volume [mm <sup>3</sup> ]	Peso [g]	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	R <sub>comp.</sub> [kN]		R <sub>Com,med</sub> [kN]	R <sub>Com,med</sub> [MPa]
Assenza di fibre a 7 giorni	271184,9	589	2,17195E-09	85,730	86,7	88,0	55,0
	251700,1	590	2,34406E-09	92,860	93,2		
	277572,1	594	2,13998E-09	82,070	87,2		
Assenza di fibre a 28 giorni	269415,5	623	2,31241E-09	110,12	111,58	104,6	65,4
	263495,9	619	2,34918E-09	103,24	96,39		
	263268,6	617	2,34361E-09	101,68	108,62		
	266462,6	611	2,29301E-09	100,25	95,61		
	268382,9	608	2,26542E-09	106,93	105,37		
Agg. 5,21 kg/m <sup>3</sup> a 7 giorni	265686,2	590	2,22066E-09	90,280	80,8	86,6	54,2
	263336,2	588	2,23289E-09	87,780	87,8		
	261672,3	586	2,23944E-09	84,150	89,1		
Agg. 5,21 kg/m <sup>3</sup> a 28 giorni	269678,4	610	2,26195E-09	105,41	110,6	104,6	65,3
	264191,5	600	2,27E-09	106,49	107,1		
	268007,2	608	2,27E-09	105,28	111,0		
	259791,4	603	2,32109E-09	98,59	97,8		
	264186,9	609	2,30519E-09	104,33	102,7		
	257442,6	600	2,33062E-09	105,39	99,9		
Agg. 10,42 kg/m <sup>3</sup> a 7 giorni	267152,5	588	2,20099E-09	82,410	86,6	86,2	53,9
	268494,2	604	2,24958E-09	86,570	84,3		
	267311,9	596	2,22961E-09	87,520	89,9		
Agg. 10,42 kg/m <sup>3</sup> a 28 giorni	267258,4	624	2,33482E-09	96,35	97,4	102,6	64,1
	275063,8	624	2,26856E-09	93,7	90,2		
	269478,4	619	2,29703E-09	105,71	106,2		
	262487,7	598	2,2782E-09	108,63	110,0		
	257504,7	581	2,25627E-09	116,19	111,0		
	262548,9	583	2,22054E-09	96,06	100,0		
Agg. 15,63 kg/m <sup>3</sup> a 7 giorni	266022,4	588	2,21034E-09	90,040	88,1	87,4	54,6
	266874,2	591	2,21453E-09	87,660	88,2		
	264018,2	584	2,21197E-09	87,510	83,2		
Agg. 15,63 kg/m <sup>3</sup> a 28 giorni	263879,4	618	2,34198E-09	101,82	107,5	102,4	64,0
	273209,2	614	2,24736E-09	104,51	104,3		
	264065,9	618	2,34033E-09	101,26	101,5		
	270199,3	590	2,18357E-09	102,57	107,2		
	262354,4	597	2,27555E-09	103,48	95,1		
	257003,3	592	2,30347E-09	96,51	103,0		
Agg. 20,83 kg/m <sup>3</sup> a 7 giorni	267943,1	580	2,16464E-09	66,530	73,0	73,9	46,2
	266918,1	581	2,1767E-09	73,100	77,9		
	263287	576	2,18773E-09	79,910	73,1		
Agg. 20,83 kg/m <sup>3</sup> a 28 giorni	269993,5	586	2,17042E-09	95,11	103,1	95,8	59,8
	263164,7	580	2,20394E-09	98,58	99,6		
	267620,5	580	2,16725E-09	96,21	95,2		
	257763,1	578	2,24237E-09	94,11	96,1		
	261833,5	574	2,19223E-09	89,28	92,1		
	263533,3	574	2,17809E-09	93,11	96,6		

Figura 49 Estratto di calcolo – Resistenza a compressione provini 40x40x160 mm, a 7 e 28 giorni

## 4 - Determinazione delle resistenze meccaniche su provini di dimensioni 100x100x500 mm

### 4.1 – Principio

Sono stati confezionati 8 provini cilindrici, di dimensione 100x100x500 mm, e 2 provini cilindrici, di diametro 150 mm ed altezza 300 mm, con differenti contenuti di fibre:

- 2 provini prismatici e 2 provini cilindrici bianchi ovvero in assenza di fibre;
- 2 Pirovini prismatici con una aggiunta di 5.21 kg/m<sup>3</sup> di fibre pari al 0,19% della massa totale;
- 2 provini prismatici con una aggiunta di 10.42 kg/m<sup>3</sup> di fibre pari al 0,39% della massa totale;
- 2 provini prismatici e 2 provini cilindrici con una aggiunta di 15.63 kg/m<sup>3</sup> di fibre pari al 0,39% della massa totale.

Lo scopo della confezionatura dei provini è stato di:

- Determinare del modulo elastico dinamico e statico dei provini: analizzando la variabilità dei dati al variare delle condizioni di vincolo e determinando la variabilità del modulo elastico al variare del contenuto di fibre;
- Determinare il ritiro in funzione del tempo.

### 4.2 – Materiali impiegati

#### 4.2.1 - Aggregato

Mediante la UNI EN 13139, si sono definite le proprietà del aggregato, naturale, normale impiegato per la preparazione dei prismi di malta, di dimensione 100x100x500 mm, e dei cilindri, di dimensione 150x300 mm.

Dall'analisi granulometrica, si riporta che si tratta di un aggregato di dimensioni 0/4 mm con un contenuto di fini rientrante nella categoria 2, dato che:

- Al setaccio di dimensione 2·D, ovvero di 8 mm, si ha una frazione passante del 100%, pari a quanto richiesto;
- Al setaccio di dimensione 1,4·D, ovvero di 5,6 mm, si ha una frazione superiore passante del 95% pari a quanto richiesto;
- Al setaccio di dimensione D, ovvero di 4 mm, si ha una frazione passante del 95%, superiore al 85% ed inferiore al 99%;
- Il contenuto di fini totale risulta pari a 3,9% della massa totale, inferiore al 5%, definito dalla categoria 2.

Dimensioni dell'aggregato mm	Limiti per la percentuale in massa del passante				
	Sopravaglio			Sottovaglio	
	2 $D^{a)}$	1,4 $D^{b)}$	$D^{c)}$	$d$	0,5 $d^{b)}$
0/1	100	da 95 a 100	da 85 a 99	-	-
0/2	100	da 95 a 100	da 85 a 99	-	-
0/4	100	da 95 a 100	da 85 a 99	-	-
0/8	100	da 98 a 100	da 90 a 99	-	-
2/4	100	da 95 a 100	da 85 a 99	da 0 a 20	da 0 a 5
2/8	100	da 98 a 100	da 85 a 99	da 0 a 20	da 0 a 5

a) Se necessario, per fini particolari, lo staccio su cui passa il 100% può essere specificato per un valore minore di 2  $D$ . Per malta a strato sottile (0/1) il 100% deve passare a  $D$ .

b) Qualora gli stacci calcolati come 0,5  $d$  e 1,4  $D$  non siano esattamente corrispondenti ai numeri indicati nella serie ISO 565:1990/R20 deve essere adottata la dimensione più prossima di staccio successiva.

c) Se la percentuale di passante a  $D$  è >99 % in massa, il produttore deve documentare e dichiarare la granulometria tipica includendo gli stacci identificati nel prospetto 2.

Figura 50 Estratto UNI EN 13139 – Limite sopravaglio e sottovaglio

Frazione granulometrica mm	Percentuale massima in massa di passante allo staccio 0,063 mm				
	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4	Categoria 5
0/1 <sup>a)</sup>	3	5	8	30	>30 <sup>a)</sup>
0/2	3	5	8	30	-
0/4; 2/4 <sup>b)</sup>	3	5	8	30	-
0/8; 2/8 <sup>b)</sup>	3	5	8	11	-

a) Valore da dichiarare da parte del produttore.

b) Gli aggregati di dimensioni 2/4 e 2/8 sono utilizzati nelle malte solo in combinazione con le dimensioni 0/1; 0/2; 0/4 e 0/8. Le combinazioni delle dimensioni devono essere conformi ai limiti per il contenuto di fini della relativa dimensione dell'aggregato combinato.

Figura 51 Estratto UNI EN 13139 – Limite per il contenuto di fini

Si tratta di un aggregato normale siccome la massa volumica dei granuli essiccati, pari a 2760 kg/m<sup>3</sup>, risulta superiore a 2000 kg/m<sup>3</sup> ed inferiore a 3000 kg/m<sup>3</sup>, in accordo alla UNI EN 206.

#### 4.2.1.1 - Determinazione della granulometria

La distribuzione granulometrica dell'aggregato è stata definita mediante la UNI EN 933-1.

#### Procedura prova

La prova consiste principalmente nella pesatura delle masse trattenute ai rispettivi setacci di interesse al fine di definire la dimensione delle granuli. Inizialmente, il campione di sabbia umido è stato essiccato mediante l'uso di un forno industriale ad una temperatura di 110 °C e pesato per ottenere la massa totale essiccata  $M_1$ . Successivamente, si è ricoperto il campione con dell'acqua corrente e mediante scuotimento si è cercato di rimuovere la porzione di fine, frazione granulometrica passante al setaccio di 0,063 mm, del campione di sabbia; tale procedura è stata svolta più volte ma non garantisce una rimozione completa. Il campione è stato essiccato, ad una temperatura di 110°C, e pesato nuovamente per ottenere la massa essiccata precedentemente lavata  $M_2$ . Dalla sottrazione tra  $M_1$  ed  $M_2$  si ottiene la massa della porzione fine rimossa.

In seguito, il campione è stato setacciato meccanicamente mediante l'ausilio di una batteria di setacci con una dimensione di apertura della maglia in via decrescente, da 6,3 mm a 0,063 mm, e pesando le varie frazioni trattenute  $R_i$ . In fine, la frazione fine P, il residuo non rimosso durante la fase di lavaggio e scuotimento, è stata scartata.

### Elaborazione dati

Definite le varie masse trattenute ai vari setacci  $R_i$  si è in grado di formulare la curva granulometrica e mediante la formulazione sotto riportata la percentuale di fine totale del campione.

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \quad [\%]$$

I risultati ottenuti risultano validi se lo scarto tra la massa totale finale, somma delle masse trattenute ad ogni setaccio  $R_i$  assieme alla frazione fine P, e la massa totale essiccata iniziale  $M_1$  risulta minore del 1%.

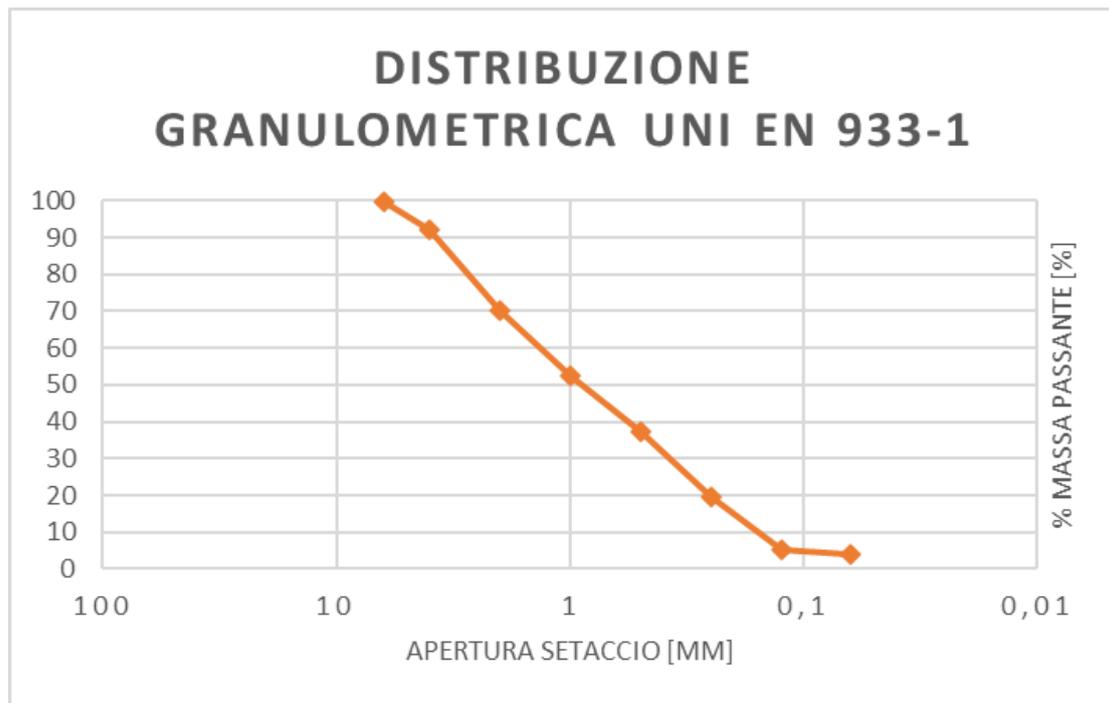
$$\text{Scarto} = \frac{M_2 - [(\sum R_i) + P]}{M_2} < 1 \quad [\%]$$

Distribuzione granulometrica - UNI EN 933-1		
Massa essiccata	$M_1$ [g]	2024,2
Massa essiccata (prec. lavata)	$M_2$ [g]	1955,4
Fini romosso	$M_2 - M_1$ [g]	68,8
% Fine passante vaglio 0,063 mm	f [%]	3,8583144
Somma Massa trattenuta	$\sum R_i + P$ [g]	1949,7
Limite scarto vaglio 1%	R [%]	0,29150046

Figura 52 Dati iniziali di calcolo

Distribuzione granulometrica - UNI EN 933-1					
Apertura setaccio [mm]		Massa trattenuta [g]	Massa passante [g]	% Massa trattenuta [%]	% Massa passante [%]
6,3	$R_1$	2,2	2022	0,108684913	99,8913151
4	$R_2$	157,2	1864,8	7,766031025	92,1252841
2	$R_3$	445,7	1419,1	22,01857524	70,1067088
1	$R_4$	358,8	1060,3	17,72552119	52,3811876
0,5	$R_5$	303,7	756,6	15,00345816	37,3777295
0,25	$R_6$	361,2	395,4	17,84408655	19,5336429
0,125	$R_7$	293,3	102,1	14,48967493	5,04396799
0,063	$R_8$	18,3	83,8	0,904060864	4,13990712
Fondo	P	9,3			

Figura 53 Calcolo % masse trattenute



*Figura 54 Andamento distribuzione granulometrica*

#### *4.2.2.1.2 - Equivalente in sabbia*

La prova dell'equivalente in sabbia per la frazione 0/2 mm con un contenuto massimo di fine del 10%, valutato nella distribuzione granulometrica, impiegata al fine della determinazione del contenuto della frazione limo-argillosa all'interno della sabbia, è stata svolta mediante la UNI EN 933-8.

