

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Edile**

Tesi di Laurea Magistrale

**Le malte di cemento rinforzate con
fibre di lana**



Relatore

prof. Alessandro Pasquale Fantilli

Candidata

Laura Leonardi

Correlatore

prof. Bernardino Chiaia

A.A. 2017/2018

ABSTRACT

Lo studio condotto nel presente lavoro di tesi ha analizzato l'efficacia delle fibre naturali all'interno di malte cementizie. In particolare, sono state utilizzate per la sperimentazione delle fibre di origine animale, ossia fibre di lana di pecora, fornite dall'ISMAC, Istituto delle Macromolecole del CNR, con sede a Biella.

Negli ultimi anni sono state valutate le proprietà delle fibre a base cheratinica, come la lana, in quanto presentano caratteristiche confrontabili a quelle di alcuni polimeri sintetici, come il polipropilene. Gli studi condotti finora sulle fibre naturali, come elementi di rinforzo per i compositi a base cementizia, hanno evidenziato problemi di degradazione delle suddette fibre dovute alle reazioni alcaline prodotte all'interno della pasta cementizia. Si sono quindi realizzate delle malte con diverse miscele, utilizzando quattro tipologie di cemento: Portland, basso-alcalino, alto-alcalino e solfoalluminoso, in modo tale da valutare la compatibilità delle fibre con le differenti matrici cementizie. La loro influenza come elementi di rinforzo è stata valutata con la definizione delle proprietà flessionali e di duttilità delle malte cementizie, a seguito di prove di flessione, eseguite a seconda del periodo di stagionatura dei provini.

The study conducted in this dissertation analysed the effectiveness of natural fibers in cement-based mortars. In particular, animal fibers have been used for the experimentation, i.e. sheep's wool fibers, supplied by ISMAC, Italian Institute of Macromolecules of the CNR, located in Biella. In recent years the properties of keratin-based fibers, such as wool, have been evaluated, as they have characteristics comparable to those of some synthetic polymers, such as polypropylene. The studies conducted on natural fibers, as reinforcing elements for cement-based composites, have highlighted degradation problems of natural fibers, due to the alkaline reactions produced inside the cement paste. Therefore, mortars were made with different mixtures, using four types of cement: Portland, low-alkaline, high-alkaline and sulfoaluminate, in order to assess the compatibility of wool fibers with the different cement matrices. Their influence as reinforcing elements was evaluated by defining the flexural properties and ductility of cement mortars, as a result of bending tests, performed on seasoning period of the specimens.

SOMMARIO

ABSTRACT.....	I
1. INTRODUZIONE.....	4
2. I COMPOSITI FIBRORINFORZATI	6
2.1 CENNI STORICI.....	6
2.2 CALCESTRUZZI FIBRORINFORZATI (FRC)	8
2.2.1 <i>Normative di riferimento</i>	9
2.2.2 <i>Composizione degli impasti: la matrice e le fibre</i>	10
2.2.2.1 Matrice cementizia	10
2.2.2.2 Fibre	11
2.2.3 <i>Proprietà del calcestruzzo fibrorinforzato allo stato fresco</i>	13
2.2.3.1 Proprietà reologiche	13
2.2.3.2 Ritiro in fase plastica.....	13
2.2.4 <i>Proprietà del calcestruzzo fibrorinforzato allo stato indurito</i>	14
2.2.4.1 Resistenza a compressione	14
2.2.4.2 Resistenza a trazione	18
3. LE TIPOLOGIE DI FIBRE.....	21
3.1 FIBRE TRADIZIONALI.....	22
3.1.1 <i>Fibre di acciaio</i>	22
3.1.2 <i>Fibre di vetro</i>	27
3.1.3 <i>Fibre sintetiche</i>	30
3.1.3.1 Fibre di polipropilene	32
3.1.3.2 Fibre di carbonio.....	35
3.2 FIBRE NATURALI	39
3.2.1 <i>Fibre vegetali</i>	40
3.2.1.1 Fibre da stelo.....	43
3.2.1.2 Fibre da foglia.....	47
3.2.1.3 Fibre da fusto	49
3.2.2 <i>Fibre animali</i>	51
3.2.3 <i>Degradazione delle fibre naturali in ambiente alcalino</i>	55
4. INDAGINE SPERIMENTALE	58
4.1 MIX-DESIGN	59

4.2	MATERIALI.....	60
4.2.1	<i>Legante idraulico</i>	60
4.2.1.1	Cemento Portland.....	60
4.2.1.2	Cemento basso-alcario.....	62
4.2.1.3	Cemento alto-alcario.....	62
4.2.1.4	Cemento solfoalluminoso.....	63
4.2.2	<i>Acqua</i>	65
4.2.3	<i>Aggregato</i>	66
4.2.4	<i>Fibre di rinforzo</i>	67
4.2.4.1	Fibre di lana.....	67
4.2.4.2	Fibre di polipropilene.....	68
4.3	CONFEZIONAMENTO DEI PROVINI.....	71
4.3.1	<i>Preparazione della malta cementizia</i>	72
4.3.2	<i>Formatura dei provini</i>	74
4.3.3	<i>Stagionatura dei provini</i>	77
4.4	PROCEDURA SPERIMENTALE.....	78
4.4.1	<i>Prova di flessione</i>	80
5.	ANALISI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI.....	83
5.1	RESISTENZA A FLESSIONE.....	84
5.2	MISURA DELLA DUTTILITÀ.....	90
5.3	INDAGINI AL MICROSCOPIO.....	98
6.	CONCLUSIONI.....	104
	APPENDICE A.....	106
	APPENDICE B.....	122
	BIBLIOGRAFIA.....	138

1. INTRODUZIONE

Al giorno d'oggi l'edilizia è uno dei settori maggiormente coinvolto nelle problematiche ambientali. Il processo di costruzione, infatti, genera un impatto ambientale che riguarda l'intero ciclo di vita del manufatto, dalla produzione e approvvigionamento delle materie prime, alla costruzione dell'opera, fino alla sua dismissione e demolizione. Il crescente utilizzo del suolo, l'elevato consumo energetico e le emissioni di sostanze inquinanti in atmosfera sono diventati i temi principali da affrontare nel settore delle costruzioni.

La necessità di salvaguardare il territorio, garantendo un utilizzo razionale delle risorse naturali, ha portato allo sviluppo di un nuovo modo di progettare utilizzando soluzioni costruttive innovative. L'obiettivo è quello di realizzare dei manufatti che siano allo stesso tempo ecologicamente sostenibili ed economicamente efficienti, quindi a basso impatto ambientale. A tale scopo, si sono sviluppati nuovi materiali da costruzione, realizzati con materiali riciclati e riciclabili, definiti con il termine "green". Nello specifico, tali cambiamenti si sono avuti anche nel settore della produzione delle materie prime, come il cemento.

In accordo alle stime effettuate dal *World Business Council for Sustainable Development*, "l'industria del cemento è responsabile del 5-7% della produzione globale di CO₂¹". Ad oggi nel processo produttivo dei cementi si utilizzano materiali di riciclo, come miscele pozzolaniche e ceneri volanti. Questi materiali consentono un risparmio energetico nei processi di lavorazione, migliorando anche le proprietà meccaniche dei compositi cementizi. Inoltre, il rinforzo delle malte e dei calcestruzzi, realizzato generalmente con le fibre sintetiche, può essere ottenuto con le fibre naturali, sia di origine vegetale, come canapa e bambù, sia di origine animale, come la lana.

Nel presente lavoro di tesi si analizza il comportamento di malte cementizie fibrerinfornate più sostenibili, utilizzando come elementi di rinforzo le fibre di lana.

La lana è impiegata nel settore edile, soprattutto per l'isolamento termico e acustico degli edifici, utilizzando gli scarti provenienti dall'industria tessile. Inoltre, essendo costituita da

¹ Definito con l'acronimo WBCSD - Consiglio Mondiale delle Ricerche per lo Sviluppo sostenibile, il quale ha definito iniziative per un cemento sostenibile, consultabile sul sito <http://www.wbcscement.org>

fibre a base cheratinica, presenta proprietà meccaniche confrontabili con alcune fibre sintetiche, come il polipropilene. Le fibre di lana sono quindi state sperimentate come elemento di rinforzo nei compositi cementizi. Da tali indagini sono emersi alcuni limiti nell'utilizzo delle fibre di lana, in quanto si disgregano nell'ambiente alcalino della pasta cementizia.

Il lavoro di tesi si sviluppa in una prima parte, sull'evoluzione delle fibre come elementi di rinforzo nei compositi cementizi. Segue un'analisi più dettagliata delle varie tipologie di fibre utilizzate in ambito edilizio, da quelle tradizionali di acciaio, vetro e materiali sintetici, a quelle alternative naturali.

La seconda parte, riguarda l'indagine sperimentale, in cui si valuta l'efficacia delle fibre di lana all'interno di differenti malte cementizie, realizzate con quattro tipologie di cemento: Portland, basso-alcalino, alto-alcalino e solfoalluminoso. L'obiettivo è individuare il tipo di cemento in grado di limitare la corrosione delle fibre, modificando la composizione chimica della malta cementizia ed evitando trattamenti superficiali alle fibre. Le proprietà meccaniche delle differenti malte cementizie, vengono determinate mediante una prova di flessione su tre punti di provini prismatici, in accordo alla normativa UNI EN 196-1. Infine, dai risultati delle prove si ricavano i grafici carico-deformazione per ogni campione, analizzando nel dettaglio la fase di post-fessurazione, da cui si ottengono informazioni sulla duttilità del materiale, ossia la sua capacità di contrastare la propagazione delle fessure.

2. I COMPOSITI FIBRORINFORZATI

2.1 Cenni storici

L'utilizzo delle fibre in edilizia per il rinforzo di matrici fragili è noto fin dai tempi più remoti. Antichi reperti di abitazioni, risalenti alle civiltà mesopotamiche, erano costituiti da impasti di argilla e paglia. Altre pratiche, quali l'utilizzo della paglia come materiale coesivo, capace di saldare i mattoni in argilla o fango, furono utilizzate sin dai tempi degli antichi Egizi.

Le primordiali forme di calcestruzzo, così come le conosciamo oggi, possono essere ricondotte all' *opus caementicium* degli antichi Romani, descritte da Vitruvio nel suo trattato *De Architectura* (29-23 a.C.). La tecnica costruttiva era basata sull'utilizzo di calce aerea per la produzione di malte da costruzione. Fu perfezionata, in seguito, con l'introduzione di pozzolana nel composto come legante, dando così origine alle malte idrauliche. Sin da quella invenzione, il calcestruzzo fu miscelato con fibre vegetali e animali che ne migliorassero la qualità, andando così a contrastare la formazione di fessure.

Il rinforzo di matrici fragili con elementi fibrosi deve però il proprio decollo a livello industriale con l'introduzione del cemento Portland. Tra i vari studi condotti dalla metà del 1700 sulle calce idrauliche, ottenute per cottura di calcari contenenti rilevanti quantità di materiale argilloso, si arrivò a definire una serie di brevetti, tra i quali il più importante dal punto di vista storico fu quello di John Aspdin. A partire dalla seconda metà del 1800, la storia del cemento Portland subì una serie di importanti miglioramenti, riguardanti il controllo delle materie prime, la tecnica di produzione, il controllo di qualità e l'ottimizzazione delle prestazioni.

Dal 1845, l'inizio della produzione del cemento a livello industriale portò all'avvento di un nuovo materiale da costruzione: il calcestruzzo armato. Nel 1847 Coignet progettò la prima copertura in cemento gettato in casseforme e armato con ferri profilati. Sempre nello stesso anno, J.L. Lambot realizzò un'imbarcazione, attraverso il getto di un sottile strato di calcestruzzo su una maglia di ferri piatti, presentata in seguito all'Esposizione Universale di Parigi del 1855. [1]

Dagli inizi del 1900 vennero depositati una serie di brevetti per il rinforzo del calcestruzzo. Si esaminarono determinate procedure per migliorare la resistenza a trazione del calcestruzzo, mediante piccole fibre longitudinali di acciaio, aventi una superficie scabra ed estremità inclinate per migliorarne l'aderenza. Di particolare importanza fu il brevetto dell'inglese Costantinesco, nel 1954, in cui furono descritti gli impieghi delle fibre di acciaio arrotolate o elicoidali, per incrementare la resistenza a fessurazione e l'assorbimento di energia del calcestruzzo, applicate in strutture per la difesa da attacchi aerei e per le fondazioni di macchinari. [1]

La necessità di trovare nuove soluzioni, che potessero migliorare le proprietà meccaniche della pasta cementizia in modo industriale, portò in un primo tempo all'utilizzo delle fibre di amianto e vetro. L'amianto, o asbesto, strutturalmente una buona soluzione a basso costo produttivo, venne introdotto negli Stati Uniti intorno al 1930. Noti i gravi danni che comportava per la salute dell'uomo, a causa della sua capacità di rilasciare fibre potenzialmente inalabili, fu sostituito con altri materiali idonei, come le fibre di vetro; queste furono inventate negli Stati Uniti, sempre negli anni '30 ed un prodotto simile si realizzò anche in Russia. [1]

A partire dal 1960, si svilupparono altre tipologie di fibre in concomitanza con l'incremento delle applicazioni, in funzione dei seguenti requisiti:

- produzione a livello industriale;
- basso costo nella produzione;
- sicurezza per la salute dell'uomo e dell'ambiente.

Da allora, sono stati introdotti sul mercato molteplici tipologie di fibre per conglomerati cementizi, tra cui le principali sono:

- fibre in acciaio (dritte, piegate, deformate a gancio o con estremità ingrossate);
- fibre di vetro;
- fibre vegetali (legno, juta, bambù, agave, cotone)
- fibre sintetiche (polipropilene, nylon, Kevlar, poliestere, carbonio)

Particolare interesse rivestono oggi le fibre sintetiche. La scoperta risale alla metà degli anni '70, ad opera dell'ingegnere svizzero Rudolf Enzler, il quale utilizzò i progressi fatti nello studio delle catene polimeriche al campo delle fibre per l'edilizia. Al 5° Salone delle

Invenzioni di Ginevra del 1976, infatti, il suo sistema "Forta-Ferro" si aggiudicò la medaglia d'oro. [2]

Da quel momento, le fibre polimeriche ebbero un importante successo nel settore delle fibre di rinforzo per il calcestruzzo, grazie anche ai progressi nello studio della Meccanica della frattura. La ricerca, nel corso degli anni, ebbe ulteriori sviluppi: dalle prime fibre in polipropilene si passò alla sperimentazione di polimeri innovativi, con forme e dimensioni variabili. Alle fibre sintetiche ausiliarie si aggiunsero quindi le fibre per applicazioni strutturali, allo scopo di garantire al calcestruzzo una resistenza residua post-fessurazione.

2.2 Calcestruzzi fibrorinforzati (FRC)

"Il calcestruzzo fibrorinforzato (FRC - *Fiber Reinforced Concrete*) è un materiale composito caratterizzato da una matrice cementizia e da fibre discrete (discontinue). La matrice è costituita da calcestruzzi o da malte, normali o ad alte prestazioni. Le fibre possono essere di acciaio, di materiale polimerico, di carbonio, di vetro o di materiale naturale." [3]

L'aggiunta delle fibre conferisce al calcestruzzo importanti proprietà che riguardano sia l'aspetto meccanico, legato ai concetti di duttilità, ovvero una significativa resistenza a trazione a seguito della fessurazione e/o un incremento dell'energia di frattura (tenacità), sia l'aspetto di durabilità, legato alla riduzione delle fessure causate dal ritiro plastico per evaporazione dell'acqua d'impasto.

L'efficacia del rinforzo dipende sia dalla tipologia di fibre impiegate ma anche da differenti fattori, fra i quali la percentuale volumetrica di fibre introdotte, la loro distribuzione all'interno della matrice cementizia e il rapporto d'aspetto, vale a dire il rapporto fra lunghezza e diametro equivalente delle fibre. Inoltre, la quantità di fibre e il loro orientamento, dipendono dalle dimensioni massime delle particelle che compongono la miscela, quindi variano a seconda che la matrice cementizia sia una pasta cementizia, una malta, o un calcestruzzo. [1]

2.2.1 Normative di riferimento

Vengono di seguito riportate le principali normative di riferimento che disciplinano l'utilizzo delle fibre come rinforzo strutturale delle matrici cementizie.

- **UNI 11039-1-2:2003**: Calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio; Parte I: Definizioni, classificazione e designazione; Parte II: Metodo di prova per la determinazione della resistenza di prima fessurazione e degli indici di duttilità;
- **UNI EN 14889-1-2:2006**: Fibre per calcestruzzo - Parte I: Fibre di acciaio; Parte II: Fibre polimeriche - Definizioni, specificazioni e conformità;
- **UNI EN 14721:2007**: Precast concrete products – test method for methallic fiber concrete – measuring the fiber concrete in fresh and hardened concrete;
- **CEN EN 14651: 2007**: Test method for metallic fibre concrete – Measuring the flexural tensile strength [limit of proportionality (*LOP*), residual];
- **UNI EN 12390, 2012**: Prove sul calcestruzzo indurito;
- **CEN EN 1992-1-1:2004/A1:2014**: Eurocode 2 – Design of concrete structures-Part 1-1: general rules and rules for buildings;
- **UNI EN 206:2016**: Calcestruzzo: specificazione, prestazione, produzione e conformità.

In particolare, le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni, **NTC 2018**, approvate con *D.M. 17 gennaio 2018*, al paragrafo *11.2.12*, inseriscono il calcestruzzo fibrorinforzato tra i materiali per la realizzazione di elementi strutturali.

Le NTC 2018, prevedono che le fibre siano marcate CE in accordo alle norme europee armonizzate, quali la UNI EN 14889-1 ed UNI EN 14889-2 per le fibre realizzate in acciaio o materiale polimerico. La miscela del calcestruzzo fibrorinforzato deve essere sottoposta a valutazione preliminare secondo le indicazioni riportate nella sezione *11.2.3*, con determinazione dei valori di resistenza a trazione residua f_{R1k} ² per lo Stato Limite di Esercizio e f_{R3k} ³ per lo Stato Limite Ultimo determinati secondo UNI EN 14651:2007. [4]

² Resistenza a flessione corrispondente a un'apertura di fessura di 0.5mm in MPa

³ Tensione residua in corrispondenza dell'apertura della fessura di 2.5mm

2.2.2 Composizione degli impasti: la matrice e le fibre

2.2.2.1 Matrice cementizia

La matrice cementizia è composta essenzialmente da una miscela di acqua, cemento e inerti fini, per le malte, ai quali si aggiungono gli inerti grossi, per i calcestruzzi. Le caratteristiche fisiche e meccaniche sono definite da specifiche normative: UNI EN 206 con indicazioni a livello nazionale nella UNI 11104:2016.

La realizzazione di un conglomerato cementizio con buone caratteristiche meccaniche prevede che, all'interno della miscela, sia garantita una distribuzione uniforme delle fibre e una buona lavorabilità dell'impasto. In generale, l'aggiunta di fibre all'interno della miscela, determina una minore lavorabilità e di conseguenza una minore omogeneità dell'impasto. Si possono quindi creare degli accumuli di fibre, comunemente chiamati "grumi", tali da rendere complicate le operazioni di posa in opera. Inoltre, la lavorabilità è conseguenza della granulometria degli inerti: risulta essere inferiore nei calcestruzzi rispetto alle malte, poiché maggiore è il diametro e più difficile sarà la dispersione omogenea delle fibre all'interno del composto (figura 2.1). Bisogna quindi trovare un giusto equilibrio tra la granulometria degli inerti e la lunghezza delle fibre. In generale, la dimensione massima degli aggregati non deve essere superiore a 0.5 volte la lunghezza delle fibre impiegate. [1]

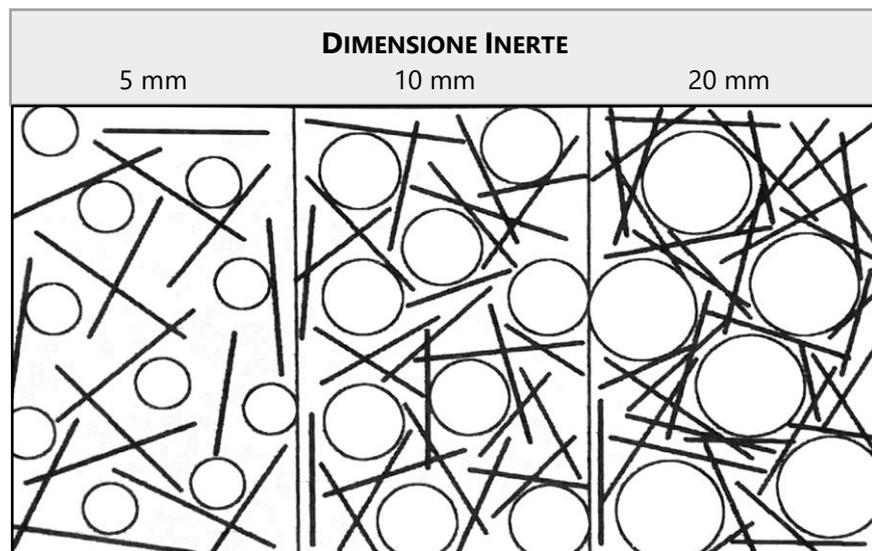


Figura 2.1- Dispersione delle fibre in funzione degli inerti; tratta da (A. Galbiati, 1996) con modifiche

2.2.2.2 Fibre

Numerosi sono i criteri per la scelta delle caratteristiche delle fibre e del loro dosaggio. Tali criteri devono essere definiti in base allo specifico progetto e alle prestazioni che deve garantire il conglomerato. Tuttavia, è possibile restituire alcune considerazioni utili per la conoscenza del materiale. Innanzitutto, una valutazione preliminare sulla scelta della tipologia di fibra riguarda:

- a) forma e dimensioni;
- b) rapporto d'aspetto;
- c) modulo di elasticità;

a) Forma e dimensioni

Le fibre presenti in commercio possono avere forme diverse; vengono di seguito riportate le principali tipologie:

- fibre lisce;
- fibre ondulate;
- fibre uncinata;
- fibre nervate;
- fibre con estremità schiacciate;

La forma contribuisce essenzialmente ad aumentare la resistenza allo sfilamento.

Le fibre impiegate nei materiali cementizi hanno una lunghezza inferiore a 15 mm, per le malte, e superiore a 15mm, per i calcestruzzi ordinari. [1] Tali dimensioni sono necessarie per garantire un'adeguata distribuzione delle fibre omogenea all'interno della matrice cementizia.

b) Rapporto d'aspetto

"Il rapporto d'aspetto è definito come quoziente tra la lunghezza l_f e il diametro equivalente d_f delle fibre", ovvero "il diametro del cerchio avente area uguale a quella della sezione trasversale della fibra". [3] Il suo valore contribuisce alla lavorabilità della matrice cementizia fibrosa, insieme alla geometria delle fibre e alla dimensione dei granuli degli inerti.

Le fibre generalmente utilizzate in ambito edilizio presentano un rapporto d'aspetto compreso fra 50 e 400. [1] All'aumentare del rapporto fra lunghezza e diametro cresce l'aderenza fra le fibre e la matrice cementizia, poiché aumenta la superficie di contatto. Conseguentemente, migliorano le prestazioni del materiale fibroso, ossia aumenta la resistenza, quando è soggetto a sforzi di trazione.

c) Modulo di elasticità

In funzione del modulo elastico, è possibile classificare le fibre utilizzate per le miscele cementizie, sia malte che calcestruzzi, in due grandi famiglie:

1. Fibre duttili: cellulosa, nylon, polipropilene; hanno un modulo elastico inferiore rispetto a quello della matrice cementizia.
2. Fibre rigide: vetro, acciaio, carbonio, Kevlar; hanno un modulo elastico superiore rispetto a quello della matrice cementizia.

In particolare, le fibre duttili migliorano la tenacità e permettono di contrastare il fenomeno delle microfessurazioni da ritiro. Le fibre rigide invece, consentono di migliorare sensibilmente la resistenza a trazione del composto cementizio. [1]

Vengono riportate nella Tabella 2.1 le principali proprietà delle fibre maggiormente utilizzate per il rinforzo dei calcestruzzi e delle malte.

Tabella 2.1 - Caratteristiche meccaniche dei materiali che compongono le fibre [5]

Tipo di fibra	Diametro [mm]	Peso specifico [g/cm ²]	Modulo elastico [GPa]	Resistenza a trazione [GPa]	Allungamento a trazione [%]
Acciaio	500-1500	7.84	200	0.5-2	0.5-3.5
Vetro	9-15	2.60	70-80	2-4	2-3.5
Polipropilene	20-200	0.90	5-7.7	0.5-0.75	20
Nylon	-	1.10	4	0.90	13-15
Polietilene	-	0.95	0.30	0.0007	10
Carbonio	9	1.90	230	2.60	1
Kevlar	10	1.45	65-133	3.60	2.1-4

2.2.3 Proprietà del calcestruzzo fibrorinforzato allo stato fresco

2.2.3.1 Proprietà reologiche

Le caratteristiche che definiscono il comportamento dei materiali a base di cemento allo stato fresco sono individuabili mediante le proprietà reologiche. Tali proprietà dipendono dalla lavorabilità della matrice cementizia e dalla tipologia, dalle dimensioni e dal dosaggio delle fibre impiegate.

Come già introdotto nel paragrafo 2.2.2, uno svantaggio nell'utilizzo delle fibre è la diminuzione della lavorabilità dell'impasto, soprattutto nel caso di fibre con rapporto d'aspetto elevato. Tale problema può essere migliorato tenendo conto di opportuni accorgimenti, tra cui:

- aumentare la frazione fine, scegliendo quindi degli inerti con una pezzatura adeguata, di diametro massimo inferiore a 12.7mm;
- aggiungere all'interno della miscela degli additivi superfluidificanti, opportunamente dosati;
- utilizzare degli additivi aeranti e cenere volante, che consentono di ottenere dei calcestruzzi plastici.

2.2.3.2 Ritiro in fase plastica

La deformazione da ritiro plastico si sviluppa durante le prime 5-10 ore dalla fase di getto. Essa dipende dal rapporto acqua/cemento, dalle condizioni termiche, igrometriche e di ventilazione dell'ambiente. Tale fenomeno si manifesta mediante delle fenditure evidenti sulla superficie che possono compromettere la resistenza del manufatto che si sta realizzando. Il ruolo delle fibre all'interno della matrice è quello di contrastare il fenomeno fessurativo causato dal ritiro plastico, in particolare le fibre polimeriche risultano essere molto efficienti. La presenza delle fibre, infatti, non riduce il fenomeno evaporativo dell'acqua di impasto, ma consente di incrementare la resistenza a trazione della matrice cementizia, rendendola maggiore della tensione di trazione indotta dal ritiro plastico, evitando così la fessurazione. [1]

2.2.4 Proprietà del calcestruzzo fibrorinforzato allo stato indurito

2.2.4.1 Resistenza a compressione

La presenza di elementi fibrosi non va ad influenzare particolarmente la resistenza a compressione, perciò la prova a compressione uniassiale utilizzata per i calcestruzzi normali, può essere impiegata ugualmente per quelli fibrorinforzati.

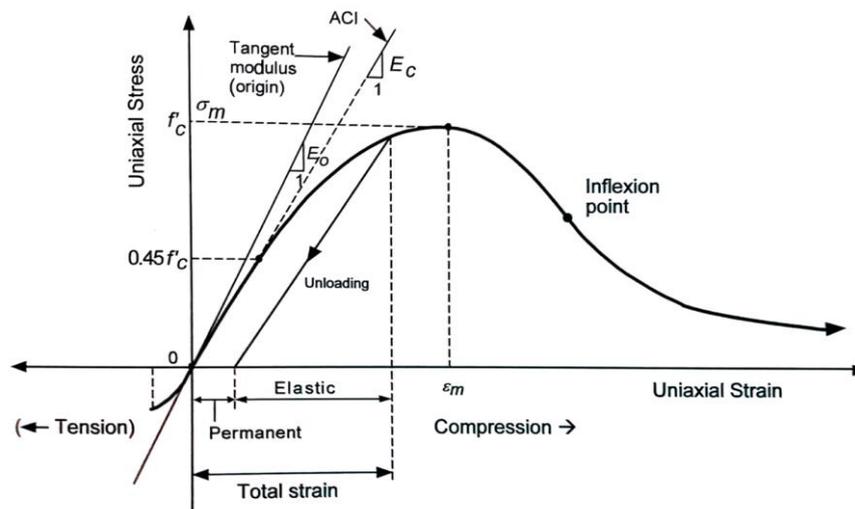


Figura 2.2 - Grafico tensione-deformazione del cls soggetto ad una prova di compressione, tratto da (Naaman, 2017)

La tipica curva tensione-deformazione viene mostrata in fig. 2.2. Generalmente è costituita da due porzioni principali: un tratto ascendente fino al punto di picco f'_c in corrispondenza del carico massimo, e un tratto discendente. Il tratto ascendente può essere a sua volta suddiviso in due porzioni: un tratto quasi-lineare fino al 40-50 % del carico, seguito da un tratto non lineare che raggiunge gradualmente il punto di picco. In particolare, nel tratto non lineare della curva, la deformazione è composta da una deformazione elastica e una deformazione permanente, attribuita alla presenza di micro-fessure (*micro-cracking*). La porzione discendente della curva parte dal carico massimo e gradualmente decresce presentando un punto di flesso, superato il quale, tende asintoticamente all'asse delle ascisse.

Come si può osservare in fig. 2.3, il tratto ascendente della curva ha una pendenza maggiore all'aumentare della resistenza del calcestruzzo, quindi un maggiore modulo elastico.

Al contrario, maggiore è la pendenza del tratto discendente, maggiore è la fragilità, ovvero la scarsa duttilità del materiale.

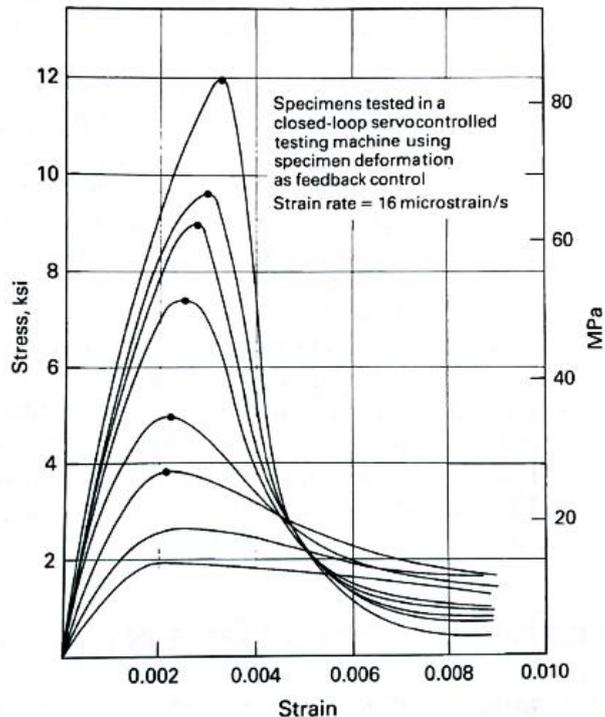


Figura 2.3 - Curve tensione deformazione del cls all'aumentare della resistenza a compressione, tratto da (Naaman, 2017)

Le modalità di rottura del calcestruzzo fibrorinforzato in compressione si presentano al raggiungimento del carico massimo, quando si percorre il tratto discendente della curva tensione- deformazione, in particolare, il comportamento a scorrimento si sviluppa con grandi deformazioni in prossimità del punto di flesso della curva.

Il concetto essenziale da comprendere è che il comportamento a rottura per compressione è il risultato della rottura per tensioni suddivise. Questo è dovuto all' *effetto Poisson*, di deformazione laterale, dove le microfessurazioni si sviluppano all'aumentare del carico in compressione, portando infine la rottura del provino. In una tipica prova di compressione di un provino cilindrico di calcestruzzo con bassa resistenza, il piano di rottura è inclinato rispetto all'asse di applicazione del carico, descrivendo una rottura conica; invece, per un calcestruzzo ad alta resistenza il piano di rottura tende ad essere parallelo all'asse di applicazione del carico (figura 2.4).

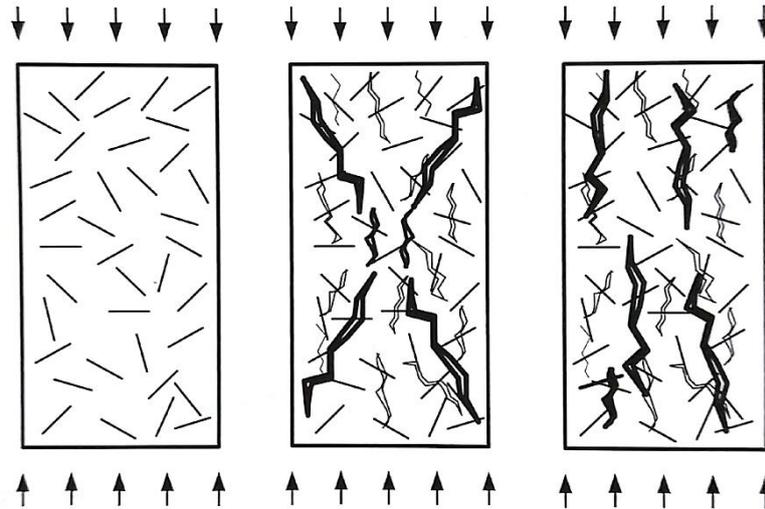


Figura 2.5 - *Differenti tipologie di rotture di provini cilindrici di cls in funzione della resistenza, tratto da (Naaman, 2017)*

Una volta creata la prima micro-fessura, è possibile che venga colmata dalle fibre, le quali generalmente frenano l'apertura delle fessure sotto ulteriori sollecitazioni (figura 2.5). L'efficacia delle fibre nel confinare le microfessurazioni può portare ad una risposta più duttile dopo la rottura. [6]

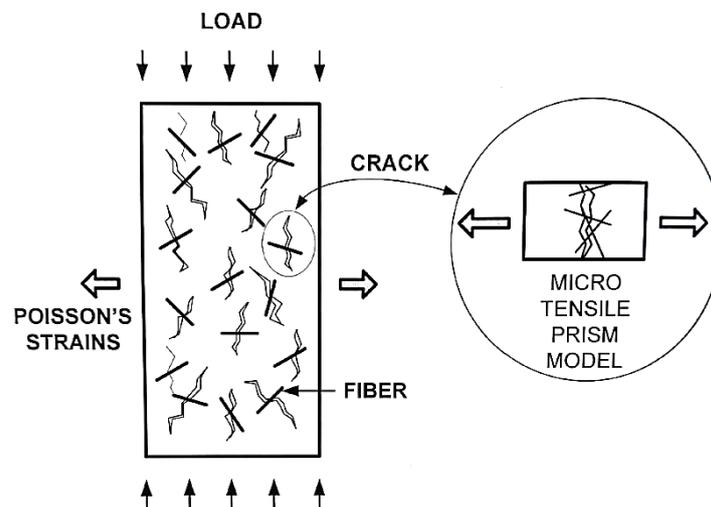


Figura 2.4 - *Effetto delle fibre sul comportamento fessurativo del cls, tratto da (Naaman, 2017)*

L'effetto delle fibre sulla risposta del calcestruzzo in compressione, dipende particolarmente dal tipo di fibra che si utilizza. Ad esempio, le fibre di polietilene, che hanno un basso modulo elastico e una scarsa proprietà legante, necessitano di una grande apertura delle

fessure prima di sviluppare sufficienti sforzi di confinamento. Il loro utilizzo, quindi, non porta generalmente ad un incremento della resistenza a compressione.

Al contrario, l'utilizzo delle fibre di acciaio, come quelle uncinate o ondulate, che hanno buone proprietà leganti e una elevata rigidità, unita al calcestruzzo in sufficienti quantità, può portare ad un incremento della resistenza a compressione e la corrispondente tensione. Possono inoltre contribuire a migliorare la duttilità, visibile nel tratto discendente della curva tensione-deformazione. Nel grafico di figura 2.6, sono rappresentate le curve tensione-deformazione di un calcestruzzo normale con l'aggiunta di frazioni volumetriche differenti, V_f , di fibre di acciaio uncinate.

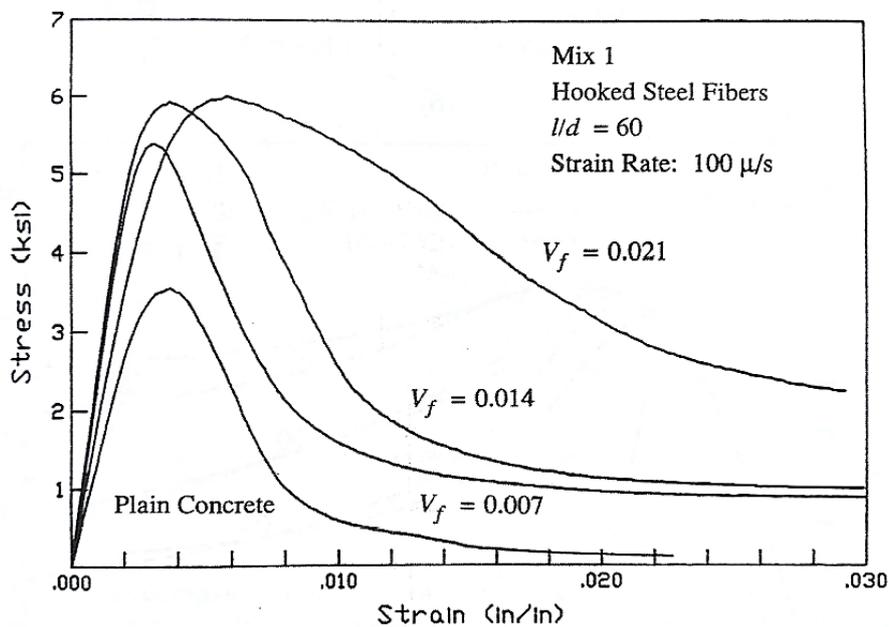


Figura 2.6 - Effetto delle fibre di acciaio uncinate sul grafico tensione- deformazione di un calcestruzzo soggetto alla prova di compressione, tratto da (Naaman, 2017)

2.2.4.2 Resistenza a trazione

La resistenza a trazione residua post-fessurativa (*post-cracking*), rappresenta un parametro progettuale importante per le strutture in calcestruzzo fibrorinforzato. Difatti, la presenza delle fibre modifica significativamente le proprietà meccaniche del calcestruzzo.

A causa delle ben note difficoltà che si riscontrano nell'eseguire test di trazione uniassiale, i metodi standardizzati si basano generalmente su prove a flessione (*bending tests*) di travetti piccoli e intagliati. Dal momento che il comportamento a flessione è estremamente differente da quello a trazione uniassiale, può accadere che materiali degradanti in trazione presentino invece un comportamento incrudente a flessione (figura 2.7). Difatti, nelle prove a flessione, la fessurazione inizia prima del raggiungimento del carico di picco e può accadere che materiali degradanti in trazione uniassiale mostrino una propagazione stabile della fessura all'aumentare del carico, ovvero un comportamento incrudente a flessione. [7]

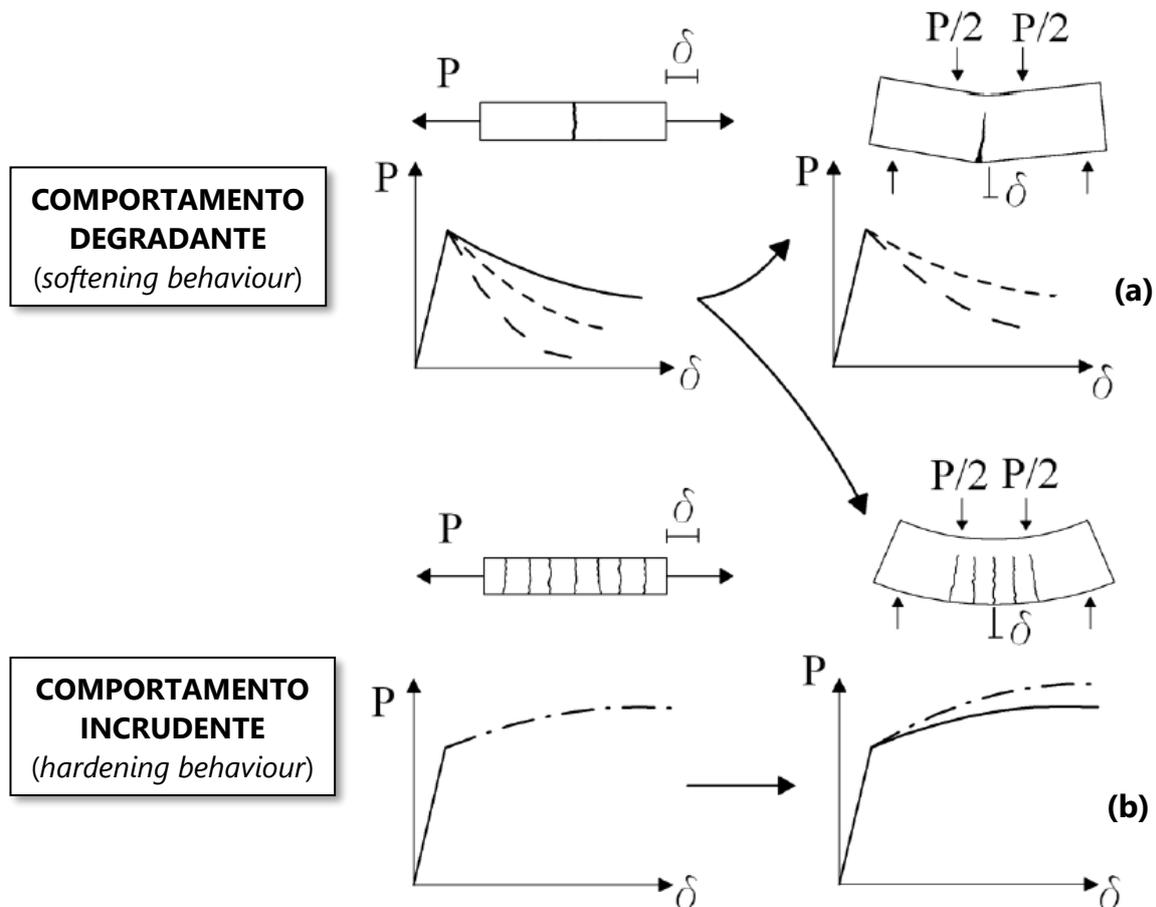


Figura 2.7 - Schemi delle curve carico-deformazione tipiche per FRC, con comportamento degradante (a) e incrudente (b), tratto da (Marco di Prisco, 2011) con modifiche

In particolare, le tipiche curve di risposta carico-deformazione di differenti tipologie di calcestruzzi fibrorinforzati, sono evidenziate in figura 2.8. Inizialmente la curva presenta un andamento lineare fino al raggiungimento del punto *LOP* o *BOP* (*Limit of Proportionality* or *Bend Over Point*), ovvero il limite di proporzionalità, in cui si ha la comparsa della prima fessura. Superato il suddetto punto, la curva può avere un andamento degradante o incrudente in modi differenti. In entrambi i casi, all'aumentare del carico si raggiunge un ulteriore punto di interesse, denominato *MOR* (*Modulus of Rupture*), ovvero il modulo di rottura, che rappresenta il punto di carico massimo dopo la formazione della prima fessura, che permette il calcolo della resistenza a flessione.