La prova consiste nell'uso di una soluzione di lavaggio e flocculante al fine di rimuovere i rivestimenti argillosi dai granuli, calcolando il valore di equivalente in sabbia SE come l'altezza del sedimento espressa come percentuale dell'altezza totale del sedimento e della sospensione nel cilindro.

#### Procedura prova

Inizialmente, si sono determinati due provini da 120 g ciascuno, dalla frazione granulometrica 0,063/2 mm, mediante setacciatura manuale. In seguito, si è versata la soluzione di lavaggio e flocculante, preparata diluendo 125 ml di soluzione concentrata su 5 l di acqua, fino al raggiungimento del livello inferiore segnato sul cilindro, ad una altezza di 100 mm dalla base; versando nei due cilindri i due rispettivi provini, mediante l'uso di un imbuto. Al fine di rimuovere le bolle d'aria, inumidire ed impregnare l'aggregato correttamente, prima si è battuto diverse volte con il palmo della mano e poi si sono lasciati riposare 10 minuti i due cilindri. Terminato il periodo di attesa di 10 minuti, i due provini, sigillati in sommità mediante l'ausilio di un tappo in gomma, sono stati agitati meccanicamente per 30 secondi. Successivamente, si è riversata la soluzione di lavaggio sia per risciacquare i due tappi e le pareti dei due cilindri, accertandosi che tutto il materiale tornasse all'interno della soluzione del provino, sia per raggiungere il livello superiore segnato, ad una altezza di 380 mm dalla base, mediante un movimento lento circolare, alzando ed abbassando il tubo rigido di metallo, per indurre i fini e i componenti argillosi a salire verso l'alto. I provini sono stati lasciati a riposare per 20 minuti e successivamente si sono misurate le due altezze di interesse.

L'altezza  $H_1$  del livello superiore della sospensione dell'aggregato è stata misurata dalla base del cilindro mentre l'altezza  $H_2$  del sedimento è stata determinata inizialmente inserendo all'interno dei cilindri il gruppo stantuffo e successivamente misurando la distanza tra la faccia inferiore della testa dello stantuffo e la faccia superiore del collare.

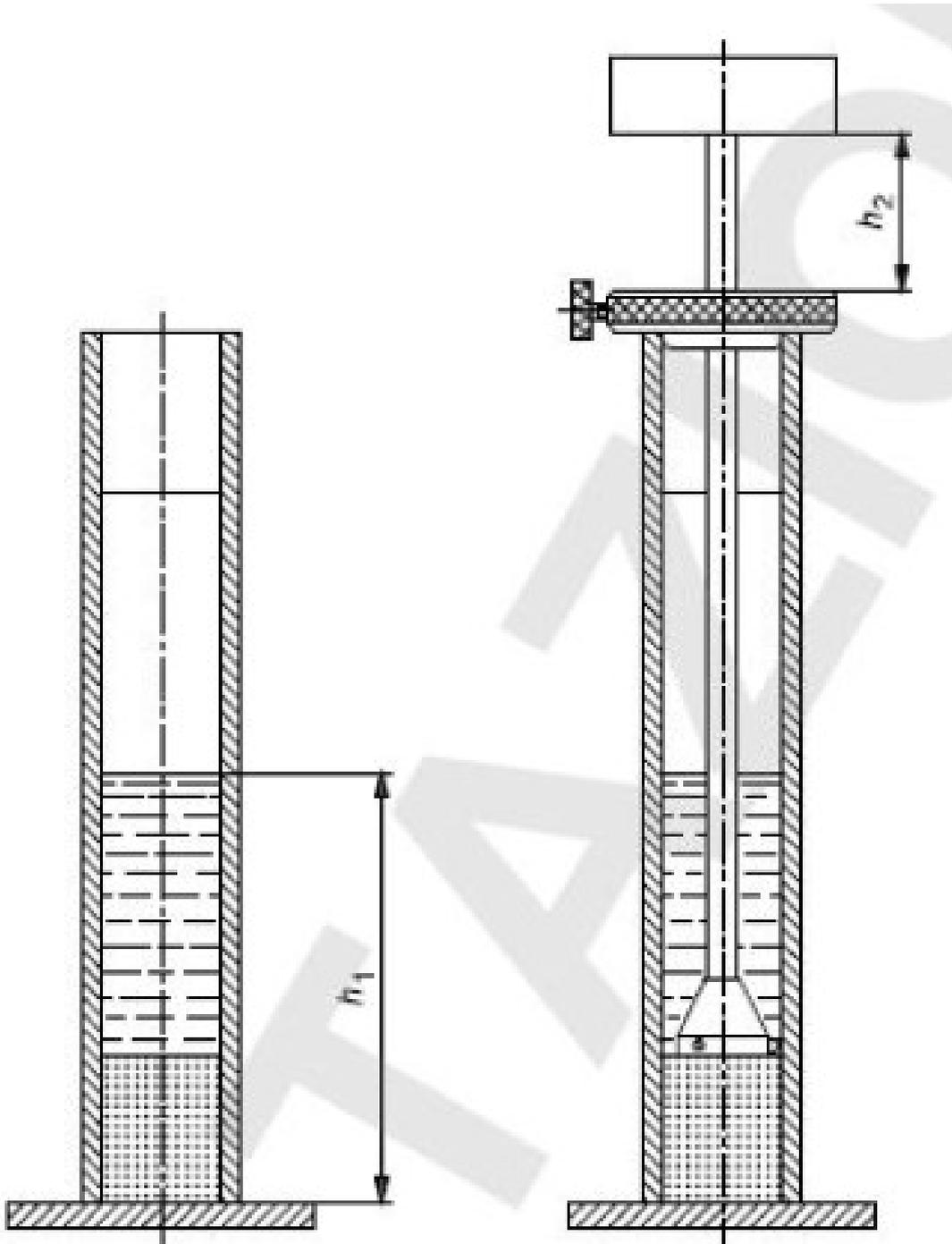


Figura 55 Estratto UNI EN 933-3 - Misurazione di  $H_1$  e  $H_2$

## Elaborazione dati

Per determinare il valore dell'equivalente in sabbia  $SE_{(10)}$ , si è calcolato il rapporto  $(H_2/H_1) \cdot 100$ , per ambi due i cilindri; se la differenza tra i due valori dell'equivalente in sabbia non risulta superiore a 4 unità allora l'esito della prova risulta accettabile e il valore finale, da considerare, risulterà la media tra i due valori  $SE_{(10)}$ .

$$SE = \frac{SE_{(Provino\ 1)} + SE_{(Provino\ 2)}}{2} = 87,81\ %$$

UNI EN 933-8			
Altezza superiore sospensione p. n°1	$H_{1,Prv1}$	10,3	[mm]
Altezza sedimento p. n°1	$H_{2,Prv1}$	8,9	[mm]
Equivalente in sabbia n°1	$SE_1$	86,40777	[%]
Altezza superiore sospensione p. n°2	$H_{1,Prv2}$	10,2	[mm]
Altezza sedimento p. n°2	$H_{2,Prv2}$	9,1	[mm]
Equivalente in sabbia n°2	$SE_2$	89,21569	[%]
Differenza Equivalente in sabbia	$ SE_1 - SE_2 $	2,807919	[%]
Valore limite diff. Equivalente in sabbia	$ SE_1 - SE_2 _{lim}$	4	[%]
Esito	Esito accettabile!		
Massa essiccata	$M_1$	2024,2	[g]
Massa essiccata (prec. lavata)	$M_2$	1955,4	[g]
Contenuto fine	f	3,398874	[%]
Contenuto limite fine	$f_{lim}$	10	[%]

Figura 56 Tabella valori di calcolo

### 4.2.2.1.3 - Massa volumica ed assorbimento d'acqua

La prova per la determinazione della massa volumica dei granuli e dell'assorbimento d'acqua è stata svolta mediante la UNI EN 1097-6.

La massa volumica risulta determinata dal rapporto tra massa e volume. Il valore della massa è determinato dalla pesatura dell'aggregato nelle condizioni di saturazione a superficie asciutta e nelle condizioni essiccate mentre il volume viene determinato dalla massa d'acqua spostata, mediante il metodo con picnometro.

#### Metodo con picnometro

Inizialmente si determinata la massa  $M_3$ , ovvero la massa del picnometro traboccante d'acqua assieme al tappo, evitando possibili vuoti d'aria presenti. Poi, determinata la frazione granulometrica 0,063/4 mm, si sono porzionati due campioni da versare all'interno dei due picnometri con l'aggiunta di acqua, fino a ricoprire gli aggregati. Sia l'aggregato, nelle sue condizioni iniziali secche, che i due picnometri vuoti sono stati pesati precedentemente. Successivamente, si è cercato di far fuoriuscire possibili vuoti d'aria, mediante scuotimento e rotazione dei due campioni, ed in seguito si sono lasciati a riposo, all'interno di un bagno d'acqua, per 24 ore. Terminata l'attesa, si sono riempiti fino a traboccare i due strumenti con acqua, posizionando anche il tappo, e

misurando il peso totale  $M_2$  ovvero la massa del picnometro contenente l'aggregato saturo con acqua.

In fine, il contenuto dei due strumenti è stato versato all'interno di una bacinella e portato ad essiccazione fino a quando l'umidità superficiale non fosse più visibile, misurando il peso totale  $M_1$  ovvero la massa in aria dell'aggregato saturo, a superficie asciutta. Al fine di verificare che le condizioni di essiccazione risultassero adeguate, una porzione del campione è stato versato all'interno di un stampo metallico, a forma conica, e applicando 25 colpi in sommità, mediante un pestello metallico facendolo cadere liberamente per forza di gravità, e verificando che una volta rimosso lo stampo si avesse un collasso come riportato nella figura F.2 ovvero di aggregato sensibilmente umido.

figura F.1 **Aggregato umido; conserva in modo pressoché completo la forma dello stampo metallico**



figura F.2 **Aggregato sensibilmente umido; si comincia ad apprezzare un certo abbassamento al cono**



figura F.4 **Aggregato quasi completamente secco; non si distingue un picco centrale, la superficie è pressoché curvilinea**



Figura 57 Estratto UNI EN 1097-6 – Appendice F, guida per valutazione della saturazione

Elaborazione dati – Metodo con picnometro

Dalle formulazioni riportate all'interno della normativa si sono calcolate le masse volumiche dei granuli e l'assorbimento d'acqua per una immersione di 24 ore.

- Massa volumica apparente dei granuli

$$\rho_a = \rho_w \cdot \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]} = 2.76 \frac{Mg}{m^3}$$

- Massa volumica dei granuli essiccati in forno

$$\rho_{rd} = \rho_w \cdot \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]} = 2.73 \frac{Mg}{m^3}$$

- Massa volumica dei granuli in condizioni di saturazione a superficie asciutta

$$\rho_{ssd} = \rho_w \cdot \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]} = 2.74 \frac{Mg}{m^3}$$

- Assorbimento d'acqua per un'immersione di 24 ore

$$WA_{24} = \frac{100 \cdot (M_1 - M_4)}{M_4} = 0.37 \%$$

Dove:

- $\rho_w$  : massa volumica dell'acqua alla temperatura di 20 °C, tratto dall'appendice D;
- $M_1$  : massa in aria dell'aggregato saturo a superficie asciutta;
- $M_2$  : massa del picnometro contenente l'aggregato e l'acqua;
- $M_3$  : massa del picnometro riempito con acqua;
- $M_4$  : massa in aria dell'aggregato essiccato in forno.

Determinazione massa volumica ed assorbimento d'acqua per frazione granulometrica 0,063/4 mm - UNI EN 1097-6				
Peso picnometro	a	146,14	143,81	[g]
Peso picnometro + Inerti	b	512,92	487,60	[g]
Peso picnometro + inerti + acqua	$M_2$	672,55	658,83	[g]
Temperatura	T	21,00	21,00	[°C]
Peso picnometro + acqua	$M_3$	438,88	439,64	[g]
Massa in aria aggregato essiccato in stufa	$M_4$	366,78	343,79	[g]
Massa in aria aggregato saturo a superficie asciutta	$M_1$	713,17		[g]
Massa volumica acqua a T = 21°C	$\rho_w$	0,9980		[Mg/m <sup>3</sup> ]
Massa volumica apparente dei granuli	$\rho_a$	2,76	2,76	[Mg/m <sup>3</sup> ]
	$\rho_{a,medio}$	2,76		[Mg/m <sup>3</sup> ]
Massa volumica dei granuli essiccati in stufa	$\rho_{rd}$	2,73		[Mg/m <sup>3</sup> ]
Massa volumica dei granuli in condizioni di saturazione a superficie asciutta	$\rho_{ssd}$	2,74		[Mg/m <sup>3</sup> ]
Assorbimento d'acqua a 24 ore	$WA_{24}$	0,37		[%]

Figura 58 Estratto di calcolo – determinazione massa volumica ed assorbimento d'acqua

#### 4.2.2 - Cemento

Come cemento è stato impiegato un Portland bianco 52,5R tipo I ad altissima resistenza normalizzata e a resistenza iniziale elevata. La scelta è ricaduta nel seguente cemento al fine di distinguere le fibre, a rottura avvenuta del provino, definendone il comportamento.

Il cemento risulta conforme alle indicazioni della UNI EN 197-1.

REQUISITI CEMENTI UNI EN 197-1	
Requisiti chimici - valori caratteristici	
Perdita a fuoco	≤ 5,0%
Residuo insolubile	≤ 5,0%
Solfati (come SO <sub>3</sub> )	≤ 4,0%
Cloruri	≤ 0,1%
Requisiti fisici - valori caratteristici	
Tempo di inizio presa	≥ 45 min
Espansione	≤ 10 min
Requisiti meccanici - valori caratteristici	
Resistenza a compressione a 2 giorni	≥ 30 MPa
Resistenza a compressione a 28 giorni	≥ 52,5 MPa

Figura 59 Requisiti cemento Portland impiegato

#### 4.2.3 - Acqua

La normativa UNI 196-1 richiede unicamente che l'acqua adoperata per l'impasto cementizio risulti potabile.

#### 4.2.4 - Fibre in basalto

Sono state impiegate microfibre naturali in basalto, denominate MasterFiber 050, ottenute mediante un processo di fusione di roccia basaltica, successiva filatura in fibra ed in fine taglio alla lunghezza desiderata. Tale fibra può vantare di:

- Una elevata stabilità al calore;
- Caratteristiche isolanti;
- Elevati valori di resistenza e durevolezza;
- Non risultare tossica.

CARATTERISTICHE CHIMICO-FISICHE FIBRE IN BASALTO	
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	2,65
Punto di fusione [°C]	1,35
Diametro [mm]	0,013
Lunghezza fibra [mm]	16
Rapporto lunghezza/diametro	1,23
Colore	Marrone
Resistenza a trazione [MPa]	2800
Modulo elastico [MPa]	84000
Allungamento alla rottura [%]	2,8
Assorbimento d'acqua	Nulla

Figura 60 Caratteristiche chimico-fisiche fibre in basalto

Le dimensioni fisiche delle fibre scelte garantiscono un'ottima disperdibilità rispetto ad altre fibre all'interno della miscela cementizia, garantendo una distribuzione omogenea al fine di massimizzare l'efficienza.

#### 4.3 – Realizzazione dei provini



*Figura 61 Provini cilindrici e prismatici in assenza di fibre*

Per la confezionatura dei nuovi provini ci si è affidati alle linee guida della UNI 196-1, nonostante essa tratti la preparazione di provini prismatici di dimensioni 40x40x160 mm. Le frazioni dei vari costituenti del composito sono state definite: inizialmente considerando una semplice proporzione in volume ed in seguito considerando l'umidità della sabbia. Si è preferito, al fine di velocizzare l'iter di produzione, definire l'umidità della sabbia prelevando un campione umido ed essicandolo con l'uso di alcol. Nota la quantità di acqua evaporata, si è potuto rettificare i valori della sabbia e del cemento.

La realizzazione di un provino prismatico, ha richiesto:

- 9173 g di sabbia;
- 2930 g di cemento;
- 1081 g di acqua;
- Contenuto variabile di fibre: 0 g – 26 g – 52 g – 78 g.

Mentre, la realizzazione di un provino cilindrico, ha richiesto:

- 9726 g di sabbia;
- 3106 g di cemento;
- 1147 g di acqua;
- Contenuto variabile di fibre: 0 g – 28 g – 55 g – 83 g.

Dati essiccazione mediante alcol		
Peso pentola	1566,1	[g]
Peso pentola + inerte umido	2913,7	[g]
Peso pentola + inerte secco	2854,9	[g]
Umidità	4,363313	[%]

Figura 62 Umidità campione sabbia

	SABBIA	CEMENTO	ACQUA	FIBRE				
Dosaggio standard	1350	450	225	0	4	8	12	[g]
Dosaggio modificato	1408,905	450	166,0953	0	4	8	12	[g]
Volume 40x40x160	0,000256							[m <sup>3</sup> ]
Volume 100x100x500	0,005							[m <sup>3</sup> ]
Volume Cilindrico	0,005301438							[m <sup>3</sup> ]
Dosaggio 100x100x500	9172,557	2929,688	1081,349	0	26,04167	52,08333	78,125	[g]
Dosaggio Cilindrico	9725,547	3106,311	1146,541	0	27,61165	55,22331	82,83496	[g]

Figura 63 Nuove frazioni costituenti composito

Inizialmente si sono pesati i vari costituenti, con l'ausilio di una bilancia, da versare nella betoniera a bicchiere per la miscelazione meccanica. Durante la fase di miscelazione, le pareti dello stampo a contatto con il conglomerato cementizio sono state oleate con del disarmate al fine di estrarre i provini con facilità senza rischiare di danneggiarli. In seguito, si è versata, uniformemente, una prima metà del conglomerato all'interno dello stampo, la quale è stata vibrata mediante un ago vibrante per calcestruzzi al fine di rimuovere possibili vuoti d'aria. Dopo aver ottenuto un composito ben compattato si è versata la seconda metà e si è avviata una seconda fase di vibrazione.



*Figura 64 Provini prismatici e cilindrici*

In caso di necessità, mediante l'ausilio di una spatolina o una cazzuola si è livellato il provino ed in fine si è disposto a maturazione per 24 ore.

Il processo indicato è stato applicato nuovamente per i restanti provini previo lavaggio della betoniera a bicchiere, della spatolina, della cazzuola al fine di non contaminare i successivi campioni.

#### 4.4 – Condizionamento dei provini



*Figura 65 Maturazione provini*

Una volta estratti i provini dai rispettivi stampi, mediante un getto d'aria, si è inciso con un pennarello le caratteristiche per l'identificazione dei vari campioni. In seguito, i provini cilindrici sono stati adagiati all'interno delle vasche d'acqua, a una temperatura controllata di 20°C, mentre i provini prismatici sono stati collocati all'interno di un armadio climatico, a temperatura controllata di 20 °C circa, per maturare fino alla data di prova prestabilita.

## 4.4 – Prova ritiro

### 4.4.1 – Descrizione della prova



*Figura 66 Lettura distanza perni di riscontro*

La prova di ritiro è stata svolta seguendo la UNI EN 1239-16, per le seguenti date:

- Tempo: 0 ore dallo scasseramento;
- Tempo: 7 giorni dallo scasseramento;
- Tempo: 14 giorni dallo scasseramento;
- Tempo: 21 giorni dallo scasseramento;
- Tempo: 28 giorni dallo scasseramento.

Dopo aver scasserato i provini a 24 ore dal getto, si sono fissati saldamente i perni di riscontro con della colla adesiva. In seguito, mediante un calibro si è registrata la distanza tra i due perni per i vari provini e mediante una bilancia si è registrato il peso. Successivamente, i provini sono stati collocati in un ambiente a temperatura controllata di 20 °C ed una umidità relativa del 50%.

#### 4.4.2 – Elaborazione dati

Si è riscontrato che all'aumentare del contenuto di fibre di basalto si ha una riduzione del ritiro totale, ovvero, del:

- 5.74% per i provini caratterizzati da una aggiunta di 5.2 kg/m<sup>3</sup>;
- 15.14% per i provini caratterizzati da una aggiunta di 10.4 kg/m<sup>3</sup>;
- 17.49% per i provini caratterizzati da una aggiunta di 15.6 kg/m<sup>3</sup>.

Il valore della deformazione da ritiro totale del provino risulta calcolata:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = [l(t_0) - l_{cs}(t)]/L_0$$

Dove:

- L<sub>0</sub> è la lunghezza di riferimento, pari a 300 mm;
- l(t<sub>0</sub>) è la lunghezza iniziale al tempo t<sub>0</sub> in mm;
- l<sub>cs</sub>(t) è la lunghezza al tempo t in mm;
- ε<sub>cs</sub>(t,t<sub>0</sub>) è la deformazione da ritiro totale del provino al tempo t.

	Numero prov.	Provini prismatici 100x100x500					
		t = 0 ore		t = 24 ore		t = 7 giorni	
		Lettura [mm]	Peso [g]	Lettura [mm]	Peso [g]	Lettura [mm]	Peso [g]
Assenza di fibre	1	0,086	11195	0,066	11153	0,021	11119
	2	0,272	11270	0,250	11220	0,199	11181
Agg. 5,2 kg/m <sup>3</sup>	1	-0,292	11205	-0,316	11141	-0,352	11090
	2	0,627	11028	0,608	10970	0,566	10920
Agg. 10,4 kg/m <sup>3</sup>	1	0,375	11310	0,360	11266	0,317	11251
	2	0,645	11233	0,622	11188	0,589	11171
Agg. 15,6 kg/m <sup>3</sup>	1	0,129	11099	0,125	11036	0,089	10998
	2	-0,352	11998	-0,367	10933	-0,406	10879

Figura 67 Estratto calcolo – Letture distanza perni di riscontro e pesatura provino

	Numero prov.	Provini prismatici 100x100x500					
		t = 14 giorni		t = 21 giorni		t = 28 giorni	
		Lettura [mm]	Peso [g]	Lettura [mm]	Peso [g]	Lettura [mm]	Peso [g]
Assenza di fibre	1	-0,044	11053	-0,084	11037	-0,100	11006
	2	0,138	11114	0,096	11096	0,075	11064
Agg. 5,2 kg/m <sup>3</sup>	1	-0,419	11021	-0,460	11002	-0,471	10970
	2	0,511	10852	0,461	10835	0,445	10801
Agg. 10,4 kg/m <sup>3</sup>	1	0,264	11200	0,237	11190	0,217	11164
	2	0,523	11120	0,499	11109	0,478	11085
Agg. 15,6 kg/m <sup>3</sup>	1	0,032	10918	-0,003	10899	-0,021	10864
	2	-0,467	10806	-0,494	10787	-0,518	10752

Figura 68 Estratto calcolo - Letture distanza perni di riscontro e pesatura provino

		Ritiro					
		t = 0 ore	t = 24 ore	t = 7 g	t = 14 g	t = 21 g	t = 28 g
Assenza di fibre	Val. 1	0	-6,667E-05	-2,167E-04	-4,333E-04	-5,667E-04	-6,200E-04
	Val. 2	0	-7,333E-05	-2,433E-04	-4,467E-04	-5,867E-04	-6,567E-04
	Val.medio	0	-7,000E-05	-2,300E-04	-4,400E-04	-5,767E-04	-6,383E-04
Agg. 5,2 kg/m <sup>3</sup>	Val. 1	0	-8,000E-05	-2,000E-04	-4,233E-04	-5,600E-04	-5,967E-04
	Val. 2	0	-6,333E-05	-2,033E-04	-3,867E-04	-5,533E-04	-6,067E-04
	Val.medio	0	-7,167E-05	-2,017E-04	-4,050E-04	-5,567E-04	-6,017E-04
Agg. 10,4 kg/m <sup>3</sup>	Val. 1	0	-5,000E-05	-1,933E-04	-3,700E-04	-4,600E-04	-5,267E-04
	Val. 2	0	-7,667E-05	-1,867E-04	-4,067E-04	-4,867E-04	-5,567E-04
	Val.medio	0	-6,333E-05	-1,900E-04	-3,883E-04	-4,733E-04	-5,417E-04
Agg. 15,6 kg/m <sup>3</sup>	Val. 1	0	-1,333E-05	-1,333E-04	-3,233E-04	-4,400E-04	-5,000E-04
	Val. 2	0	-5,000E-05	-1,800E-04	-3,833E-04	-4,733E-04	-5,533E-04
	Val.medio	0	-3,167E-05	-1,567E-04	-3,533E-04	-4,567E-04	-5,267E-04