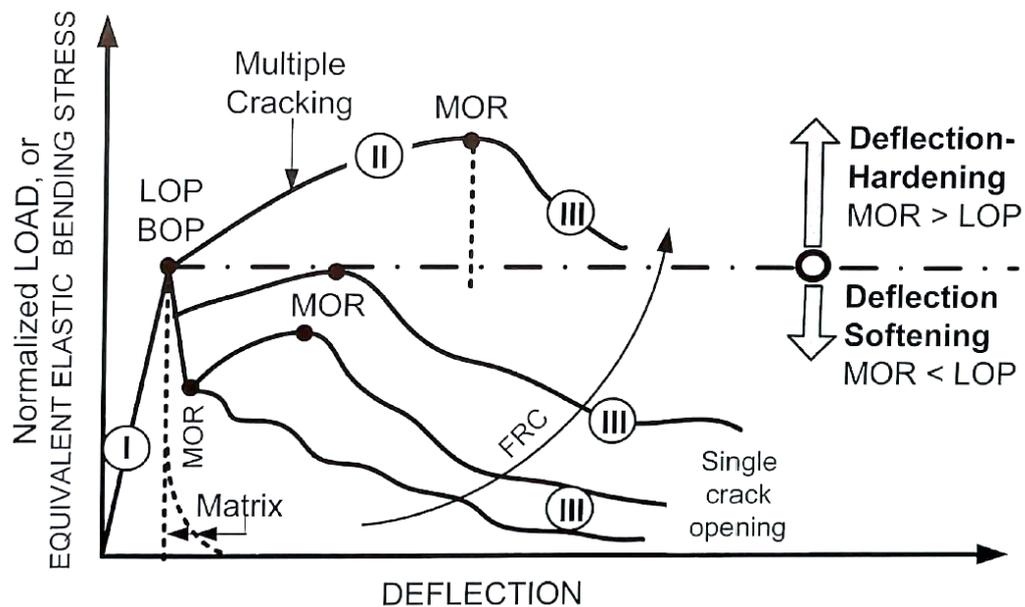


Figura 2.8 - tipiche curve carico-deformazione di travi in FRC, tratta da (Naaman, 2017)

La tipica curva tensione-deformazione (P-d) di un calcestruzzo fibrorinforzato con comportamento degradante, dopo il raggiungimento del carico massimo (LOP), si ha la formazione della prima fessura critica (*failure crack*) e la resistenza diminuisce progressivamente (*deflection softening*), come si evince dalla parte III del grafico di figura 2.8. Si genera quindi una fessura localizzata, senza lo sviluppo di ulteriori fessure. Di conseguenza, all'aumentare del carico si evidenzia un incremento dell'ampiezza della fessura critica.

Per quanto riguarda invece i calcestruzzi fibrorinforzati a comportamento incrudente, la curva presenta lo stesso andamento crescente di quelli a comportamento degradante per il tratto I, però è successivamente seguita da un tratto II crescente, dove si sviluppano fessurazioni multiple e viene assorbita una significativa energia. A questo punto, le fibre tendono a sopportare gli sforzi di trazione (*deflection hardening*), permettendo alle microfessure di svilupparsi nella matrice cementizia, con delle sollecitazioni maggiori o uguali rispetto alla resistenza a fessurazione del composto. Questo processo continua fino a quando le microfessure non si stabilizzano e con un ulteriore incremento del carico, una fessura diventa critica, raggiungendo il punto MOR (*module of rupture*), ovvero il modulo di rottura (figura 2.9). Di conseguenza, le fibre non hanno più la capacità di contrastare l'estensione della fessura critica, portando così alla progressiva rottura del conglomerato.

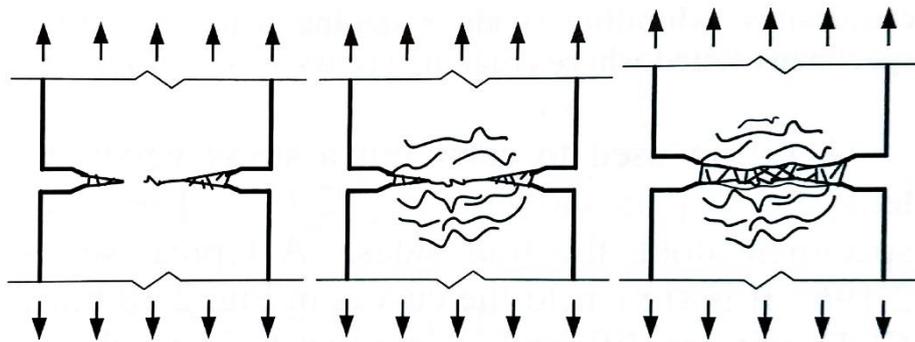


Figura 2.9 - Comportamento duttile del FRC per la presenza delle fibre, tratto da (Naaman, 2017)

In conclusione, l'aggiunta delle fibre all'interno della matrice cementizia, cambia radicalmente il suo comportamento a trazione. In particolare, qualunque sia la risposta del calcestruzzo fibrorinforzato, incrudente o degradante, la curva post-fessurazione, ha un andamento che non è confrontabile con quella del calcestruzzo in assenza di fibre. [6] Infatti, la caratteristica fondamentale del calcestruzzo fibrorinforzato è la sua duttilità e tenacità, rispetto al comportamento fragile del calcestruzzo semplice.

3. LE TIPOLOGIE DI FIBRE

Le numerose tipologie di fibre utilizzate e sperimentate in ambito edilizio possono essere classificate generalmente in funzione del tipo di materiale, in due grandi famiglie: naturali ed artificiali. In particolare, viene riportato lo schema riassuntivo in figura 3.1.

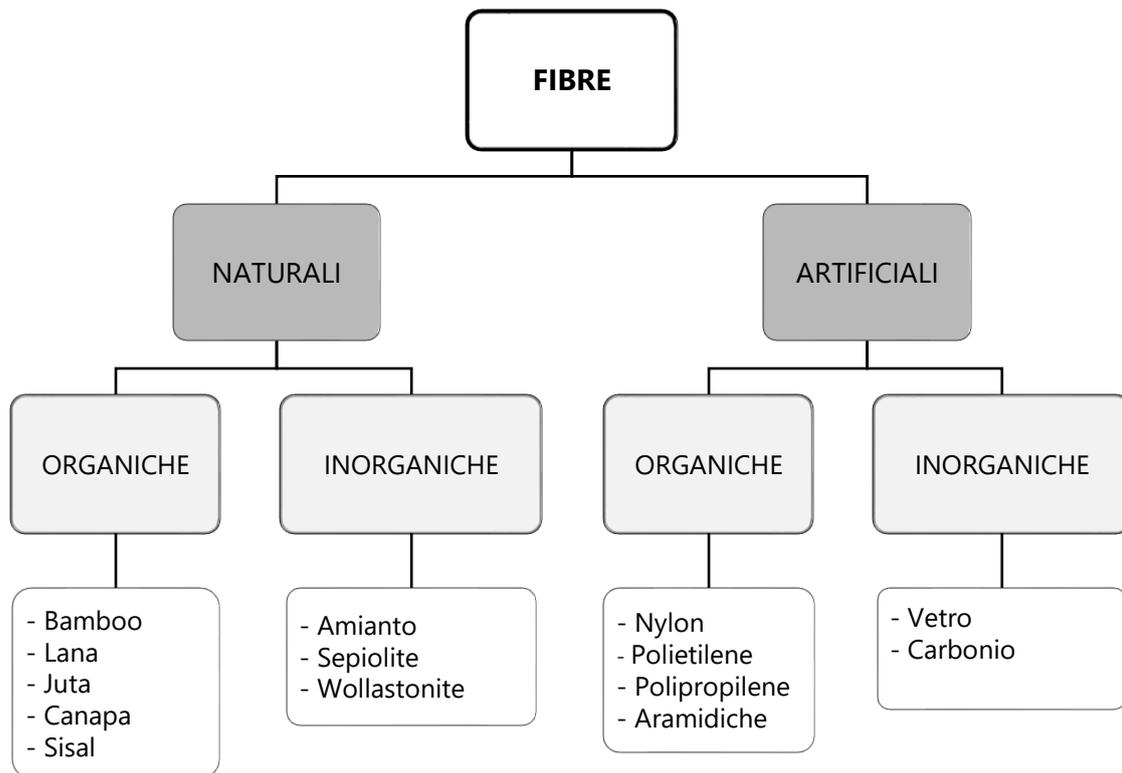


Figura 3.1 - Classificazione delle fibre in funzione del tipo di materiale

Inoltre, possono essere classificate in altri modi, come già anticipato nel paragrafo 2.2.2.2, in funzione di specifiche caratteristiche, come:

- forma e dimensioni (lunghe, corte, lisce, nervate, ecc);
- modulo elastico (basso o alto);
- tipo di applicazione (strutturale o non strutturale).

Nel presente capitolo verranno analizzate più nel dettaglio le varie tipologie di fibre utilizzate per miscele cementizie, da quelle tradizionali come acciaio, vetro e polipropilene, a quelle alternative naturali come canapa, juta e lana.

3.1 Fibre tradizionali

3.1.1 Fibre di acciaio



Figura 3.2 - Esempio di fibre in acciaio per FRC

I primi studi teorici sui calcestruzzi fibrorinforzati negli anni '60 riguardarono principalmente il comportamento del calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio. Nel 1962 prese forma il primo brevetto, successivamente la *Battelle Development Corporation* acquistò il brevetto e lo commercializzò con il marchio "Wirand", diffondendo il concetto di calcestruzzo fibrorinforzato. Nel 1973, la *Bekaert*⁴ dopo un lungo periodo di sperimentazioni, iniziò la fabbricazione delle fibre con il marchio "Dramix". [1]

Da allora, il calcestruzzo fibrorinforzato con fibre di acciaio, indicato con l'acronimo SFRC (*Steel Fiber Reinforced Concrete*), è diventato il materiale fibroso più comunemente utilizzato in ambito edilizio. Originariamente venivano utilizzati per il controllo delle fessurazioni, per sostituire il rinforzo secondario nei solai piani, per le pavimentazioni industriali e per i rivestimenti interni di gallerie. Al giorno d'oggi, oltre a questi scopi, vengono utilizzati sempre più in ambito strutturale, sia per sostituire i rinforzi di acciaio convenzionali, sia per operare in maniera complementare ad essi.

⁴ Multinazionale belga attiva nella produzione di fibre di acciaio

LE FIBRE DI ACCIAIO PER SFRC

Gli acciai utilizzati per produrre fibre sono generalmente acciai al carbonio o acciai legati (inox), questi ultimi utilizzati per strutture esposte in ambienti corrosivi, per strutture marine o per applicazioni con calcestruzzo refrattario.

Le fibre di acciaio possono essere prodotte in diverse varianti, a seconda delle applicazioni. La forma più semplice ovvero quella liscia, usata in origine, oggi è raramente utilizzata in quanto le fibre lisce non sviluppano un legame sufficiente con la matrice cementizia. Viene quindi migliorata l'aderenza fibra-matrice uncinando le estremità o conferendo una forma ondulata a tutta la lunghezza della fibra. Alcuni esempi di fibre deformate vengono riportate in figura 3.3.

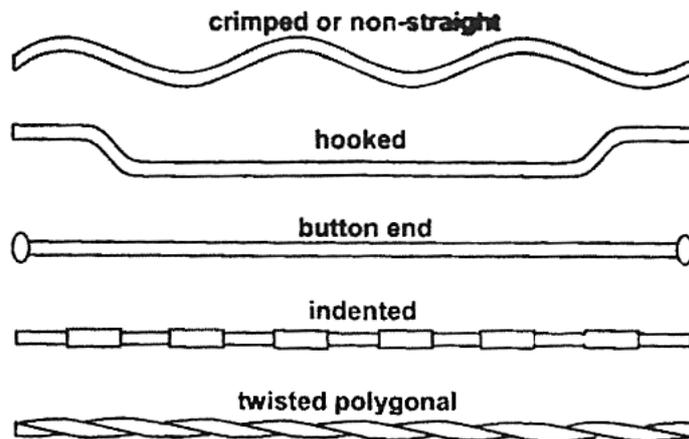


Figura 3.3 - Principali tipologie di fibre in acciaio deformate, tratto da (Antoine E. Naaman, 2003) [6]

Le fibre tonde sono prodotte tagliando dei fili, con diametri compresi nell'intervallo di 0,25 -1 mm. Le fibre piatte possono essere prodotte sia mediante tranciatura di lamiere o laminando un filo; le dimensioni della sezione trasversale sono generalmente variabili sia in spessore, comprese tra 0,15-0,40 mm, sia in larghezza, comprese tra 0,25-0,90 mm. [8]

A seconda del tipo di acciaio e del particolare processi di produzione, possono avere

- resistenza a trazione: 500 - 2000 MPa
- allungamento a rottura: 0,5 - 3,5%

VANTAGGI

L'aumento della tenacità della matrice cementizia per la presenza delle fibre, può prevenire o almeno ridurre al minimo le fessurazioni dovute alle variazioni di temperatura e umidità relativa, inoltre può aumentare la resistenza nei confronti di carichi dinamici, causati da fenomeni di fatica, azioni sismiche o esplosioni. Tuttavia, i miglioramenti della resistenza dovuti alle aggiunte di fibre sono modesti, eccetto per volumi elevati di fibre. [9]

L'effetto principale delle fibre di acciaio è quello di migliorare la resistenza del conglomerato cementizio alla propagazione della fessura, ovvero la tenacità, come si può notare in figura 3.4.

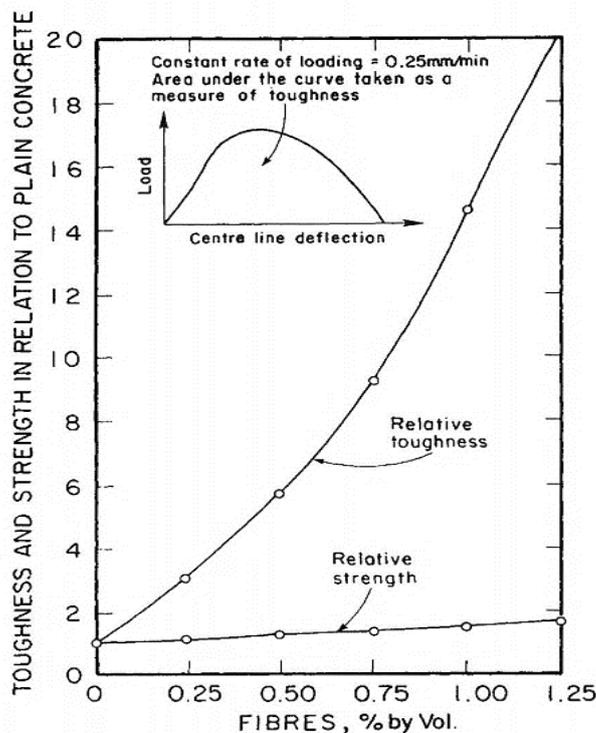


Figura 3.4 - Effetto del volume di fibre d'acciaio sulla resistenza e tenacità per i SFRC, tratto da (Arnon Bentur, 2014) [9]

SVANTAGGI

Le fibre di acciaio possono subire effetti di corrosione, dovuti essenzialmente all'interazione chimico-fisica tra il metallo e l'ambiente circostante, che risulta in alterazioni delle proprietà tecnologiche del materiale, che possono compromettere la sua funzionalità.⁵

⁵ In riferimento alla norma ISO 8044:2010

I fenomeni corrosivi possono essere distinti in:

- *corrosione secca*: si verifica in assenza di acqua condensata, a temperature elevate, quando il metallo reagisce ai gas caldi e forma uno strato di ossido;
- *corrosione umida*: si verifica in presenza di acqua allo stato condensato, è la reazione corrosiva più comune, di natura elettrochimica. Tali reazioni comportano uno scambio elettrico per mezzo degli elettroni nel metallo, degli ioni in un elettrolita conduttore, come una pellicola d'acqua sulla superficie e dell'ossigeno, come evidenziato in figura 3.5. [10]

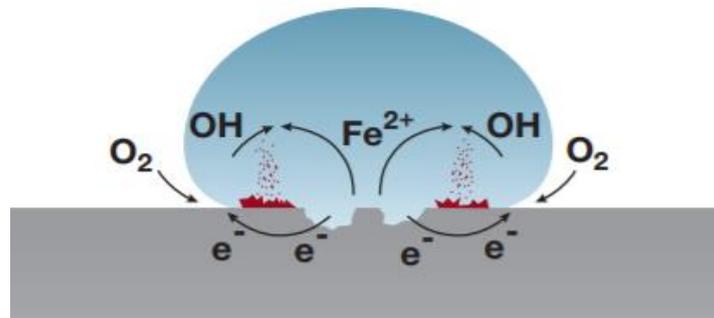


Figura 3.5 - Schema del processo di corrosione nell'acciaio, tratto dal manuale sulla corrosione di Hilti [10]

Le due reazioni di dissoluzione del metallo e di riduzione dell'ossigeno si verificano con una leggera separazione sulla superficie e i loro prodotti (ioni di Fe e di OH), reagiscono a formare gli ossidi di ferro FeO o Fe₂O₃, ricoprendo la superficie dell'acciaio come un film, proteggendolo dalla corrosione, soprattutto se l'acciaio si trova nell'ambiente alcalino della pasta cementizia. Il pH del conglomerato è all'incirca 12 e provvede alla protezione delle fibre presenti al suo interno; però quando il pH diminuisce, a causa del processo di carbonatazione⁶, la passività delle fibre diminuisce, permettendo al fenomeno corrosivo di progredire. [6]

Da numerose prove è emerso che la corrosione delle fibre nel calcestruzzo interessa principalmente le fibre affioranti in superficie, mentre quelle immerse sono passivate e protette dalla soluzione alcalina che riempie i pori della pasta cementizia.

Nel caso in cui ci sia un'eventuale ossidazione delle fibre immerse nella pasta cementizia, provocando però effetti irrilevanti, rispetto alle fessurazioni provocate dall'aumento di volume

⁶ La carbonatazione è un processo chimico dove l'idrossido di calcio combinandosi con l'anidride carbonica dà luogo alla formazione di carbonato di calcio CaCO₃

dell'armatura tradizionale; questo fenomeno nelle fibre è controllato essendo meno voluminose e meglio distribuite all'interno del conglomerato.

In conclusione, la resistenza ai fenomeni corrosivi può essere migliorata anche per le fibre, utilizzando acciai inossidabili o applicando specifici trattamenti, come la zincatura, in funzione del loro grado di esposizione agli agenti aggressivi.

3.1.2 Fibre di vetro



Figura 3.6 - Esempio di fibre di vetro per FRC

Il GFRC (*Glass Fibre Reinforced Concrete*) o GRC (*Glass Reinforced Concrete*) è un materiale composito, costituito da una matrice cementizia al cui interno sono disperse le fibre di vetro. Questo materiale, presente sul mercato da oltre 50 anni, ha riscontrato particolare successo nella produzione di pannelli, per la realizzazione o il rivestimento di facciate.

VANTAGGI

I calcestruzzi rinforzati con fibre di vetro presentano interessanti caratteristiche:

- il basso peso e la conseguente riduzione delle spese per il trasporto e il montaggio;
- la possibilità di ottenere forme complesse, valide anche per operazioni di restauro e ristrutturazione di edifici;
- la diminuzione dei costi strutturali grazie alla riduzione del carico gravante sulla struttura;
- la bassa manutenzione.

Dal punto di vista delle prestazioni meccaniche, la presenza delle fibre all'interno della matrice cementizia, con una percentuale ottimale di circa il 6%, offre numerosi vantaggi, quali:

- maggiore integrità della matrice;
- duttilità e resistenza al taglio;

- maggiore tolleranza al danno e capacità di assorbimento di energia in caso di impatto e carico ciclico;
- migliore stabilità dimensionale (riduzioni ridotte ed espansioni).

In termini di maggiore stabilità dimensionale, è stato dimostrato che l'uso di fibre di vetro come rinforzi discreti nel calcestruzzo aumenta la resistenza alla frattura e la durabilità del calcestruzzo. [11]

LE FIBRE DI VETRO PER GFRC

Un tipico vetro inorganico è caratterizzato da una rete amorfa (non cristallina) di silicio-ossigeno. [12] Il legame chimico viene mostrato in figura 3.7.

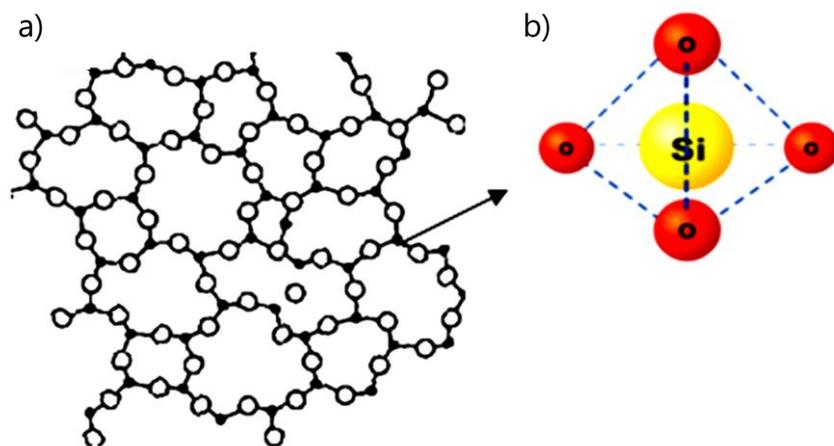


Figura 3.7 - Struttura amorfa (a) e struttura molecolare (b) del vetro a base di silice, tratto da (Axinte, 2011) con modifiche [12]

Le fibre di vetro vengono prodotte mediante un processo in cui le materie prime vengono fuse, attraverso appositi forni, successivamente passano attraverso filiere in platino dove il vetro fuso fuoriesce sotto forma di filamenti, che solidificano durante il raffreddamento all'esterno, quindi vengono raccolti su bobine ruotanti ad elevata velocità. Prima dell'avvolgimento, i filamenti sono rivestiti con una colla, che protegge i filamenti dagli agenti atmosferici e dagli effetti di abrasione.

Le fibre possono essere quindi commercializzate sotto forma di un fascio continuo, oppure possono essere assemblate in reti. In particolare, per il rinforzo di malte cementizie, le reti

presentano dei fori sufficientemente grandi, per consentire la penetrazione dei granuli di cemento (figura 3.8). [9]



Figura 3.8 - Esempio di applicazione delle reti in fibra di vetro alla malta cementizia

SVANTAGGI

L'utilizzo delle fibre di vetro come rinforzo ha richiesto lo sviluppo di tecnologie speciali per incorporare le fibre nella matrice. Un problema particolare che doveva essere affrontato era la bassa resistività alcalina delle fibre di vetro tradizionali, denominato *E-glass*, che era originariamente usato per GRC. Questo tipo di fibra si deteriora abbastanza rapidamente nell'ambiente altamente alcalino della matrice cementizia. [11] Questo processo può essere attribuito alla rottura dei legami Si-O-Si nella struttura molecolare di vetro, dagli ioni OH che sono altamente concentrati nella soluzione alcalina.

Per superare questo problema, è stato necessario sviluppare speciali formulazioni di vetro resistenti agli alcali, denominati AR-glass⁷. Nella composizione delle fibre alcali-resistenti, il materiale caratteristico è l'ossido di zirconio (ZrO_2), con una percentuale minima del 16%. L'impregnazione delle fibre di vetro da parte dello zirconio agisce come un componente nella struttura molecolare della fibra di vetro, migliorando la resistenza alla corrosione alcalina. [11] Sempre per prevenire l'attacco alcalino, sono stati sviluppati ulteriori trattamenti alle fibre AR, tramite l'utilizzo di cere impermeabili e resine sintetiche.

⁷ AR(Alcali Resistance)-glass fibers, sono state sviluppate alla fine degli anni '60 in Inghilterra nei laboratori del British Research Establishment, e commercializzate negli anni '70 dalla Pilkington con il nome di Cem-Fil®.

3.1.3 Fibre sintetiche

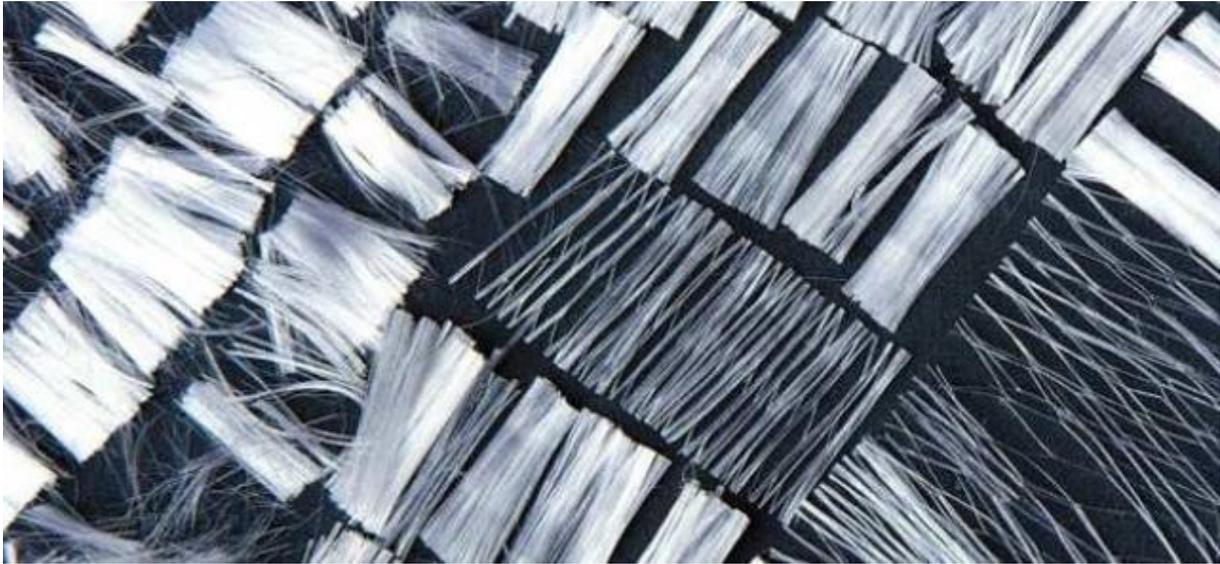


Figura 3.9 - *Differenti tipologie di fibre sintetiche per FRC*

Lo sviluppo delle fibre sintetiche in ambito edilizio, come già anticipato nel capitolo 2, al paragrafo 2.1, risale alla metà degli anni '70. Da allora, anni di studi e ricerche nel campo, hanno portato alla produzione di numerose tipologie di fibre, specifiche per il rinforzo di malte e calcestruzzi.

Le fibre sintetiche o polimeriche sono costituite da catene di polimeri appartenenti alla stessa famiglia dei comuni materiali plastici. Quelle più diffuse in ambito edilizio sono le fibre *poliolefiniche*, tra cui ricordiamo il polipropilene (PP) e il polietilene (PE).

Le proprietà delle fibre sintetiche variano ampiamente rispetto alla resistenza e al modulo di elasticità, come mostrato per le fibre più comuni nella Tabella 3.1.

Come già discusso nel capitolo precedente, per aumentare la resistenza dei materiali compositi, le fibre devono avere un modulo di elasticità maggiore di quello della matrice. Nei materiali cementizi, per i quali il modulo di elasticità varia da circa 10 a 45 GPa, questa condizione è difficile da soddisfare con la maggior parte delle fibre sintetiche. Pertanto, sono state sviluppate alcune fibre definite ad "alta tenacità", ovvero si fa riferimento a fibre con un alto modulo di elasticità, accompagnate da un'elevata resistenza. Tuttavia, sia la ricerca teorica sia quella applicata hanno dimostrato che, anche con fibre a basso modulo elastico, si possono ottenere notevoli miglioramenti in termini di capacità di deformazione, tenacità, resistenza

all'impatto e controllo delle fessure dei compositi FRC. Nella maggior parte delle applicazioni, il miglioramento di queste proprietà è molto più importante di un modesto aumento della resistenza alla trazione o alla flessione. [9]

Tabella 3.1 - Principali proprietà delle fibre sintetiche, tratta da (Arnon Bentur, 2014)

Fibre	Diametro (μm)	Densità relativa (-)	Resistenza a trazione (GPa)	Modulo elastico (GPa)	Allungamento a rottura (%)
Acriliche	20-350	1.16-1.18	0.2-1.0	14-19	10-50
Aramidiche (kevlar)	10-12	1.44	2.3-3.5	63-120	2-4.5
Carbonio (PAN)	8-9	1.6-1.7	2.5-4.0	230-380	0.5-1.5
Carbonio (Pece)	9-18	1.6-1.21	0.5-0.31	30-480	0.5-2.4
Nylon	23-400	1.14	0.75-1.0	4.1-5.2	16-20
Poliestere	10-200	1.34-1.39	0.23-1.2	10-18	10-50
Polietilene	25-1000	0.92-0.96	0.08-0.60	5	3-100
Polipropilene	20-400	0.9-0.95	0.45-0.76	3.5-10	15-25
Poliiolefine	150-635	0.91	0.275	2.7	15
PVA	14-650	1.3	0.8-1.5	29-36	5.7

In questo paragrafo verranno approfondite soltanto due delle principali fibre sintetiche utilizzate in ambito edilizio; in particolare, tra le fibre sintetiche a basso modulo di elasticità verranno analizzate le fibre di polipropilene, mentre fra quelle ad alto modulo elastico verranno esaminate le fibre di carbonio.

3.1.3.1 Fibre di polipropilene



Figura 3.10 – Esempio di fibre di polipropilene per FRC

Il rinforzo delle matrici cementizie con fibre polipropileniche risale al 1965, grazie ad alcune ricerche condotte in USA, riprese in seguito per la produzione industriale nei calcestruzzi e nelle malte. Successivamente, un nuovo materiale cementizio costituito da reti di polipropilene, si proponeva come una valida alternativa alle lastre di amianto-cemento, portando allo sviluppo di nuove tecnologie per la produzione di lastre con armature fibrose. [1]

LE FIBRE DI POLIPROPILENE

Il polipropilene è un polimero termoplastico a struttura molecolare lineare, ottenuto dalla polimerizzazione del propilene ($\text{H}_3\text{C}-\text{CH}=\text{CH}_2$). Attraverso la disposizione spaziale regolare della macromolecola, tale struttura può essere prodotta più facilmente in forma cristallina e quindi elaborata mediante processi di stiramento per ottenere un alto grado di orientamento delle molecole, necessario per ottenere fibre con buone proprietà. [13, 9]

Le fibre di polipropilene vengono prodotte mediante un processo di estrusione sotto forma di sottili pellicole (film); sottoponendo questi film a particolari operazioni di fibrillazione⁸, si possono ottenere reti sottili oppure singoli filamenti. [14]

⁸ Fenomeno per il quale un filamento manifesta segni di struttura fibrosa di scala inferiore, per un groviglio longitudinale del filamento sottoposto a tensione eccessiva e rapida o a sollecitazione di taglio. [14]

L'operazione di fibrillazione, infatti, è importante non solo per ottenere aderenza meccanica con le matrici, ma anche per realizzare prodotti aventi una struttura geometrica reticolare, come si può notare in figura 3.10, migliorando l'impiego come rinforzo all'interno dei composti cementizi. Le fibre vengono commercializzate in bobine oppure tagliate con lunghezze variabili tra 10 e 80 mm, aventi un diametro compreso fra 0.5-15 mm.



Figura 3.11 - Esempio di fibra di polipropilene fibrillata

VANTAGGI

Le fibre di polipropilene sono ampiamente utilizzate in ambito edilizio per il rinforzo dei conglomerati cementizi, grazie alle sue importanti caratteristiche, quali:

- inerzia chimica, che rende le fibre resistenti all'attacco alcalino;
- elevata resistenza a trazione, compresa fra 400-600 MPa, rispetto alla matrice cementizia;
- punto di fusione abbastanza elevato, intorno ai 170 °C;
- basso costo, rispetto ad altre tipologie di fibre. [9, 15]

SVANTAGGI

D'altro canto, le fibre di polipropilene presentano alcuni svantaggi tra cui:

- basso modulo di elasticità, compreso fra 1-8 GPa, che implica una riduzione della resistenza a fessurazione;
- elevata sensibilità alla luce solare e all'ossigeno;
- bassa aderenza con la matrice cementizia.

Il polipropilene è un materiale idrofugo, ovvero impermeabile, da cui ne consegue un basso legame con la matrice cementizia; per ottenere una buona impregnazione e permettere quindi la bagnabilità delle fibre, è necessario renderlo idrofilo. Inoltre, la struttura superficiale delle fibre è molto liscia, limitando così l'aderenza meccanica e i punti di presa con la pasta cementizia. [9, 16]

Le proprietà meccaniche, in particolare il modulo elastico e la bassa aderenza alla pasta cementizia, sono state migliorate mediante opportuni trattamenti superficiali delle fibre, di natura fisica, chimica e meccanica, capaci di incrementare l'efficienza delle fibre all'interno dei composti a base cementizia. Ad esempio, numerose ricerche effettuate sulle fibre con trattamenti al plasma, hanno riportato miglioramenti sul comportamento flessionale e tenacità dei composti FRC con fibre di polipropilene. [9, 16] Allo stesso modo, altre sperimentazioni hanno dimostrato l'aumento di bagnabilità delle fibre a seguito di trattamenti chimici superficiali, come processi di fluorurazione [9], l'utilizzo di una soluzione con acido solforico [17], il ricoprimento delle fibre con particelle di nanosilice o carbonato di calcio (CaCO_3). [16] Tuttavia, alcuni di questi trattamenti necessitano di prodotti chimici costosi.

3.1.3.2 Fibre di carbonio



Figura 3.12 - Esempio di fibre di carbonio per FRC

Le prime fibre di carbonio furono scoperte nel 1879 da Thomas Alva Edison, mediante processo di carbonizzazione di cotone e bambù. Il loro primo utilizzo come filamento, riguardò lo sviluppo iniziale di lampade elettriche, essendo resistente al calore; tuttavia, venne ben presto sostituito dal tungsteno, poiché i filamenti di carbonio erano di breve durata. [18]

Furono prodotte commercialmente solo dal 1960, secondo un procedimento messo a punto da William Watt per la Royal Aircraft in UK, rappresentando il punto di separazione tra le fibre organiche e inorganiche, in quanto prodotte per modificazione di fibre organiche (rayon, acriliche, etc.) o da peci organiche, ricavate da residui di petrolio e catrame.

La natura fibrosa del carbonio è risultata essere di grande importanza per l'evoluzione strutturale, soprattutto nel settore aerospaziale e dell'automazione. Inoltre, nel corso degli anni, le fibre di carbonio hanno sostituito le comuni fibre di vetro in numerosi settori, da quello automobilistico a quello edile, civile e industriale, contribuendo significativamente allo sviluppo di prodotti con migliori caratteristiche di resistenza. [18]

LE FIBRE DI CARBONIO

La singola fibra di carbonio è costituita da numerosi filamenti, all'incirca 10 000, aventi un diametro compreso tra 5 - 7 μm , costituiti dai piccoli cristalli di grafite, nei quali gli atomi di carbonio hanno una disposizione esagonale in piano, come si può notare in figura 3.13. Questi piani, costituiti da atomi di carbonio, sovrapposti mediante legami covalenti, formano il singolo cristallo di grafite. [9, 18]

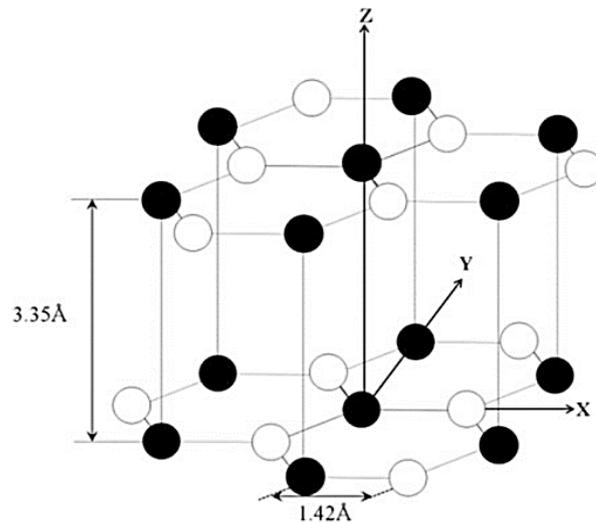


Figura 3.13 - Struttura cristallina della grafite, tratta da (Park,2018) [18]

Le elevate proprietà meccaniche delle fibre di carbonio dipendono dalla particolare struttura cristallina, in particolare, per ottenere elevate resistenze, i piani stratificati di grafite devono essere allineati parallelamente all'asse delle fibre [9] [18], come si può notare in figura 3.13.

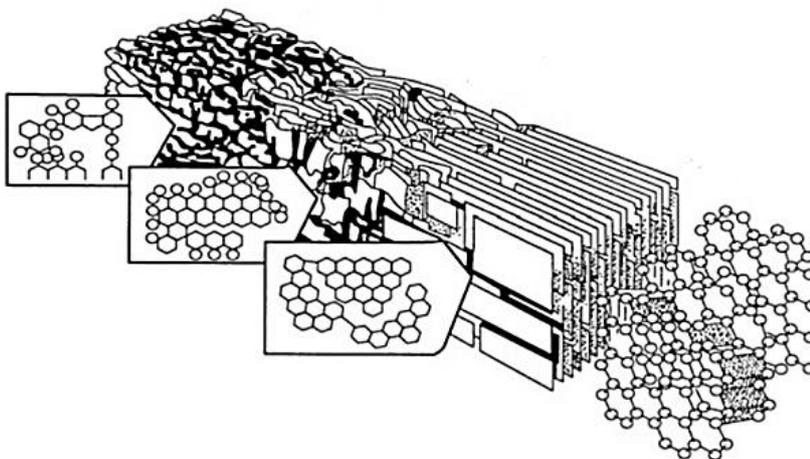


Figura 3.14 - Struttura delle fibre di carbonio, tratta da (Park,2018) [18]

I due processi principali per la produzione di fibre di carbonio si basano sul diverso utilizzo del materiale di base, ovvero poliacrilonitrile (PAN) o pece, ricavata da processi di distillazione del bitume o catrame di carbon fossile. Entrambi i processi comportano trattamenti termici, ottenendo fibre di carbonio con diverse proprietà, a seconda della combinazione del trattamento termico, stiramento e ossidazione. [18]

Le fibre di carbonio PAN sono di qualità superiore, ma più costose, aventi un modulo di elasticità e resistenza elevati. Le fibre di carbonio derivate dalla pece, invece, hanno un modulo di elasticità e resistenza molto più basso, ma sono molto meno costose delle fibre PAN; tuttavia, hanno proprietà superiori rispetto alla maggior parte delle fibre sintetiche e il loro modulo di elasticità è uguale o maggiore di quello della matrice cementizia. Queste caratteristiche, combinate al basso costo, hanno permesso un maggiore utilizzo nel rinforzo di matrici cementizie. [9]

VANTAGGI

Le fibre di carbonio, per la loro natura, instaurano un buon legame interfacciale con la matrice cementizia. Le elevate caratteristiche di resistenza e rigidità delle fibre, conferiscono eccellenti vantaggi nell' utilizzo di composti CFRC (*Carbon Fiber Reinforced Concrete*), tra cui:

- elevata resistenza a trazione e flessione, anche dopo la fessurazione della matrice;
- aumento della resistenza a compressione;
- ottima resistenza alle abrasioni, agli urti e ai carichi dinamici in generale;
- tolleranza alle elevate temperature e bassa dilatazione termica;
- elevata resistenza alla corrosione. [19, 20]

Il CFRC è un materiale di grande interesse tecnologico grazie alla combinazione di buone proprietà strutturali ed eccezionali proprietà elettriche. Infatti, l' utilizzo di un' appropriata quantità di fibre di carbonio nella matrice cementizia può regolare la conduttività elettrica. [20]

SVANTAGGI

Un fattore che limita l'utilizzo dei composti fibrorinforzati con fibre di carbonio in ambito edilizio è l'elevato costo di produzione rispetto ad altri materiali sintetici, anche se trovano maggiore impiego in questo settore le fibre a base bituminosa. [1, 19]

Inoltre, le proprietà del cemento aumentano con il contenuto di fibre di carbonio, a meno che il contenuto non sia così alto che la presenza di vuoti risulta eccessiva. I vuoti d'aria all'interno della pasta cementizia, comportano effetti negativi sulle proprietà, come la resistenza alla compressione. Di conseguenza, la lavorabilità dell'impasto diminuisce con il contenuto di fibre. L'uso efficace delle fibre di carbonio nel cemento richiede una dispersione omogenea nella matrice cementizia, in quanto influenza direttamente le proprietà meccaniche ed elettriche. Vengono quindi aggiunti nell'impasto quantità appropriate di additivi, come fumi di silice, solitamente il 15% in peso di cemento, a cui si aggiunge in genere una piccola quantità di metilcellulosa, per favorire la dispersione delle fibre e la lavorabilità della miscela. [20]

3.2 Fibre naturali

La crescente consapevolezza nei confronti delle tematiche ambientali, incentrate sui concetti di sostenibilità, ha portato alla sperimentazione e lo sviluppo di materiali alternativi naturali, in sostituzione a quelli tradizionali sintetici.

Le fibre naturali hanno sostituito le fibre artificiali in molte applicazioni negli ultimi decenni grazie alla loro natura ecosostenibile, essendo provenienti da fonti rinnovabili e con proprietà riciclabili. Inoltre, presentano buone proprietà meccaniche e bassa densità, disponibili ad un costo relativamente basso rispetto alle fibre artificiali.

Le fibre naturali sono classificate in funzione della loro origine [21], come riportato nello schema riassuntivo di figura 3.14, in tre categorie:

- fibre vegetali;
- fibre minerali;
- fibre animali.