Figura 69 Estratto calcolo – Andamento ritiro

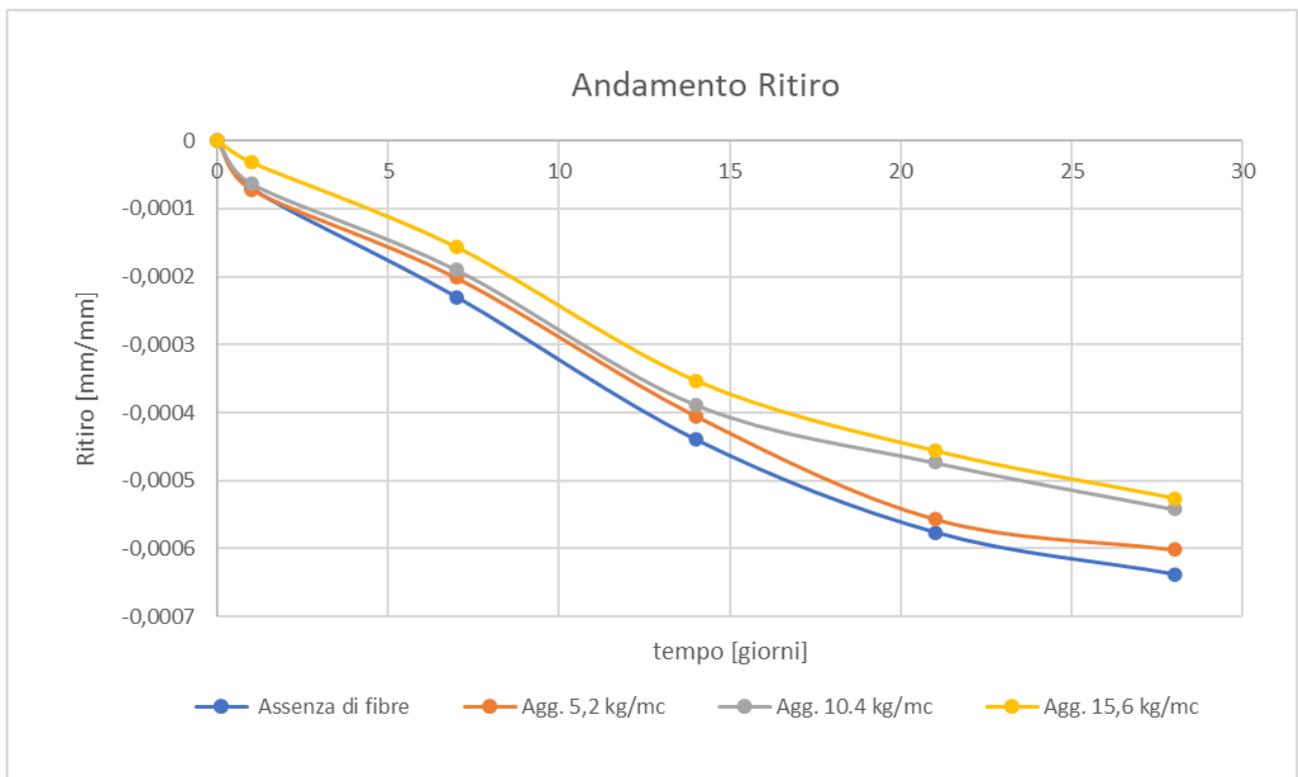
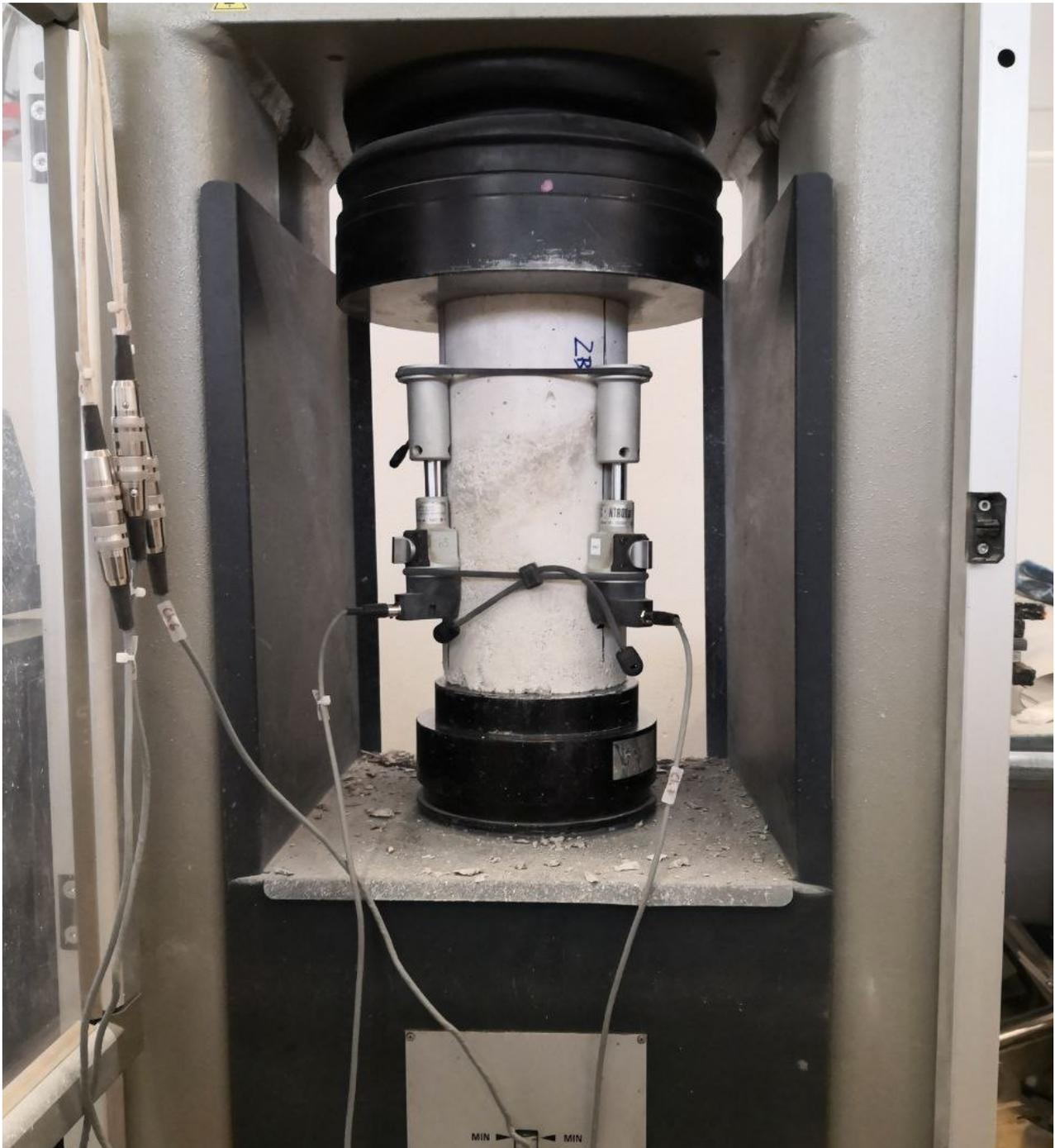


Figura 70 Andamento Ritiro

#### 4.5 – Prova statica modulo elastico secante



*Figura 71 Applicazione ciclo di carico per la determinazione del modulo elastico secante*

Il modulo elastico secante a compressione è stato determinato per:

- 2 provini cilindrici caratterizzati da assenza di fibre;
- 2 provini cilindrici caratterizzati da una aggiunta di  $15.6 \text{ kg/m}^3$ .

La prova è stata eseguita sia per determinare un possibile beneficio, dei valori resistenti, dall'aggiunta di fibre in basalto sia per stimare l'errore del modulo elastico dinamico.

#### 4.5.1 – Descrizione prova

Inizialmente si sono definite le tensioni ( $\sigma_a$  e  $\sigma_b$ ), da applicare ai vari provini cilindrici, per avviare il ciclo di carico e scarico. I valori delle tensioni limite sono state dedotte dai valori resistenti ottenuti dalla prova di compressione a rottura dei provini prismatici 40x40x160 mm.

$$\sigma_a = \frac{f_c}{3} = 17.7 \text{ MPa}$$

$$\sigma_b = 0.10 \cdot f_c = 5.31 \text{ MPa}$$

In seguito, si sono fissati gli estensimetri in posizione laterale al provino ad un'equidistanza radiale di 120° e mediante il software si è avviato il ciclo di carico – scarico come indicato al metodo B.

Al termine del ciclo si è definito il modulo secante elastico mediante la formulazione:

$$E_{C,S} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_b^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{a,2}}$$

Dove:

- $\sigma_a^m$  risulta la tensione limite superiore, al terzo ciclo di carico, in MPa
- $\sigma_b^m$  risulta la tensione limite inferiore, al terzo ciclo di carico, in MPa
- $\varepsilon_{a,3}$  risulta la deformazione, rispetto a  $\sigma_a^m$ , in  $\mu\varepsilon$ ;
- $\varepsilon_{a,2}$  risulta la deformazione, rispetto a  $\sigma_b^m$ , in  $\mu\varepsilon$ .

#### 4.5.2 – Elaborazione dati

La prova ha determinato i seguenti valori:

- Modulo elastico secante per il provino cilindrico in assenza di fibre n°1: 27474 N/mm<sup>2</sup>;
- Modulo elastico secante per il provino cilindrico in assenza di fibre n°2: 42867 N/mm<sup>2</sup>, tale valore viene scartato;
- Modulo elastico secante per il provino cilindrico in aggiunta di 15.6 kg/m<sup>3</sup> di fibre n°1: 27027 N/mm<sup>2</sup>;
- Modulo elastico secante per il provino cilindrico in aggiunta di 15.6 kg/m<sup>3</sup> di fibre n°2: 28003 N/mm<sup>2</sup>.

Scartando il valore anomalo, la media risulta:

- Modulo elastico secante per il provino cilindrico in assenza di fibre: 27474 N/mm<sup>2</sup>;
- Modulo elastico secante per il provino cilindrico in aggiunta di 15.6 kg/m<sup>3</sup> di fibre: 27515 N/mm<sup>2</sup>.

Ciò mostra che l'aggiunta di fibre non incrementa il valore resistente del modulo elastico statico secante.

Modulo Elastico secante

29474,21638

[N/mm<sup>2</sup>]

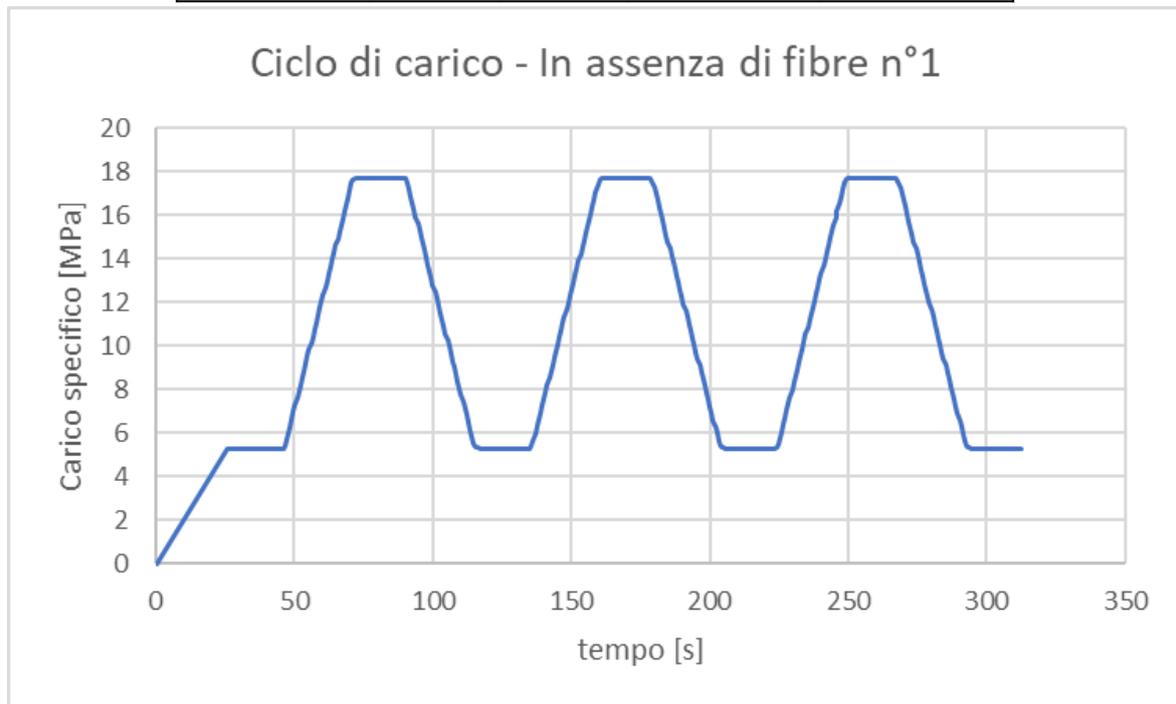


Figura 72 Grafico ciclo di carico – Provino in assenza di fibre n°1

Modulo Elastico secante

42867,25664

[N/mm<sup>2</sup>]

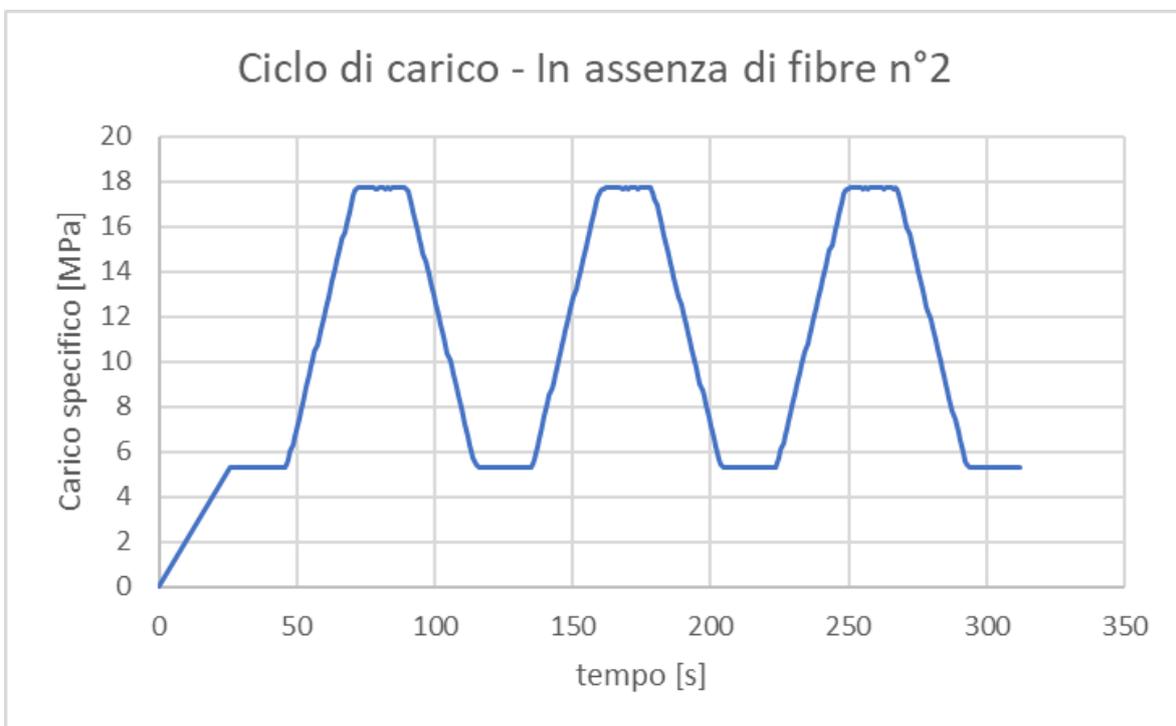


Figura 73 Grafico ciclo di carico – Provino in assenza di fibre n°2

Modulo Elastico secante

27027,02703

[N/mm<sup>2</sup>]

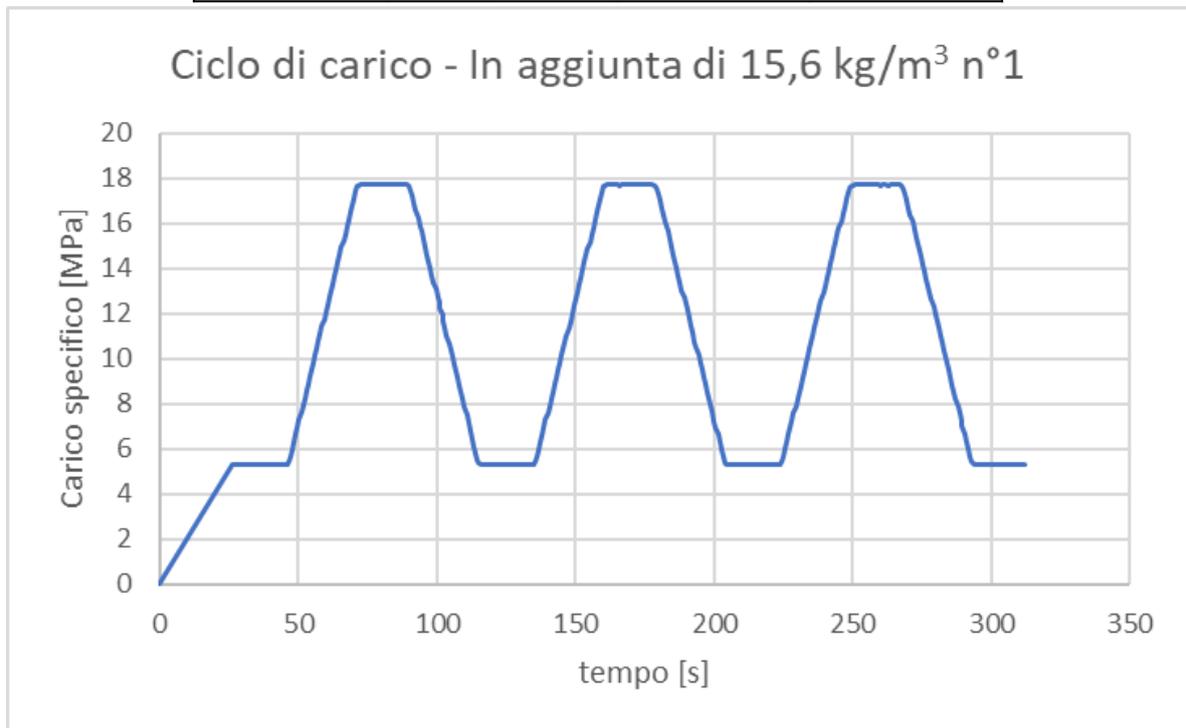


Figura 74 Grafico ciclo di carico – Provino in aggiunta di 15.6 kg/m<sup>3</sup> di fibre n°1

Modulo Elastico secante

28003,67563

[N/mm<sup>2</sup>]

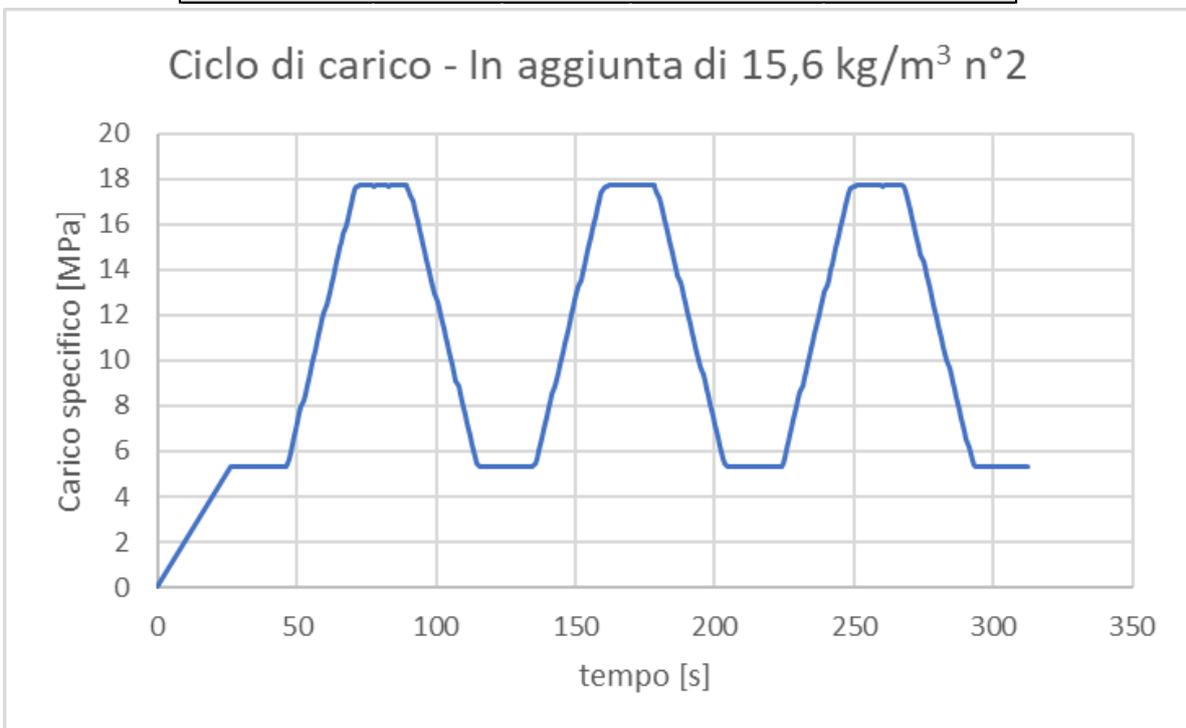


Figura 75 Grafico ciclo di carico – Provino in aggiunta di 15.6 kg/m<sup>3</sup> di fibre n°2

## 4.6 – Prova dinamica per modulo elastico

### 4.6.1 – Descrizione della prova



Figura 76 Esecuzione prova per determinazione modulo elastico dinamico

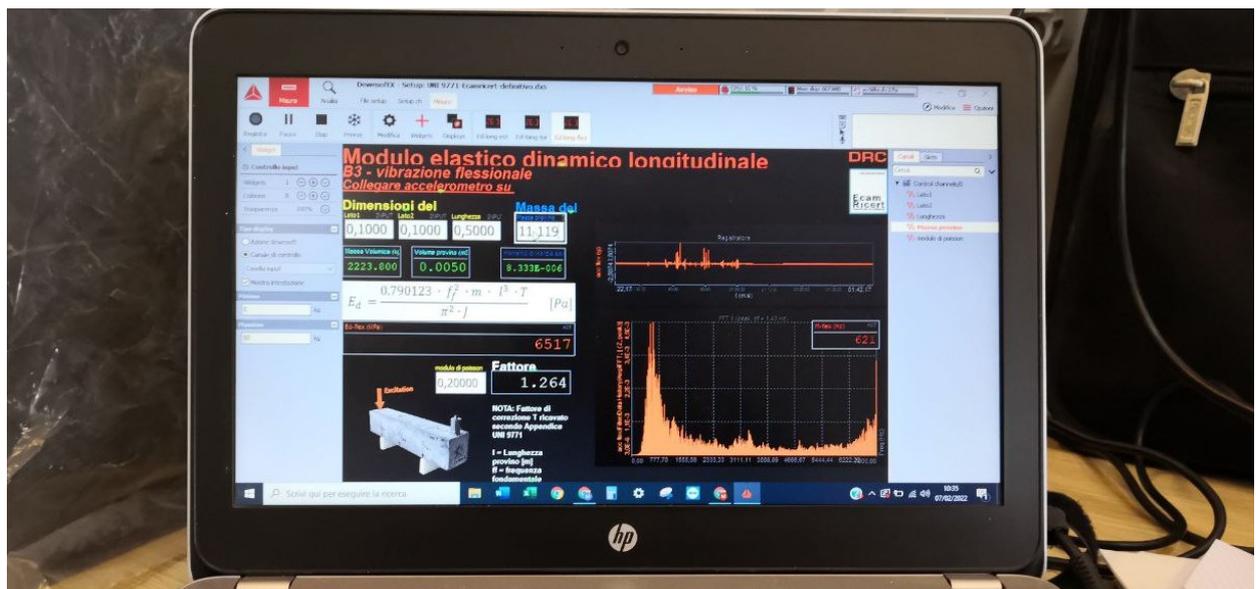


Figura 77 Software di calcolo



*Figura 78 Accelerometro*

La prova per la determinazione del modulo elastico dinamico  $E_d$  è definita dalla norma UNI 9771:1990 mediante la definizione delle frequenza fondamentale  $f_r$ . La prova consiste nella eccitazione di un provino semplicemente appoggiato, di dimensioni 100x100x500 mm, mediante un impulso e nel rilevamento dell'impulso. Nel caso delle determinazione del modulo elastico flessionale, l'accelerometro, che rileverà l'impulso, sarà predisposto nel punto "E" mentre l'impulso fornito, mediante un semplice martello a punta rotonda al fine di generare un colpo secco puntuale, sarà applicato nel punto "R"; come illustrato in immagine.

Oltre a voler definire la precisione della prova per la determinazione del modulo elastico dinamico rispetto al modulo elastico secante statico, risulta di interesse determinare la variabilità dei dati ottenuti al variare delle condizioni di appoggio. La formulazione empirica proposta da normativa considera il provino vincolato ad una precisa posizione al fine di formulare il corretto modo di vibrare.