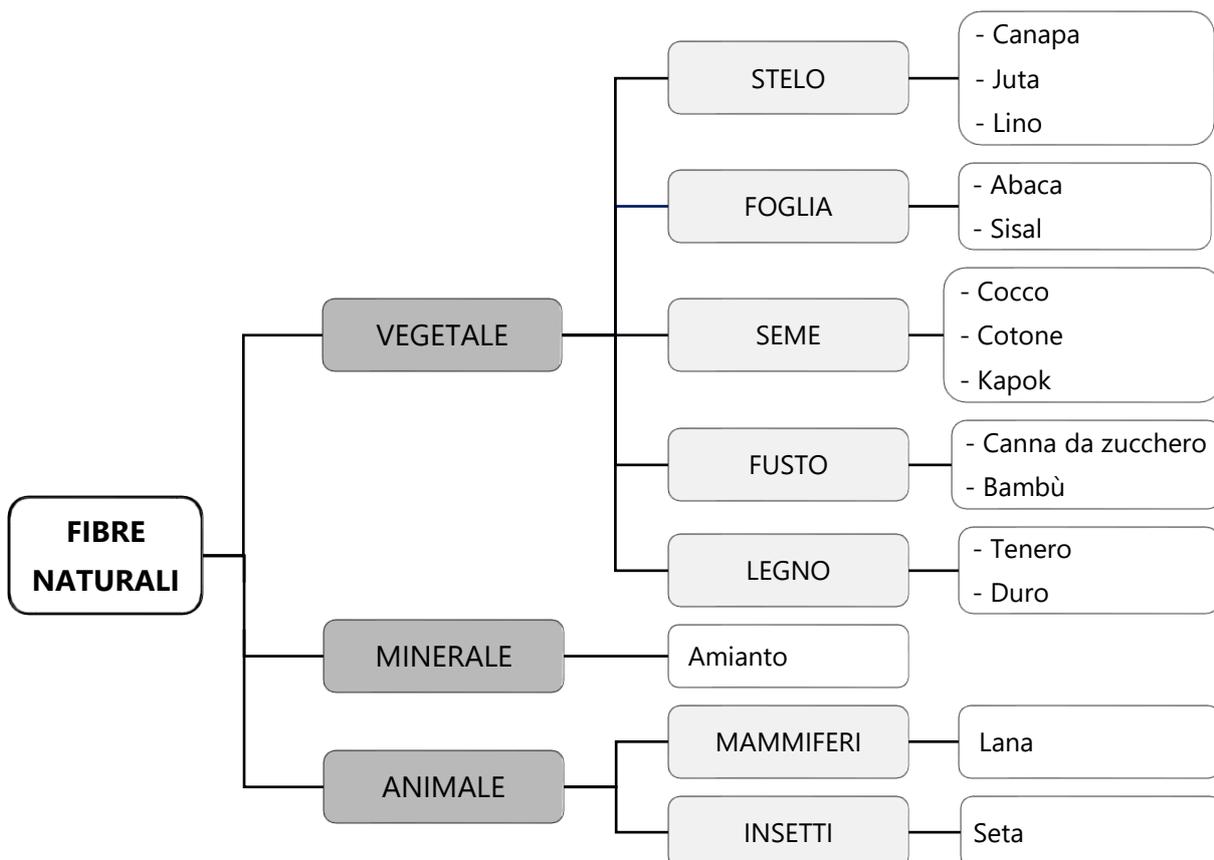


Figura 3.15 - Classificazione schematica delle fibre naturali, tratto da (Ramamoorthy, Skrifvars, & Persson, 2015) [21] con modifiche

In particolare, le fibre minerali di amianto non possono più essere utilizzate per la produzione di materiali cementizi, in quanto cancerogene per la salute, come prescritto dalla Direttiva 83/477/CEE del Consiglio delle Comunità Europee del 19 settembre 1983 sulla "protezione dei lavoratori contro i rischi connessi con un'esposizione all'amianto durante il lavoro (seconda direttiva particolare ai sensi dell'articolo 8 della direttiva 80/1107/CEE)", con le successive rettifiche 91/382/EEC, 98/24/EC; 2003/18/CE and 2007/30/EC. [22]

Le fibre animali, come lana e seta, non vengono generalmente utilizzate come fibre di rinforzo. Al contrario, differenti fibre vegetali, stanno riscontrando numerosi consensi nel campo dei composti fibrorinforzati, in particolar modo con lo sviluppo dei materiali biocompositi; questi ultimi sono ottenuti accostando alle fibre naturali, come juta, canapa e lino, biopolimeri⁹ ricavati da oli vegetali o amidi, con numerose applicazioni nel settore automobilistico, navale e delle costruzioni. [21, 23]

3.2.1 Fibre vegetali

Le fibre vegetali possono essere suddivise in classi differenti, come evidenziato nello schema riassuntivo di figura 3.14 al paragrafo 3.2, a seconda della parte filamentosa della pianta utilizzata per ricavare le fibre. La parte fibrosa, infatti influenza le proprietà del composito: le fibre ricavate da fusti e gambi (canapa, lino, juta, bambù, canna da zucchero, kenaf, etc.) sono migliori poiché sono più flessibili, le fibre delle foglie (abaca, sisal, ananas) sono più rigide e spesse, mentre le fibre da seme o frutto (cotone, cocco, kapok) sono più corte ma più resistenti agli alcali. [1, 21]

Quando si considerano le diverse tipologie di fibre vegetali, si può notare che la loro microstruttura è piuttosto complessa e che le fibre sono composte da lignocellulosa, sostanza organica risultante dalla combinazione di cellulosa, emicellulosa e lignina, in quantità variabili da pianta a pianta. [21, 22] La struttura di una singola cellula è mostrata schematicamente in

⁹ Con il termine "biopolimeri" secondo l'European Bioplastics Association si intendono:

1. polimeri biodegradabili con biodegradabilità approvata secondo norma EN 13432;
2. polimeri a base di materie prime rinnovabili.

figura 3.15, in cui sono evidenziate le fibrille stratificate che costituiscono la parete cellulare. L'orientamento delle fibrille in ogni strato è diverso.

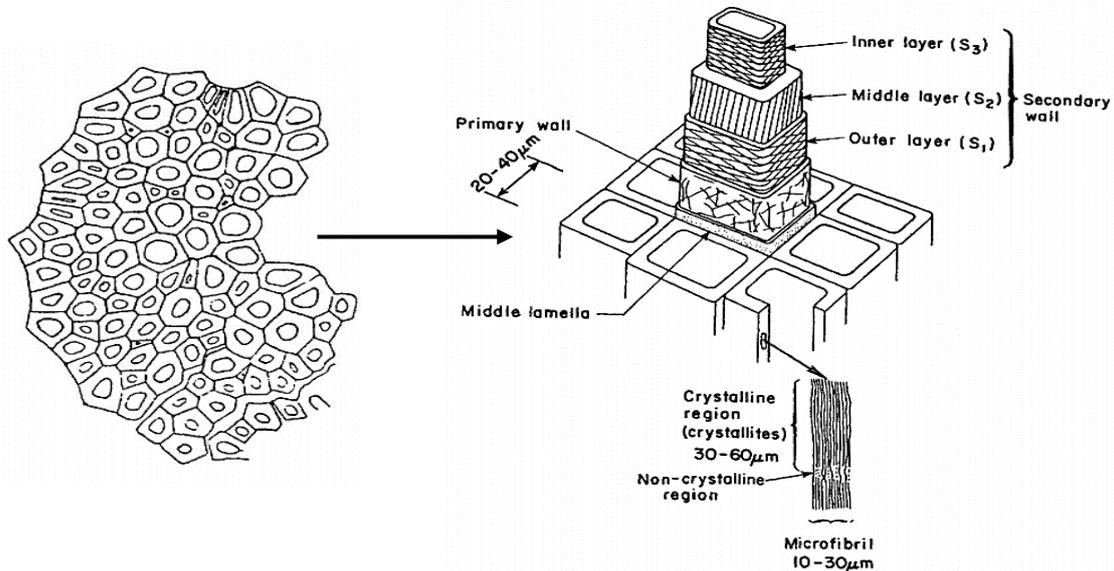


Figura 3.16 - Microstruttura cellulare delle fibre vegetali (sx), con particolare sulla struttura della singola cellula (dx), tratto da (Bentur, 2014) [9]

Sono composte principalmente da lunghe molecole di cellulosa orientate, con un grado di polimerizzazione di circa 25.000 [9]. Le catene di molecole di cellulosa sono raggruppate a loro volta in lunghe e orientate microfibrille. Gli altri componenti della parete cellulare, emicellulosa e lignina, hanno dei gradi di polimerizzazione molto più bassi e si trovano principalmente nelle lamelle centrali, aventi il compito di collegare insieme le singole cellule. [9, 21]

La struttura chimica della cellulosa rimane la stessa per tutte le fibre vegetali, mentre il grado di polimerizzazione cambia, il quale influenza le proprietà meccaniche delle fibre. Da alcuni studi è emerso che le fibre ricavate da stelo e fusto hanno il più alto grado di polimerizzazione, confrontato con quello delle altre fibre vegetali. [21]

Inoltre, la diversificazione delle proprietà meccaniche tra le diverse fibre è il risultato di una serie di fattori, come la posizione geografica, la maturità, le dimensioni e la composizione chimica delle piante; questa variazione può essere attribuita anche alle fasi di estrazione, raccolta e stoccaggio delle fibre. [21] Le proprietà meccaniche di alcune fibre vegetali sono elencate nella tabella 3.2.

Tabella 3.2 - Proprietà meccaniche delle principali fibre vegetali, tratto da (Ramamoorthy, Skrifvars, & Persson, 2015) [21] con modifiche

Fibre	Densità (g/cm ³)	Resistenza a trazione (MPa)	Modulo elastico (GPa)	Allungamento a rottura (%)
Stelo				
Lino	1.5	345-1100	27.6	2.7-3.2
Canapa	-	690	30-60	1.6
Juta	1.3-1.4	393-773	13-26.5	1.2-1.5
Kenaf	-	930	53	1.6
Ramia	1.5	400-938	61.4-128	1.2-3.8
Foglia				
Abaca	1.5	400	12	3-10
Sisal	1.4	468-640	9.4-22	3-7
Ananas	-	413-1627	34.5-82.5	1.6
Curauà	1.4	500-1150	11.8	3.7-4.3
Seme/frutto				
Cotone	1.5-1.6	287-800	5.5-12.6	7-8
Cocco	1.1	131-175	4-6	15-40
Fusto				
Canna da zucchero	1.25	290	17	-
Bambù	0.6-1.1	140-230	11-17	-

In generale, le fibre vegetali presentano interessanti caratteristiche meccaniche, tra cui bassa densità, buona resistenza e modulo elastico, che associato alla disponibilità delle fibre con semplici processi di produzione, ha dato la possibilità di realizzare composti cementizi fibrorinforzati, per applicazioni di edilizia residenziale a basso costo. [9]

3.2.1.1 Fibre da stelo

Le fibre da stelo (*bast fibers*) sono ricavate dai gambi delle piante, i quali vengono liberati dalle sostanze che li circondano mediante un processo noto come macerazione (*retting*), che attraverso l'azione combinata di batteri e umidità, comporta la degradazione biologica e chimica degli steli delle piante. Questo processo può essere effettuato in vasche di acqua riscaldata o mediante un trattamento più semplice, in cui i gambi vengono sparsi sul terreno per consentire ai batteri, al sole e all'aria, di dissolvere il materiale che circonda le fibre. Il processo è seguito dall'asciugatura ed infine le fibre tessili sono ottenute mediante filatura. Le fibre vengono solitamente utilizzate sotto forma di lunghi fasci o ciocche. Fanno parte di questa categoria le fibre di canapa e juta, che verranno analizzate di seguito. [9, 24]

- **Canapa sativa**



Figura 3.17 - Piantagioni di *canapa sativa* (sx) e fibre di canapa (dx)

La canapa è la fibra tessile estratta tramite processo di macerazione dall'omonima pianta *Cannabis sativa*, appartenente alla famiglia delle Cannabinacee. La pianta, originaria dell'Asia centrale, viene coltivata principalmente in Cina e In Francia, da cui vengono ricavate fibre, olio e semi. Oggi è ampiamente coltivata anche in paesi con clima temperato come Cile, Corea del Nord, India, Giappone e molti paesi dell'Europa. L'Unione Europea infatti, considera la promozione della coltivazione della canapa nei paesi membri mediante sussidi e attende nuovi

sviluppi. Oggi la canapa è utilizzata in numerose applicazioni come fibre tessili, carta, fibre composite, semi, olio, cera, resina, polpa, biocarburanti, etc. Il suo utilizzo dipende principalmente dalla qualità della pianta di canapa. La pianta di canapa secerne piccole quantità di tetraidrocannabinolo (THC), noto per essere la sostanza psicoattiva delle infiorescenze. Poiché la quantità di THC presente nella canapa è inferiore allo 0,2%, può essere coltivata nota come *Cannabis sativa*.

La coltivazione della fibra di canapa fu brevemente vietata tra il 1971 e il 1993 per evitare abusi; revocato il divieto, la sua coltivazione è cresciuta esponenzialmente negli anni, ma comunque ad oggi, la fibra di canapa conta meno dello 0,5% della produzione totale di fibre naturali.

La pianta presenta uno stelo tubolare che può raggiungere un'altezza massima di 5 m. La composizione chimica della fibra di canapa varia, in generale contiene circa il 70% di cellulosa (con grado di polimerizzazione intorno a 2200), il 14% di emicellulosa, il 4% di lignina, il resto di grassi e cere, di sostanze solubili. [21] Le fibre elementari (celle), sono unite l'una all'altra tramite della pectina che forma così il fascio di fibra, composta da lunghi filamenti, come si può notare in figura 3.18. Le cellule hanno una tipica forma geometrica poligonale che non si mantiene costante lungo la fibra stessa. Il diametro del fascio medio è di 25 μm mentre la lunghezza ha un valore medio di 25 mm. [21]



Figura 3.18 - Estrazione delle fibre di canapa dal fusto ligneo

Oltre alle tradizionali applicazioni, grazie alla sua elevata resistenza e rigidità, la fibra di canapa viene anche utilizzata come rinforzo nei biocompositi.

Le proprietà meccaniche, come riportato in tabella 3.2, sono le seguenti:

- resistenza a trazione: ~690 MPa
- modulo elastico: 30÷60 GPa
- deformazione a rottura: ~1.6%

▪ **Juta**



Figura 3.19 - Piantazione di juta (sx) e fibre di juta (dx)

La juta è la fibra tessile ottenuta dalla pianta *Corchorus* (*Corchorus capsularis* / *Corchorus olitorius*), appartenente alla famiglia delle Malvacee. Viene principalmente coltivata nelle regioni tropicali, è considerata una delle fibre naturali più importanti dopo il cotone ed anche una delle più economiche.

La storia della juta risale tra il 206 a.C.-221 d.C., quando della carta di juta fu scoperta a Dunhuang, in Cina e probabilmente fu prodotta durante il regno della dinastia Han occidentale. Inoltre, documenti storici mostrano che le fibre di juta furono utilizzate prevalentemente in India durante l'era di Mughal Emperor Akbar (1542-1605). La Compagnia Britannica delle Indie Orientali iniziò a commercializzare la juta dall'India. Da allora, è diventata una delle fibre principali in termini di utilizzo, consumo, produzione e disponibilità. La produzione globale di fibre è fornita soprattutto da India, Cina e Bangladesh. [21]

I fusti possono raggiungere un'altezza compresa tra 2-4 m e le fibre sono ottenute dal processo di macerazione, come per lino e canapa. Lo schema esplicativo del processo di macerazione per ricavare le fibre di juta viene mostrato in figura 3.19.

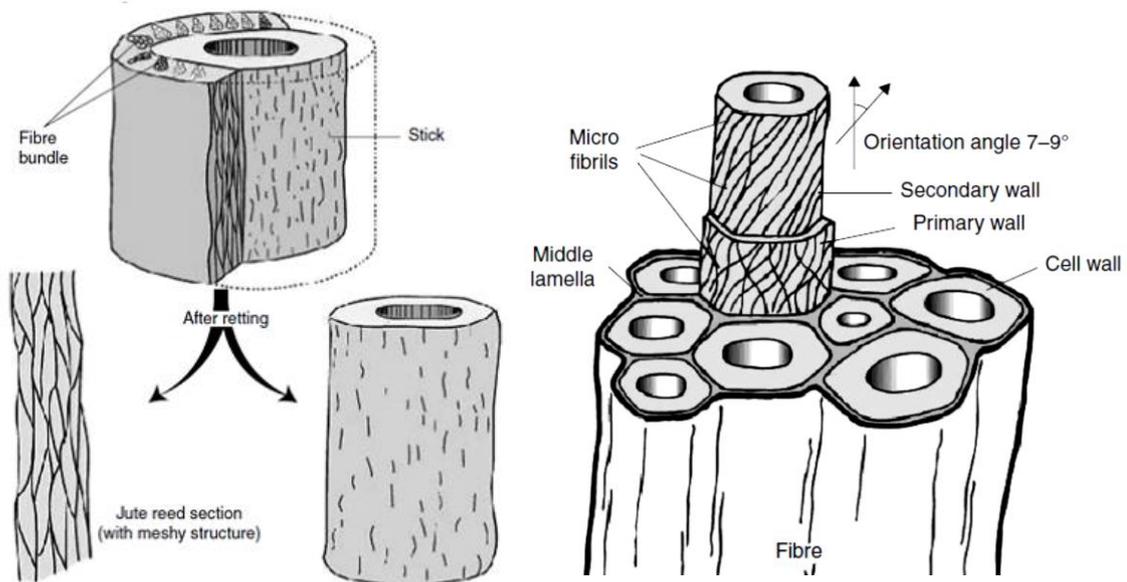


Figura 3.20 - Schema del processo di macerazione delle fibre di juta (sx) e microstruttura di una fibra di juta (dx), tratto da (Hasan, 2018) [25]

La filaccia è costituita da filamenti lunghi 2-3 m formati da fibre elementari di 2-5 mm di lunghezza e 20-25 μm di diametro. La composizione chimica delle fibre di juta è stata studiata da vari ricercatori e i risultati mostrano che il contenuto di cellulosa è compreso tra 61-71,5% (con grado di polimerizzazione 2120), il 12% di emicellulosa, il resto di lignina, cere, etc. [25]

Le proprietà meccaniche, come riportato in tabella 3.2, sono le seguenti:

- resistenza a trazione: 393-773 MPa
- modulo elastico: 13÷26.5 GPa
- deformazione a rottura: 1.2-1.5%

3.2.1.2 Fibre da foglia

Le fibre fogliari (*leaf fibre*) sono ottenute dalle nervature delle foglie delle piante mediante un processo in cui la foglia viene frantumata e raschiata per rimuovere le fibre, seguita infine dalla fase di essiccazione. Le fibre fogliari sono solitamente più dure, rigide e di consistenza maggiore rispetto a quelle derivate dallo stelo. Le fibre sono circondate da tessuto cellulare e sostanze gommose, che vengono eliminate durante la lavorazione delle foglie. Le fibre più comuni in questa categoria sono la sisal e l'abaca. [9, 21]

- **Sisal**



Figura 3.21 - Piantazione di *agave sisalana* (sx) e fibre di sisal (dx)

Le fibre di sisal sono ottenute dal tessuto connettivo di una pianta nota con il nome di *Agave Sisalana*, originaria della penisola dello Yucatan, in Messico. Attualmente, la sisal rappresenta una fibra naturale con un'enorme applicazione commerciale; esso, infatti, rappresenta più della metà del totale delle fibre naturali utilizzate. Il Brasile è il principale produttore ed esportatore mondiale di fibra di sisal, insieme alla Tanzania, dove è spesso l'unica coltura alternativa con rendimenti economici soddisfacenti. È ampiamente coltivato anche in Cina e in Kenya. [21, 26]

L'agave sisalana è una pianta grassa, appartenente alla famiglia delle *Agavaceae*, le cui foglie sono fibrose, rigide e carnose, emergenti dalla base del fusto. La pianta può crescere fino ad 1 metro di altezza, con un numero di foglie che può arrivare fino a 200-250. Ogni foglia può avere all'incirca mille fasci di fibre, che vengono generalmente utilizzate per realizzare corde e

prodotti tessili. Le fibre vengono estratte mediante il processo di decorticazione e sono classificate in tre tipologie: meccaniche, a nastro, xilem, in funzione del tipo di estrazione. In particolare, le fibre meccaniche hanno una resistenza maggiore, mentre quelle xilema hanno la resistenza più bassa, e questo è dovuto al fatto che le fibre meccaniche vengono estratte dalla parte terminale della foglia e hanno una forma definita, invece le fibre xilema sono di forma irregolare e hanno cellule con pareti sottili. Le fibre a nastro sono intermedie, che vengono estratte dalla parte centrale della foglia e presentano una notevole resistenza meccanica. [21]

Le fibre di sisal hanno una composizione chimica caratterizzata dal 67-78% di cellulosa, emicellulosa per il 10-14% e 8-11% di lignina. In figura 3.21 viene mostrata la microstruttura delle fibre di sisal, costituite da fibre primarie da 4 a 12 μm di diametro che vengono aggregate da lamelle intermedie formanti legami naturali da 1 a 2 μm . Tali matrici sono disposte lungo tutta la lunghezza della pianta in maniera regolare. [21, 26, 27]

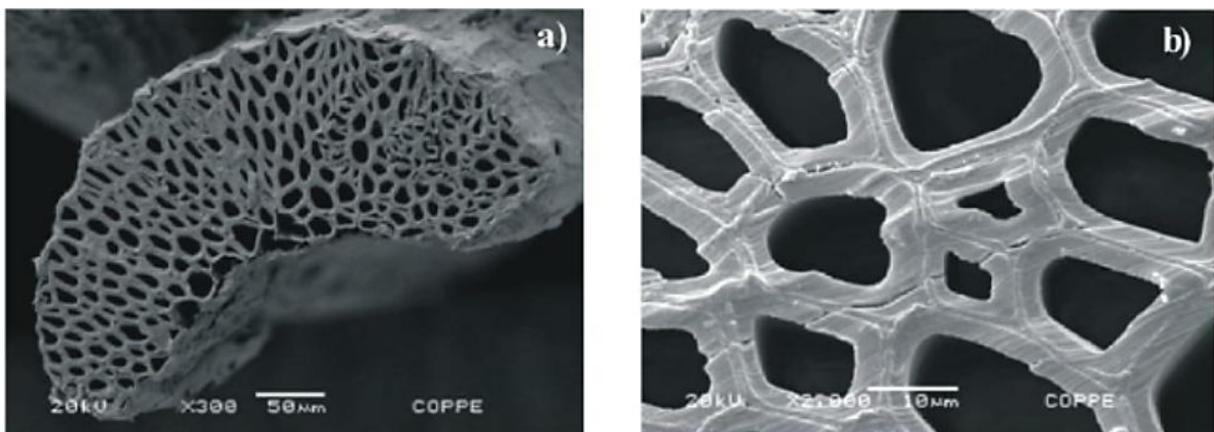


Figura 3.22 - Microstruttura delle fibre di sisal, tratto da (Alves Fidelis, et al. 2013) [27]

La resistenza a trazione e il modulo di elasticità, ad eccezione dell'allungamento della rottura, dipendono dalla quantità di cellulosa presente nelle fibre e dall'orientamento delle microfibre.

Le proprietà meccaniche, come riportato in tabella 3.2, sono le seguenti:

- resistenza a trazione: 468-640 MPa
- modulo elastico: 9.4-22 GPa
- deformazione a rottura: 3-7%

Le fibre di sisal sono ampiamente utilizzate in ambito edilizio, come rinforzo nei materiali compositi, poiché oltre alle buone caratteristiche meccaniche, sono molto economiche rispetto alle fibre sintetiche, come vetro e carbonio, con un costo di 0.36 \$/g. [26]

3.2.1.3 Fibre da fusto

Fanno parte di questa categoria (*grass fiber*) le piante costituite essenzialmente da alti fusti come il loglio (*Lolium perenne*), l'erba dell'elefante (*Pennisetum purpureum*), il panico verga (*Panicum virgatum*), il bambù (*Bambusa vulgaris*) e la canna da zucchero (*Saccharum officinarum*) da cui si ricavano le fibre. Sono utilizzate per la produzione di composti cementizi a basso costo. La lavorazione comprende la frantumazione della pianta mediante rulli, in particolare, per la canna da zucchero sono necessari alcuni trattamenti, per rimuovere eventuali residui di zucchero. Di particolare interesse risultano essere le fibre di bambù, che possono essere utilizzate come elementi di rinforzo, per le loro elevate caratteristiche di resistenza.

- **Bambù**

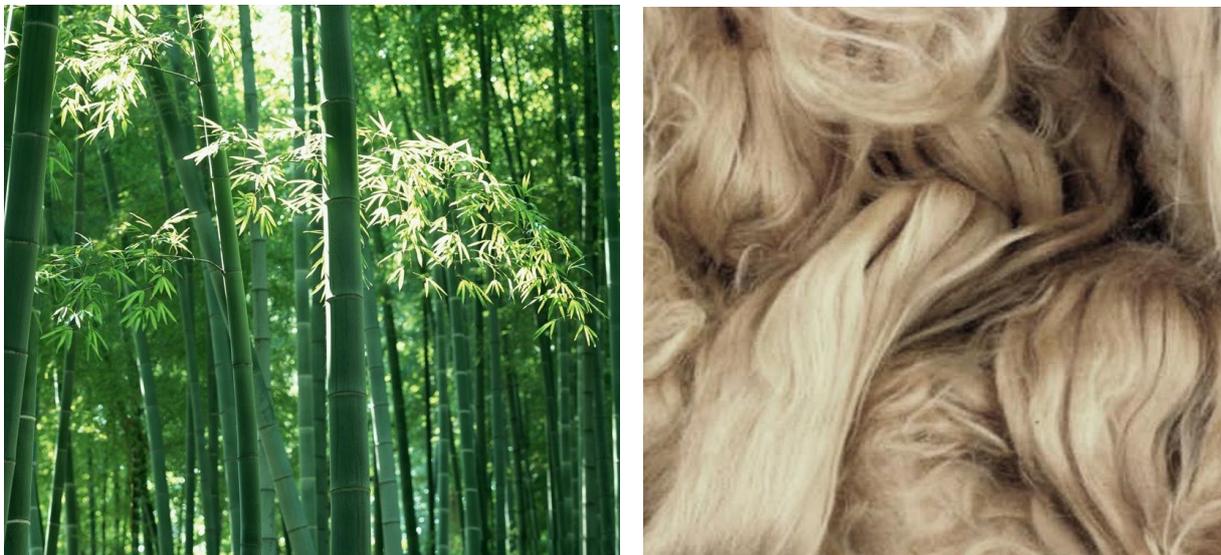


Figura 3.23 - Piantagione di bambù (sx) e fibre di bambù (dx)

Il bambù (*Bambusa Shreb*) è una pianta erbacea perenne coltivata principalmente in Asia ed anche in altri paesi come India, Cina e Indonesia. Esistono più di 1.250 specie diverse e il bambù di alta qualità è utilizzato come materiale da costruzione. Appartiene alla famiglia delle

Graminaceae e le fibre estratte possono essere di due tipi: fibra di bambù originale naturale e la fibra di viscosa di bambù rigenerata. Viene utilizzato principalmente nell'industria tessile e cartaria. [21] Sono piante molto vigorose, con un'altezza che può arrivare fino a 25 m e con un diametro del fusto di 30 cm.

La figura 3.23 mostra la schematizzazione gerarchica delle fibre di bambù su diversa scala. In particolare, in (a) viene rappresentato il fusto (culmo) di bambù, in cui le fibre di sono distribuite longitudinalmente lungo di esso. Le fibre corte e sottili (b), rastremate su entrambe le estremità, sono intercalate longitudinalmente l'una sull'altra lungo il culmo. La parete delle fibre cellulari presenta una struttura polilamellare (c) con lamelle alternate larghe e strette.

La lamella centrale (*middle lamella*) è lo strato più esterno, seguito dalla parete primaria e la parete secondaria, come mostrato nello schema superiore in (c). Gli strati sottili sono costituiti da strati di microfibrille unidirezionali, alternativamente a lamelle trasversali e longitudinali. La composizione chimica della fibra di bambù, mostrata in (d), è caratterizzata da granuli di cellulosa per il 26-43%, il 30% di emicellulosa e lignina per il 21-31%. [21]

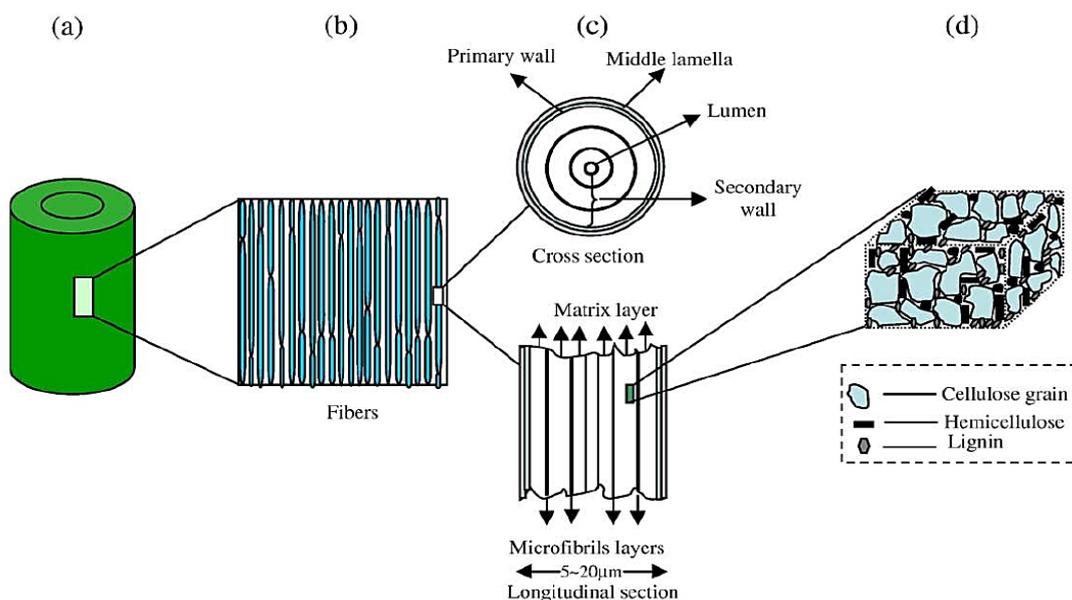


Figura 3.24 - Schematizzazione della composizione delle fibre di bambù

Lo stato di sollecitazione rispetto al quale il bambù presenta caratteristiche meccaniche notevoli, se paragonato a quelle dei più comuni materiali da costruzione, è lo sforzo normale di trazione. Esso risulta maggiore del legno e si avvicina a quello dell'acciaio. Per questo motivo viene chiamato anche "acciaio vegetale". Le proprietà meccaniche del bambù sono

principalmente attribuite alle sue fibre orientate unidirezionalmente, le quali rappresentano il 40% del volume del fusto. [28]

Le proprietà meccaniche della fibra di bambù, come riportato in tabella 3.2, sono le seguenti:

- resistenza a trazione: 140-230 MPa
- modulo elastico: 11-17 GPa

Sono state inoltre rilevate da Takagi et al. le proprietà di conduttività elettrica delle fibre di bambù rinforzate con acido polilattico (PLA), ed è stato scoperto che questi compositi presentano una conduttività termica inferiore rispetto a quella del legno. [21]

3.2.2 Fibre animali

Le fibre animali come la seta, la lana, le piume, etc. sono la seconda fonte più importante di fibra naturale dopo quelle vegetali, per il rinforzo nei materiali compositi. Si tratta anche della seconda fibra naturale più importante in termini di disponibilità.

Si classificano principalmente in due categorie, ossia fibre provenienti dal bulbo pilifero di alcuni mammiferi come pecore, capre, alpaca, lama, etc, dai quali si ricava la lana, e fibre derivanti dalla secrezione ghiandolare di alcuni insetti come le larve appartenenti alla famiglia dei lepidotteri (baco da seta), da cui si ricava la seta.

Le fibre animali sono formate essenzialmente da sostanze proteiche, ovvero macromolecole formate da carbonio, idrogeno, ossigeno, azoto e da piccole quantità di zolfo. La sequenza ed il tipo di macromolecole determinano la struttura della fibra, conferendole un aspetto filamentoso, che incide sulla qualità e sulle sue proprietà meccaniche. [21]

Le caratteristiche principali delle fibre animali sono:

- igroscopicità: la lana e la seta sono tra le fibre più igroscopiche, ovvero hanno la capacità di assorbire umidità dall'ambiente, fino al 33% del loro peso in acqua;
- comportamento al calore: le fibre animali, come quelle vegetali, non fondono ma si decompongono; in particolare la lana inizia a decomporsi a 130° e a 300° carbonizza.

- comportamento alla combustione: le fibre animali bruciano lentamente, infiammandosi con difficoltà rispetto alle fibre vegetali, con un caratteristico odore dovuto dalla presenza di zolfo nelle fibre;
- buone proprietà di coibenza termica, soprattutto per le fibre di lana;
- presentano buone caratteristiche di tenacità, ovvero di allungamento a rottura, che dipende dal grado di cristallinità delle fibre e buona elasticità.

La seta e la lana sono utilizzate nell'industria tessile, ma la concorrenza con i materiali sintetici, ha influenzato negativamente la domanda di prodotti ricavati da fibre naturali nel mercato globale. Si è quindi cercato di utilizzare in maniera alternativa questi materiali, soprattutto la lana, sfruttando le sue proprietà meccaniche e le sue potenzialità come fibra naturale, rinnovabile e biodegradabile, in settori non convenzionali, come quello edile, per realizzare prodotti per l'isolamento termico degli edifici, sperimentando anche il suo utilizzo come rinforzo di compositi cementizi. [21, 29]

▪ **Lana**



Figura 3.25 - Allevamento di pecore (sx) e fibre di lana (dx)

La lana è una delle fibre tessili più comuni, ottenuta dal vello di ovini, come pecore e capre ed altri mammiferi tra cui alpaca, lama, cammelli, etc. L'uso della lana risale ad epoca remota, come prodotto della pastorizia, un elemento essenziale, assieme all'agricoltura, per l'economia dell'uomo primitivo. Diverse infatti sono le testimonianze archeologiche sull'utilizzo della lana

già nell'età preistorica. Sebbene i reperti archeologici in lana più antichi sono invece datati intorno al 1800 a.C., secondo alcuni studi, in Mesopotamia la lana era utilizzata già a partire dal 3000 a.C. Molte raffigurazioni su ceramica testimoniano l'importanza della lana nell'Antica Grecia, dove nell'Età del ferro costituiva la materia tessile più utilizzata. [30]

Ad oggi, la produzione annua di lana di pecora è di circa 1,2 milioni di tonnellate e il 90% viene utilizzata dall'industria tessile. I principali produttori ed esportatori a livello mondiale sono l'Australia, la Nuova Zelanda e la Cina. [29] Prima di essere utilizzata come fibra tessile, la lana subisce delle lavorazioni, in cui si eliminano le impurità presenti, come il grasso, la terra e gli escrementi. Il lavaggio della lana è caratterizzato dai seguenti trattamenti:

- la lana viene aperta, con una prima eliminazione delle impurità, rendendola più penetrabile ai successivi trattamenti; [30, 31]
- tramite una macchina disungitrice, la lana viene bagnata da un getto di acqua a pioggia alla temperatura di 30°, eliminando così i primi grassi solubili in acqua; [30, 31]
- subentra la fase di sgrassatura, in cui si libera la lana dai grassi non solubili in acqua semplice, in vasche contenenti una miscela di acqua, carbonato di soda e saponi alla temperatura di 40°-50°; tra una vasca e l'altra i fasci di lana vengono spremuti per far uscire il liquido grasso; in questa operazione viene persa circa la metà della lana raccolta ed è una fase molto delicata perché può provocare l'infeltrimento irreversibile del materiale. [30, 31]

Infine, segue il processo di asciugatura, in cui si effettuano diverse lavorazioni di filatura della lana, a seconda dell'utilizzo finale delle fibre. [30, 31]

La lana è una fibra proteica di tipo cheratinico e risulta costituita da carbonio (50%), ossigeno (22-24%), idrogeno (7%), azoto (16-17%) e zolfo (3-4%). La struttura istologica della fibra di lana comprende la cuticola, la corteccia e il complesso di membrana cellulare, come si può notare in figura 3.25.

La cuticola è lo strato più esterno squamoso, con funzione di barriera contro danni fisici e chimici esterni. La superficie della cuticola è idrofoba, per la presenza di acidi grassi legati in modo covalente al substrato proteico. Poiché la corteccia è idrofila, la fibra ha una struttura a guscio centrale, con una superficie esterna idrofobica che avvolge un nucleo idrofilo. La corteccia è il corpo principale della fibra capillare ed è composta da molte cellule fusiformi (fibrille), che contengono cheratina fino al 93% in peso. Il particolare amminoacido contenuto

nella cheratina è la cisteina, che rappresenta i ponti disolfuro che collegano trasversalmente le macromolecole adiacenti e conferisce tenacia, resistenza e insolubilità all'intero complesso proteico. [29, 31]

Le macromolecole alfa-cheratina sono costituite da due catene polipeptidiche arrotolate destrorse. Si assemblano ulteriormente secondo un modello di piegatura alfa-elica, per formare strutture microfibrille note come filamenti intermedi cheratinici (IF). I filamenti intermedi sono uniti insieme per formare le microfibrille. Queste microfibrille sono incorporate in una matrice amorfa contenente proteine ad alto contenuto di zolfo, insieme ad altre ricche di glicina e tirosina. [29]

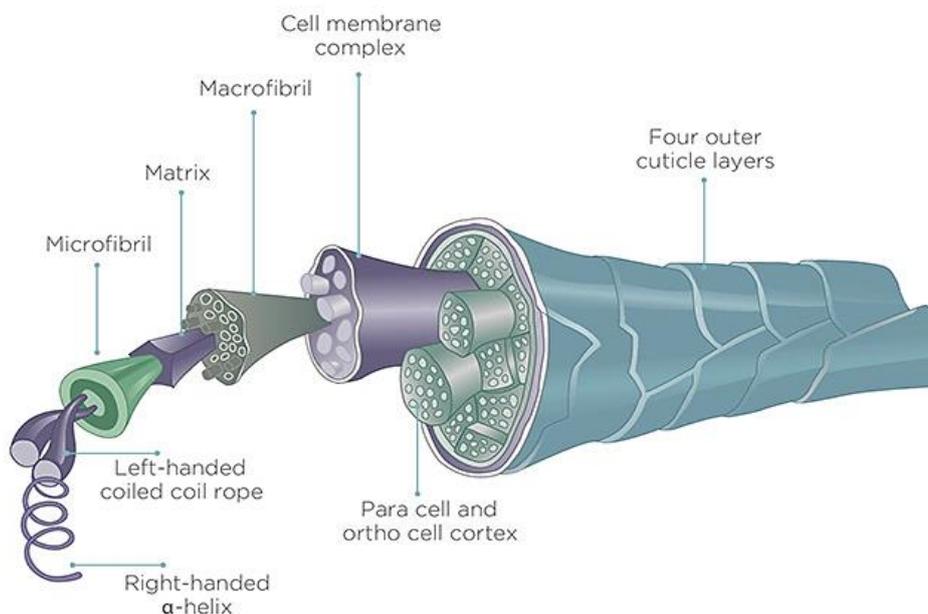


Figura 3.26 - Rappresentazione schematica della struttura istologica di una fibra di lana

Nell'Unione Europea, ci sono circa 124 milioni di pecore che producono all'incirca 260.000 tonnellate di lana all'anno. Tuttavia, non tutta la lana prodotta dagli allevamenti di pecore può essere utilizzata dall'industria tessile. Deve essere pertanto considerato un rifiuto speciale, che necessita di un trattamento di sterilizzazione (a 130 °C) prima del suo smaltimento. La quantità di questa lana inutilizzata è di circa 150 milioni di tonnellate all'anno, tra cui si considera anche la lana dei rifiuti dell'industria tessile. [32] Nell'ultimo decennio, le fibre di lana sono state apprezzate come materiale naturale da utilizzare nel settore edilizio, soprattutto per l'isolamento termico e acustico delle facciate e delle coperture o per compositi con diverse matrici (polimeriche o cementizie). [33]

Come materiale da costruzione, la lana può rappresentare un'alternativa alle fibre sintetiche [33] per le sue proprietà, tra cui:

- ottime proprietà termocoibenti, ovvero è in grado di isolare gli ambienti interni degli edifici sia dal caldo che dal freddo;
- ottime proprietà igroscopiche, ovvero è in grado di assorbire umidità fino al 30% del loro peso senza subire alterazioni e al tempo stesso, permette al vapore di fluire, evitando così condense interstiziali;
- buone proprietà elastiche, per la sua composizione chimica;
- buona resistenza meccanica, essendo una fibra resistente all'usura;
- buona resistenza in ambienti acidi, ma suscettibile in ambienti alcalini.

3.2.3 Degradazione delle fibre naturali in ambiente alcalino

L'aggiunta di fibre naturali nei composti a base cementizia può risultare un'alternativa sostenibile alle fibre di rinforzo tradizionali e può migliorare il comportamento fragile delle paste cementizie. La presenza delle fibre naturali può aumentare la resistenza e il comportamento post-fessurativo, contribuendo a ridurre l'impatto ambientale dei composti cementizi. Tuttavia, vi sono alcuni limiti nell'utilizzo delle fibre naturali a causa di una riduzione della durabilità a lungo termine del composito, causato da un indebolimento delle fibre in ambiente alcalino, come quello della pasta cementizia. Questa riduzione della durabilità è associata ad una minore resistenza di "pull-out" (sfilamento), causata da una combinazione tra l'indebolimento delle fibre per via dell'attacco alcalino, la mineralizzazione delle fibre provocata dalla migrazione dei prodotti di idratazione verso il lumen ed i vuoti cellulari, e la variazione di volume delle fibre a causa dell'assorbimento di acqua. Questi fattori dipendono dal tipo di fibra, dalla composizione chimica della matrice cementizia, dalla sua porosità e dall'ambiente di stagionatura. [34]

I meccanismi della degradazione delle fibre naturali possono essere dovuti a:

- effetto *peeling off*, dovuto alla presenza di soluzione alcalina presente nei vuoti capillari della pasta cementizia, poiché le reazioni del processo di idratazione del cemento con

l'acqua, portano ad un aumento del pH nei vuoti della pasta cementizia. L'acqua alcalina presente nei vuoti dissolve la lignina e l'emicellulosa presente nella lamella centrale (*middle lamellae*) delle fibre portando ad un indebolimento dei legami tra le singole cellule, come mostrato schematicamente in figura 3.26; [9, 34, 35]

- fenomeno dell'idrolisi alcalina delle molecole di cellulosa che causa la degradazione delle catene molecolari, portando ad una riduzione significativa del grado di polimerizzazione e quindi una minore resistenza a trazione. [9, 34, 35]

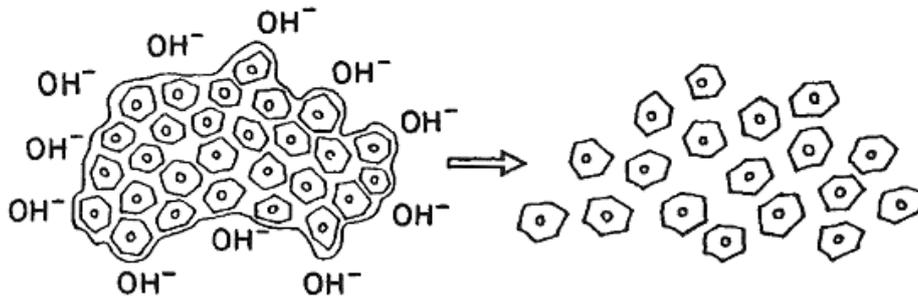


Figura 3.27 - Schematizzazione dell'effetto di degradazione delle fibre naturali in ambiente alcalino, in alto, tratto da (Bentur,2014) [9] e immagine al SEM della degradazione di una fibra di sisal, in basso

La degradazione delle fibre naturali può essere mitigata in due modi:

- pretrattamento della fibra;
- modificazione della matrice cementizia.