Tra le condizioni di vincolo semplicemente appoggiato considerate, si ha:

- Appoggio A – A

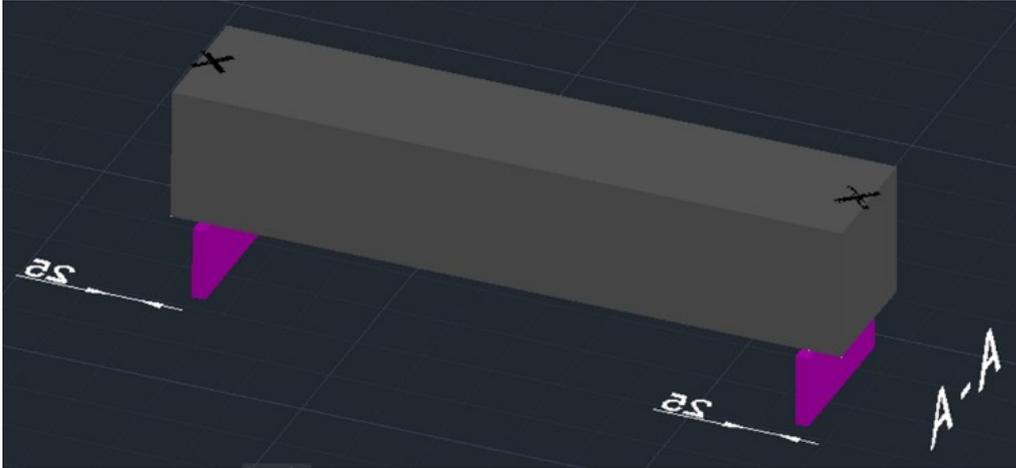


Figura 79 Rappresentazione appoggio A - A

- Appoggio B – B

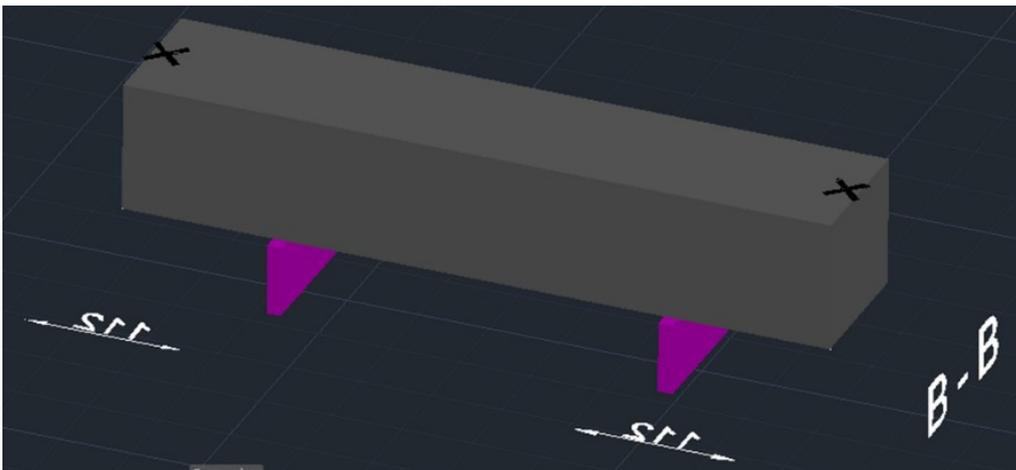


Figura 80 Rappresentazione appoggio B - B

- Appoggio C – C

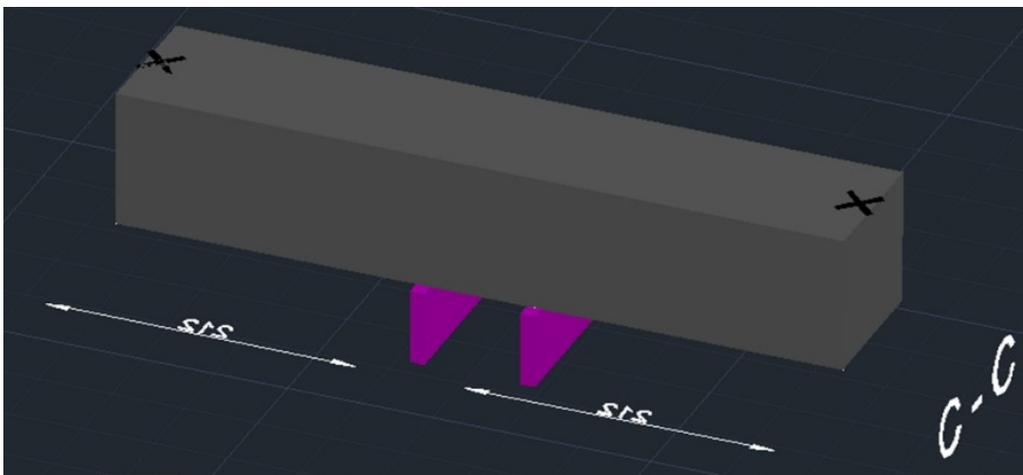


Figura 81 Rappresentazione appoggio C - C

- Appoggio B' – B'

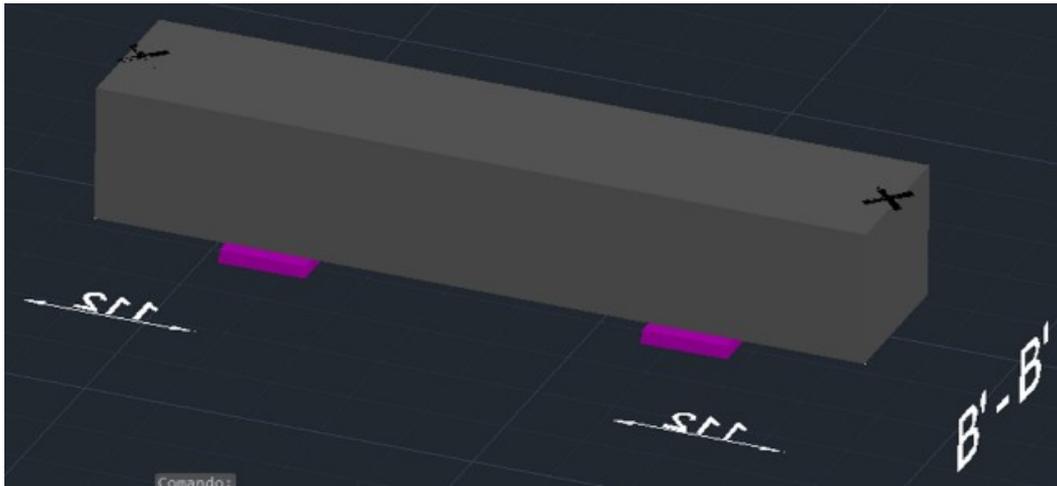


Figura 82 Rappresentazione appoggio B' - B'

- Appoggio D

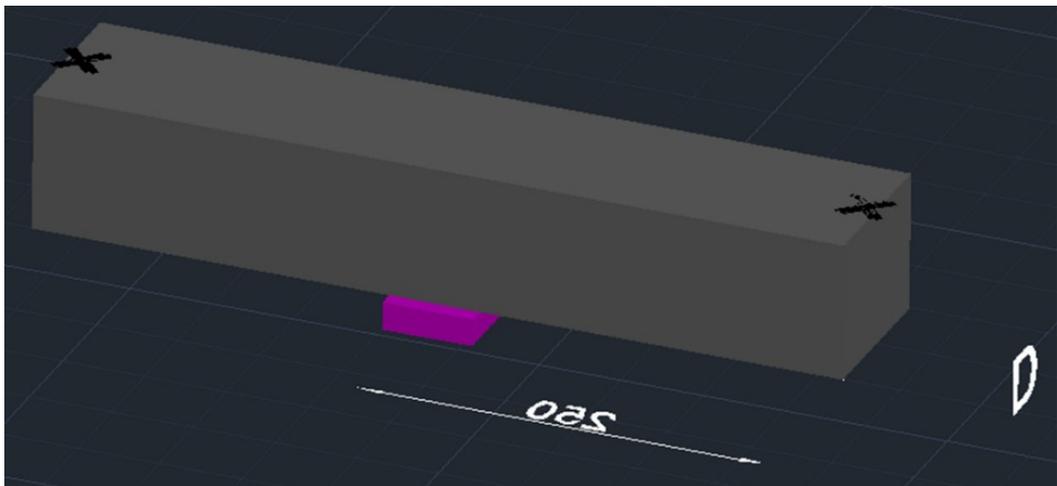


Figura 83 Rappresentazione appoggio D

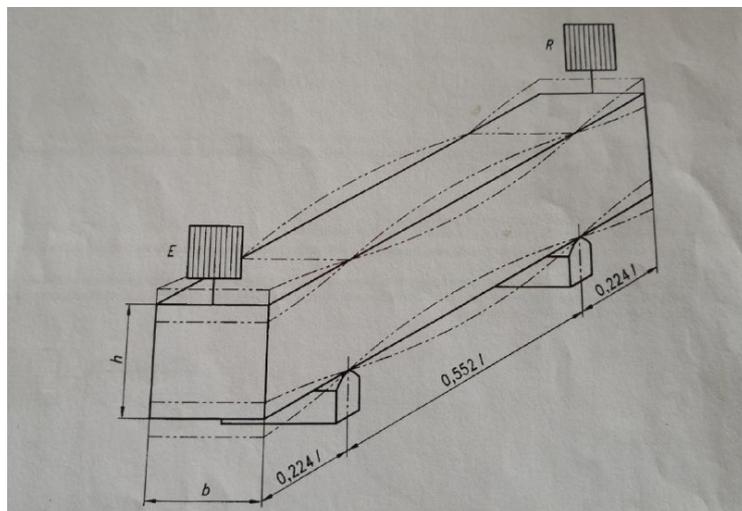


Figura 84 Determinazione della frequenza fondamentale flessionale

Grazie alla centralina di controllo collegata al software, si è in grado di definire il modulo elastico dinamico, note le dimensioni effettive ed il peso, mediante la formulazione sotto riportata

$$Ed = \frac{0.790123 \cdot f_f^2 \cdot m \cdot l^3 \cdot T}{\pi^2 \cdot J} [Pa]$$

Dove:

- $f_f$  è la frequenza fondamentale flessionale, in hertz;
- $m$  è la massa del provino in kg;
- $l$  è la lunghezza del provino, in metri;
- $T$  è il fattore correttivo;

	Rapporto di Poisson				
1/l·rad(J/A)	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,01	1,008	1,008	1,008	1,008	1,009
0,02	1,032	1,032	1,033	1,034	1,034
0,03	1,071	1,072	1,073	1,075	1,077
0,04	1,125	1,127	1,129	1,134	1,135
0,05	1,193	1,196	1,199	1,203	1,208
0,06	1,275	1,278	1,283	1,289	1,295
0,07	1,369	1,373	1,379	1,387	1,396
0,08	1,474	1,480	1,488	1,498	1,510
0,09	1,592	1,599	1,609	1,621	1,636
0,10	1,720	1,729	1,741	1,756	1,774
0,11	1,859	1,870	1,884	1,902	1,923
0,12	2,008	2,021	2,038	2,059	2,084
0,13	2,167	2,182	2,202	2,227	2,256
0,14	2,335	2,353	2,376	2,405	2,439
0,15	2,513	2,533	2,560	2,593	2,632

Figura 85 Tabella fattore correttivo

- $J$  è il momento di inerzia della sezione nella sezione di vibrazione.

#### 4.6.2 – Elaborazione dati

I dati hanno mostrato che la condizione di vincolo proposta dalla normativa presenta la minor variabilità nei dati. Oltre a ciò, tenendo conto che la formulazione impiegata per ricavare il modulo elastico dinamico dalla frequenza fondamentale flessionale risulta ottimale per la condizione di vincolo richiesta, ovvero B - B, si può constatare che anche le ulteriori differenti condizioni di vincolo comportano una adeguatezza complessiva nel calcolo. Mediamente, il valore, per le varie condizioni di vincolo, non si discosta dalla condizione di vincolo B - B per più di 1000 MPa circa che su un valore medio di circa 27000 MPa presenta un errore medio circa del 3.7%.

Viceversa, la differenza tra il valore statico e dinamico medio risulta modesto.

	Val. statico	Val. dinamico	Errore
In assenza di fibre	27474	27110	1,32
In agg. 15,6 kg/m <sup>3</sup> di fibre	27515	26949	2,06

Figura 86 Tabella errore tra valore statico e dinamico

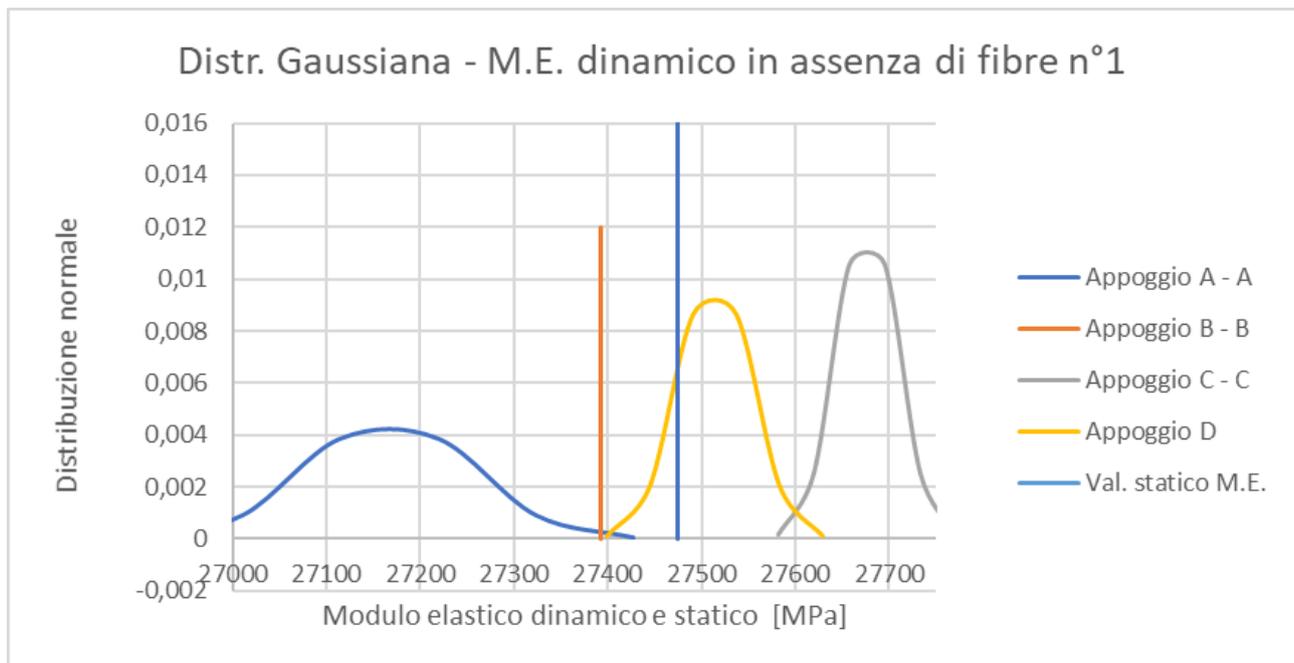
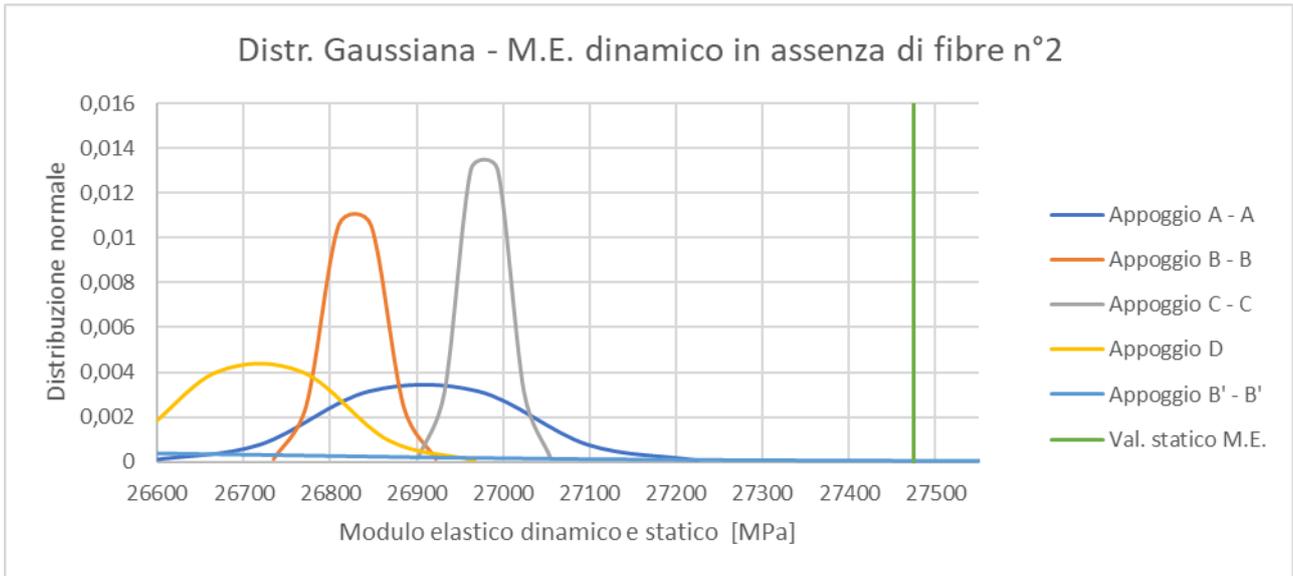