Il pretrattamento della fibra naturale comprende metodi chimici, fisici e fisico-chimici. È stato dimostrato che il rivestimento silanico, il silicato di sodio, il silicato di potassio possono migliorare le proprietà meccaniche e la durabilità delle fibre naturali nei materiali a base di cemento. [35]

Il rinforzo delle matrici cementizie con fibre naturali può essere migliorato mediante l'utilizzo di materiali supplementari per la preparazione dell'impasto. Tolêdo et al. hanno sperimentato diversi trattamenti, tra cui la modifica della composizione della matrice cementizia, attraverso la sostituzione di determinate percentuali di cemento Portland con alcuni materiali, come fumi di silice, ceneri volanti e scorie d'altoforno. L'aggiunta di elementi pozzolanici può portare alla riduzione dell'alcalinità della pasta cementizia, riducendo quindi la quantità di idrossido di calcio e di conseguenza limitare il processo che porta alla degradazione del materiale. Risultati migliori si ottengono immergendo le fibre in fumi di silice prima di aggiungerle nella matrice cementizia. [34]

4. INDAGINE SPERIMENTALE

L'attività sperimentale è stata svolta presso il MASTRLAB, laboratorio prove materiali e strutture del dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica del Politecnico di Torino, e ha riguardato la realizzazione di particolari compositi cementizi fibrorinforzati con fibre naturali. In particolare, sono state realizzate delle malte cementizie rinforzate mediante fibre animali in lana di pecora.

Precedenti indagini sperimentali sono state effettuate dal Prof. A.P. Fantilli, sul rinforzo dei compositi cementizi mediante fibre di lana. In particolare, sono state analizzate le proprietà meccaniche delle suddette fibre, nello specifico il comportamento flessionale e la duttilità, ossia la resistenza alla frattura, valutando l'efficacia del materiale a base cementizia sostenibile, rinforzato con fibre naturali. I risultati hanno evidenziato miglioramenti sulle prestazioni delle malte cementizie, quando la stagionatura dei provini è avvenuta a 28 giorni in ambiente, a temperatura e umidità relativa controllate. Al contrario, la stagionatura dei provini in acqua non ha portato a dei risultati interessanti, in quanto le fibre di lana hanno risentito dell'ambiente alcalino. Infatti, osservazioni dettagliate dei provini al microscopio, hanno evidenziato gli effetti corrosivi sulle fibre di lana, dovuti al manifestarsi della reazione chimica alcalina. [36]

L'indagine sperimentale, che verrà discussa nel seguente capitolo, ha come obiettivo l'analisi del comportamento delle fibre di lana, con quattro diverse tipologie di cemento: Portland tradizionale, basso-alcalino, alto-alcalino e solfoalluminoso. In particolare, si è cercato di comprendere quale cemento è in grado di limitare la degradazione delle fibre in ambiente alcalino. Quindi, si è voluto modificare la composizione della matrice cementizia, allo scopo di migliorare le proprietà meccaniche e la durabilità delle fibre di lana.

La procedura utilizzata nella campagna sperimentale, in accordo con la normativa Europea EN-196-1 del 2005, "Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength", ha permesso di determinare le proprietà flessionali e di duttilità dei provini, mediante una prova a flessione su tre punti; inoltre, le prestazioni dei campioni contenenti fibre di lana, sono stati confrontati con quelli contenenti fibre artificiali di polipropilene.

Nei paragrafi successivi verranno descritte nel dettaglio, sia le fasi relative alla preparazione dei provini, sia la procedura riguardante le prove eseguite su di essi.

4.1 Mix-design

La preparazione della malta cementizia è stata effettuata tenendo conto della composizione indicata per le malte idrauliche, dalla normativa EN-196-1: 2005, prevedendo la seguente proporzione tra i costituenti: "una parte di cemento, tre parti di sabbia standard CEN e metà parte di acqua (rapporto acqua / cemento = 0,50)" [37]. Sono state poi aggiunte le fibre con una percentuale dell'1% sul volume complessivo, per garantire un'adeguata lavorabilità dell'impasto. In tabella 4.1 viene riportato il peso in grammi per ogni componente della malta cementizia fibrorinforzata, previsto in ciascun lotto per tre campioni di prova.

Tabella 4.1 - Mix-design della malta fibrorinforzata

MATERIALE	QUANTITÀ (g)
Cemento	450 ± 2
Sabbia	1350 ± 5
Acqua	225 ± 1
Fibre (lana/polipropilene)	10

La composizione della matrice cementizia è la stessa per tutti i provini realizzati, la differenza riguarda le quattro tipologie di cemento utilizzato: Portland, basso-alcino, alto-alcino e solfoalluminoso. Come elementi di rinforzo sono stati impiegati oltre alle fibre di lana, anche quelle di polipropilene, in modo tale da poter confrontare le prestazioni delle differenti tipologie di fibre, naturali e artificiali.

Nel paragrafo 4.2 successivo vengono analizzati nel dettaglio i materiali utilizzati per il mix-design delle diverse malte cementizie fibrorinforzate. In particolare, si riportano i principali costituenti chimici dei cementi e delle fibre (lana e polipropilene), in riferimento alle schede tecniche delle aziende produttrici.

4.2 Materiali

4.2.1 Legante idraulico

Il cemento è un legante idraulico capace di reagire con l'acqua provocando nella malta una graduale perdita di fluidità fino ad ottenere un impasto non più lavorabile (fenomeno di presa) e un progressivo incremento delle resistenze meccaniche (fenomeno di indurimento). I componenti che costituiscono il clinker, il materiale di base per la produzione del cemento, sono responsabili dei fenomeni di presa e indurimento.

I cementi utilizzati durante l'indagine sperimentale per la realizzazione delle malte fibrorinforzate, sono di quattro diverse tipologie, elencate nella tabella 4.2 seguente:

Tabella 4.2 - Tipologie di cemento utilizzate per le malte cementizie fibrorinforzate

TIPO DI CEMENTO	CARATTERISTICHE
Portland	CEM I 42.5 R Buzzi Unicem
Basso alcalino (<i>Low Alkali</i>)	CEM I 42.5 R HEIDELBERGCEMENT
Alto alcalino (<i>High Alkali</i>)	CEM I 42.5 R HEIDELBERGCEMENT
Solfoalluminoso (sulfoaluminate)	Next Binder SL05 Buzzi Unicem

4.2.1.1 Cemento Portland

Il cemento Portland, definito comunemente cemento tradizionale, è il legante idraulico più utilizzato per la preparazione delle malte e dei calcestruzzi.

Si ottiene dai processi di cottura, a temperatura di circa 1450 °C, di materiale naturale (marne) o non naturale, contenente calcare e argilla. Il prodotto della fusione prende il nome di clinker, è miscelato con gesso (*solfo di calcio idrato*) ed anidrite (*solfo di calcio anidro*) in quantità necessaria del 2-6%, con funzione di ritardante di presa. La polvere ottenuta è cemento pronto all'uso, la cui composizione tipica è la seguente:

- 64% ossido di calcio (CaO)
- 21% ossido di silicio (SiO₂)
- 5,5% ossido di alluminio (Al₂O₃)
- 4,5% ossido di ferro (Fe₂O₃)

- 2,4% ossido di magnesio (MgO)
- 1,6% solfati
- 1% altri, soprattutto acqua

Ad un'analisi microscopica, il cemento Portland presenta quattro componenti principali, indicati mediante la simbologia che si utilizza nella chimica del cemento:

- silicato tricalcico (alite): C_3S
- silicato bicalcico (belite) C_2S
- alluminato tricalcico (celite): C_3A
- alluminato ferrito tetracalcico (brownmillerite): C_4AF

Il cemento Portland viene indicato dalla normativa UNI EN 196-1: 2005 "Cemento - Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni", come:

- *Tipo I*: costituito almeno per il 95% da clinker e solo in misura inferiore al 5% da costituenti minori. Sono i cementi generalmente utilizzati nella prefabbricazione di calcestruzzi armati semplici e precompressi; [37]
- *Classe di resistenza standard*: sono disponibili tre classi di resistenza standard (32,5 - 42,5 - 52,5 MPa) a rottura per compressione, a distanza di 28 giorni dal getto; [37]
- *Resistenza iniziale*: per ognuna delle classi di resistenza standard, sono individuate due classi di resistenza iniziale, a 2 o 7 giorni, indicate con N (normale) e R (elevata). [37]

Il codice della prima tipologia di cemento, utilizzato per il confezionamento dei provini, è: *CEM I 42.5 R*, fornito dalla ditta Buzzi Unicem. La composizione chimica è indicata in tabella 4.3.

Tabella 4.3 - Principali costituenti chimici del cemento Portland, tratto da (Buzzi Unicem)

COMPOSTO CHIMICO	NOMENCLATURA	PERCENTUALE (%)
Ossido di calcio	CaO	63
Ossido di alluminio	Al ₂ O ₃	6.1
Silice	SiO ₂	19.6
Ossido di ferro	Fe ₂ O ₃	2.7
Ossido di magnesio	MgO	1.4

4.2.1.2 Cemento basso-alcantino

Il cemento basso-alcantino utilizzato per l'indagine sperimentale è stato fornito dall'azienda produttrice HEIDELBERGCEMENT Group. Si tratta di un cemento di tipo I 42.5 R. La composizione chimica è riportata in tabella 4.4.

Tabella 4.4 - Principali costituenti del cemento basso-alcantino

COMPOSTO CHIMICO	NOMENCLATURA	PERCENTUALE (%)
Ossido di calcio	CaO	63.3
Ossido di alluminio	Al ₂ O ₃	4.4
Silice	SiO ₂	20.8
Ossido di ferro	Fe ₂ O ₃	5.34
Ossido di magnesio	MgO	0.93

4.2.1.3 Cemento alto-alcantino

Il cemento alto-alcantino utilizzato per l'indagine sperimentale è stato fornito dall'azienda produttrice HEIDELBERGCEMENT Group. Si tratta di un cemento di tipo I 42.5 R. La composizione chimica è riportata in tabella 4.5.

Tabella 4.5 - Principali costituenti del cemento alto-alcantino

COMPOSTO CHIMICO	NOMENCLATURA	PERCENTUALE (%)
Ossido di calcio	CaO	61.8
Ossido di alluminio	Al ₂ O ₃	4.8
Silice	SiO ₂	19.4
Ossido di ferro	Fe ₂ O ₃	3.18
Ossido di magnesio	MgO	2.56

4.2.1.4 Cemento solfoalluminoso

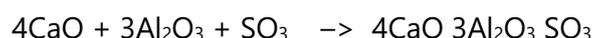
I cementi a base di solfoalluminato di calcio (CSA) sono considerati dei leganti idraulici a ridotto impatto ambientale, sviluppando al contempo buone prestazioni meccaniche. Rispetto ad un clincker di Portland, un clincker di CSA può consentire risparmi di circa il 68% nel fabbisogno di calcare e il 40% nel consumo di combustibile. Inoltre, permette di ottenere una rilevante riduzione dell'emissione di CO₂ nell'ambiente, di circa il 60%, per la contenuta presenza di carbonato di calcio (CaCO₃) tra le materie prime e il minor consumo di combustibile fossile durante la fase di cottura. [38] Difatti, le temperature raggiunte nel forno durante la cottura della farina sono circa 200°C inferiori a quelle tipiche della produzione dei clinker Portland ordinari, permettendo quindi un minore impatto energetico. Si ottengono inoltre, dei clinker più friabili che richiedono una minore energia di macinazione, con la possibilità di utilizzare nel ciclo di produzione, una serie di rifiuti e sottoprodotti industriali difficili da smaltire. [38, 39]

Il clinker solfoalluminato si ottiene mediante la cottura di una miscela composta da bauxite, calcare e gesso, ad una temperatura di circa 1350°C. Viene riportata di seguito la percentuale delle materie prime, in riferimento al manuale d'uso del cemento utilizzato, dell'azienda Buzzi Unicem.

Tabella 4.6 - Composizione della miscela di CSA, tratto da (Buzzi Unicem) [38]

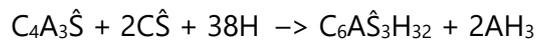
Calcare ~ 30-40%	⇒	sorgente principale di CaO
Bauxite ~ 35-45%	⇒	sorgente principale di Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ e SiO ₂
Gesso ~ 20-30%	⇒	sorgente principale di CaSO ₄

La reazione principale ottenuta dal processo di cottura è il solfoalluminato di calcio:



La reazione di idratazione del solfoalluminato di calcio consente la rapida formazione di ettringite non espansiva e una parte di idrossido di alluminio amorfo. La caratteristica dell'ettringite di non essere espansiva, è in grado di favorire elevate resistenze meccaniche già

alle brevi stagionature. Affinché questa reazione si sviluppi pienamente è necessaria la presenza di solfato di calcio come indicato nella formula di seguito riportata:



dove:

- $C\hat{S}$: solfato di calcio
- $C_4A_3\hat{S}$: solfoalluminato di calcio
- $C_6A\hat{S}_3H_{32}$: ettringite
- AH_3 : idrossido di alluminio
- H: acqua

Considerando i rapporti acqua/cemento ordinari ($0,40 < a/c < 0,55$), le malte e i calcestruzzi confezionati con leganti a base di clinker solfoalluminato, mostrano una capillarità estremamente ridotta congiuntamente ad una rapida asciugatura della pasta cementizia indurita, a causa della rapida reazione di idratazione. [38] Di conseguenza, la rapida formazione di cristalli prismatici di ettringite, provoca la formazione di una struttura chimica meno porosa e più consistente rispetto a quella che si genera dai cristalli del silicato di calcio idrato (C-S-H) nei tradizionali cementi Portland. [38] Il rapido sviluppo delle resistenze meccaniche dei cementi solfoalluminosi e il loro basso ritiro all'essiccazione, rappresentano delle proprietà di base molto valide, che consentono di utilizzarlo in miscela con il cemento Portland, fungendo da acceleratore dei tempi di presa oppure utilizzato come legante principale, per la realizzazione di malte tecniche ad elevate prestazioni. [38]

Il cemento a base di solfoalluminato di calcio, utilizzato per l'indagine sperimentale è il *Next Binder SL05*, prodotto dall'azienda Buzzi Unicem. Ha un ampio campo di utilizzo, in quanto la velocità di presa controllata ne consente l'utilizzo sia alle basse che alle medie temperature. Inoltre, garantisce alle miscele un basso ritiro, un rapido indurimento e asciugamento, rispetto ai tradizionali cementi Portland. Per queste sue caratteristiche viene proposto in tutte le applicazioni della premiscelazione in cui siano richieste tali prestazioni come, ad esempio, nella confezione di malte per massetti autolivellanti, colle e malte da ripristino. [38]

In tabella 4.7, si riportano i principali costituenti chimici presenti nella scheda tecnica del prodotto.

Tabella 4.7 - Principali costituenti chimici del CSA, tratto da (Buzzi Unicem) [38]

COMPOSTO CHIMICO	NOMENCLATURA	PERCENTUALE (%)
Ossido di calcio	CaO	52-58
Ossido di alluminio	Al ₂ O ₃	9-15
Silice	SiO ₂	11-17
Anidride solforica	SO ₃	8-14
Ione cloruro	Cl ⁻	<0.1

4.2.2 Acqua

L'acqua d'impasto è necessaria per garantire una corretta idratazione del cemento, per bagnare l'aggregato in modo da favorire l'aderenza con la pasta cementizia e di portare l'impasto alla consistenza ideale, in modo tale da garantire la sua lavorazione e successiva posa in opera. L'acqua deve essere dosata adeguatamente, per ottenere un corretto rapporto acqua/cemento, da cui dipende la resistenza finale del conglomerato cementizio.

Inoltre, l'acqua d'impasto deve essere limpida, priva di sali, in particolare solfati e cloruri in percentuali dannose e conforme alle prescrizioni delle norme in vigore. In particolare, secondo la normativa UNI EN 1008: 2003, che specifica i requisiti dell'acqua d'impasto per la produzione di malte e calcestruzzi, l'acqua potabile è considerata idonea per la produzione di compositi cementizi, e non necessita di essere sottoposta a specifiche prove. [40]

Facendo riferimento anche alla norma UNI EN 196-1, utilizzata per il confezionamento dei campioni di prova, si è utilizzata acqua potabile per la realizzazione della pasta cementizia. In particolare, è stata considerata una quantità pari a 225 g per ciascun provino di malta cementizia, composto da tre campioni, come già anticipato nel paragrafo 4.1.

4.2.3 Aggregato

Gli inerti fini utilizzati per il confezionamento delle malte cementizie, rispettano le prescrizioni della normativa UNI EN 196-1. Si tratta di sabbia normalizzata CEN conforme a quella di riferimento CEN, ovvero una sabbia silicea naturale formata da particelle arrotondate, con un contenuto di silicio almeno del 98% e la cui granulometria rientra nei limiti definiti nella tabella 4.8.

Tabella 4.8 - *Granulometria di una sabbia CEN, definita dalla UNI EN 196-1 [37]*

Dimensioni della maglia (mm)	2.00	1.60	1.00	0.50	0.16	0.08
Residuo cumulativo (%)	0	7±5	33±5	67±5	87±5	99±1

La setacciatura deve proseguire fino a quando la quantità di sabbia che passa attraverso ogni maglia non sia inferiore di 0.5g/min. Inoltre, il tenore di umidità deve essere minore dello 0.2%, determinato come perdita di massa di un campione rappresentativo di sabbia dopo essiccazione per due ore a 105-110 °C ed espressa come percentuale di massa del campione essiccato. Tuttavia, questi requisiti non sono sufficienti a garantire che la sabbia standard CEN abbia delle prestazioni equivalenti alla sabbia di riferimento CEN. Tale equivalenza deve essere stabilita da un test di validazione descritto nella Clausola 11 della norma. [37]

La sabbia standard CEN viene preconfezionata in sacchi con un contenuto di 1350 ± 5 g, come mostrato in figura 4.1. Il materiale utilizzato per i sacchetti non deve avere alcun effetto sui risultati delle prove di resistenza e il contenuto di ciascun sacco deve essere conforme alla distribuzione granulometrica specificata nella tabella 4.8.



Figura 4.1 - *Sabbia normalizzata CEN, con dettaglio a destra della granulometria*

4.2.4 Fibre di rinforzo

4.2.4.1 Fibre di lana

Le fibre animali, in particolare le fibre di lana, sono utilizzate in ambito edilizio, principalmente per le loro proprietà coibenti, nella produzione di prodotti per l'isolamento termico, come anticipato nel paragrafo 3.2.2. La lana ed altre fibre a base di cheratina, ad esempio i capelli umani, sono state analizzate negli ultimi anni, in quanto hanno proprietà macroscopiche simili a quelle di alcuni polimeri sintetici. Infatti, il modulo di elasticità della lana è compreso fra 1-4 GPa, confrontabile a quello di alcune fibre sintetiche, come il polipropilene, utilizzate per il rinforzo di compositi cementizi. [41]

Le fibre di lana utilizzate per la produzione delle malte cementizie fibrorinforzate, sono state fornite al laboratorio per la sperimentazione, dall'ISMAL, Istituto per lo Studio delle Macromolecole del CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche), con sede a Biella. Si tratta di lana ricavata dal vello delle pecore. La composizione delle suddette fibre cheratiniche viene mostrata in tabella 4.9.

Tabella 4.9 - Composizione delle fibre di lana

ELEMENTO CHIMICO	PERCENTUALE (%)
Carbonio	50
Ossigeno	22-24
Idrogeno	7
Zolfo	3-4

Le fibre di lana si presentavano unite in fasci di piccole matasse, si è quindi proceduto a tagliarle adeguatamente, ottenendo così dei "fiocchi", con un diametro medio della fibra di 19 μ m e una lunghezza di circa 16mm, come si può notare in figura 4.2, in percentuale pari all' 1% del volume totale, corrispondente a 10g, in modo tale da consentire un'omogenea dispersione

all'interno del composto ed evitare la creazione di accumuli di fibre, tali da compromettere la lavorabilità dell'impasto.

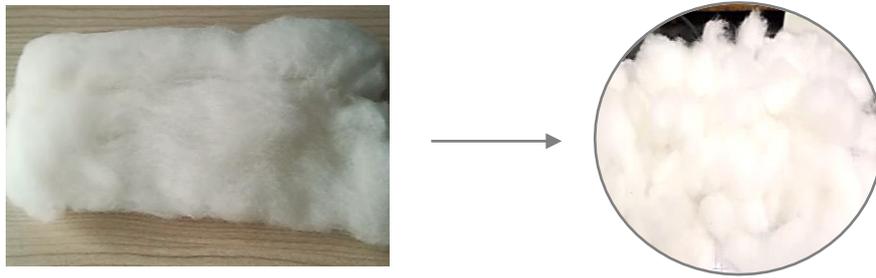


Figura 4.2 - Matassa di lana (sx) e nel dettaglio fiocchi di fibre di lana utilizzate per la malta cementizia fibrorinforzata (dx)

4.2.4.2 Fibre di polipropilene

Le fibre sintetiche sono notevolmente utilizzate in ambito edilizio per il rinforzo delle matrici cementizie. Grande importanza rivestono le fibre di polipropilene (PP) grazie alle sue proprietà, già enunciate nel paragrafo 3.1.3.2, come l'elevata resistenza a trazione, resistenza all'attacco alcalino, elevato punto di fusione e un costo relativamente basso rapportato alle altre tipologie di fibre.

La norma UNI EN 14889-2:2006 "Fibre per calcestruzzo - Parte 2: Fibre polimeriche - Definizioni, specificazioni e conformità" specifica i requisiti relativi alle fibre polimeriche per usi strutturali e non strutturali, da utilizzare nei calcestruzzi, nelle malte e nelle malte per iniezione. In particolare, vengono descritte le prove da effettuare e le specifiche tecniche necessarie per ottenere la dichiarazione di conformità CE, definita comunemente come marcatura CE. [42]

La norma sulle fibre sintetiche differenzia due metodi di certificazione distinti applicabili alle fibre:

- Sistema 3: fibre per applicazioni generiche;
- Sistema 1: fibre per applicazioni strutturali.

SISTEMA 3

La marcatura CE per le fibre sintetiche con il Sistema di certificazione "3" viene eseguita quando la fibra da testare non verrà utilizzata per scopi strutturali. Le prove più importanti da effettuare sono: la prova di trazione sulla fibra (in riferimento alla norma UNI EN 10002-1:2004) e quella

sugli effetti della fibra sulla consistenza del calcestruzzo allo stato fresco (riferita alla norma EN 12350-3:2009). Per questo tipo di certificazione, la fibra è sottoposta a pochi e semplici test, in assenza di valori limite da rispettare. Si tratta di una certificazione che si può ottenere agevolmente, infatti qualunque laboratorio di prova per materiali da costruzione può effettuare i test ed emettere il certificato.

SISTEMA 1

La marcatura con il Sistema di certificazione "1" viene applicata per testare e certificare le fibre per applicazioni strutturali. La procedura per ottenere questa certificazione è simile a quella utilizzata per certificare le fibre d'acciaio con la UNI EN 14889-1. A differenza della marcatura con il Sistema 3, questo metodo richiede che le prove siano effettuate da un soggetto esterno, notificato con autorizzazione ministeriale e le fibre campione sono prelevate da un ispettore, presso il sito di produzione del prodotto. Oltre a tutti i test previsti per il Sistema 3, il Sistema 1 richiede anche la prova sul comportamento di un concio di trave sottoposto a flessione, secondo la norma UNI EN 14651. Questo tipo di certificazione è costoso e complesso, con valori limite da rispettare.

Le fibre sintetiche utilizzate per il rinforzo delle malte cementizie, da confrontare con quelle naturali di lana, sono delle fibre polipropileniche antiritiro, idonee per contrastare la formazione di fessure indotte dal ritiro igrometrico, prodotte dall'azienda Mapei. La struttura "monofilamento" della fibra facilita la sua dispersione all'interno del conglomerato cementizio, in modo tale da ottenere una distribuzione omogenea ed orientata in tutte le direzioni, creando una matrice particolarmente rinforzata capace di resistere efficacemente alle tensioni innescate dai fenomeni di presa ed indurimento. [43]

Le fibre di polipropilene utilizzate per l'indagine sperimentale sono: *Mapefibre NS12* dell'azienda Mapei (figura 4.3). I dati identificativi del prodotto sono riportati in tabella 4.10.



Figura 4.3 - Fibre di polipropilene utilizzate per l'indagine sperimentale

Tabella 4.10 - Caratteristiche delle fibre di polipropilene secondo la scheda tecnica del prodotto [43]

DATI IDENTIFICATIVI DEL PRODOTTO		
Classificazione		Classe I
Generalità	Tipo polimero	Polipropilene
	Forma	Monofilamento
Diametro		0,020 mm
Lunghezza		12 mm
Massa volumica (g/cm ³)		0.91
Punto di accensione		160°C-170°C
Punto di fusione		400°C
Assorbimento d'acqua		nullo
Resistenza agli alcali, acidi e sali		alta
Resistenza alla trazione (N/mm ²)		400-500

4.3 Confezionamento dei provini

La prova a flessione è stata effettuata su provini prismatici, di dimensioni 40x40x160 mm, come previsto dalla normativa di riferimento per le malte cementizie UNI EN 196-1: 2005.

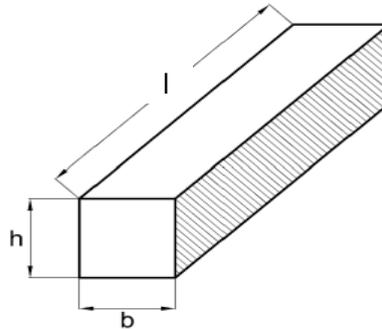


Figura 4.4 - Schematizzazione dei provini prismatici, di dimensioni: $b=40\text{mm}$; $h=40\text{mm}$; $l=160\text{mm}$

Sono stati preparati in totale quattro impasti diversi, in funzione delle diverse tipologie di cemento utilizzate, e da ognuno di essi sono state ricavate due diverse miscele, in funzione del tipo di rinforzo, ossia fibre di lana o polipropilene. Si sono ottenuti per ogni impasto 21 provini, di cui 9 rinforzati con fibre di lana, 9 con fibre di polipropilene e 3 privi di fibre di rinforzo; questi ultimi sono stati considerati come provini di riferimento, in modo tale da poter valutare l'effetto delle fibre nel composto cementizio.

Gli impasti sono stati identificati con una lettera, in funzione del diverso legante, come segue:

- Serie "N" (*Normal*): prevede l'utilizzo di cemento Portland CEM I 42.5 R;
- Serie "H" (*High Alkali*): prevede l'utilizzo di cemento ad alta alcalinità;
- Serie "L" (*Low Alkali*): prevede l'utilizzo di cemento a bassa alcalinità;
- Serie "S" (*Sulfoaluminate*): prevede l'utilizzo di cemento solfoalluminoso.

Le tre diverse miscele utilizzate per la prova sperimentale sono:

- malta cementizia priva di fibre di rinforzo;
- malta cementizia rinforzata con fibre di lana;
- malta cementizia rinforzata con fibre di polipropilene.

In tabella 4.11, viene riportata la composizione delle malte cementizie, in riferimento al mix-design descritto al paragrafo 4.1:

Tabella 4.11 - Composizione delle malte cementizie

TIPO DI MALTA	CEMENTO (g)	ACQUA (g)	SABBIA (g)	FIBRE (g)	
				LANA	POLIPROPILENE
Malta cementizia	450	225	1350	-	-
Malta cementizia rinforzata con lana	450	225	1350	10	-
Malta cementizia rinforzata con PP	450	225	1350	-	10

4.3.1 Preparazione della malta cementizia

La preparazione della malta cementizia per il confezionamento dei campioni di prova, è stata effettuata considerando la procedura dettagliata dalla normativa di riferimento UNI EN 196-1.

Viene di seguito elencata la strumentazione utilizzata in laboratorio:

- Bilancia con tolleranza di 1g;
- Becher graduato;
- Mescolatrice (*mixer*);

Si sono poi effettuate le seguenti fasi operative per la preparazione delle miscele:

1. PESATURA

Inizialmente, si è proceduto a pesare tutti i materiali, tramite bilancia con precisione di $\pm 1g$ e l'ausilio di strumentazione di laboratorio, come il becher e il cilindro graduato, facendo riferimento alle composizioni calcolate per ogni impasto, come previsto da normativa, riportate nella tabella 4.11.

2. MISCELAZIONE

La fase di miscelazione della pasta cementizia va effettuata seguendo specifiche fasi, nei tempi previsti dalla normativa di riferimento. La macchina utilizzata è una mescolatrice planetaria (o mixer), costituita da un recipiente in acciaio inossidabile, con una capacità di circa 2 litri, ed una

pala, anch'essa in acciaio inossidabile, avente una forma particolare a "lisca di pesce" (figura 4.5). La velocità viene controllata mediante un motore elettrico.



Figura 4.5 - Mescolatrice utilizzata in laboratorio, con dettaglio della pala

Sono stati inseriti prima l'acqua e il cemento nel recipiente della mescolatrice, azionandola a bassa velocità; dopo 30 secondi, sono state aggiunte al composto la sabbia e le fibre gradualmente, per i successivi 30 secondi; si è aumentata la velocità della macchina e si è continuato a miscelare per ulteriori 30 secondi. (figura 4.6)



Figura 4.6 - Fase di miscelazione in laboratorio

Successivamente, arrestando la macchina per 1 minuto e 30 secondi, si è proceduto a rimuovere, con un'apposita spatola, la malta che si è depositata sulle pareti del recipiente, aggiungendola al composto. Infine, si è continuato a mescolare ad alta velocità per altri 60 secondi, ottenendo un impasto omogeneo, adeguato al confezionamento dei provini (figura 4.7).



Figura 4.7 – Esempio di impasto finale della malta cementizia fibrorinforzata

4.3.2 Formatura dei provini

Le apparecchiature utilizzate per il confezionamento dei provini sono:

- casseforme in acciaio (*moulds*);
- macchina compattatrice a battente (*jolting apparatus*).

I campioni di prova vengono realizzati subito dopo la preparazione della malta, con le fibre disperse in maniera casuale all'interno della pasta cementizia. Si è proceduto quindi al trasferimento del composto in un'apposita cassaforma in acciaio, mostrata in figura 4.8.



Figura 4.8 - Cassaforma utilizzata per il confezionamento dei provini

Quest'ultima è costituita da tre scomparti, aventi ciascuno le dimensioni di 40x40x160 mm, terminanti con dei piccoli perni metallici avvitati al bordo del cassero. Prima di utilizzare il cassero, è necessario oliarlo mediante disarmante, in modo tale che la successiva fase di scasseratura possa avvenire senza danneggiare i provini.

Dopo aver applicato il disarmante, si è trasferito il composto cementizio, in due fasi, in ciascuno dei tre scomparti dello stampo, avendo cura di riempirli con una quantità pari alla metà del loro volume complessivo. La cassaforma è stata fissata ad una macchina a battente, compattando il primo strato di malta con 60 colpi, con una cadenza al secondo. Si è inserita la restante malta nel cassero, procedendo nuovamente alla sua compattazione con altri 60 colpi. Infine, si è eliminata la malta in eccesso mediante una cazzuola metallica. In figura 4.9 sono riportate alcune foto esplicative delle operazioni di casseratura dei provini. In particolare, in figura 4.9 a, è riportata la macchina a battente, utilizzata in laboratorio per la compattazione della malta; in figura 4.9 b, viene mostrata la fase di riempimento delle casseforme ed infine in figura 4.9 c, i provini pronti per la fase di stagionatura.



Figura 4.9 - Fasi relative alla formatura dei provini: a) macchina compattatrice a battente; b) compattazione della malta cementizia; c) realizzazione dei provini prismatici

Completata questa operazione, gli stampi sono stati etichettati e trasferiti nell'apposita camera umida, con temperatura di 20 °C e umidità relativa (U.R.) del 90%, per le successive 24 ore, come si può notare in figura 4.10.



Figura 4.10 – Collocazione dei provini nella camera umida del laboratorio

Trascorse le 24 ore (+1) si è proceduto allo scassero dei provini, andando a svitare le teste dei bulloni che legano i perni metallici al cassero. Una volta svitati, è possibile smontare le parti metalliche della cassaforma. Questa operazione è stata eseguita con cautela per evitare di danneggiare i provini, che al momento presentavano una scarsa resistenza meccanica. Infine, i provini sono stati marcati opportunamente per consentire un'agevole identificazione durante la fase di prova (figura 4.11).



Figura 4.11 – Provini costituiti dalle varie miscele (N, L, H, S) dopo il disarmo, opportunamente marcati con codice identificativo e la data di confezionamento

4.3.3 Stagionatura dei provini

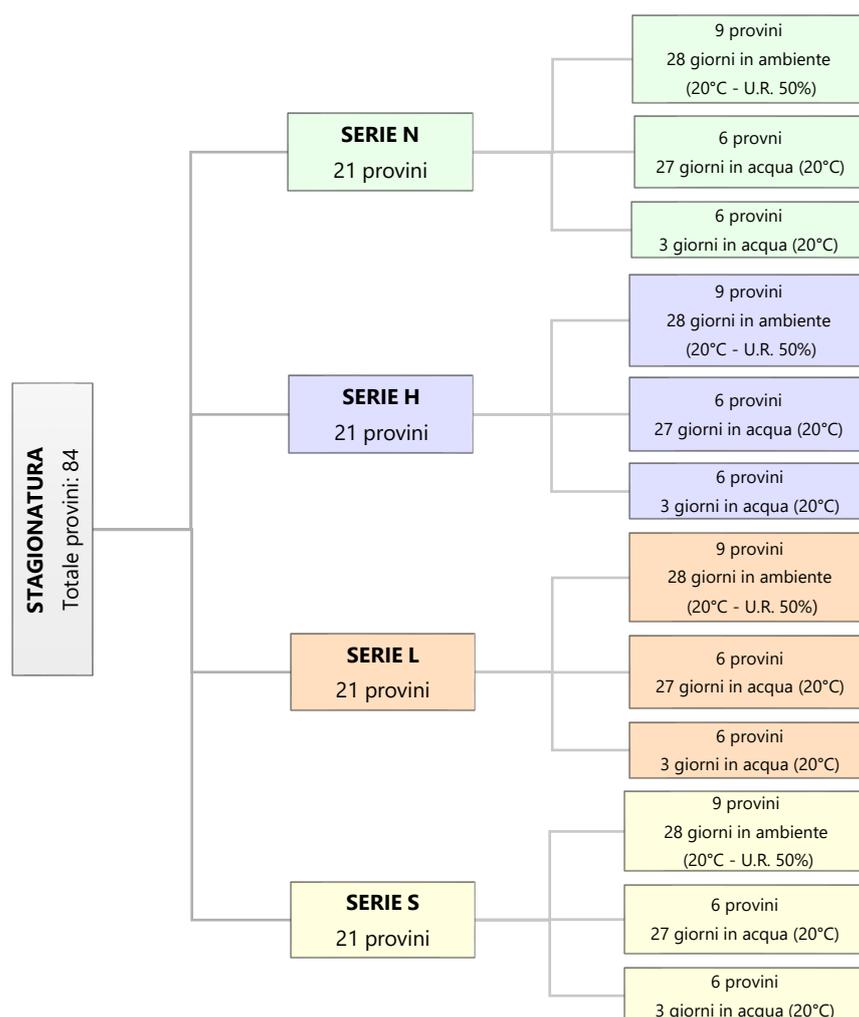
I provini realizzati da sottoporre alla prova di flessione (*bending test*) hanno subito due diverse stagionature, ossia:

- in ambiente: alla temperatura di 20 °C e umidità relativa del 50%;
- in acqua: all'interno di una vasca termostatica alla temperatura di 20 °C.

Le prove di resistenza a flessione sono state effettuate per i periodi di stagionatura, riportati in tabella 4.12. Di seguito si riporta lo schema riassuntivo del periodo di stagionatura dei 21 provini per ogni serie (N, L, H, S), per un totale di 84 provini da sottoporre alla prova di flessione.

Tabella 4.12 - Tempi di stagionatura dei provini

STAGIONATURA	TEMPO
In ambiente	28 giorni
In acqua	27 giorni
	3 giorni



4.4 Procedura sperimentale

L'obiettivo dell'indagine sperimentale è quello di analizzare il comportamento flessionale e la duttilità delle malte cementizie fibrorinforzate, andando a valutare l'efficacia del rinforzo realizzato mediante le fibre di lana. La prova di flessione, in riferimento alla normativa UNI EN 196-1 ha permesso di individuare i parametri necessari per analizzare il materiale, in particolare il comportamento post-fessurativo, quindi la sua capacità di deformarsi prima che sopraggiunga la rottura del provino. Le prove di flessione sono state eseguite dopo una prima fase di catalogazione dei campioni, di cui si riportano le tabelle esplicative. Ogni provino, costituito da 3 campioni, è stato indicato con una lettera seguita da un numero, ad esempio "N_2" o "S_3" in cui:

- lettera (N, H, L, S): indicativa del tipo di cemento utilizzato per la composizione della malta;
- numero pari (2,4,6): per i provini rinforzati con fibre di lana;
- numero dispari (3,5,7): per i provini rinforzati con fibre di polipropilene;
- numero 1: per i provini in assenza di fibre.

Inoltre, sono state indicate le composizioni della miscela per ogni provino, con il corrispettivo periodo di stagionatura, come definito nel paragrafo 4.3.3, riassunte in tabella 4.13.

Tabella 4.13 - Nomenclatura utilizzata per l'identificazione dei provini riferiti alle serie (N, L, H, S)

		Cemento (g)	Acqua (g)	Sabbia (g)	Lana (g)	Fibre PP (g)	Stagionatura
Serie N	N_1	450	225	1350	-	-	28 giorni in ambiente (20 °C – U.R. =50%)
	N_2	450	225	1350	10	-	28 giorni in ambiente (20 °C – U.R. =50%)
	N_3	450	225	1350	-	10	28 giorni in ambiente (20 °C – U.R. =50%)
	N_4	450	225	1350	10	-	27 giorni in acqua (20 °C)
	N_5	450	225	1350	-	10	27 giorni in acqua (20 °C)
	N_6	450	225	1350	10	-	3 giorni in acqua (20 °C)
	N_7	450	225	1350	-	10	3 giorni in acqua (20 °C)

4. INDAGINE SPERIMENTALE

		Cemento (g)	Acqua (g)	Sabbia (g)	Lana (g)	Fibre PP (g)	Stagionatura
Serie H	H_1	450	225	1350	-	-	28 giorni in ambiente (20 °C – U.R. =50%)
	H_2	450	225	1350	10	-	28 giorni in ambiente (20 °C – U.R. =50%)
	H_3	450	225	1350	-	10	28 giorni in ambiente (20 °C – U.R. =50%)
	H_4	450	225	1350	10	-	27 giorni in acqua (20 °C)
	H_5	450	225	1350	-	10	27 giorni in acqua (20 °C)
	H_6	450	225	1350	10	-	3 giorni in acqua (20 °C)
	H_7	450	225	1350	-	10	3 giorni in acqua (20 °C)
Serie L	L_1	450	225	1350	-	-	28 giorni in ambiente (20 °C – U.R. =50%)
	L_2	450	225	1350	10	-	28 giorni in ambiente (20 °C – U.R. =50%)
	L_3	450	225	1350	-	10	28 giorni in ambiente (20 °C – U.R. =50%)
	L_4	450	225	1350	10	-	27 giorni in acqua (20 °C)
	L_5	450	225	1350	-	10	27 giorni in acqua (20 °C)
	L_6	450	225	1350	10	-	3 giorni in acqua (20 °C)
	L_7	450	225	1350	-	10	3 giorni in acqua (20 °C)
Serie S	S_1	450	225	1350	-	-	28 giorni in ambiente (20 °C – U.R. =50%)
	S_2	450	225	1350	10	-	28 giorni in ambiente (20 °C – U.R. =50%)
	S_3	450	225	1350	-	10	28 giorni in ambiente (20 °C – U.R. =50%)
	S_4	450	225	1350	10	-	27 giorni in acqua (20 °C)
	S_5	450	225	1350	-	10	27 giorni in acqua (20 °C)
	S_6	450	225	1350	10	-	3 giorni in acqua (20 °C)
	S_7	450	225	1350	-	10	3 giorni in acqua (20 C)

4.4.1 Prova di flessione

La prova di flessione su tre punti (*three point bending test*) è stata eseguita mediante una macchina di prova universale servoidraulica MTS, avente una capacità di carico di 100 kN e una corsa di 250 mm, classe 0.5, ossia con un errore della misura dello 0.5% rispetto alla cella campione, in riferimento alla normativa UNI EN 7500-1:2018. L'apparecchio è munito di un dispositivo per l'inflessione del provino, composto da due rulli di supporto in acciaio nella parte inferiore, distanziati fra loro di 100 mm e un terzo rullo di carico in acciaio nella parte superiore, posto centralmente tra gli altri due. Lo schema rappresentativo della prova di carico viene mostrato in figura 4.12, mentre la macchina di prova utilizzata in laboratorio è mostrata in figura 4.13.

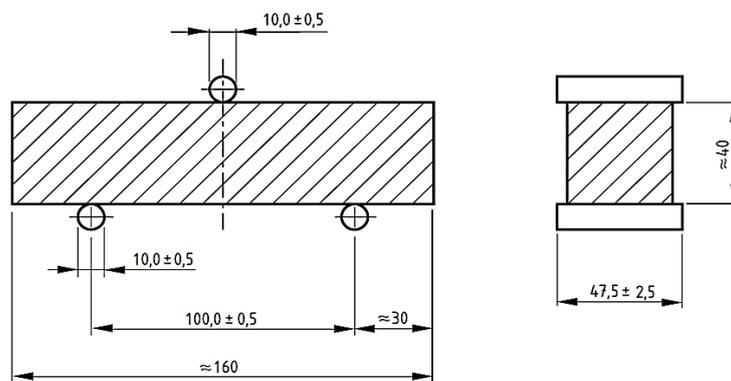


Figura 4.12 – Disposizione del carico per la determinazione della resistenza a flessione, dimensioni in mm, tratta da UNI EN 196-1 [37]



Figura 4.13 - Macchina di prova universale MTS con dettaglio dell'elemento di ripartizione del carico

Durante le prove è stato necessario verificare il corretto posizionamento del provino sugli appoggi di base, difatti per migliorare la precisione ed evitare problemi durante la fase di carico, si è proceduto a indicare manualmente la distanza degli assi dei rulli di supporto e di carico dai bordi del provino, mediante l'ausilio di un calibro. Successivamente, è stato collocato il provino nella macchina di prova, in modo tale da far corrispondere le linee di tracciamento indicate, sugli elementi di appoggio. Si sono quindi portate a contatto le superfici del provino con i rulli della macchina, per poi dare inizio alla prova.