Figura 87 Andamento modulo Elastico – provino n°1 in assenza di fibre

Tipo appoggio	Modulo Elastico Dinamico - Assenza fibre n°1						Media
A-A	27029	27150	27271	27250	27150	27150	27167
B-B	27392	27392	27392	27392	27392	27392	27392
C-C	27697	27697	27697	27697	27636	27636	27677
D	27514	27453	27514	27514	27514	27575	27514
B'-B'	[/]	[/]	[/]	[/]	[/]	[/]	[/]

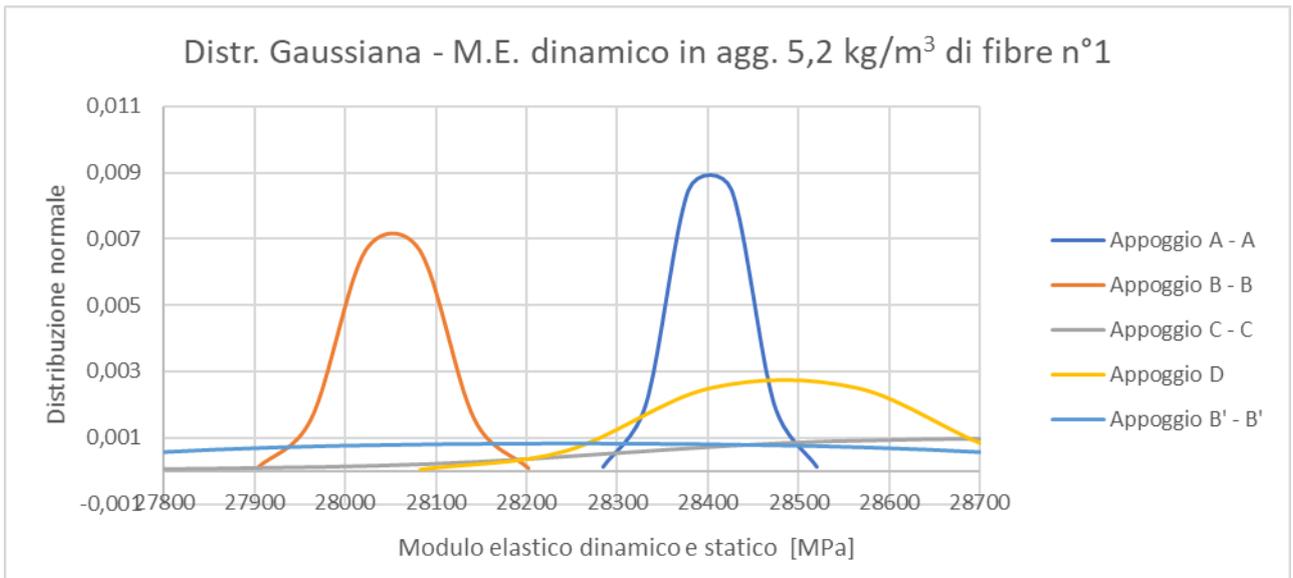
Figura 88 File di calcolo – Modulo elastico provino n°1 in assenza di fibre



*Figura 89 Andamento modulo Elastico – provino n°2 in assenza di fibre*

Tipo appoggio	Modulo Elastico Dinamico - Assenza fibre n°2						Media
A-A	26989	26808	26989	26989	26748	26929	26909
B-B	26808	26869	26808	26869	26808	26808	26828
C-C	26926	26986	26989	26989	26989	26989	26978
D	26568	26748	26748	26808	26688	26749	26718
B'-B'	26448	26090	26688	25265	25031	25971	25916

*Figura 90 File di calcolo – Modulo elastico provino n°2 in assenza di fibre*



*Figura 91 Andamento modulo Elastico – provino n°1 in aggiunta di 5.2 kg/m³ di fibre*

Tipo appoggio	Modulo Elastico Dinamico - 5,2 kg/m <sup>3</sup> n°1						Media
A-A	28402	28464	28402	28402	28340	28402	28402
B-B	28032	27970	28032	28093	28093	28093	28052
C-C	29275	29024	28650	28184	28650	28774	28760
D	28278	28587	28650	28464	28526	28402	28485
B'-B'	28836	28776	27909	28032	27909	28032	28249

Figura 92 File di calcolo – Modulo elastico provino n°1 in aggiunta di 5.2 kg/m<sup>3</sup> di fibre

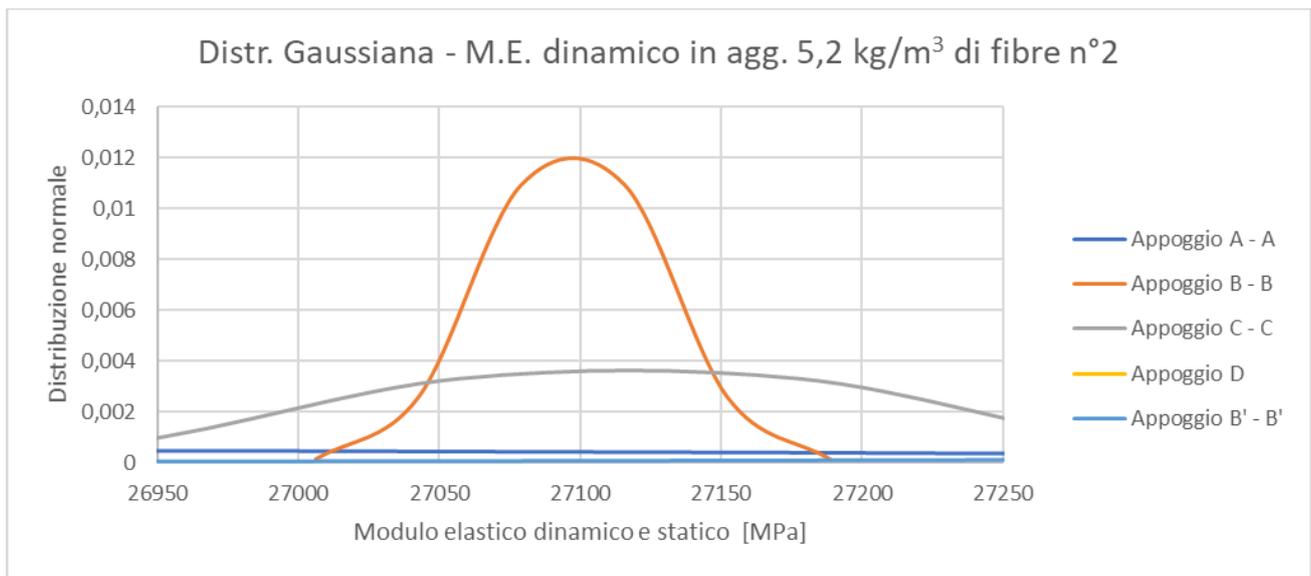


Figura 93 Andamento modulo Elastico – provino n°2 in aggiunta di 5.2 kg/m<sup>3</sup> di fibre

Tipo appoggio	Modulo Elastico Dinamico - 5,2 kg/m <sup>3</sup> n°2						Media
A-A	26998	26878	26998	25298	26998	26168	26556
B-B	27117	27058	27117	27058	27117	27117	27097
C-C	27117	27117	27058	26998	27297	27117	27117
D	27942	28889	28389	28267	28144	28573	28367
B'-B'	29067	28267	28819	27564	28634	30510	28810

Figura 94 File di calcolo – Modulo elastico provino n°2 in aggiunta di 5.2 kg/m<sup>3</sup> di fibre

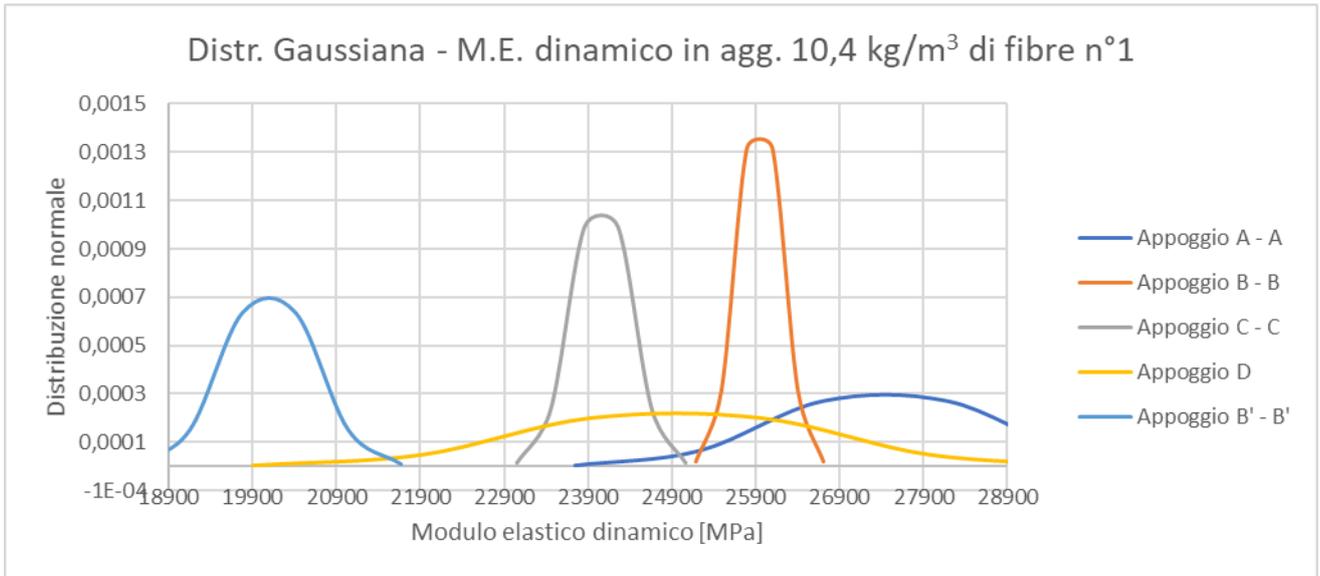


Figura 95 Andamento modulo Elastico – provino n°1 in aggiunta di 10.4 kg/m<sup>3</sup> di fibre

Tipo appoggio	Modulo Elastico Dinamico - 10,4 kg/m <sup>3</sup> n°1						Media
A-A	29554	27985	27553	26278	26338	26942	27442
B-B	25860	25800	25800	26458	25920	25860	25950
C-C	23819	24278	24509	24220	23591	23933	24058
D	22690	26881	24163	23990	25092	26881	24950
B'-B'	20409	19779	19821	20998	19998	19572	20096

Figura 96 File di calcolo – Modulo elastico provino n°1 in aggiunta di 10.4 kg/m<sup>3</sup> di fibre