La macchina è collegata ad un sistema di controllo elettronico, come mostrato in figura 4.14, che utilizza uno specifico software di acquisizione dati personalizzabile, con il quale è possibile impostare i parametri della prova e monitorare i movimenti della traversa mobile su cui è posizionato il rullo di carico. La prova di flessione, infatti, è stata eseguita con controllo di spostamento della cella di carico da 10 kN, la cui corsa è stata impostata ad una velocità di 0.05 mm/min. Il software ha permesso di controllare in tempo reale i principali parametri, tra cui il carico applicato P in kN e la freccia in mezzzeria d_p in mm, visualizzando anche il grafico tensione-deformazione (*load-deflection*) in funzione del tempo. Al raggiungimento del carico massimo P_{max} , indicato dal software, è avvenuta la fessurazione del provino, ovvero la prima fessura critica (*failure crack*), con una graduale diminuzione della resistenza (figura 4.15).

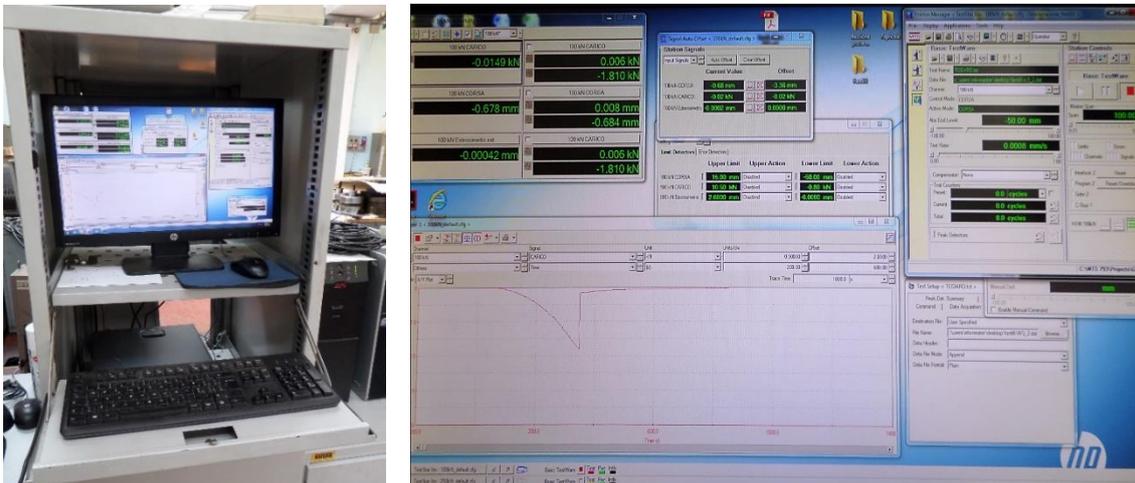


Figura 4.14 - Sistema di controllo della macchina di prova, con dettaglio dell'interfaccia grafica del software di acquisizione dei dati

La prova è proseguita, con la fase di scarico, fino ad un limite di 0.2 mm della curva post-fessurazione del provino in esame, allo scopo di valutare l'effetto delle fibre sulle proprietà della malta cementizia.



Figura 4.15 - Esempio di fessurazione (sx) e rottura per flessione (dx) di un provino prismatico

Infine, i dati registrati dal software durante le prove di flessione sono stati salvati in file di report, necessari per l'elaborazione dei risultati. In particolare, verrà sviluppato il grafico tensione-deformazione ($P-\delta$) per ogni provino e calcolata la resistenza a flessione, σ_F , definita anche come modulo di rottura (MOR). La presenza delle fibre influenza le proprietà meccaniche dei composti cementizi. La loro efficacia all'interno della matrice cementizia verrà valutata, andando a considerare il ramo di softening della curva tensione- deformazione, nella fase di post-fessurazione del provino.

5. ANALISI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Nel seguente capitolo verrà valutata l'efficacia delle fibre di lana all'interno dei composti cementizi, costituiti dai diversi tipi di cemento Portland (N), alto-alcario (H) basso-alcario (L) e solfoalluminoso (S) esposti nel capitolo 4 dell'indagine sperimentale, al paragrafo 4.2.1. In particolare, si è valutata la duttilità delle malte cementizie fibrorinforzate, andando ad elaborare i dati di output ricavati dalla prova di flessione su tre punti.

Dai grafici carico-deformazione ($P-\delta$) ottenuti, si è esaminato più nel dettaglio il ramo di softening della curva, e ricavata quindi l'area A_F sottesa dalla curva. Il grafico ad andamento discendente è stato semplificato mediante una relazione bilineare, in modo tale da calcolare i parametri più rilevanti, ossia il carico massimo P_{max} , la corrispondente freccia in mezzeria δ_P , e la duttilità del materiale, A_F , valutata mediante lo stress residuo nella fase di post-fessurazione (*post cracking*) del campione.

Le prove meccaniche effettuate sui provini, sono state successivamente affiancate da indagini chimiche, tramite un microscopio elettronico a scansione, indicato con l'acronimo SEM (*Scanning Electron Microscope*), che ha permesso di analizzare nel dettaglio la microstruttura delle malte cementizie rinforzate con fibre di lana, confrontandole con quelle rinforzate mediante fibre sintetiche in polipropilene. Le osservazioni al SEM, in prossimità della superficie di rottura del campione, hanno permesso di investigare la compatibilità chimica, quindi individuare i legami fra le fibre e la pasta cementizia, riscontrando in maniera visiva, i dati ottenuti dalle prove di flessione, qualora manifestassero particolari comportamenti.

5.1 Resistenza a flessione

I dati acquisiti durante la prova di flessione su tre punti, effettuata sui provini prismatici, hanno permesso di determinare i grafici carico-deformazione (*load-deflection*), mediante i quali si sono ricavati i valori del carico massimo P_{max} e la corrispondente freccia δ_p , nella mezzeria del provino. Lo schema di carico rappresentativo della prova di flessione e il corrispondente grafico ($P-\delta$) viene mostrato in figura 5.1.

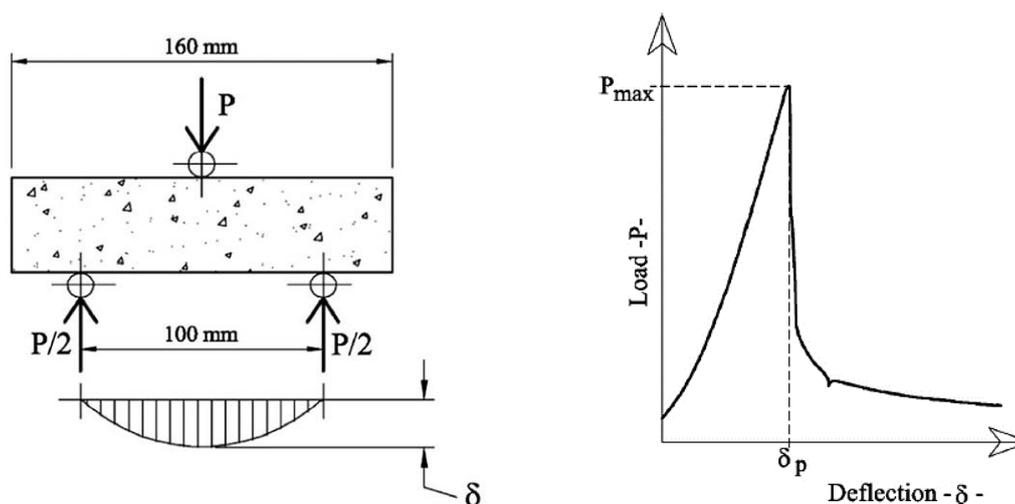


Figura 5.1 - Schema di carico della prova di flessione (sx) e grafico carico-deformazione ($P-\delta$), tratto da (Fantilli, 2017) [36]

La curva carico-deformazione ($P-\delta$) delle malte cementizie fibrorinforzate in esame, mostra un andamento degradante, vale a dire che presenta un tratto crescente fino al raggiungimento del carico massimo, definito anche limite di proporzionalità, in cui si ha la formazione della fessura critica; superato tale valore, la resistenza diminuisce progressivamente e la curva di post-fessurazione presenta un andamento discendente (*deflection softening*).

Viene riportato un esempio del file di output della prova di flessione ed un modello tipo dei grafici ($P-\delta$) ricavati per il singolo provino, costituito da un lotto di tre campioni. In dettaglio, il test è stato effettuato applicando un carico con progressione graduale del pistone, ad una velocità di 0.0008 mm/sec, in modo tale da registrare le deformazioni del provino in relazione al carico applicato, fino alla rottura.

I dati di output forniti dallo strumento di analisi, come evidenziato in figura 5.2, sono i seguenti:

- Tempo: espresso in sec;
- Carico: applicato dal pistone, espresso in kN;
- Corsa: lo spostamento massimo dell'elemento mobile della macchina di carico, coincidente con l'abbassamento nella mezzeria del provino, per una prova di carico con controllo di spostamento, espressa in mm.

```

MTS793|BTW|ENU|1|0|.|-:|1|2|0|A
Data Header:                               Time:      20.03125  s           2018-05-18 9:41:06 AM
Data Acquisition: Timed
Station Name: 100kN_default.cfg
Test File Name: fantilli.tst
Time      100 kN CARICO 100 kN CORSA
s         kN          mm
0.03515625 -0.00031684487 0.0010730381
0.044921875 0.00063072715 0.0015769156
0.0546875 -0.0018988728 -0.00052226416
0.064453125 0.0020209013 -0.0021586267
0.07421875 -0.00052892609 -0.0034760628
0.083984375 -0.00092346256 -0.0026273835
0.09375 -0.00015809042 -0.0016092989
0.10351563 6.6811721e-05 -0.0020497527
0.11328125 -0.00047192161 -0.00056192983
0.12304688 0.0034065293 -0.0044435323
0.1328125 0.002279771 -0.00074600318
0.14257813 -0.00033666362 -0.00035099956
0.15234375 0.00080153631 -0.0016642523
0.16210938 0.0018014646 -0.0027571232
0.171875 0.0028957874 -0.00054808817
0.18164063 0.0014187786 -0.0028164149
0.19140625 0.00020043516 -5.5573208e-05
0.20117188 0.0017718386 -0.00045346911
0.2109375 -0.00070075685 -0.00067638169
0.22070313 -2.3854031e-05 -0.0026649833
0.23046875 0.0018976979 -0.0028031932
0.24023438 0.0016662066 -0.0030589539
0.25 0.00081849465 -0.00017580966
0.25976563 0.0018174014 -0.0025831729
0.26953125 0.0005069109 -0.0011027873
0.27929688 0.00013403207 0.00062803924
0.2890625 0.0056771063 -0.00012705398

```

Figura 5.2 - Stralcio di un file di output della prova di flessione, ottenuto dal software di acquisizione dei dati

Successivamente i dati di output sono stati opportunamente processati, al fine di ricavare dei grafici carico-deformazione adeguati. In particolare, per evitare la ridondanza dei dati, poiché si avevano a disposizione all'incirca 80 000 valori di carico con le rispettive deformazioni, si è proceduto ad ottimizzare il database andando ad applicare un processo di normalizzazione, utilizzando quindi un file di output più snello. Un esempio tipo del grafico (P- δ) ricavato per ogni provino, è riportato in figura 5.3. Nell'appendice A, sono stati riportati tutti i grafici relativi ai 21 provini per ogni serie (N, H, L, S), raggruppati in gruppi di tre campioni.

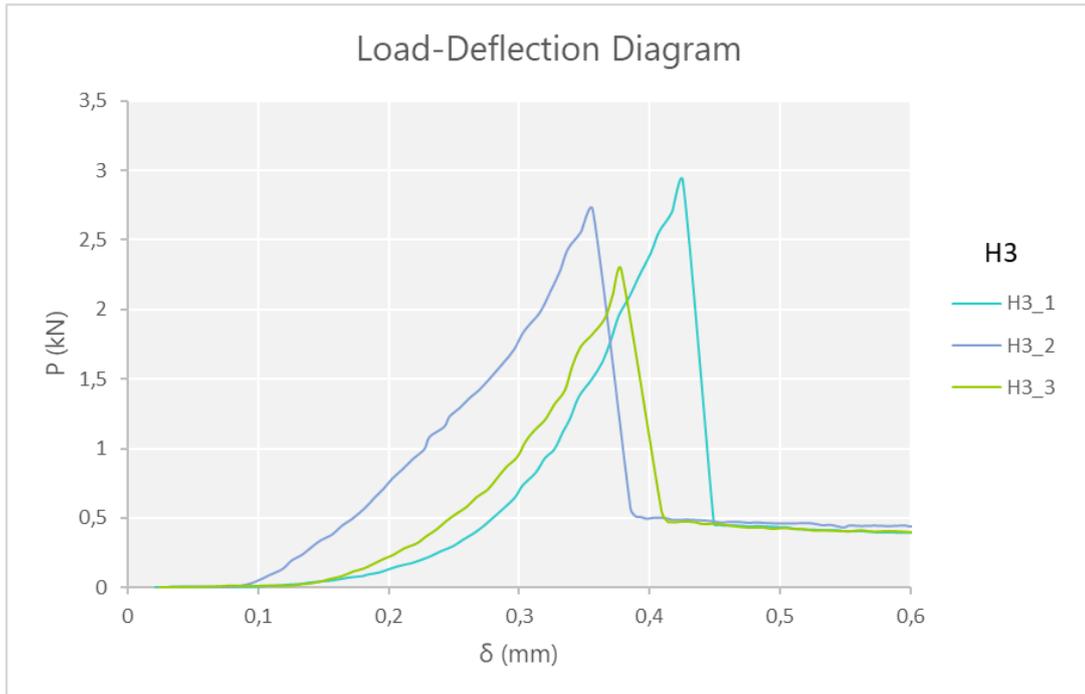


Figura 5.3 - Esempio di grafico carico-deformazione relativo alla prova di flessione per un singolo provino, costituito da tre campioni

La corrispondente resistenza a flessione σ_F , definita anche come modulo di rottura, può essere calcolata, in riferimento alla normativa UNI EN 196-1 [37], mediante la formula di Navier, in regime elastico lineare, come segue:

$$\sigma = \frac{h M}{2 I} = \frac{h Fl/4}{2 bh^3/12} = \frac{3 Fl}{2 bh^2} \quad (5.1)$$

dove:

$M = \frac{Fl}{4}$ – momento flettente per la trave appoggiata con carico concentrato nella mezzeria;

$I = \frac{bh^3}{12}$ – momento d'inerzia per una trave a sezione rettangolare.

Da cui si ricava:

$$\sigma_F = 1.5 \frac{P_{max} l}{b^3} \quad (5.2)$$

dove:

σ_F = resistenza a flessione, espressa in MPa;

$l = 100$ mm – distanza fra i due supporti come indicato in fig. 5.1;

$b=h=40$ mm – larghezza e altezza della sezione del provino;

P_{max} = carico massimo a rottura, espresso in N.

Il valore del carico massimo misurato durante la prova, la freccia massima in mezzeria e la corrispondente resistenza a flessione, sono riportati nella tabella 5.1 seguente, in funzione della diversa tipologia di malta cementizia analizzata.

Tabella 5.1 - Carico massimo, freccia massima in mezzeria e resistenza a flessione misurate durante la prova di flessione

	Provino	P_{max} (kN)	δ_p (mm)	σ_F (MPa)
Serie N	N_1	3,12	0,47	7,31
	N_2	2,83	0,33	6,63
	N_3	2,22	0,33	5,20
	N_4	2,52	0,45	5,90
	N_5	2,60	0,52	6,09
	N_6	2,11	0,45	4,93
	N_7	2,12	0,57	4,96
Serie L	L_1	2,50	0,49	5,85
	L_2	1,78	0,66	4,17
	L_3	1,85	0,38	4,33
	L_4	2,30	0,55	5,38
	L_5	2,69	0,57	6,31
	L_6	1,49	0,38	3,50
	L_7	1,61	0,57	3,78
Serie H	H_1	3,43	0,45	8,04
	H_2	3,33	0,47	7,81
	H_3	2,72	0,39	6,37
	H_4	2,86	0,72	6,71
	H_5	2,65	0,65	6,21
	H_6	2,40	0,40	5,62
	H_7	2,83	0,46	6,64
Serie S	S_1	3,65	0,47	8,56
	S_2	4,32	0,42	10,13
	S_3	3,27	0,53	7,67
	S_4	2,65	0,48	6,20
	S_5	2,84	0,50	6,66
	S_6	2,14	0,93	5,02
	S_7	2,25	0,77	5,27

In figura 5.4, 5.5 e 5.6 vengono riportati i grafici riassuntivi inerenti alla resistenza a flessione delle malte cementizie analizzate (N, L, H, S), in funzione del tipo di stagionatura dei provini, ossia a 28 giorni in condizioni normali (temperatura di 20 °C; U.R. 50%), a 27 giorni in acqua (temperatura di 20°C) e 3 giorni in acqua (temperatura 20 °C).

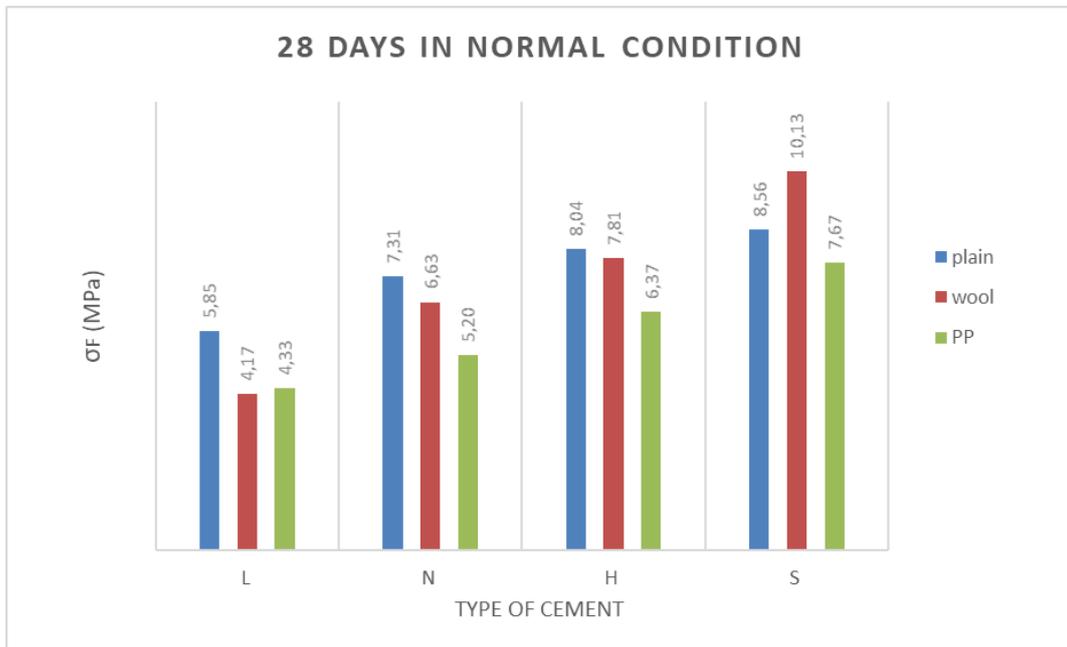


Figura 5.4 - Risultati delle prove in termini di resistenza a flessione a 28 giorni

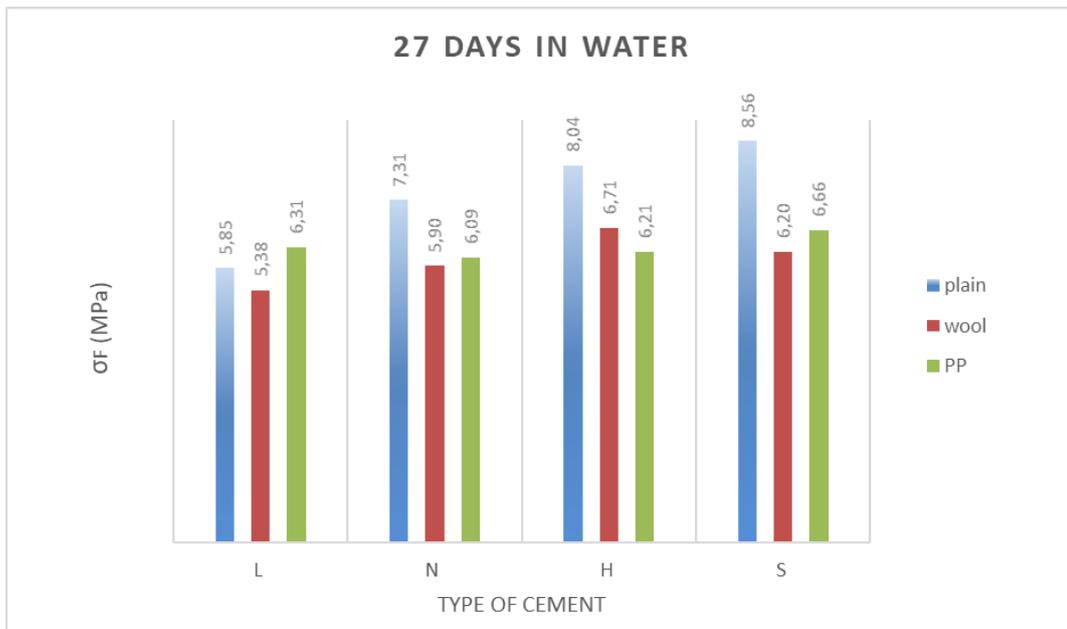


Figura 5.5 – Risultati delle prove in termini di resistenza a flessione a 27 giorni in acqua

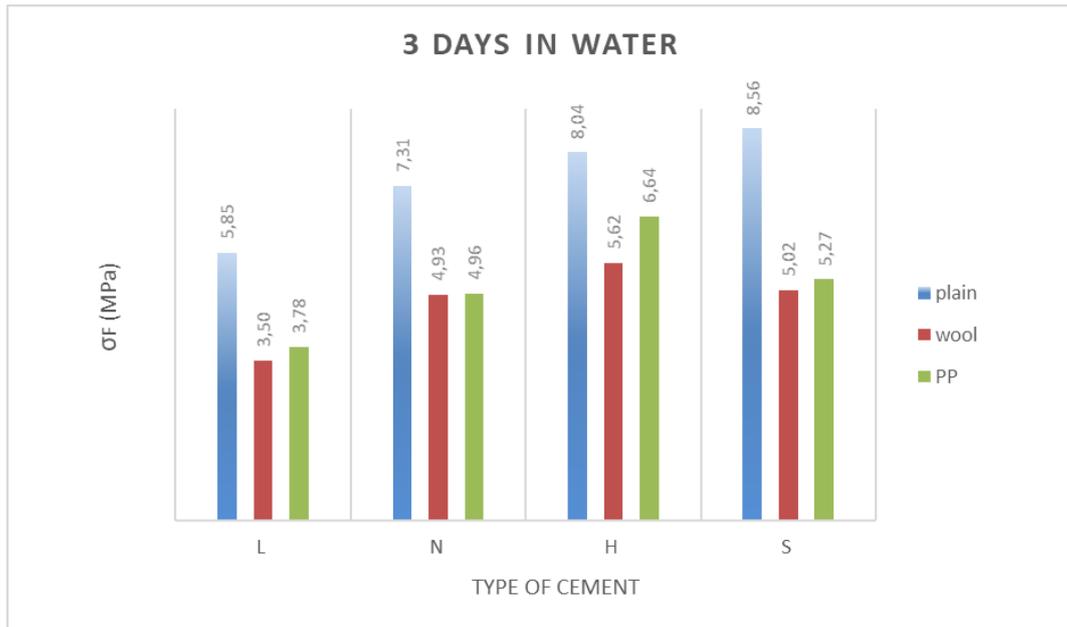


Figura 5.6 - Risultati delle prove in termini di resistenza a flessione a 3 giorni in acqua

Dai grafici riportati è possibile fare le seguenti considerazioni:

- Per il periodo di stagionatura dei provini a 28 giorni, in ambiente con temperatura di 20 °C e umidità relativa del 50%, è possibile notare che la resistenza a flessione per i provini con cemento Portland, alto-alcantino e basso-alcantino, diminuisce con la presenza delle fibre; questo è dovuto alla minore lavorabilità dell'impasto fibroso rispetto al medesimo in assenza di fibre, la quale ha comportato una diminuzione della resistenza meccanica. Inoltre, dal grafico in figura 5.4, è possibile notare che all'aumentare dell'alcantinità del cemento, corrisponde un aumento della resistenza a flessione e di conseguenza del carico massimo a rottura dei provini. Invece, si manifesta un comportamento diverso per i provini a base di cemento solfoalluminoso, presentando una maggiore resistenza a flessione rispetto a quelli con le altre tipologie di cemento, soprattutto per i composti fibrerinfornati; in particolare con le fibre di lana, si è ottenuto il miglior risultato, con un carico massimo $P_{max} = 4.32$ kN e la corrispondente resistenza a flessione residua $\sigma_F = 10.13$ MPa.
- La maturazione a 27 giorni in acqua dei provini contenenti fibre, mostra una resistenza a flessione simile per i quattro tipi di cemento utilizzati (figura 5.5). In particolare, per il cemento a bassa alcantinità, si registra un valore della resistenza

simile a quello del cemento in assenza di fibre, mentre per le altre tipologie di cemento, il valore della resistenza è inferiore. Come per la maturazione dei provini a 28 giorni, il valore della resistenza aumenta in funzione dell'alcalinità del cemento, ad eccezione del cemento solfoalluminoso, i cui provini rinforzati, mostrano un valore della resistenza simile a quelli realizzati con cemento Portland.

- I risultati delle prove relativi alla resistenza a flessione per i provini a 3 giorni di maturazione in acqua (figura 5.6), presentano lo stesso andamento di quelli a 27 giorni in acqua, con valori di resistenza leggermente inferiori. Il valore della resistenza aumenta con il grado di alcalinità, riscontrando un valore simile per il cemento Portland e solfoalluminoso. Si può notare, inoltre, che la resistenza a flessione dei provini fibrosi è inferiore rispetto ai provini in assenza di fibre, per lo stesso motivo riscontrato nel periodo di stagionatura a 28 giorni, ossia per la ridotta lavorabilità della pasta cementizia contenente fibre.

5.2 Misura della duttilità

La prova di flessione su tre punti ha permesso di ricavare i grafici carico-deformazione ($P-\delta$), analizzati nel paragrafo 5.1. Nella fase successiva dell'analisi, si è esaminato più nel dettaglio il ramo discendente (di *softening*) della curva ($P-\delta$), riportato in figura 5.7b, in quanto la duttilità del conglomerato cementizio fibrorinforzato, quindi l'effetto delle fibre sulle proprietà meccaniche del materiale, sono evidenziate nella fase di post-fessurazione (*post-cracking stage*). Sull'ordinata di tale diagramma, è riportato il valore del carico normalizzato rispetto a quello massimo, P_{max} ; sull'asse delle ascisse, invece, è indicata la differenza tra δ , la deformazione post-picco, e δ_p , ossia la freccia massima nella mezzeria del provino. Il grafico post-fessurazione è limitato al valore $\delta - \delta_p = 0,2$ mm.

Il comportamento nella fase di post-fessurazione dei diversi compositi fibrorinforzati è stato individuato mediante un approccio semplificato, per cui il ramo di softening della curva ($P-\delta$) è stato approssimato mediante una relazione bilineare, come si può notare dal grafico rappresentativo di figura 5.7c. La curva semplificata presenta in ascissa il parametro $x = \delta/\delta_p$, ovvero l'abbassamento in rapporto all'abbassamento massimo nella mezzeria del provino,

mentre in ordinata è indicato il parametro $y = P/P_{\max}$, ossia il rapporto fra il carico e il valore del carico massimo a rottura misurato durante la prova di flessione.

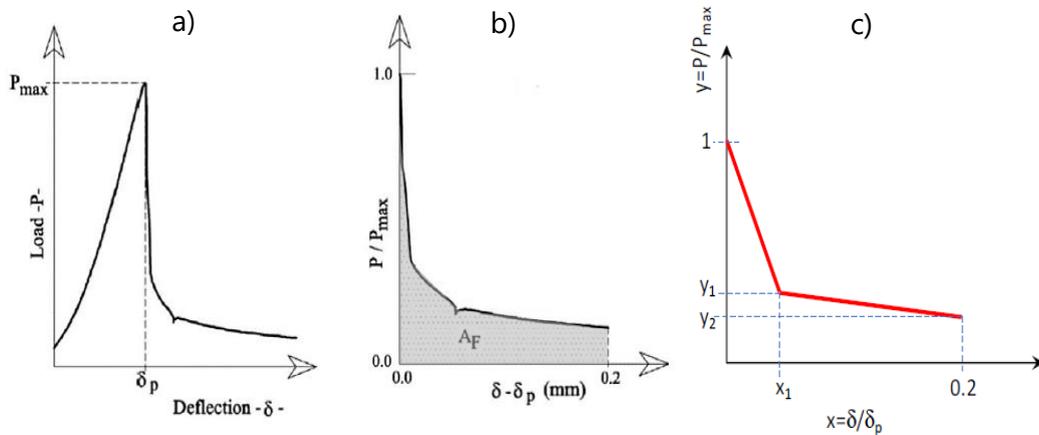


Figura 5.7 - a) Grafico carico-deformazione ($P-\delta$); b) ramo di softening; c) semplificazione bilineare del ramo di softening.

In particolare, la curva bilineare è stata sviluppata mediante l'individuazione di tre punti caratteristici, che verranno di seguito esplicitati:

- $(x_0; y_0) = (0; 1)$
- $(x_1; y_1)$
- $(x_2; y_2)$

La tensione residua nella fase di post-fessurazione, ovvero la misura della duttilità indicata dal parametro A_F , viene ricavata mediante i parametri y_1 e y_2 , dove:

- y_1 = la resistenza a flessione residua, espressa in percentuale, subito dopo la formazione della fessura critica, il cui valore aumenta in funzione dell'efficacia delle fibre;
- y_2 = la resistenza a flessione residua, espressa in percentuale, per grandi fessure, il cui valore aumenta in funzione della capacità di mantenere lo stress residuo.

Un esempio tipo del grafico post-fessurazione ricavato per ogni provino e la corrispondente semplificazione bilineare, è riportato in figura 5.8. Nell'appendice B, sono riportati tutti i grafici relativi ai 21 provini per ogni serie (N, H, L, S), raggruppati in gruppi di tre campioni.

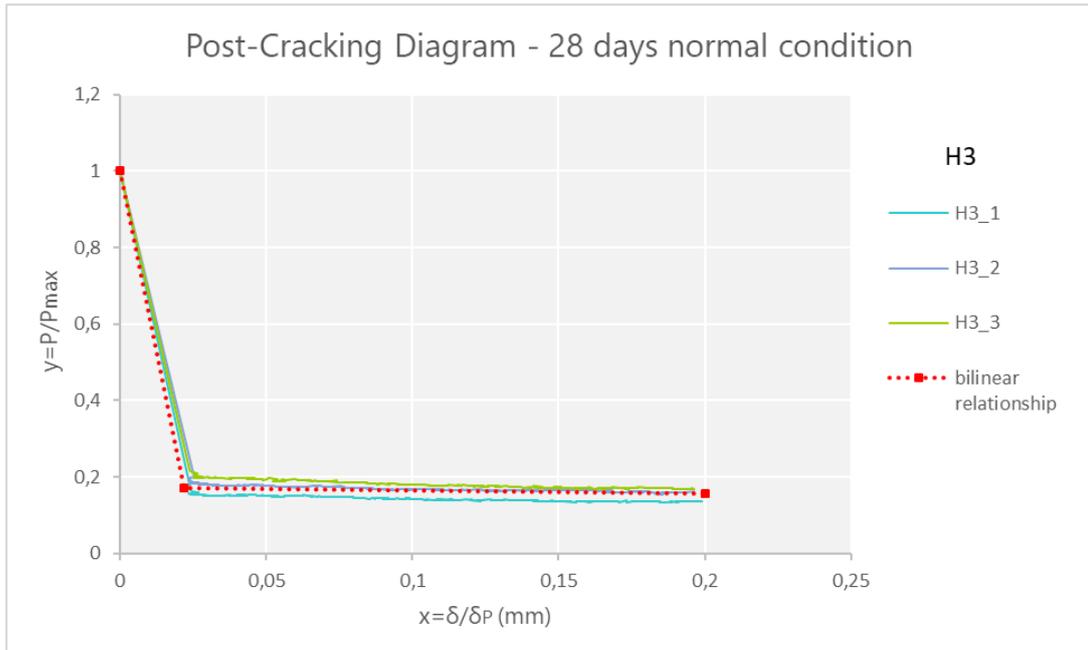


Figura 5.8 - Grafico post-fessurazione di un provino sottoposto alla prova di flessione, con approssimazione bilineare della curva

Il valore di A_F , che rappresenta la capacità complessiva delle fibre di contrastare l'apertura delle fessure, graficamente rappresentato dall'area sottesa dalla curva di softening, è stato calcolato mediante la seguente formula:

$$A_F = \frac{1+y_1}{2} \cdot x_1 + \frac{y_1+y_2}{2} \cdot (0.2 - x_1) \quad (5.2)$$

Nella tabella 5.2 seguente sono riportati i risultati delle prove sperimentali, in particolare vengono indicati i valori della duttilità, espressi tramite A_F , e i valori dei tre punti caratteristici $(x_0; y_0)$, $(x_1; y_1)$, $(x_2; y_2)$ che descrivono l'approssimazione bilineare della curva di post-fessurazione, in funzione della diversa tipologia di malta cementizia analizzata.

Tabella 5.2 – Coordinate dei tre punti che descrivono l'approssimazione bilineare della curva di post-fessurazione e il corrispondente valore della duttilità ricavato per le serie N, L, H, S dei provini analizzati.

	Provino	x_0 (mm)	y_0	x_1 (mm)	y_1	x_2 (mm)	y_2	A_F (mm)
Serie N	N1_1	0	1	0.02	0.014	0.2	0.008	0.012
	N1_2	0	1	0.013	0	0.2	0	0.007
	N1_3	0	1	0.029	0	0.2	0	0.015
	N2_1	0	1	0.02	0.09	0.2	0.029	0.022
	N2_2	0	1	0.02	0.09	0.2	0.039	0.023
	N2_3	0	1	0.016	0.1	0.2	0.04	0.022

	Provino	x₀ (mm)	y₀	x₁ (mm)	y₁	x₂ (mm)	y₂	A_F (mm)
	Serie N	N3_1	0	1	0.016	0.26	0.2	0.15
N3_2		0	1	0.016	0.38	0.2	0.191	0.064
N3_3		0	1	0.016	0.26	0.2	0.16	0.049
N4_1		0	1	0.027	0.015	0.2	0.013	0.016
N4_2		0	1	0.027	0.015	0.2	0.013	0.016
N4_3		0	1	0.024	0.065	0.2	0.009	0.019
N5_1		0	1	0.019	0.17	0.2	0.127	0.038
N5_2		0	1	0.022	0.16	0.2	0.131	0.039
N5_3		0	1	0.022	0.16	0.2	0.131	0.039
N6_1		0	1	0.019	0.12	0.2	0.035	0.025
N6_2		0	1	0.019	0.11	0.2	0.040	0.024
N6_3		0	1	0.018	0.05	0.2	0.024	0.016
N7_1		0	1	0.015	0.22	0.2	0.170	0.045
N7_2		0	1	0.015	0.23	0.2	0.183	0.047
N7_3		0	1	0.017	0.19	0.2	0.156	0.042
Serie L	L1_1	0	1	0.022	0.02	0.2	0.009	0.014
	L1_2	0	1	0.022	0.05	0.2	0.011	0.017
	L1_3	0	1	0.017	0.04	0.2	0.013	0.014
	L2_1	0	1	0.025	0.28	0.2	0.115	0.051
	L2_2	0	1	0.022	0.3	0.2	0.120	0.052
	L2_3	0	1	0.09	0.42	0.2	0.201	0.098
	L3_1	0	1	0.025	0.31	0.2	0.236	0.064
	L3_2	0	1	0.025	0.29	0.2	0.186	0.058
	L3_3	0	1	0.025	0.32	0.2	0.235	0.065
	L4_1	0	1	0.02	0.05	0.2	0.022	0.017
	L4_2	0	1	0.022	0.05	0.2	0.013	0.017
	L4_3	0	1	0.025	0.05	0.2	0.015	0.019
	L5_1	0	1	0.028	0.18	0.2	0.172	0.047
	L5_2	0	1	0.025	0.15	0.2	0.147	0.040
	L5_3	0	1	0.03	0.18	0.2	0.156	0.046
	L6_1	0	1	0.018	0.12	0.2	0.069	0.027
	L6_2	0	1	0.018	0.15	0.2	0.109	0.034
	L6_3	0	1	0.018	0.17	0.2	0.097	0.035
	L7_1	0	1	0.017	0.34	0.2	0.278	0.068
	L7_2	0	1	0.016	0.25	0.2	0.196	0.051
	L7_3	0	1	0.017	0.28	0.2	0.219	0.057

	Provino	x₀ (mm)	y₀	x₁ (mm)	y₁	x₂ (mm)	y₂	A_F (mm)
	Serie H	H1_1	0	1	0.014	0.01	0.2	0
H1_2		0	1	0.022	0.01	0.2	0	0.012
H1_3		0	1	0.025	0.005	0.2	0	0.013
H2_1		0	1	0.027	0.03	0.2	0.02	0.018
H2_2		0	1	0.027	0.05	0.2	0.025	0.021
H2_3		0	1	0.03	0.035	0.2	0.02	0.020
H3_1		0	1	0.023	0.145	0.2	0.136	0.038
H3_2		0	1	0.021	0.17	0.2	0.162	0.042
H3_3		0	1	0.021	0.2	0.2	0.169	0.046
H4_1		0	1	0.023	0.03	0.2	0	0.015
H4_2		0	1	0.025	0.03	0.2	0.011	0.016
H4_3		0	1	0.03	0.02	0.2	0.007	0.018
H5_1		0	1	0.018	0.15	0.2	0.137	0.036
H5_2		0	1	0.028	0.17	0.2	0.155	0.044
H5_3		0	1	0.028	0.155	0.2	0.143	0.042
H6_1		0	1	0.03	0.025	0.2	0.014	0.019
H6_2		0	1	0.023	0.057	0.2	0.022	0.019
H6_3		0	1	0.023	0.057	0.2	0.022	0.019
H7_1		0	1	0.018	0.165	0.2	0.144	0.039
H7_2		0	1	0.02	0.145	0.2	0.131	0.036
H7_3		0	1	0.023	0.185	0.2	0.158	0.044
Serie S	S1_1	0	1	0.026	0.01	0.2	0.09	0.015
	S1_2	0	1	0.026	0.01	0.2	0	0.014
	S1_3	0	1	0.034	0.008	0.2	0.001	0.018
	S2_1	0	1	0.033	0.01	0.2	0.004	0.018
	S2_2	0	1	0.028	0.015	0.2	0.023	0.018
	S2_3	0	1	0.032	0.012	0.2	0.009	0.018
	S3_1	0	1	0.027	0.1	0.2	0.089	0.031
	S3_2	0	1	0.006	0.1	0.2	0.085	0.021
	S3_3	0	1	0.025	0.11	0.2	0.092	0.032
	S4_1	0	1	0.007	0.04	0.2	0.013	0.008
	S4_2	0	1	0.02	0.045	0.2	0.017	0.016
	S4_3	0	1	0.03	0.04	0.2	0.008	0.020
	S5_1	0	1	0.025	0.14	0.2	0.116	0.037
	S5_2	0	1	0.018	0.14	0.2	0.128	0.035
	S5_3	0	1	0.022	0.12	0.2	0.107	0.033

	Provino	x_0 (mm)	y_0	x_1 (mm)	y_1	x_2 (mm)	y_2	A_F (mm)
	S6_1	0	1	0.016	0.1	0.2	0.046	0.022
	S6_2	0	1	0.021	0.08	0.2	0.026	0.021
	S6_3	0	1	0.016	0.1	0.2	0.042	0.022
	S7_1	0	1	0.02	0.22	0.2	0.163	0.047
	S7_2	0	1	0.017	0.21	0.2	0.169	0.045
	S7_3	0	1	0.013	0.2	0.2	0.162	0.042

I grafici riassuntivi inerenti alla duttilità, mostrano il comportamento delle malte cementizie analizzate (N, L, H, S), a seguito del raggiungimento del valore del carico di picco, a cui corrisponde la freccia massima nella mezzeria del singolo provino sottoposto alla prova di flessione. In figura 5.9, 5.10 e 5.11 vengono riportati tali grafici, in funzione del tipo di stagionatura dei provini, ossia a 28 giorni in condizioni normali (temperatura di 20 °C; U.R. 50%), a 27 giorni in acqua (temperatura di 20°C) e 3 giorni in acqua (temperatura 20 °C), evidenziando il diverso comportamento delle malte cementizie rinforzate con fibre di lana, da quelle rinforzate con fibre di polipropilene, confrontate con le malte prive di fibre di rinforzo.