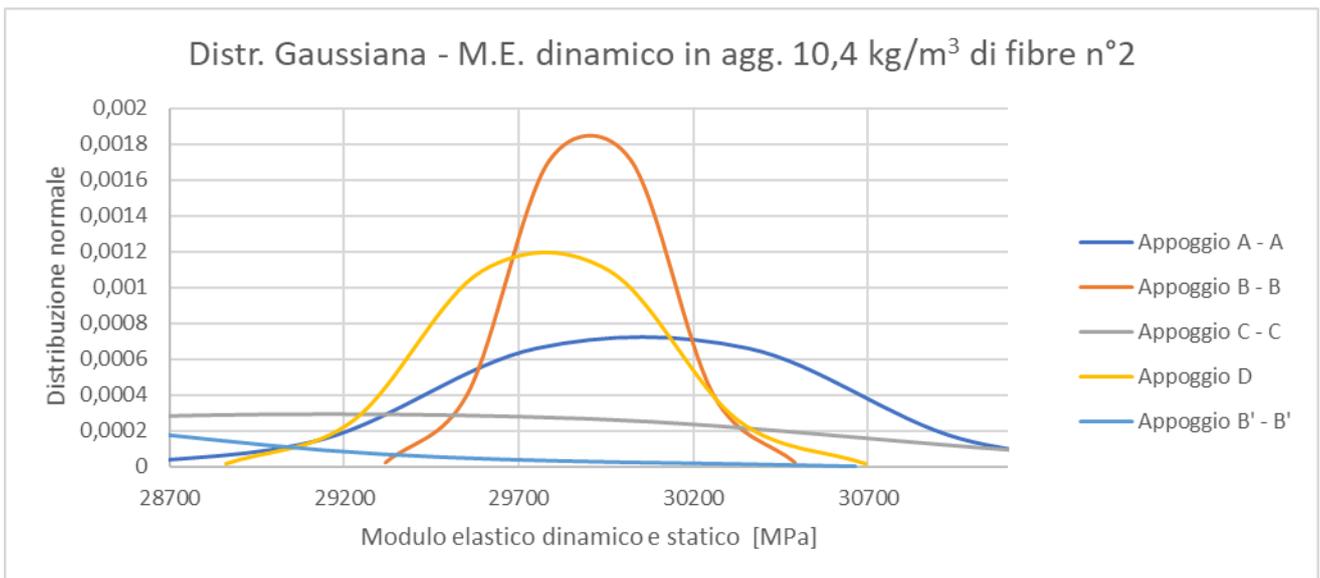


Figura 97 Andamento modulo Elastico – provino n°2 in aggiunta di 10.4 kg/m<sup>3</sup> di fibre

Tipo appoggio	Modulo Elastico Dinamico - 10,4 kg/m <sup>3</sup> n°2						Media
A-A	29850	29596	29723	31009	30106	30042	30054
B-B	29596	30042	30042	29723	30042	29978	29904
C-C	27117	28465	29028	29787	30042	30491	29155
D	29596	30106	29406	30106	29533	29914	29777
B'-B'	26660	25498	26931	28217	28279	28155	27290

Figura 98 File di calcolo – Modulo elastico provino n°2 in aggiunta di 10.4 kg/m<sup>3</sup> di fibre

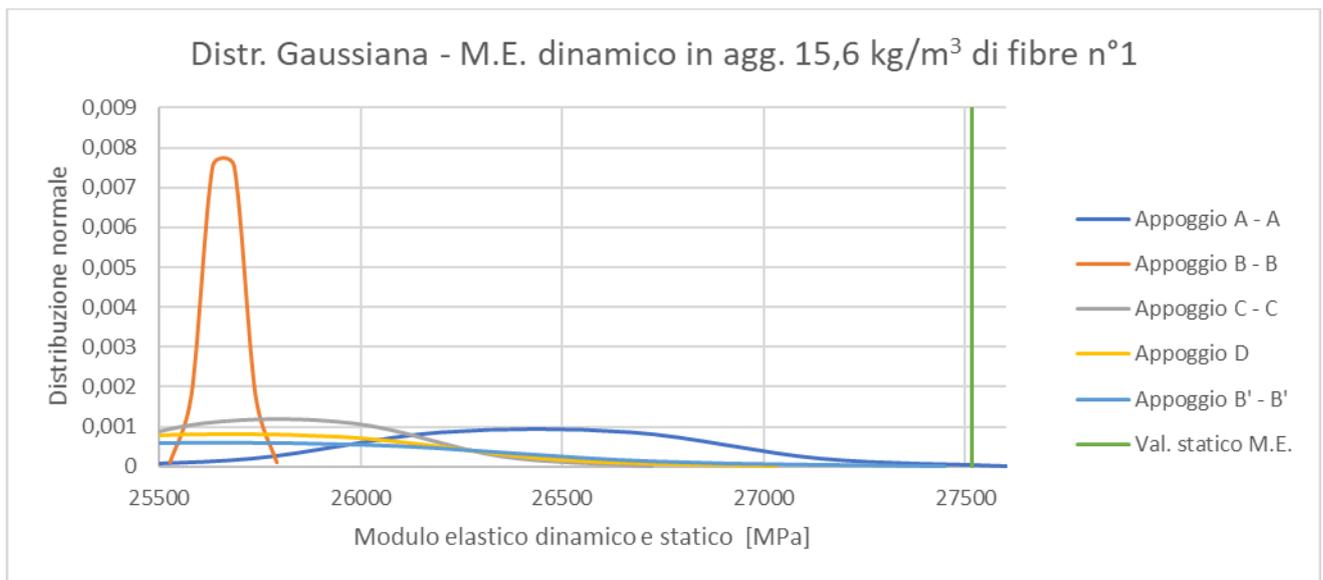
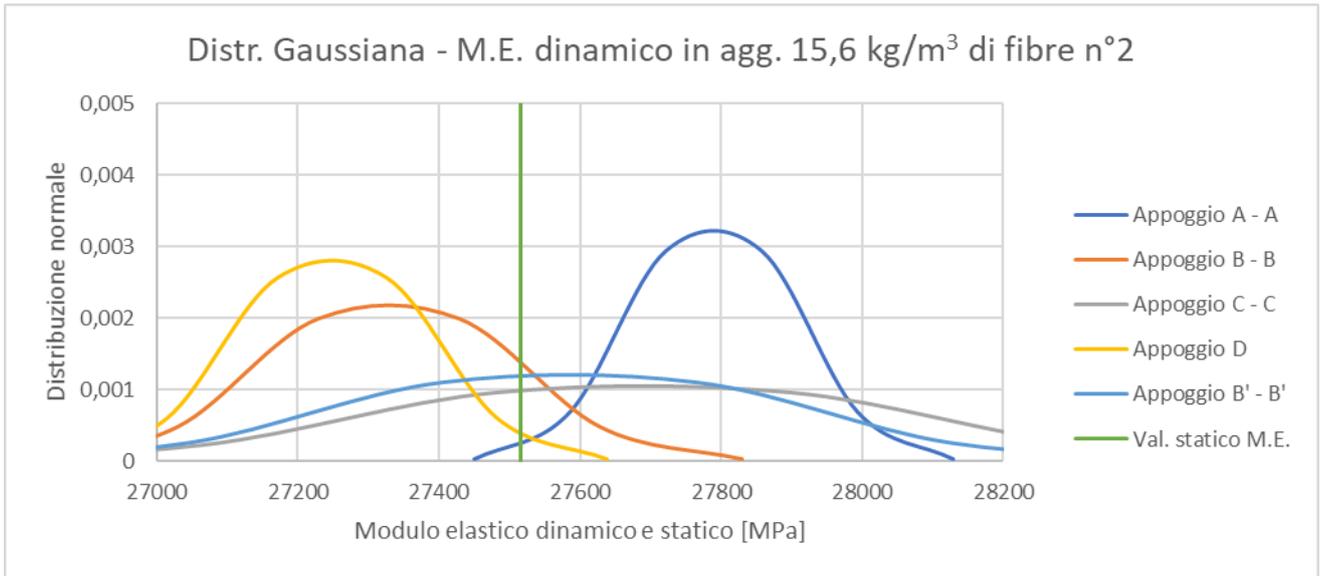


Figura 99 Andamento modulo Elastico – provino n°1 in aggiunta di 15.6 kg/m<sup>3</sup> di fibre

Tipo appoggio	Modulo Elastico Dinamico - 15,6 kg/m <sup>3</sup> n°1						Media
A-A	26138	26197	26910	26970	26197	26197	26435
B-B	25610	25670	25668	25727	25610	25670	25659
C-C	25727	26138	25319	25727	26138	25727	25796
D	25782	25610	26434	25610	25030	25610	25679
B'-B'	25552	25436	25377	25030	26790	25668	25642

Figura 100 Figura 98 File di calcolo – Modulo elastico provino n°1 in aggiunta di 15.6 kg/m<sup>3</sup> di fibre



*Figura 101 Andamento modulo Elastico – provino n°2 in aggiunta di 15.6 kg/m<sup>3</sup> di fibre*

Tipo appoggio	Modulo Elastico Dinamico - 15,6 kg/m <sup>3</sup> n°2						Media
A-A	27639	27760	27699	27941	27881	27820	27790
B-B	27399	27339	27519	27159	27099	27458	27329
C-C	27519	27458	27339	27579	28063	28184	27690
D	27099	27219	27159	27339	27458	27219	27249
B'-B'	27519	27549	27458	27219	27639	28123	27585

*Figura 102 File di calcolo – Modulo elastico provino n°2 in aggiunta di 15.6 kg/m<sup>3</sup> di fibre*

## 5 – Conclusioni

L'aggiunta di fibre ha mostrato che:

- Nei provini prismatici di dimensione 40x40x160 mm non altera significativamente il valore resistente a compressione sia dopo 7 giorni di maturazione che 28. I provini caratterizzati da un contenuto di fibre pari a 20.8 kg/m<sup>3</sup> hanno mostrato un decadimento dei valori resistenti causato per una cattiva miscelazione del composito. Ciò ha definito un limite del contenuto delle fibre di basalto. Mediamente, il valore resistente a compressione a 7 giorni risultava stabile intorno a 54 N/mm<sup>2</sup> mentre a 28 giorni intorno a 65 N/mm<sup>2</sup>.  
La resistenza a flessione ha mostrato un incremento massimo dei valori resistenti del 13% circa a 7 giorni e del 17% circa a 28 giorni. L'aumento della resistenza a flessione risulta modesto.
- Il ritiro totale si è ridotto del 18% circa per i provini con un contenuto di fibre pari al 20.8 kg/m<sup>3</sup>.

Il modulo elastico dinamico ha mostrato un errore trascurabile in confronto al modulo elastico secante statico, pari a 1.32% per i provini in assenza di fibre e 2% per i provini con un contenuto di fibre pari a 20.8 kg/m<sup>3</sup>. Dopo aver analizzato le varie condizioni di vincolo considerate assieme alla condizioni proposta dalla normativa si evince che:

- La configurazione B – B, ovvero la condizione di vincolo proposta dalla normativa, presenti una variabilità dei dati mediamente minore rispetto alle altre condizioni di vincolo;
- Il valore medio delle varie condizioni di vincolo presenta un errore modesto, inferiore al 5%, rispetto alla condizione di vincolo prescritta.

## Bibliografia

- [1] Calcestruzzi e polimeri: materiali compositi compositi versatili dalle prestazioni specifiche, Antonio Magarò, Aprile 2016, Università Degli Studi Roma Tre
- [2] Fibre reinforced cement-base (FRC) composites after 40 years of development in building and civil engenering, Andrzej M. brandt, 12 March 2008, Institute of Fundamental Tecnological Reserch, Polish Accademy of Sciences, Warsaw, Poland
- [3] Fiber Selection for Reinforced Additive Manufacturing, Ivan Philp Beckman – Christine Lozano – Elton Freeman – Guillermo Riveros, 7 July 2021
- [4] Influences of the volume fraction and shape of steel fiber on fiber-reinforced concrete subjected to dynamic loading, Leila Soufeiani – Sudharshan N. Raman – Mohd Zamin Bin Jumaat – Ubagaram Johnson Alengaram – Ghasem Ghadyani – Priyan Mendis, 6 July 2016
- [5] The influence of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra high performance concrete: A review, Ingrid Lande Larsen – Rein Terje Thorstensen, 15 May 2020
- [6] The use of glass fiber-reinforced concrete as a structural material, J.P.J.G. Ferreira, F.A.B Branco, May – June 2007
- [7] Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material, D. D. L. Chung, Composite Materials Research Laboratory – Buffalo (NY), 8 December 1999
- [8] Basalt Fibre – Ancient Mineral Fibre for Green and Sustainable Development, Madan Lal Regar – Akhtarul Islam Amjad, Mars 2016
- [9] Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete, John Branstone – Sreekanta Das – Sara Y. Keno – Craig Taylor, 10 August 2016
- [10] Basalt fibre - reinforced concrete: review of fresh and mechanical properties, Naraindas Bheel, 24 February 2021
- [11] A Review of recent Advances in Hibryd Natural Fiber Reinforced Polymer Composites, Jorde Neto – Henrique Queiroz – Ricardo Aguiar -Rosemere Lima – Daniel Cavalcanti – Mariana Doina Banea, 23 June 2021
- [12] Fibrous and composite materials for civil engineering applications, R. Fanguero, 2011;
- [13] Recent Advances in the Application of NaturalFiber Based Composites, Jitendra K. Pandey - S. H. Ahn - Caroline S. Lee - Amar K. Mohanty - Manjusri Misra, October 8 2010
- [14] Syntehtic fibre – reinforced concerete, Zhihong Zheng – dorel Feldman, Prog. Polym. Sci., Vol. 20, 185 - 210, 1995
- [15] Calcestruzzo fibrorinforzato nel nuovo codice modello fib, M. Di Prisco – G. Plizzari – L. Vandewalle, Roma 2011
- [16] Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato, Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Roma, 18 giugno 2007