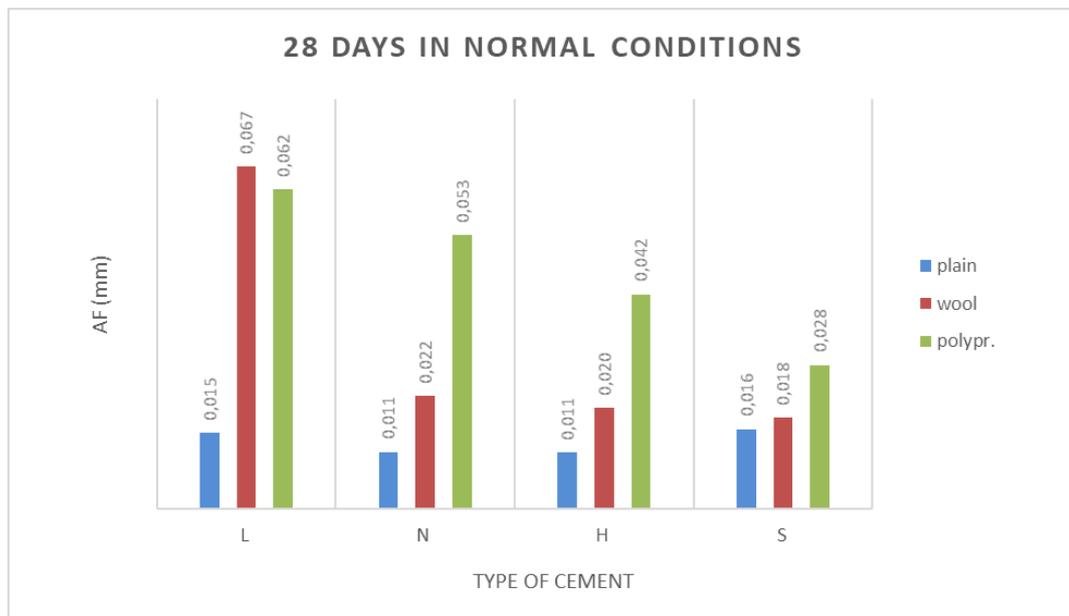


Figura 5.9 – Risultati delle prove in termini di duttilità a 28 giorni

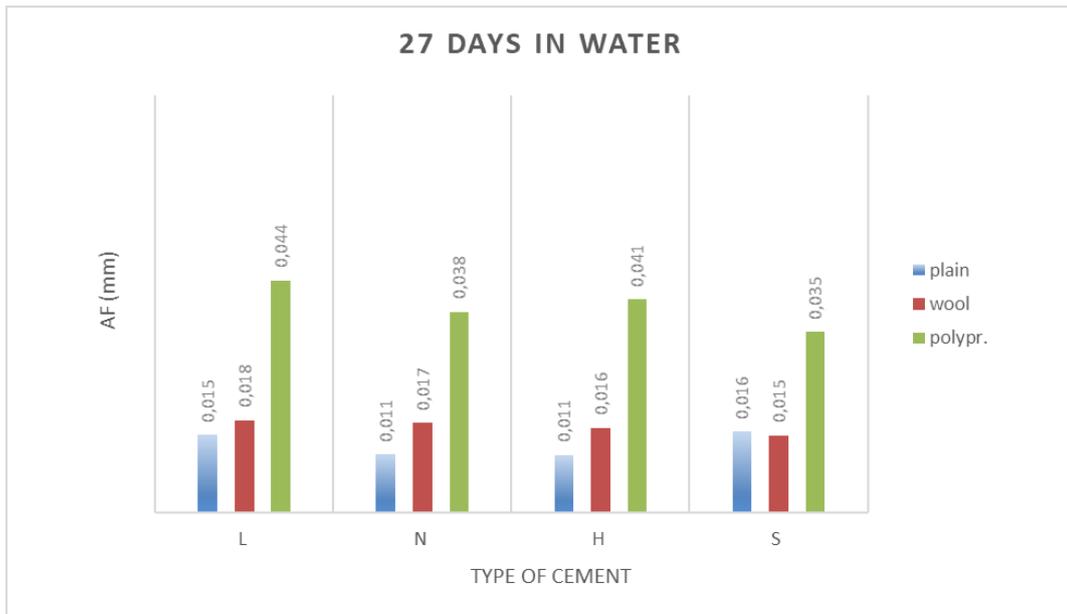


Figura 5.10 - Risultati delle prove in termini di duttilità a 27 giorni in acqua

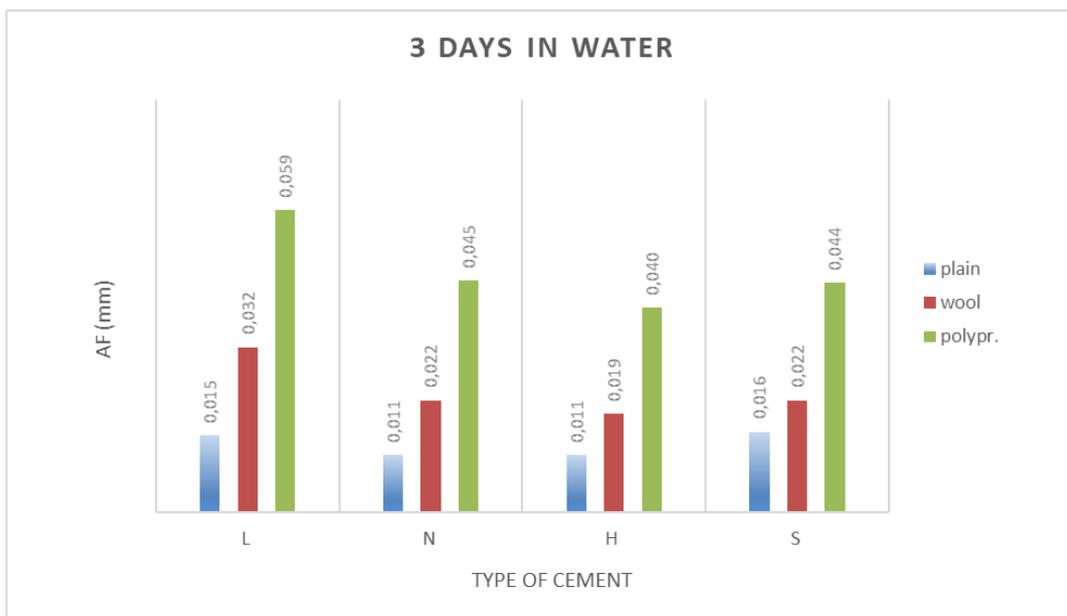


Figura 5.11 - Risultati delle prove in termini di duttilità a 3 giorni in acqua

Dai grafici riassuntivi è possibile fare le seguenti considerazioni:

- per il periodo di stagionatura a 28 giorni in ambiente a temperatura di 20 °C e U.R.=50% (figura 5.9), il valore della duttilità è prossimo allo 0.01 mm per le malte cementizie che non presentano fibre di rinforzo, rappresentate dalla curva *plain* del grafico. Al contrario, la presenza delle fibre, evidenzia un aumento della duttilità, a

cui corrisponde un aumento della resistenza a flessione residua, indicata dal parametro y_1 , i cui valori sono riportati in tabella 5.2. Tuttavia, sia per le fibre di lana sia per quelle di polipropilene, è possibile osservare che la duttilità diminuisce all'aumentare dell'alcalinità del cemento, presentando il valore più basso per il cemento solfoalluminoso. Nello specifico, i valori più alti della duttilità sono stati riscontrati per il cemento basso-alcalino, in cui l'efficacia delle fibre di lana e di polipropilene è pressoché la stessa, presentando un valore della duttilità di circa 0.065 mm, con la corrispondente resistenza a flessione residua $y_1 = 0.3$. All'aumentare dell'alcalinità, in particolare, per il cemento solfoalluminoso, la duttilità si riduce a 0.03 per le fibre di polipropilene, e a 0.02 per le fibre di lana. Questo risultato è dovuto al fenomeno corrosivo dell'ambiente alcalino del cemento in cui, non solo le fibre di lana, ma anche quelle sintetiche, hanno subito una riduzione della loro efficacia come elementi di rinforzo.

- La maturazione dei provini a 27 giorni in acqua alla temperatura di 20 °C (figura 5.10), presenta un valore della duttilità simile per le quattro tipologie di malte cementizie analizzate. In particolare, si registra una duttilità maggiore per le malte cementizie rinforzate con fibre di polipropilene, compresa fra 0.035 e 0.045 mm, con il valore massimo per il cemento basso-alcalino. Lo stesso andamento si evidenzia per le fibre di lana, ma con una duttilità dimezzata rispetto alle fibre di polipropilene, compresa fra 0.015 e 0.018 mm.
- La duttilità dei provini, con periodo di stagionatura di soli 3 giorni in acqua alla temperatura di 20 °C (figura 5.11), diminuisce con l'aumentare dell'alcalinità del cemento, evidenziando un valore maggiore per le malte realizzate con cemento basso-alcalino ed un valore pressoché simile per quelle a base di cemento Portland e solfoalluminoso. In particolare, per tutte le tipologie di cemento analizzate, la duttilità delle malte rinforzate con le fibre di polipropilene è circa il doppio di quelle rinforzate con fibre di lana, presentando un valore compreso fra 0.045 e 0.06 mm.

5.3 Indagini al microscopio

Le prove di flessione effettuate sui provini, sono state infine affiancate da indagini chimiche tramite un microscopio elettronico a scansione, indicato con l'acronimo SEM (*Scanning Electron Microscope*), che ha permesso di analizzare nel dettaglio la microstruttura delle malte cementizie rinforzate con fibre di lana.

Le analisi chimiche che vengono effettuate mediante il SEM, sono realizzate mediante un fascio elettronico irradiato sul campione. La misurazione dell'energia e la distribuzione dell'intensità dei raggi X, vengono effettuate mediante un rivelatore a dispersione di energia EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectrometry*), ossia spettrometria per dispersione di energia. L'analisi prodotta permette di individuare gli elementi che costituiscono le inclusioni, ovvero la tipologia e l'origine. Si ricavano le scansioni del fascio elettronico, nei punti di interesse sulla superficie del campione, con dettagli su scala microscopica. SEM+EDS rappresentano quindi uno strumento estremamente utile nel settore della scienza dei materiali.

Le osservazioni al SEM, sono state effettuate in corrispondenza della superficie di rottura dei campioni, permettendo di individuare i legami fra le fibre e la pasta cementizia, riscontrando in maniera visiva, i risultati ottenuti durante le prove di flessione. In particolare, sono stati analizzati i provini rinforzati con fibre di lana costituiti da cemento alto alcalino, in modo tale da analizzare visivamente il comportamento della lana in ambiente alcalino, in funzione del tipo di stagionatura dei provini.

Si riportano in elenco, i provini sottoposti alle indagini al SEM:

- H2: periodo di stagionatura a 28 giorni in ambiente (temperatura di 20 °C, U.R.= 50%);
- H4: periodo di stagionatura a 27 giorni in acqua (temperatura di 20 °C);
- H6: periodo di stagionatura a 3 giorni in acqua (temperatura di 20 °C).

La stagionatura ha influenzato il comportamento delle fibre di lana, in particolare la condizione più gravosa è avvenuta per un periodo prolungato dei provini in acqua, ossia per la maturazione a 27 giorni in acqua (temperatura di 20 °C).

Come evidenziato già dalla misura della duttilità nel paragrafo 5.2, tramite il parametro A_F , i campioni costituiti da malta con cemento alcalino fibrorinforzate con le fibre di lana, mostrano dei valori di duttilità leggermente più alti rispetto ai provini in assenza di fibre, per il periodo di stagionatura a 27 giorni in acqua. Tale risultato è dovuto al fatto che all'interno della matrice cementizia si sono verificate delle reazioni alcaline e la lana è stata corrosa. Il risultato di tale fenomeno è chiaramente visibile in figura 5.12. In particolare, la superficie di rottura del campione mostra la presenza di vuoti, anziché filamenti di lana.



Figura 5.12 - Porzione di un provino H4, con stagionatura a 27 giorni in acqua, in cui sono visibili vuoti nella matrice cementizia al posto delle fibre di lana

La maturazione tradizionale dei provini a 28 giorni in ambiente (temperatura di 20 °C, U.R.= 50%), non ha influito molto sulla degradazione delle fibre, mentre per quella a soli 3 giorni in acqua, le fibre hanno risentito dell'ambiente alcalino, dovuto al fenomeno di idratazione tra il cemento e l'acqua. In figura 5.13 vengono messe a confronto le immagini al SEM riferite rispettivamente ai campioni H2 e H4. Nel dettaglio, in figura 5.13 a, sono visibili delle porzioni più scure, ovvero degli accumuli di fibre di lana disperse nella matrice cementizia. In figura 5.13 b, le fibre risultano essere maggiormente disgregate.

Inoltre, nei campioni conservati per 3 giorni in acqua, ci sono cambiamenti visibili dentro e sulle fibre rispetto ai campioni maturati in modo tradizionale. L'analisi EDS ha permesso di individuare la composizione chimica della matrice cementizia. I risultati hanno evidenziato che i campioni H6 sono caratterizzati da un picco più elevato di calcio (Ca) rispetto ai campioni H2. La percentuale maggiore di ossido di calcio (CaO), a seguito della maturazione dei provini, evidenzia quindi una maggiore alcalinità della matrice cementizia con effetti negativi sulla resistenza delle fibre di lana.

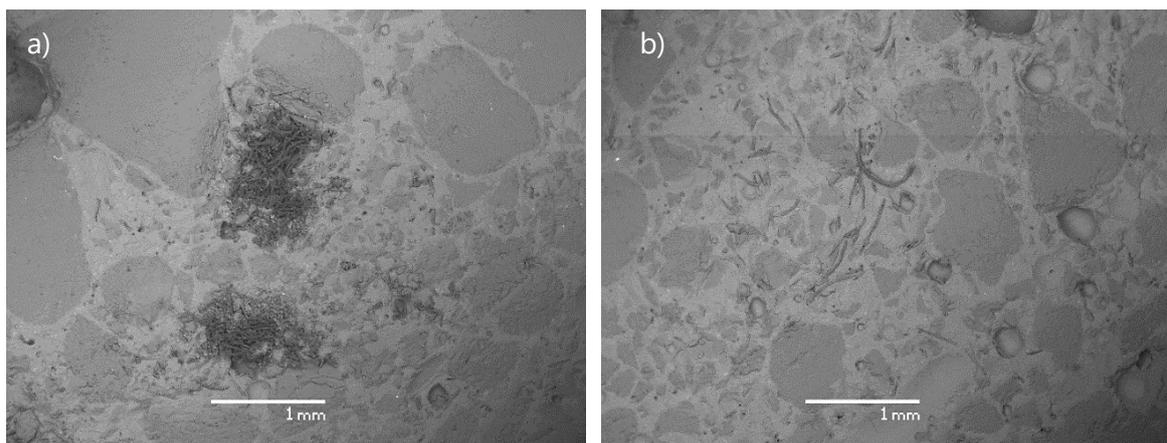


Figura 5.13 - a) porzione di provino H2, maturato a 28 giorni in ambiente, in cui sono visibili accumuli di fibre di lana; b) porzione del provino H6, maturato a 3 giorni in acqua, in cui le fibre risultano disgregate; indagini al SEM, fattore di scala = 1mm

Si riportano di seguito le analisi EDS dei provini H2, H4 e H6, in cui si evidenzia una maggiore presenza di calcio (Ca) all'interno dei campioni H4 e H6 a seguito delle reazioni alcaline nella matrice cementizia (figura 5.15- 5.16). Il campione H2 presenta picchi più elevati di zolfo (S) e carbonio (C) per la presenza delle fibre di lana (figura 5.14), evidenziati anche nel provino H6. Al contrario, l'analisi EDS del campione H4 (figura 5.15), effettuata in corrispondenza dei vuoti nella matrice cementizia, mostra dei picchi di zolfo (S) e carbonio (C) estremamente inferiori rispetto agli altri campioni. Tale risultato è attribuito alla disgregazione delle fibre nel composto.

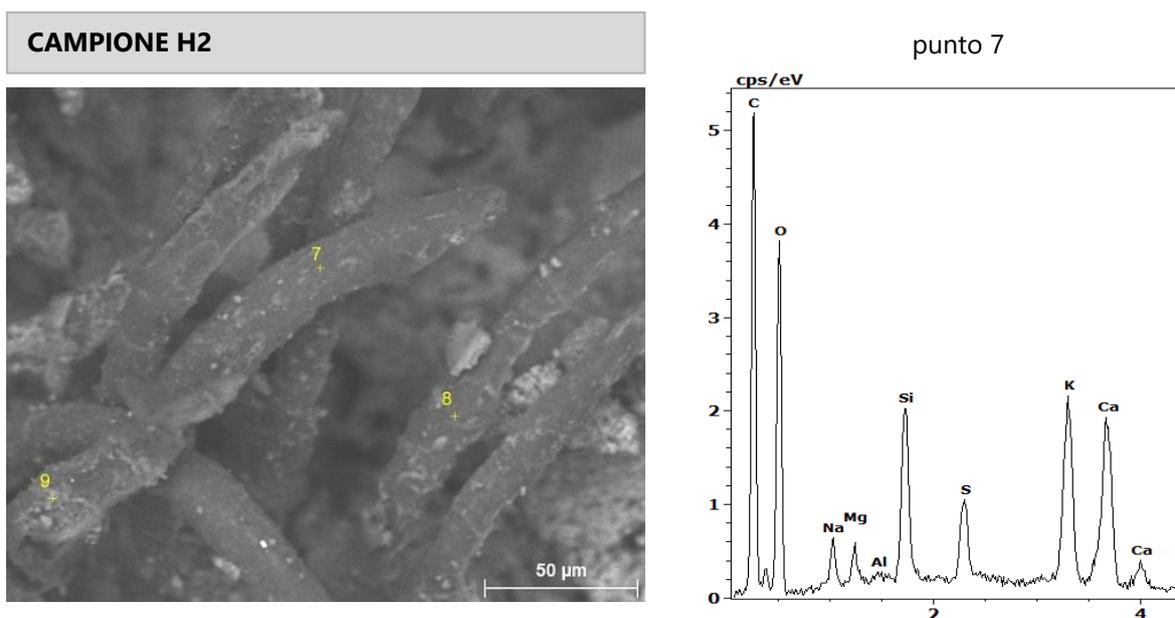


Figura 5.14 - Immagine al SEM + analisi EDS riferiti al provino H2, con periodo di stagionatura a 28 giorni in ambiente (temperatura 20 °C, U.R.=50%), fattore di scala 50 µm

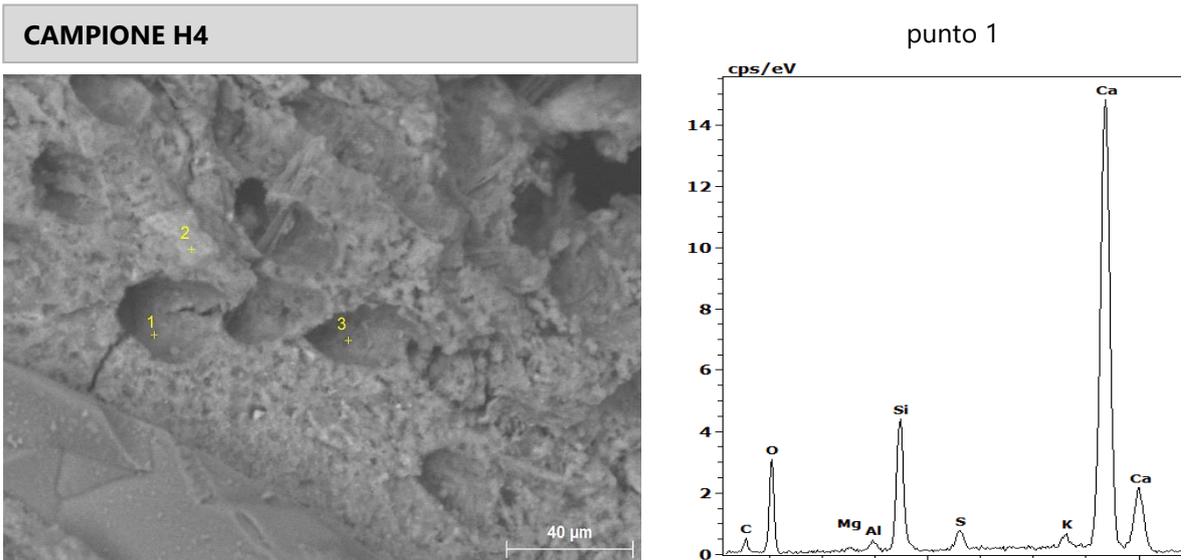


Figura 5.15 - Immagine al SEM + analisi EDS riferiti al provino H4, con periodo di stagionatura a 27 giorni in acqua (temperatura 20 °C), fattore di scala 40 μm

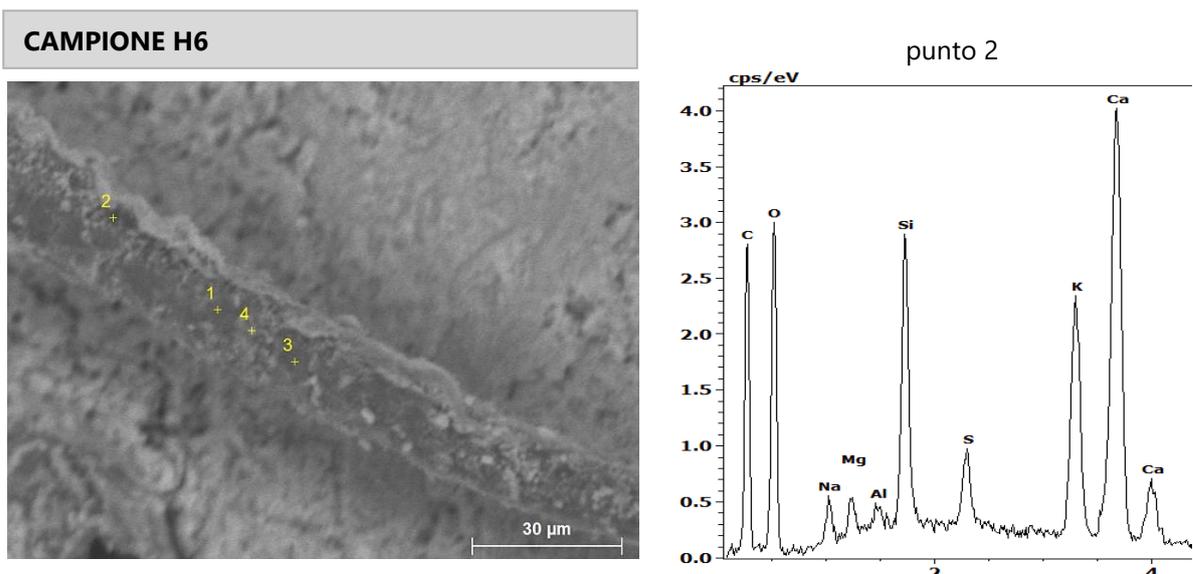


Figura 5.16 - Immagine al SEM + analisi EDS riferito al provino H6, con periodo di stagionatura a 3 giorni in acqua (temperatura 20 °C), fattore di scala 30 μm

L'ultima parte delle indagini al SEM riguarda il confronto fra i campioni L6 e H6, con periodo di stagionatura a 3 giorni in acqua (temperatura di 20 °C). In funzione del diverso contenuto di alcali nella matrice cementizia, è possibile fare delle considerazioni riguardanti la compatibilità delle fibre di lana con le due diverse malte composte rispettivamente da cemento basso-alcalino ed alto-alcalino.

Come evidenziato in figura 5.17, per il campione L6 realizzato con cemento basso-alcalino non è stata riscontrata la degradazione delle fibre di lana. Al contrario, come già analizzato

in precedenza, per il campione H6 costituito da cemento alto-alcantino, è visibile una parziale degradazione delle fibre. Inoltre, dalle analisi EDS, riportate in figura 5.18, è stato possibile riscontrare un contenuto più alto di calcio (Ca), sulla superficie delle fibre di lana.

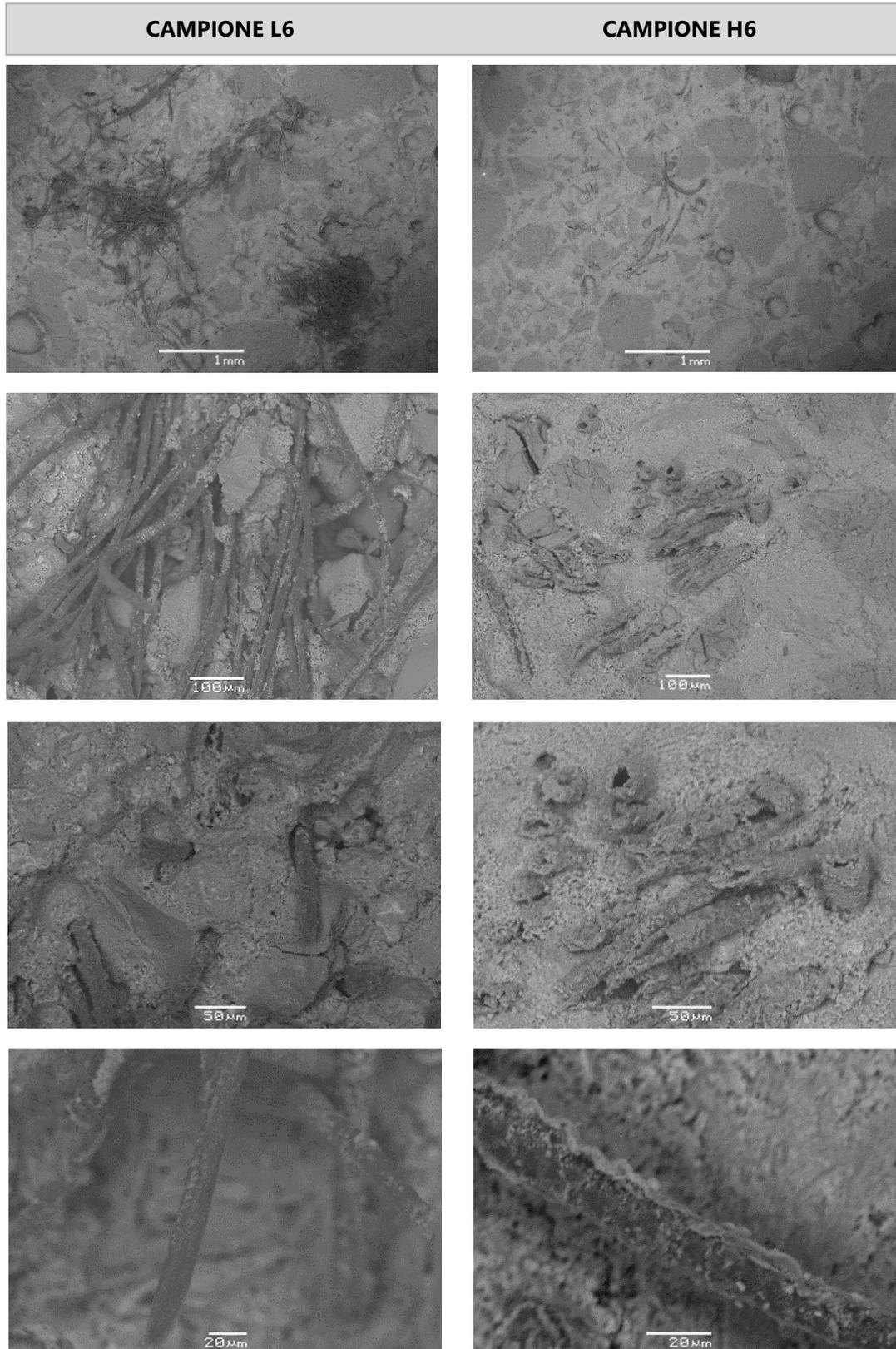


Figura 5.17 - Indagini al SEM provini L6 (cemento basso-alcantino) e H6 (cemento alto-alcantino)

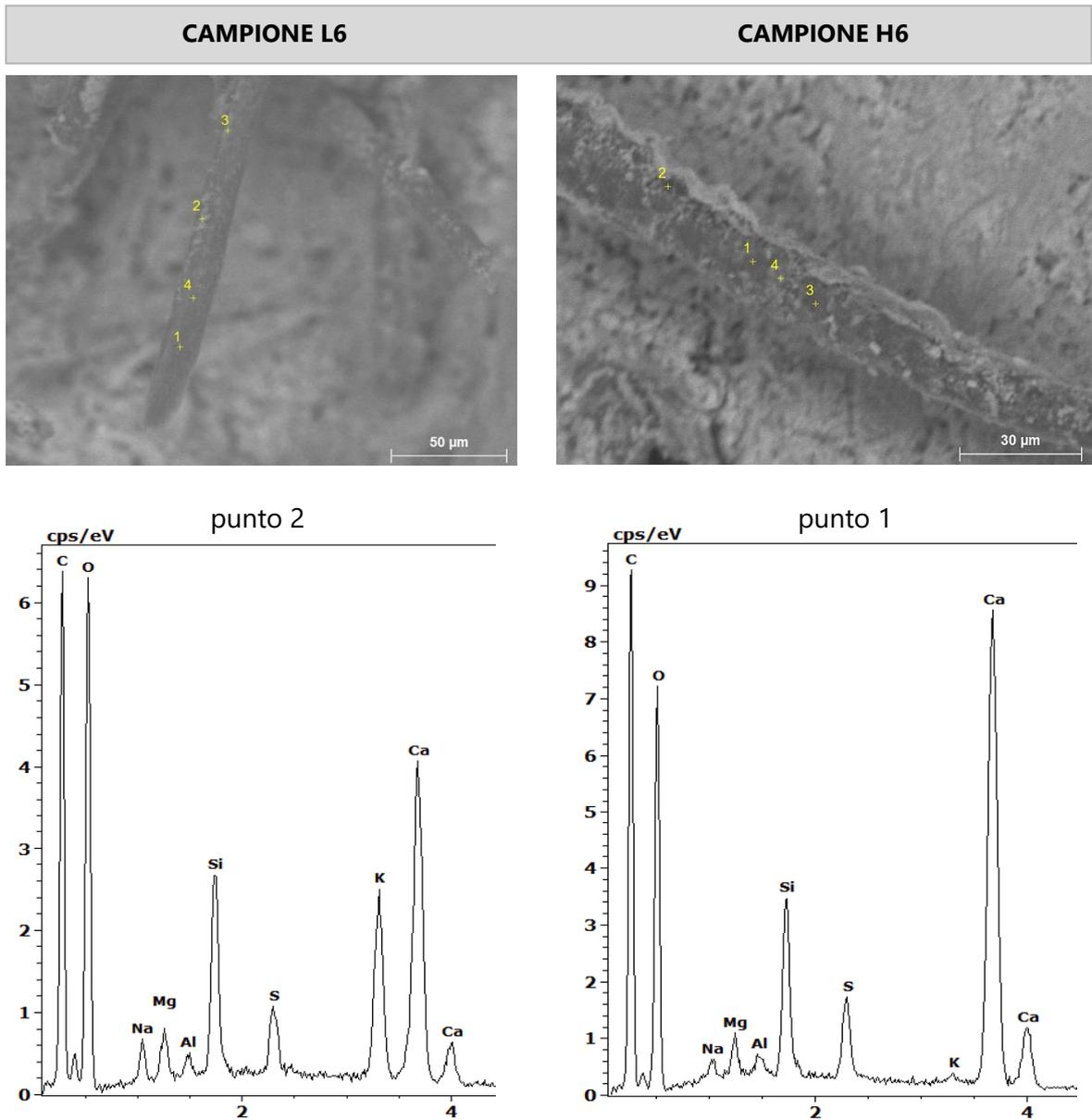


Figura 5.18- Immagine al SEM + indagine EDS riferiti ai provini L6 e H6, con periodo di stagionatura a 3 giorni in acqua (temperatura 20 °C)

6. CONCLUSIONI

L'obiettivo del lavoro di tesi è stato quello di valutare il comportamento delle fibre di lana nelle malte a base cementizia. Il principale svantaggio nell'utilizzo delle fibre naturali è la loro disgregazione in ambiente alcalino. A tale scopo sono state preparate in laboratorio differenti miscele di malte, costituite da quattro diverse tipologie di cemento con diverso grado di alcalinità: Portland, basso-alcalino, alto-alcalino e solfoalluminoso. Il rinforzo si è ottenuto, aggiungendo alle diverse miscele una quantità di fibre di lana pari all'1% del volume totale del singolo provino, confrontate poi con la medesima quantità di fibre sintetiche in polipropilene.

La prova di flessione su tre punti, eseguita in riferimento alla normativa UNI EN 196-1, ha permesso di determinare la resistenza a flessione e valutare la duttilità delle malte fibrorinforzate. Dai dati di output registrati durante i test, si sono ricavati i grafici carico-deformazione ($P-\delta$), in funzione del diverso periodo di stagionatura. Tali grafici presentano un comportamento degradante (*deflection softening*), quindi una volta raggiunto il carico di picco, il materiale ha una progressiva perdita di resistenza. I valori estrapolati del carico massimo P_{max} , hanno consentito la determinazione della resistenza a flessione σ_F . La duttilità, invece, è stata valutata andando a considerare la fase post-fessurativa del provino. Lo stress residuo nella fase di post-fessurazione è stato determinato mediante il parametro A_F , ossia l'area sottesa dalla curva di softening. Tale curva è stata successivamente approssimata con una relazione bilineare.

I risultati dell'indagine sperimentale hanno messo in evidenza che le fibre di rinforzo contribuiscono ad aumentare le prestazioni delle malte cementizie. In particolare, si possono fare le seguenti considerazioni:

- La resistenza a flessione dei provini, con periodo di stagionatura a 28 giorni in ambiente, a temperatura di 20°C e umidità relativa del 50%, è risultata superiore all'aumentare dell'alcalinità del cemento, in particolare si sono avuti i risultati migliori con le malte a base di cemento solfoalluminoso, rinforzate con fibre di lana. Questo però ha evidenziato un comportamento fragile nella fase di post-fessurazione.

- Al contrario, la duttilità aumenta con il diminuire dell'alcalinità del cemento, in quanto le fibre, sia quelle naturali che quelle sintetiche, hanno risentito delle reazioni alcaline della pasta cementizia. I risultati migliori si sono ottenuti con le malte a base di cemento basso-alcalino, per i provini con periodo di stagionatura a 28 giorni in ambiente (temperatura di 20°C e U.R.=50%), con valori pressoché simili sia per le fibre di lana sia per quelle di polipropilene. La maturazione dei provini a 27 giorni in acqua, invece, ha influenzato negativamente le fibre di lana rispetto a quelle di polipropilene.

L'indagine sperimentale effettuata in questo lavoro di tesi ha messo in evidenza la compatibilità delle fibre di lana con cementi a diverso grado di alcalinità. Il comportamento delle fibre in ambiente basso-alcalino ha determinato una minore resistenza a flessione ma un comportamento più duttile delle malte, nella fase di post-fessurazione.

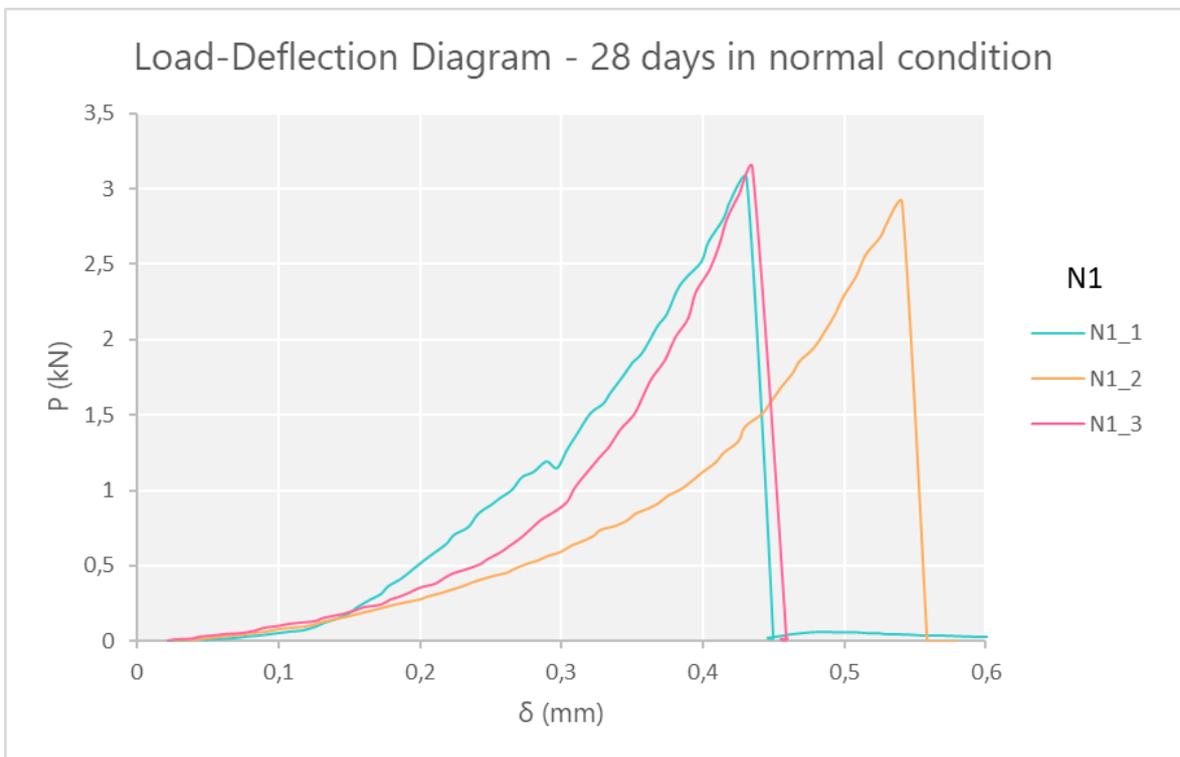
Ulteriori sviluppi possono essere condotti su questo tema, cercando di analizzare le interazioni chimiche tra i vari materiali che compongono i compositi cementizi e al tempo stesso migliorare il comportamento della lana in ambiente alcalino con trattamenti superficiali, in modo tale da ritenere le fibre naturali una valida alternativa a quelle tradizionali sintetiche.

APPENDICE A

Vengono riportati di seguito i grafici carico-deformazione ($P-\delta$) relativi ai 21 provini sottoposti alla prova di flessione su tre punti, delle malte cementizie realizzate con le diverse tipologie di cemento: Portland, basso-alcalino, alto-alcalino e solfoalluminoso, indicati rispettivamente con la sigla (N, L, H, S). I tre diversi campioni per ogni provino, sono stati raggruppati in un unico grafico, ottenendo 7 grafici diversi, in funzione del periodo di stagionatura, ossia a 28 giorni in ambiente (temperatura di 20°C, U.R. 50%), 27 giorni in acqua e 3 giorni in acqua (temperatura di 20°C).

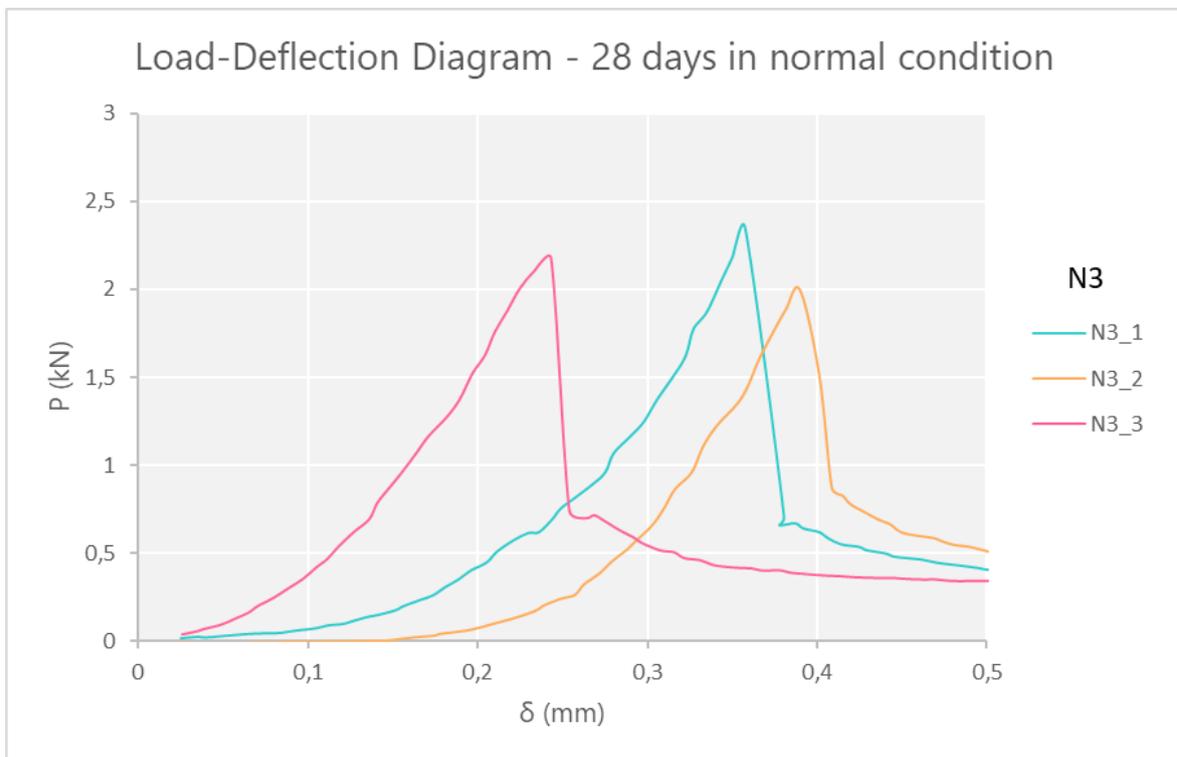
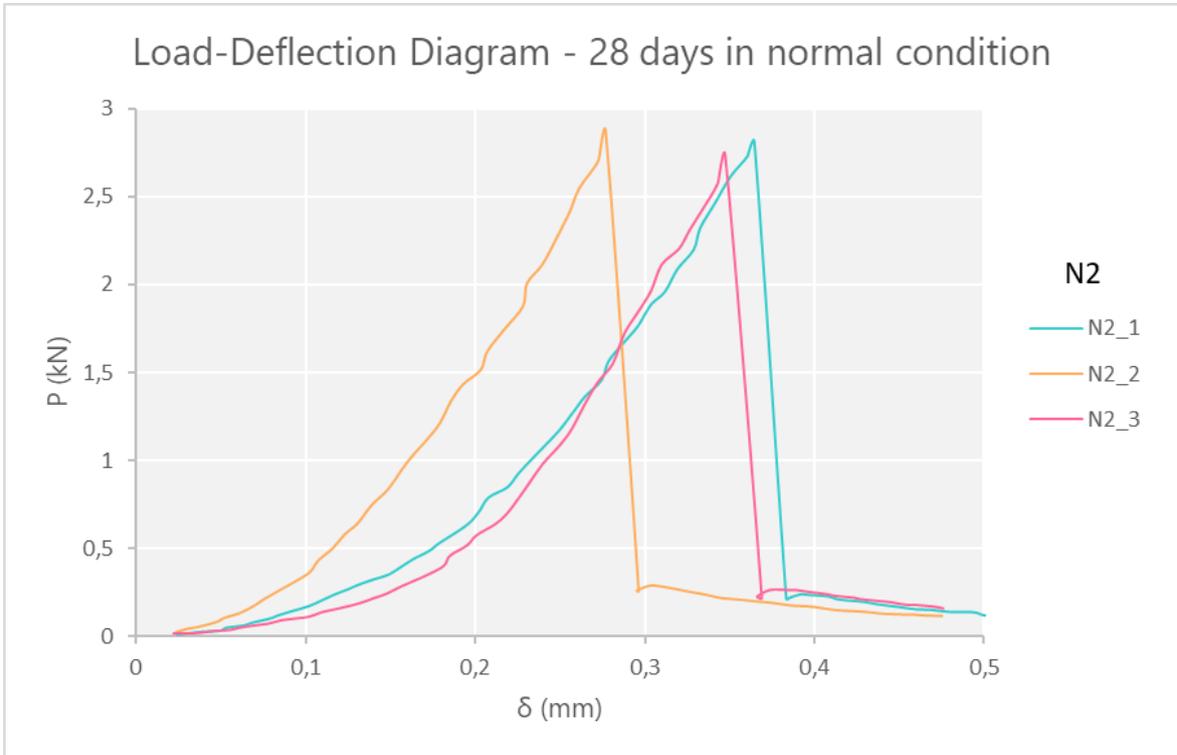
CEMENTO PORTLAND – SERIE N

Resistenza a flessione



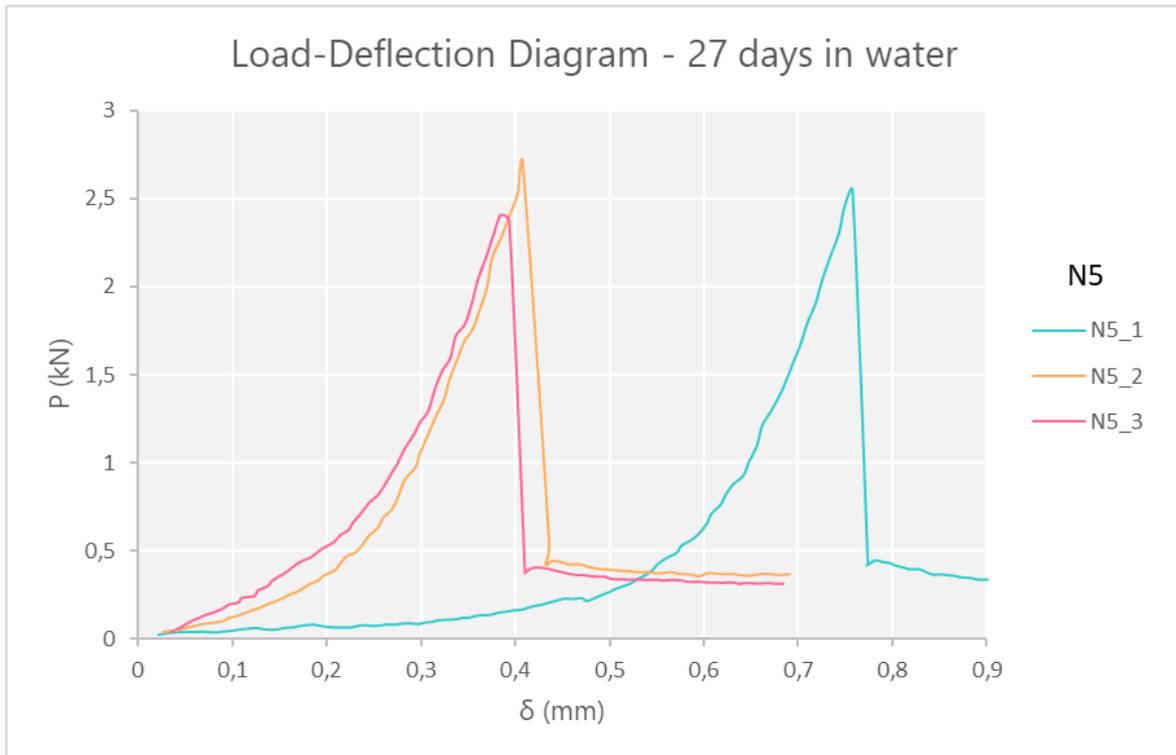
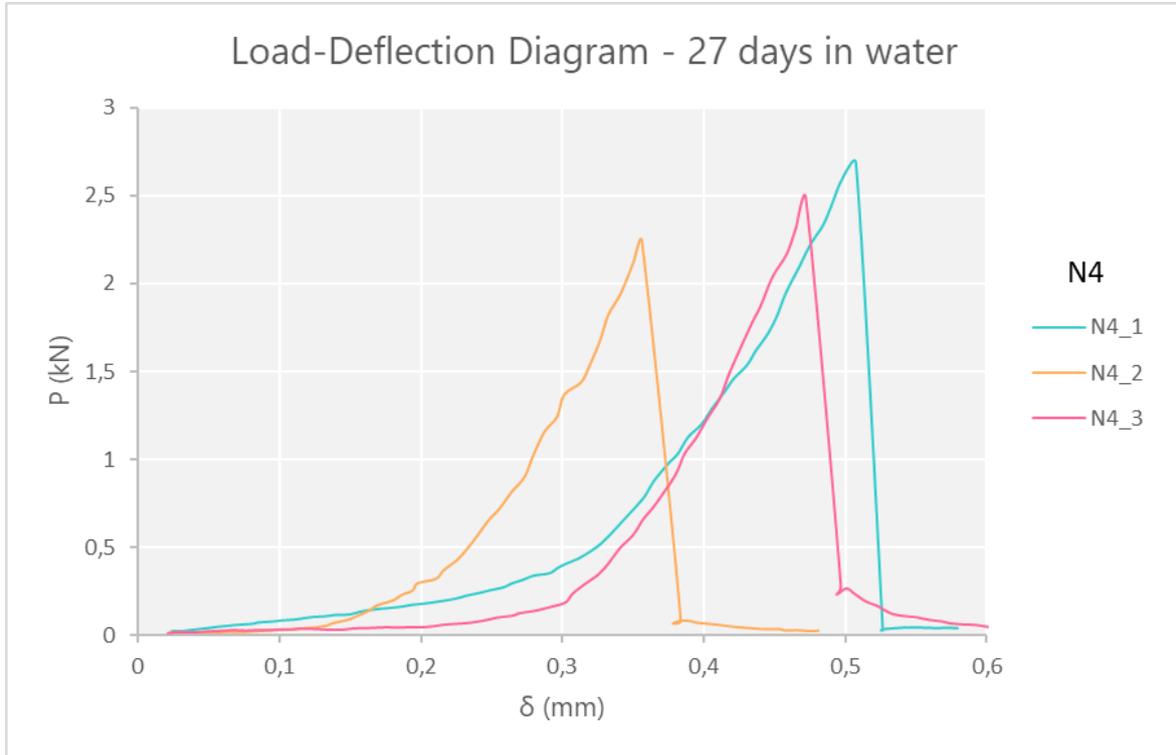
CEMENTO PORTLAND – SERIE N

Resistenza a flessione



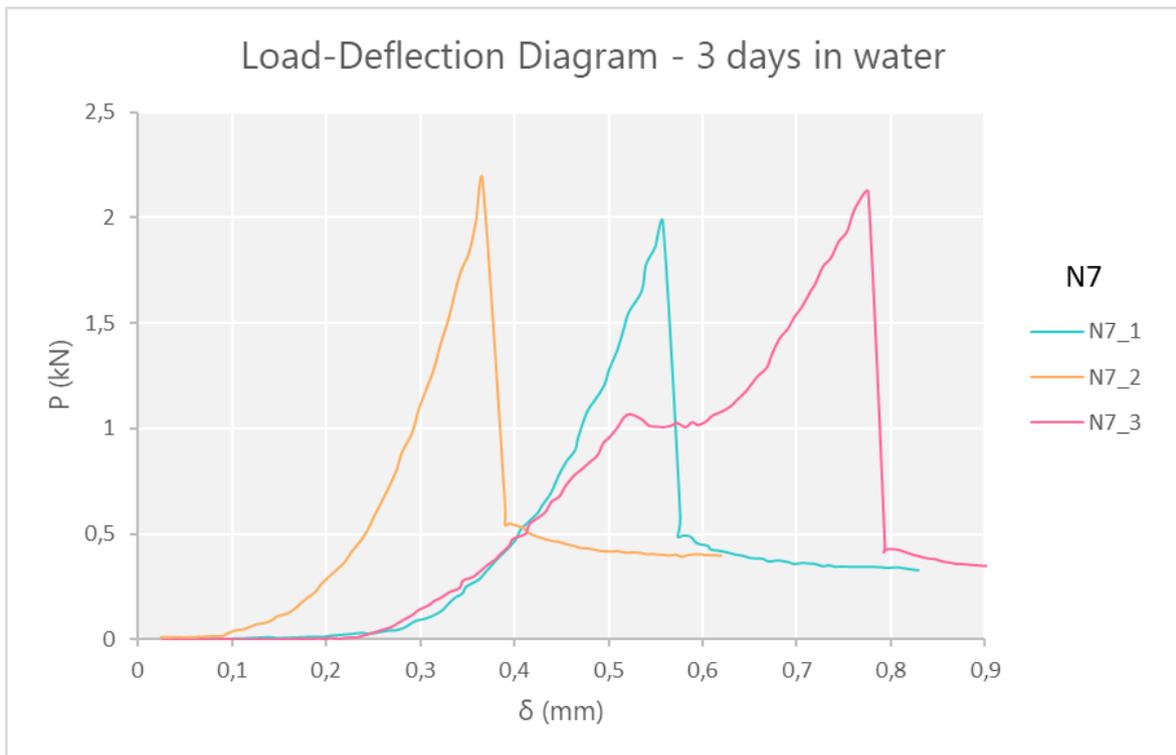
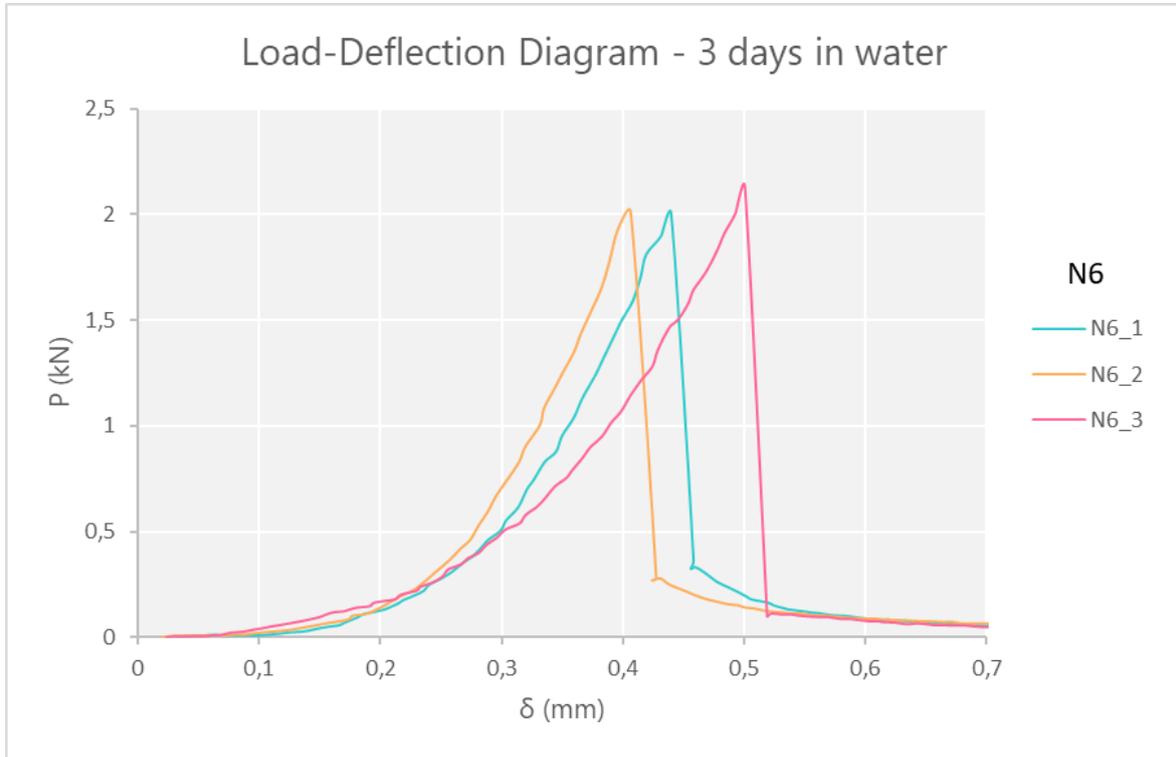
CEMENTO PORTLAND – SERIE N

Resistenza a flessione



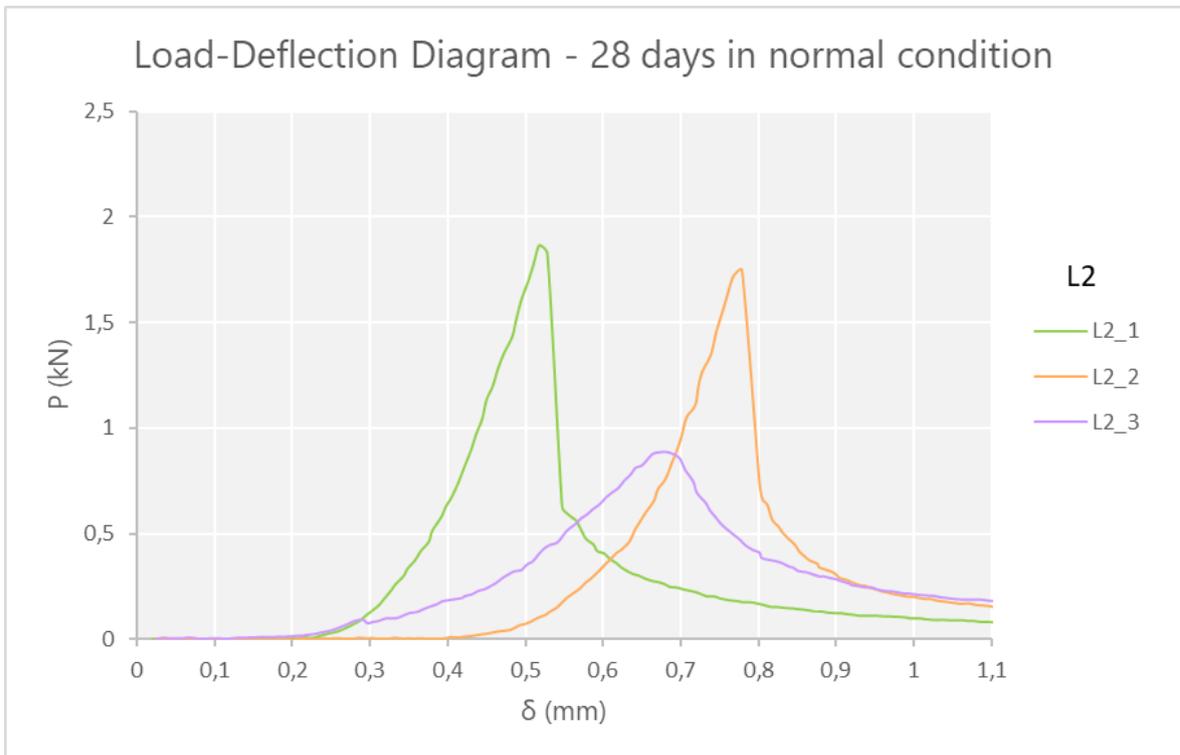
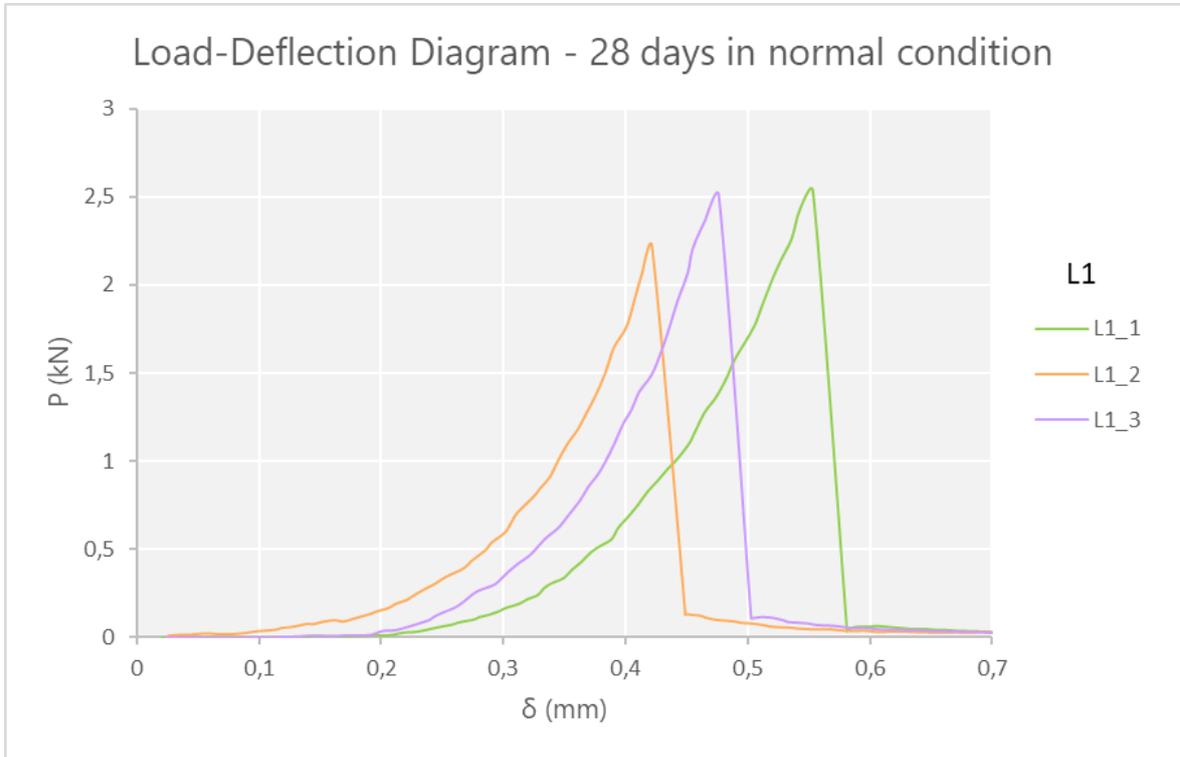
CEMENTO PORTLAND – SERIE N

Resistenza a flessione



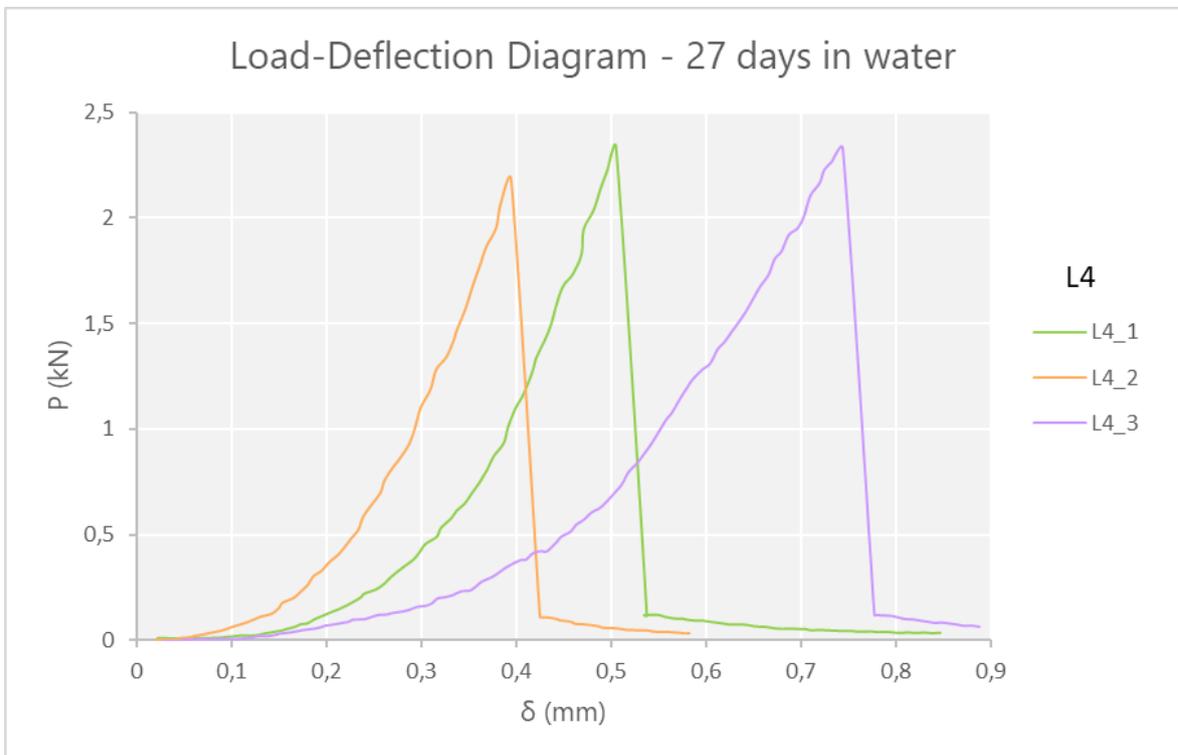
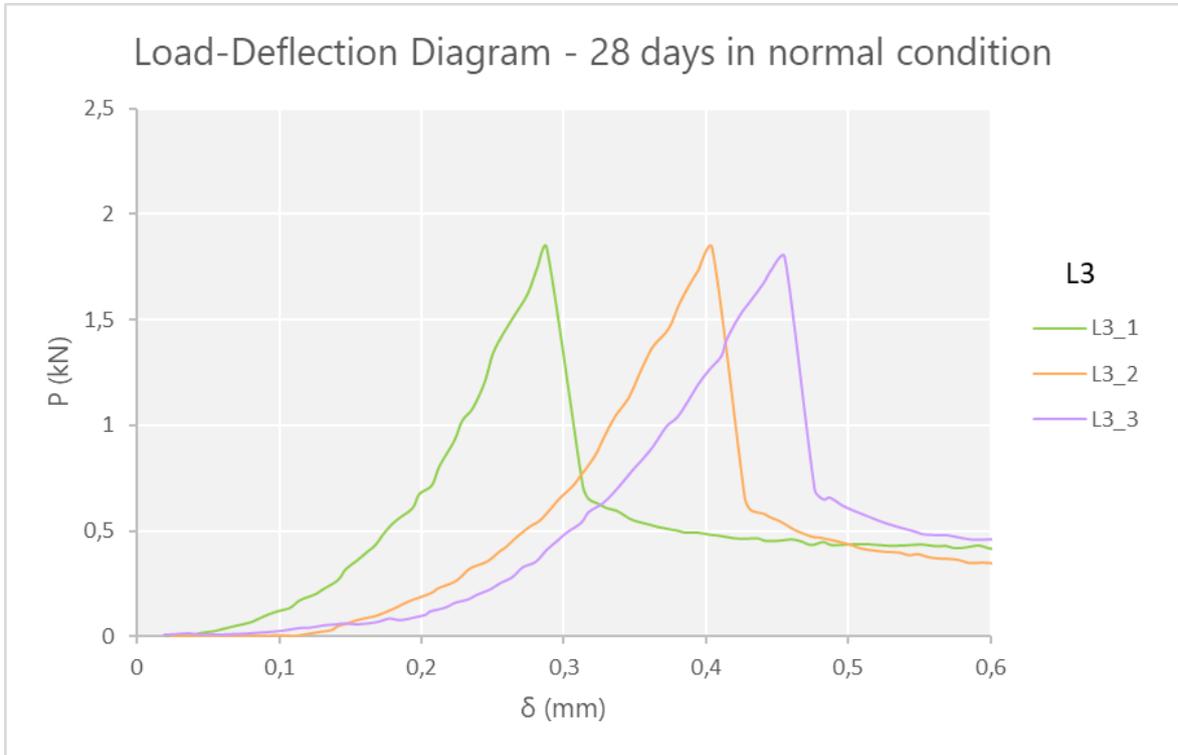
CEMENTO BASSO-ALCALINO – SERIE L

Resistenza a flessione



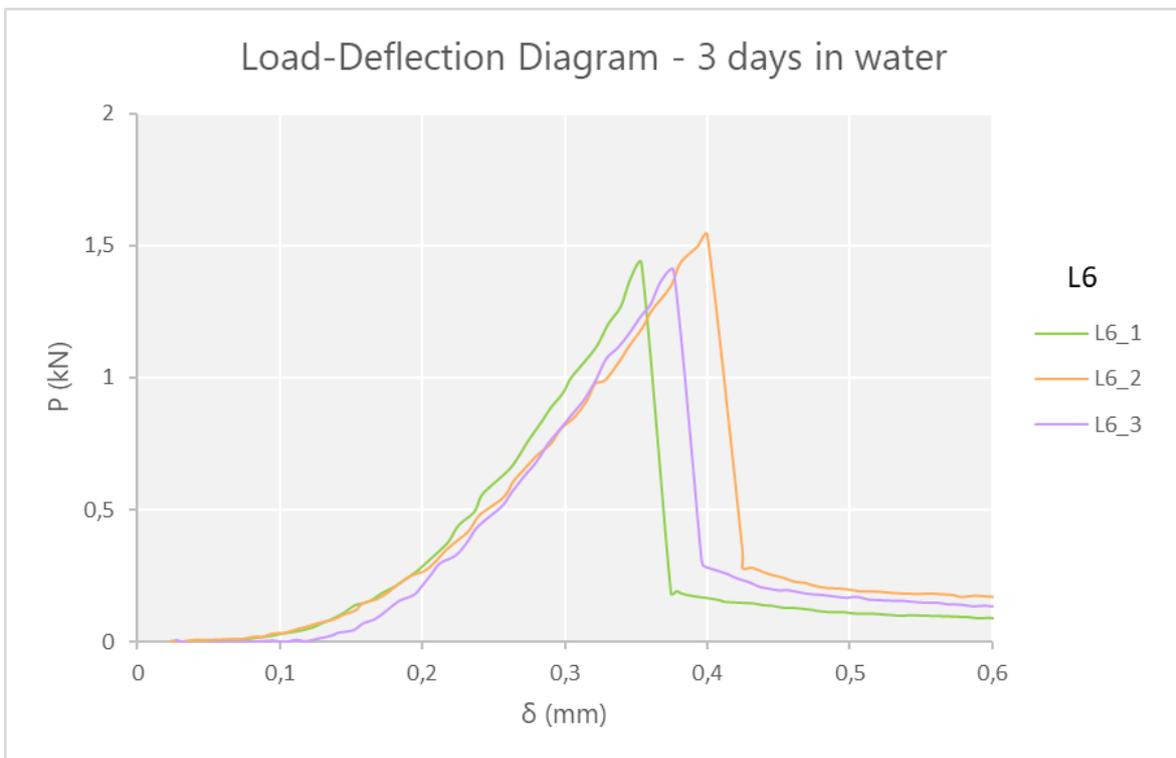
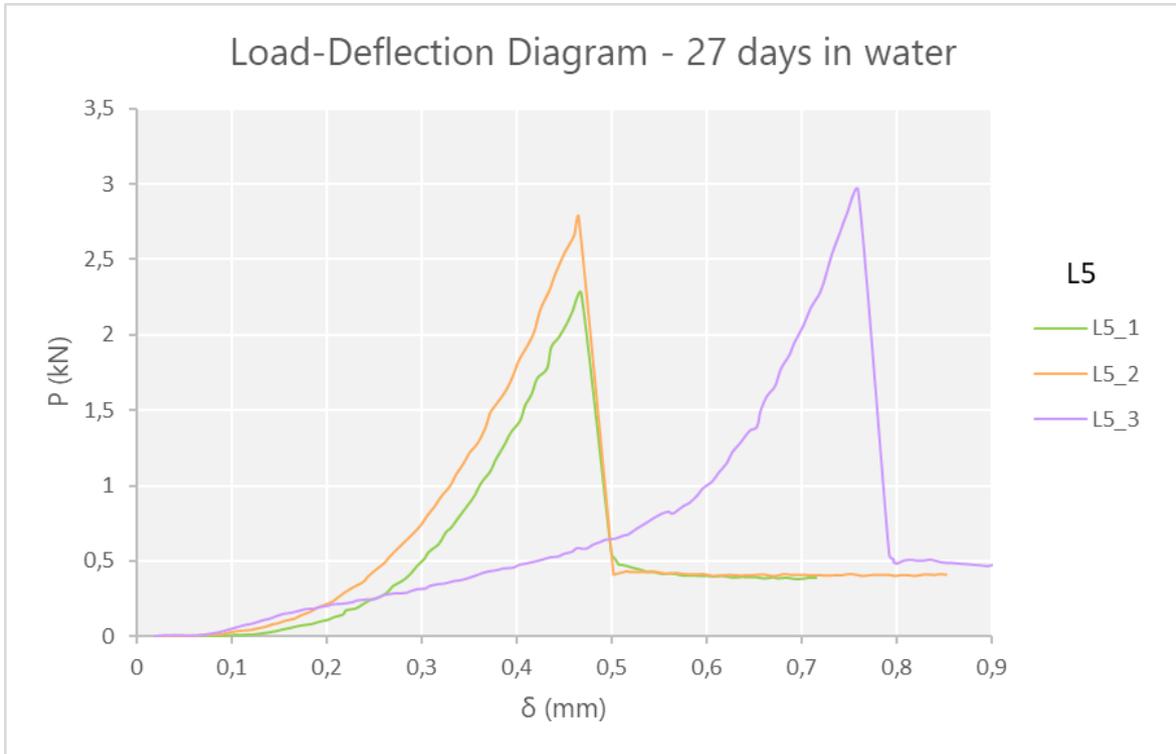
CEMENTO BASSO-ALCALINO – SERIE L

Resistenza a flessione



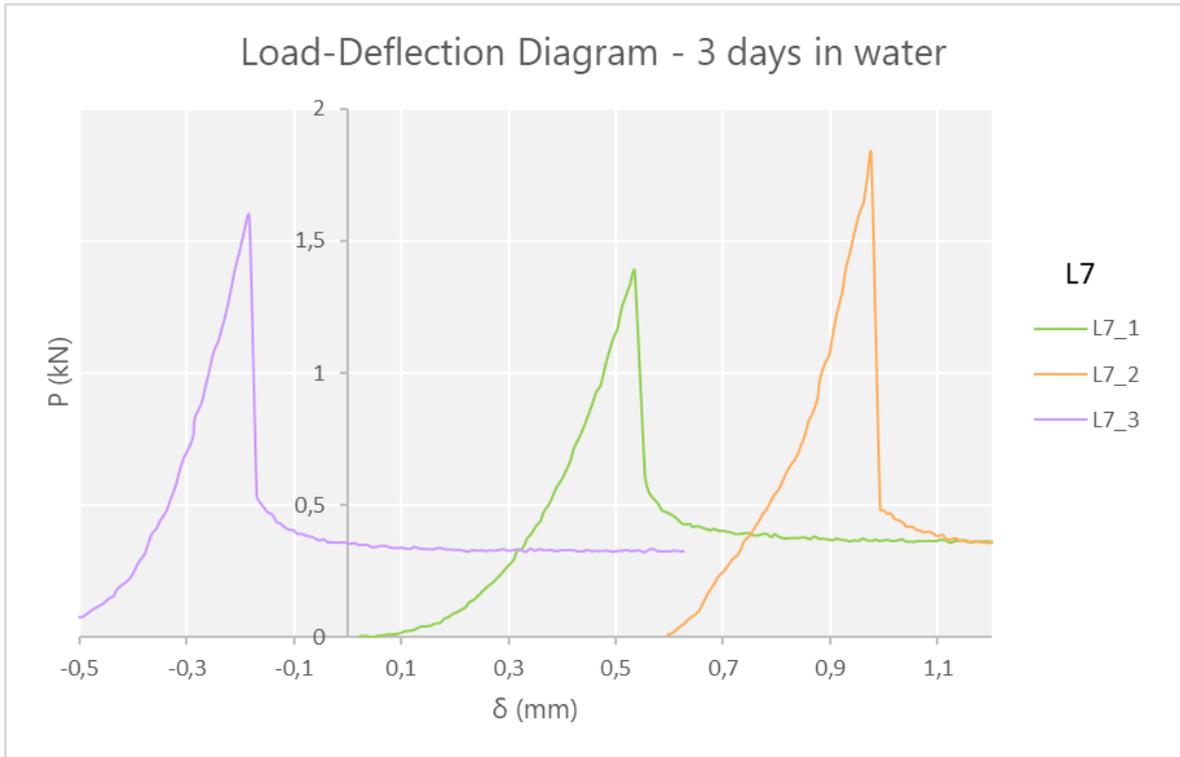
CEMENTO BASSO-ALCALINO – SERIE L

Resistenza a flessione



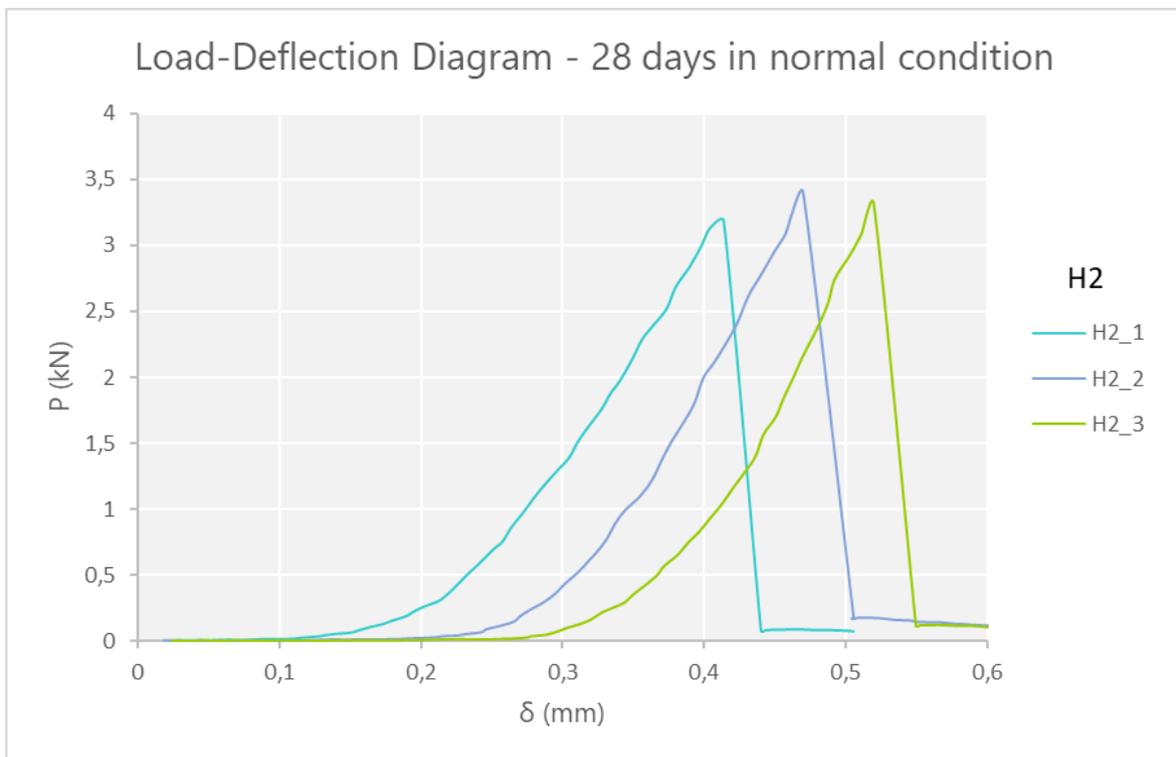
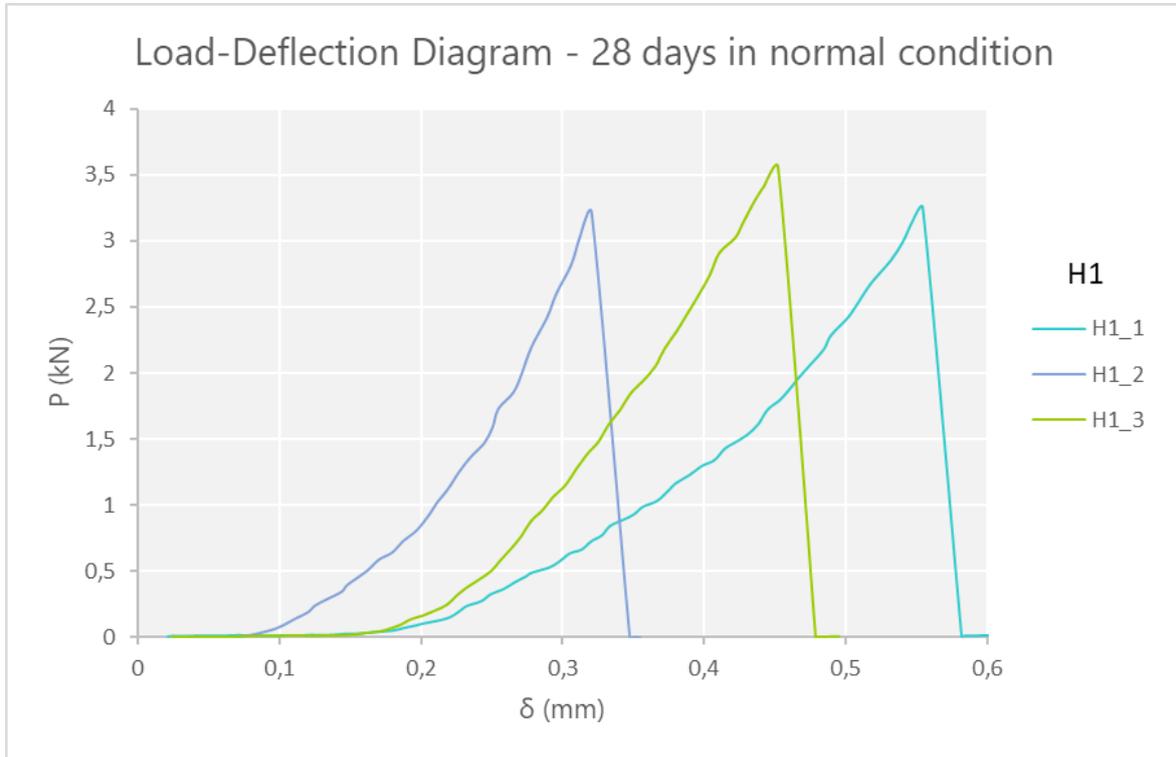
CEMENTO BASSO-ALCALINO – SERIE L

Resistenza a flessione



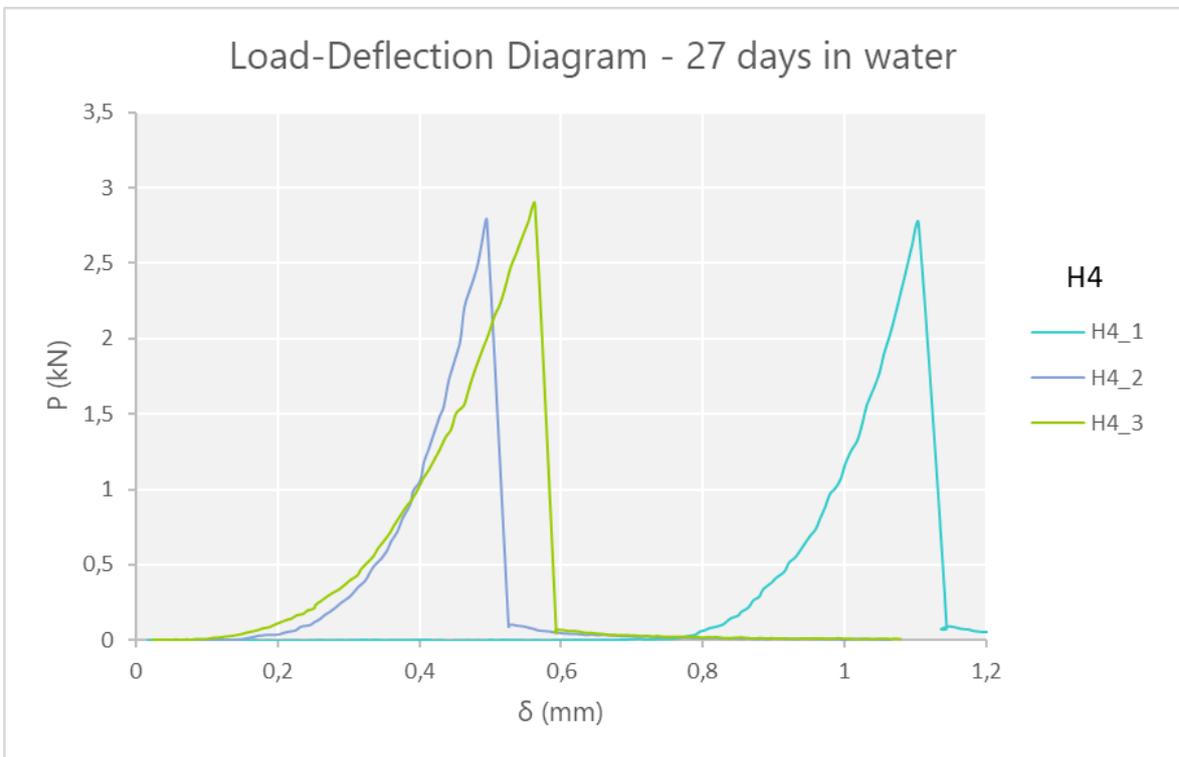
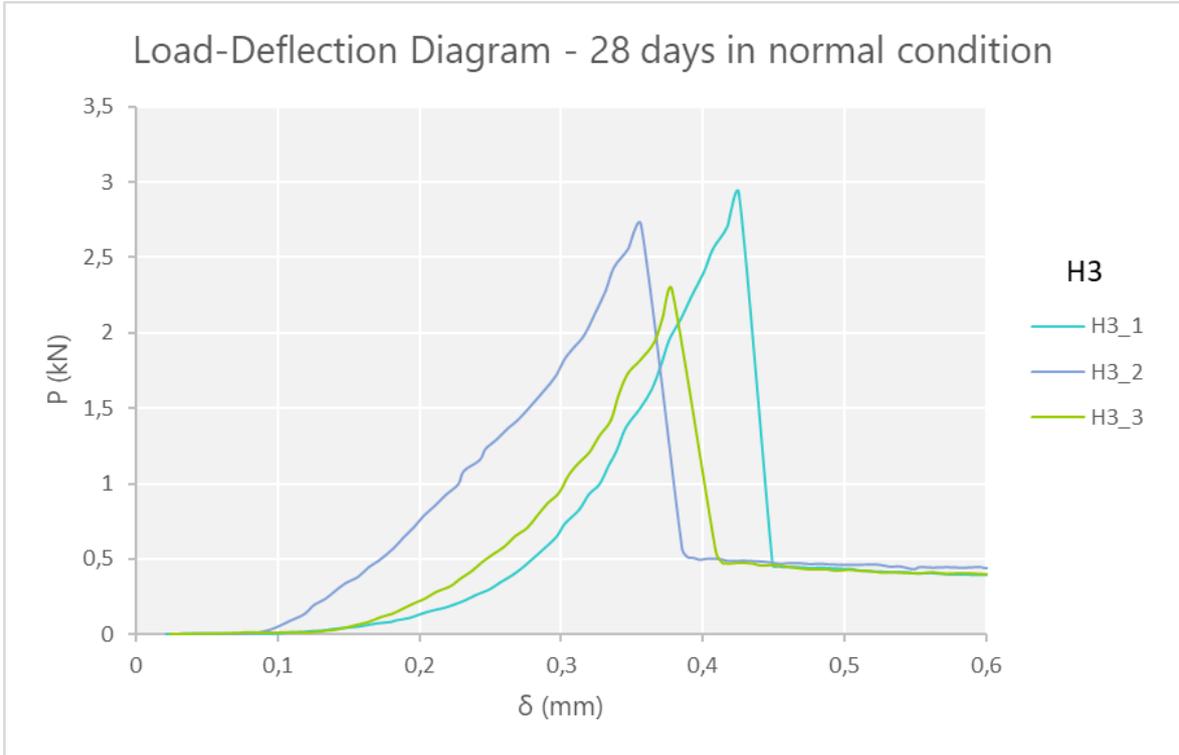
CEMENTO ALTO-ALCALINO – SERIE H

Resistenza a flessione



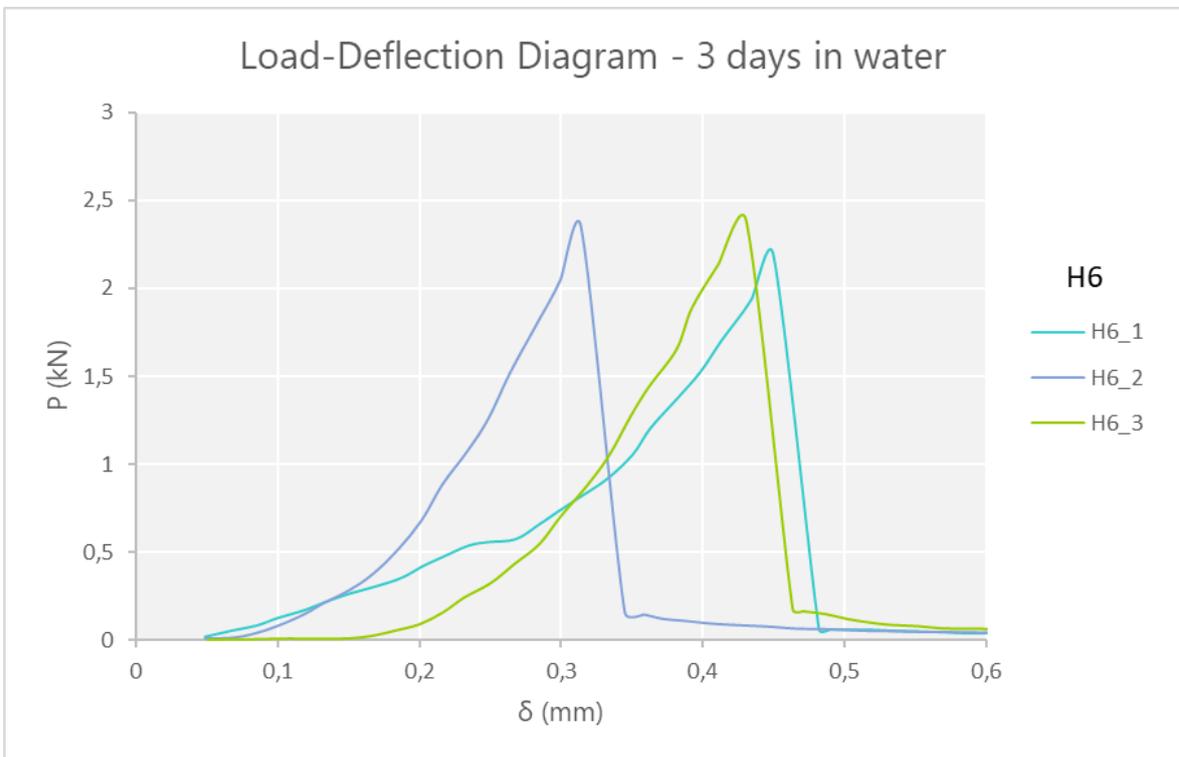
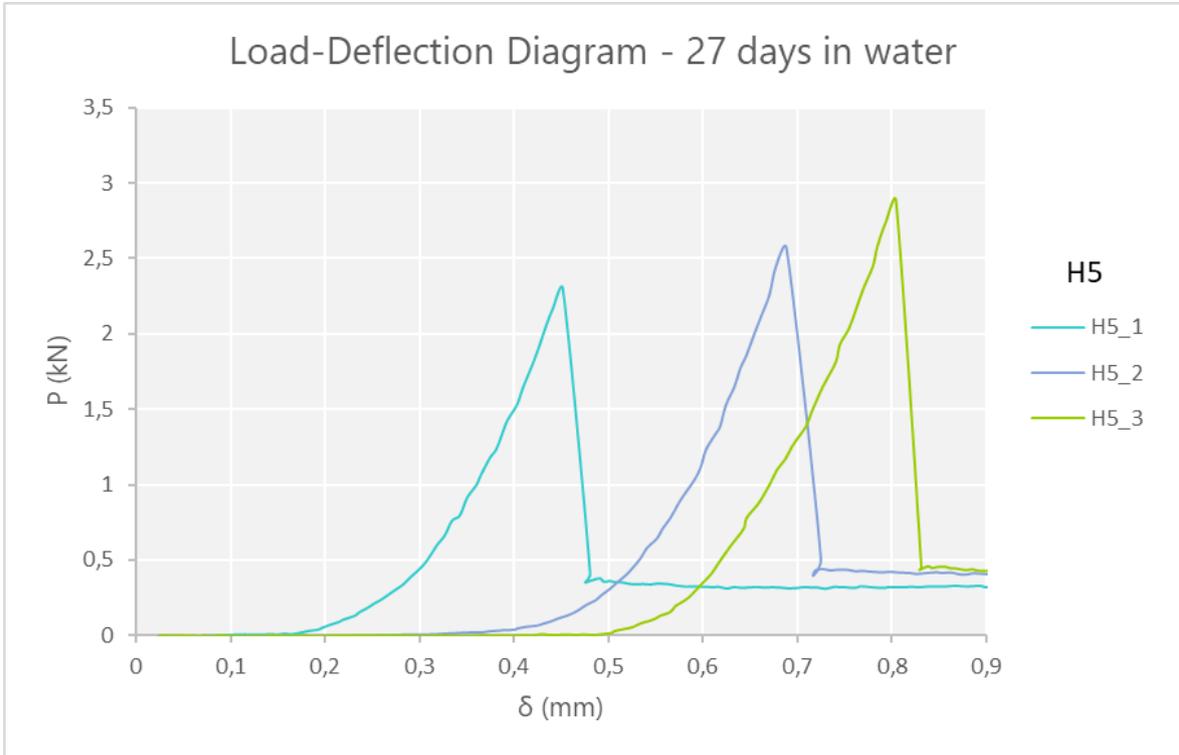
CEMENTO ALTO-ALCALINO – SERIE H

Resistenza a flessione



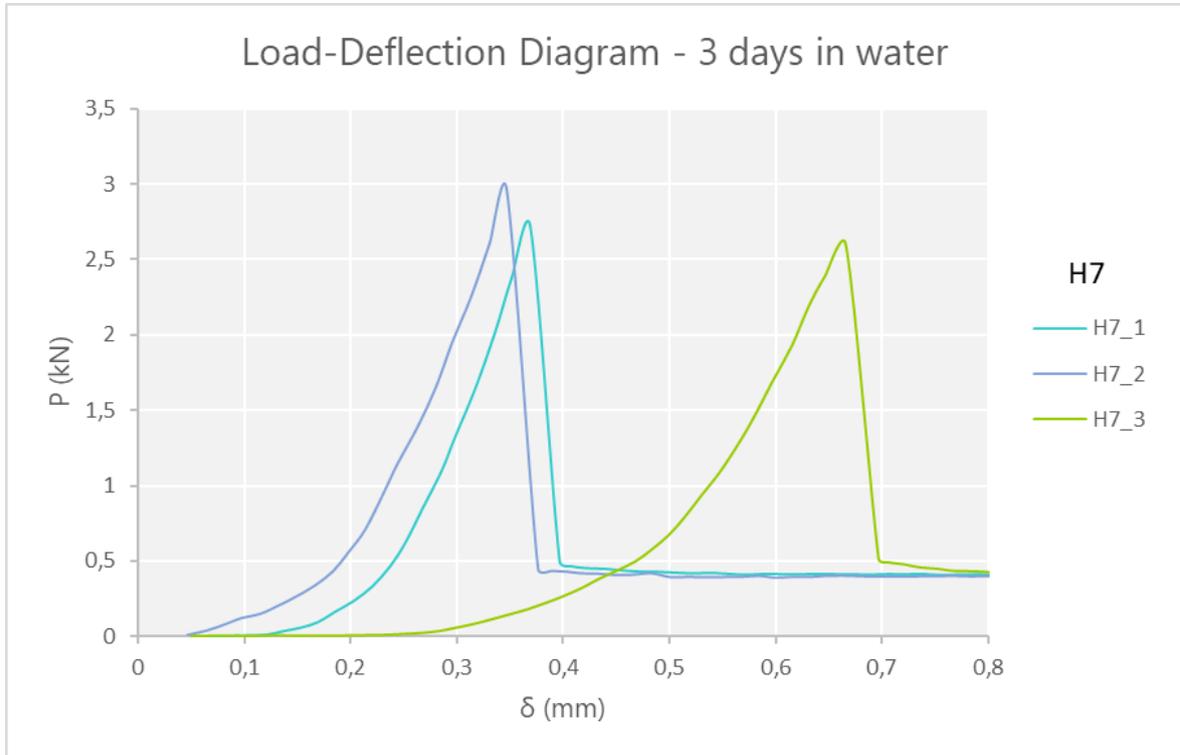
CEMENTO ALTO-ALCALINO – SERIE H

Resistenza a flessione



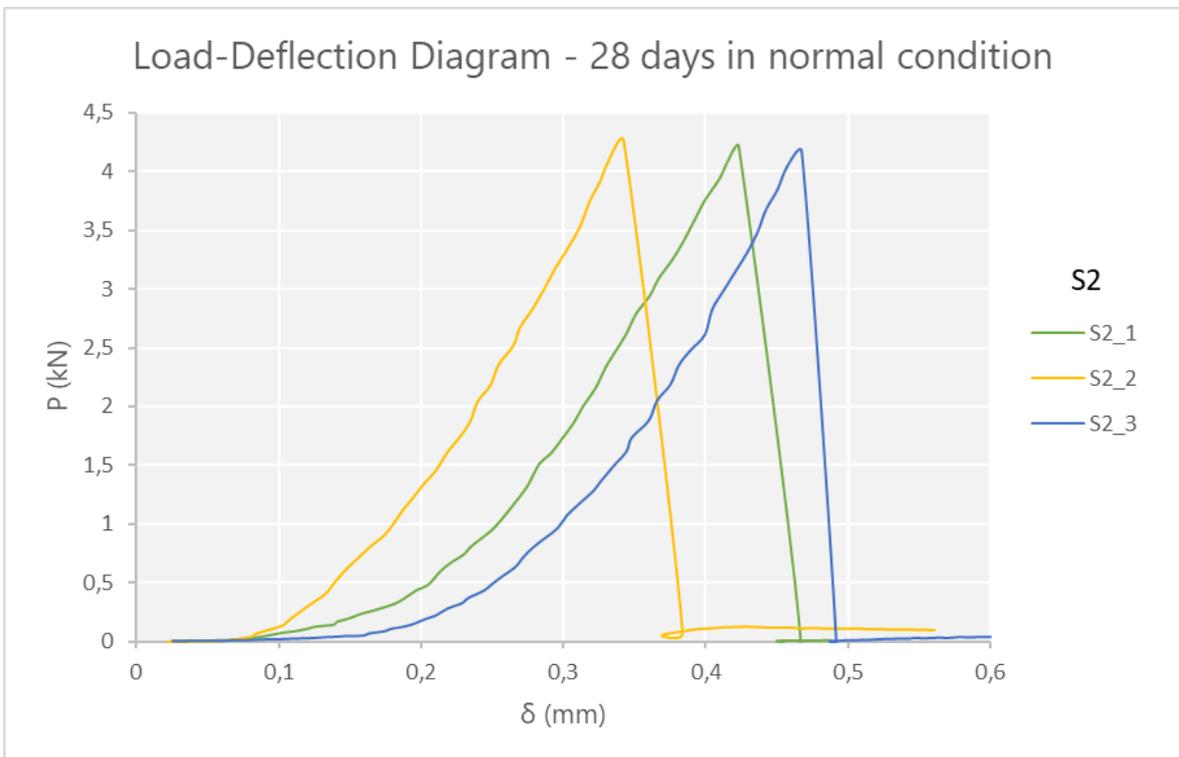
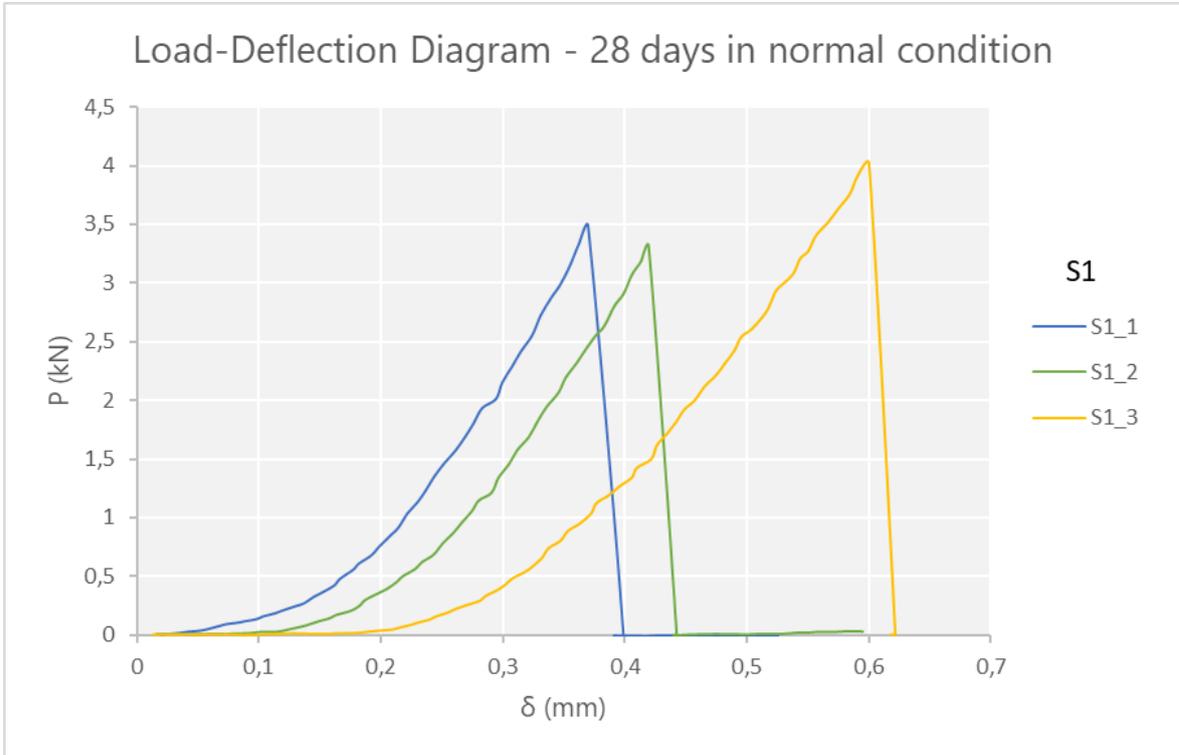
CEMENTO ALTO-ALCALINO – SERIE H

Resistenza a flessione



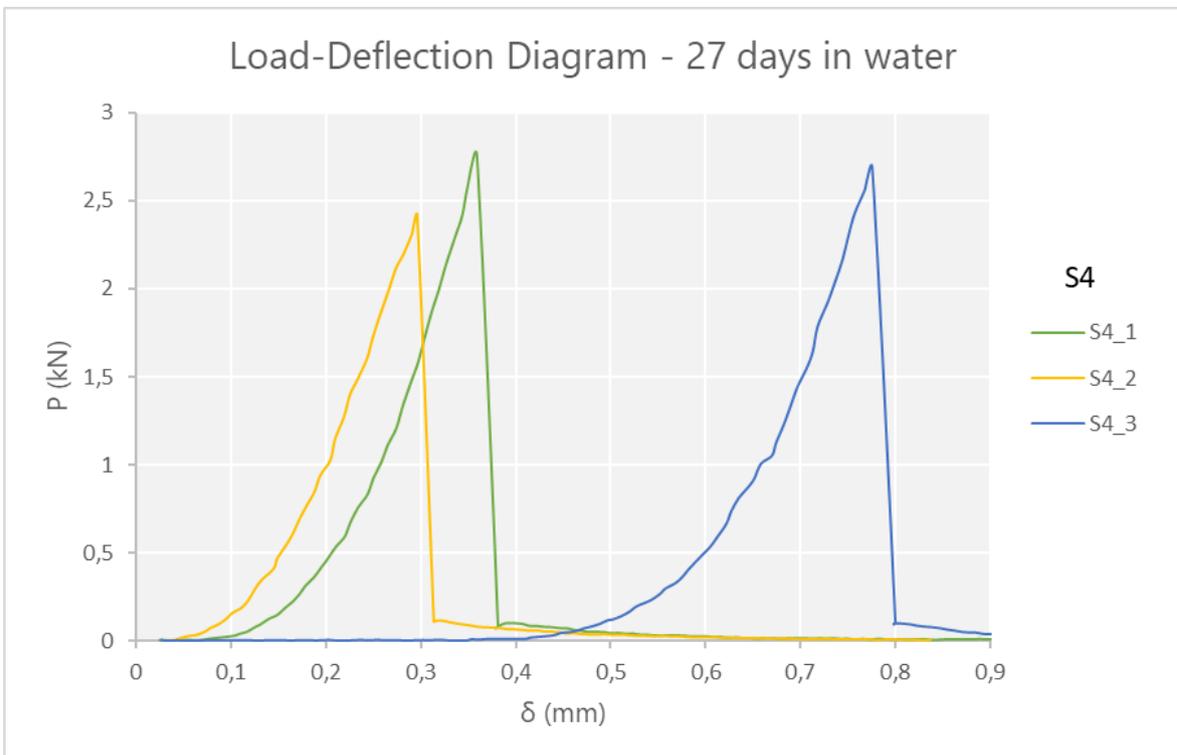
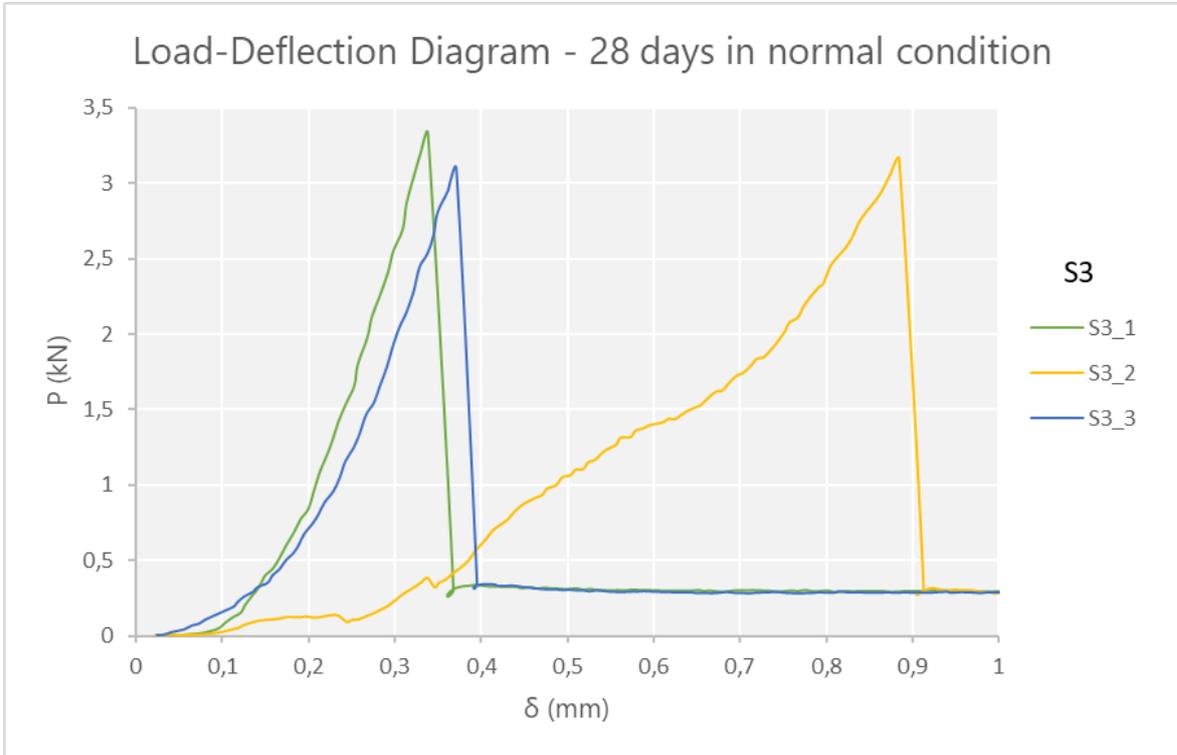
CEMENTO SOLFOALLUMINOSO – SERIE S

Resistenza a flessione



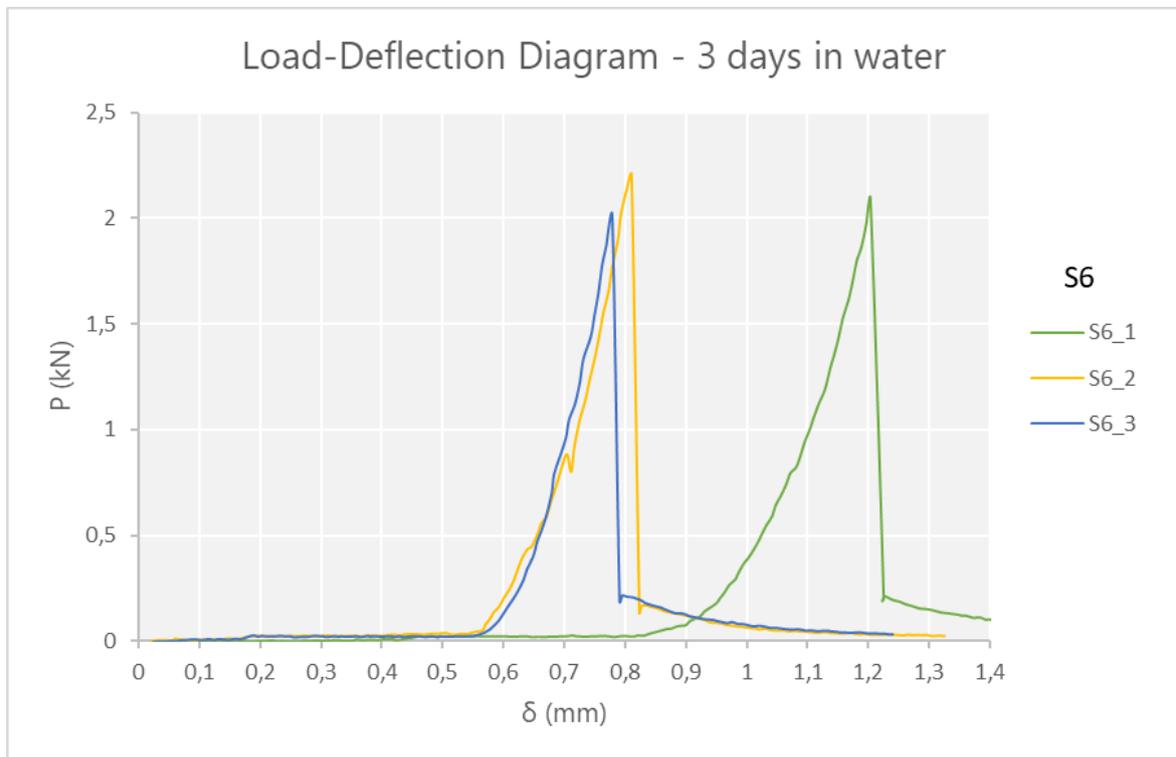
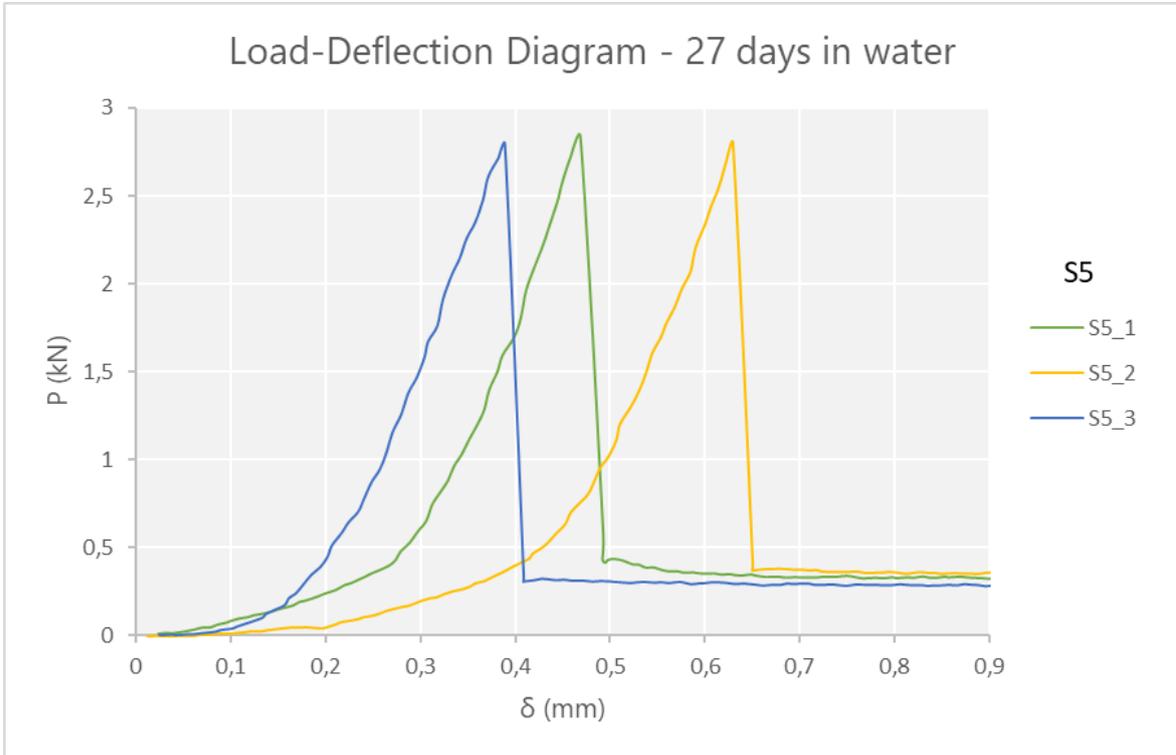
CEMENTO SOLFOALLUMINOSO – SERIE S

Resistenza a flessione



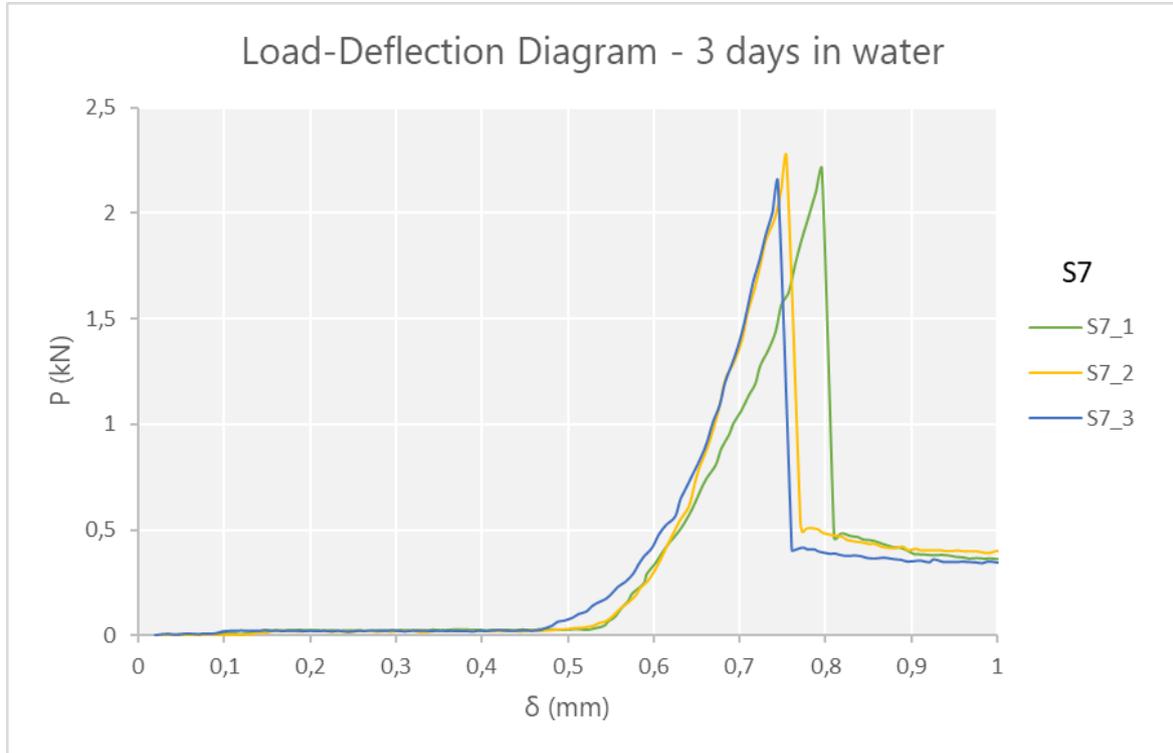
CEMENTO SOLFOALLUMINOSO – SERIE S

Resistenza a flessione



CEMENTO SOLFOALLUMINOSO – SERIE S

Resistenza a flessione

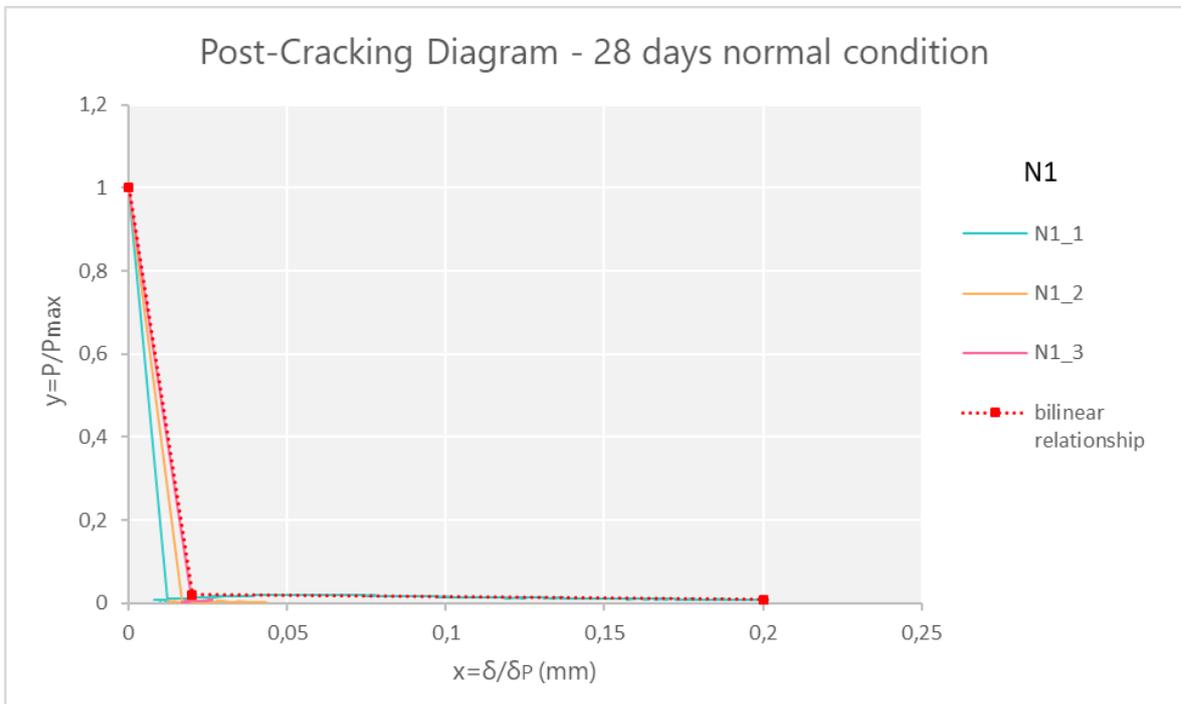


APPENDICE B

Vengono riportati di seguito i grafici post-fessurazione relativi ai 21 provini sottoposti alla prova di flessione su tre punti e la corrispondente semplificazione bilineare. Le malte cementizie realizzate con quattro diverse tipologie di cemento: Portland, basso-alcalino, alto-alcalino e solfoalluminoso, sono state indicate rispettivamente con la sigla (N, L, H, S). I tre diversi campioni per ogni provino, sono stati raggruppati in un unico grafico, ottenendo 7 grafici diversi, in funzione del periodo di stagionatura, ossia a 28 giorni in ambiente (temperatura di 20°C, U.R. 50%), 27 giorni in acqua e 3 giorni in acqua (temperatura di 20°C).

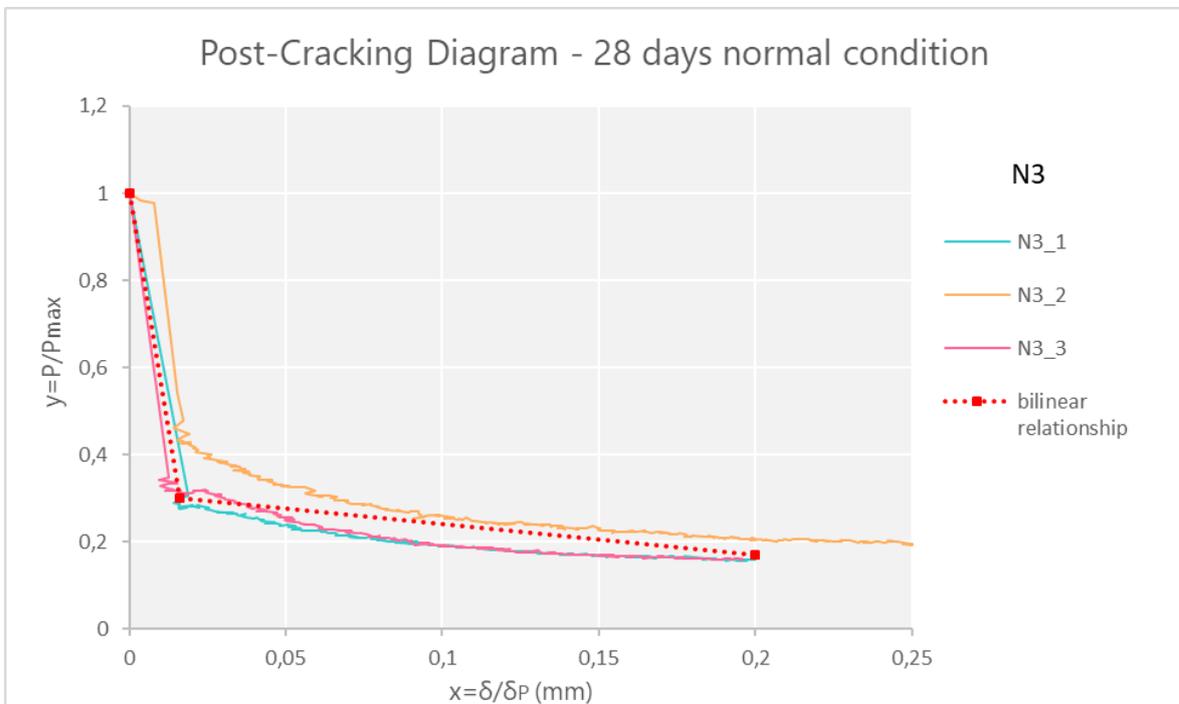
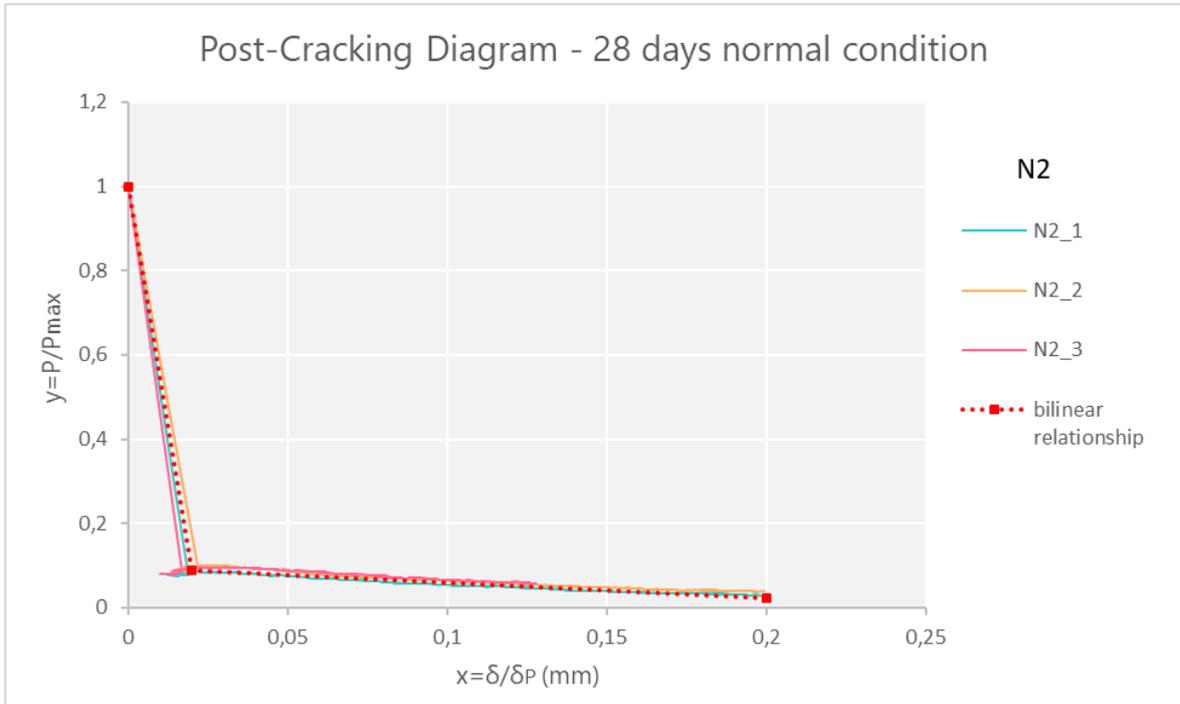
CEMENTO PORTLAND – SERIE N

Misura della duttilità



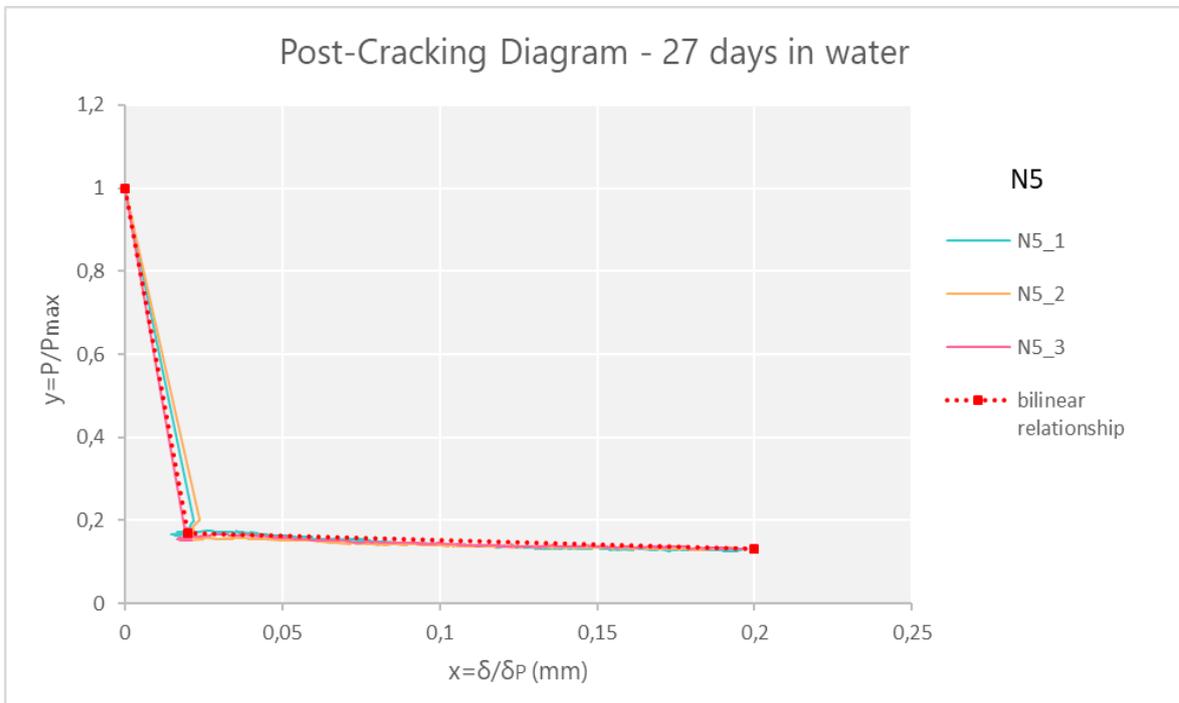
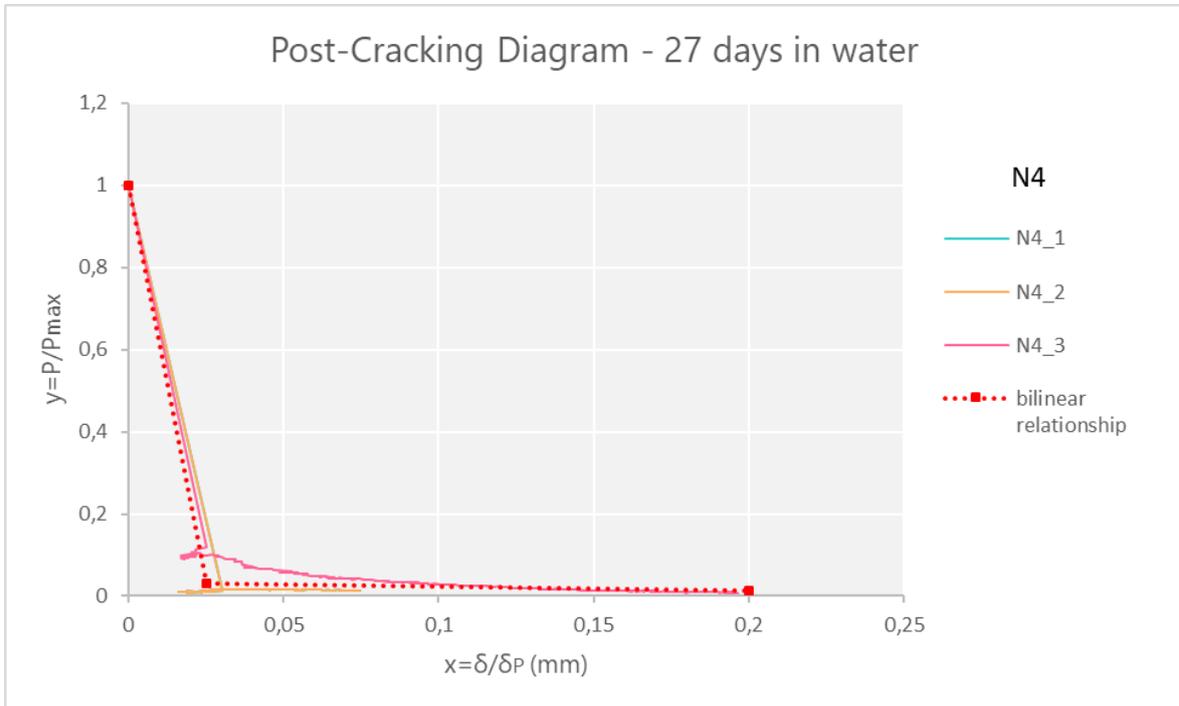
CEMENTO PORTLAND – SERIE N

Misura della duttilità



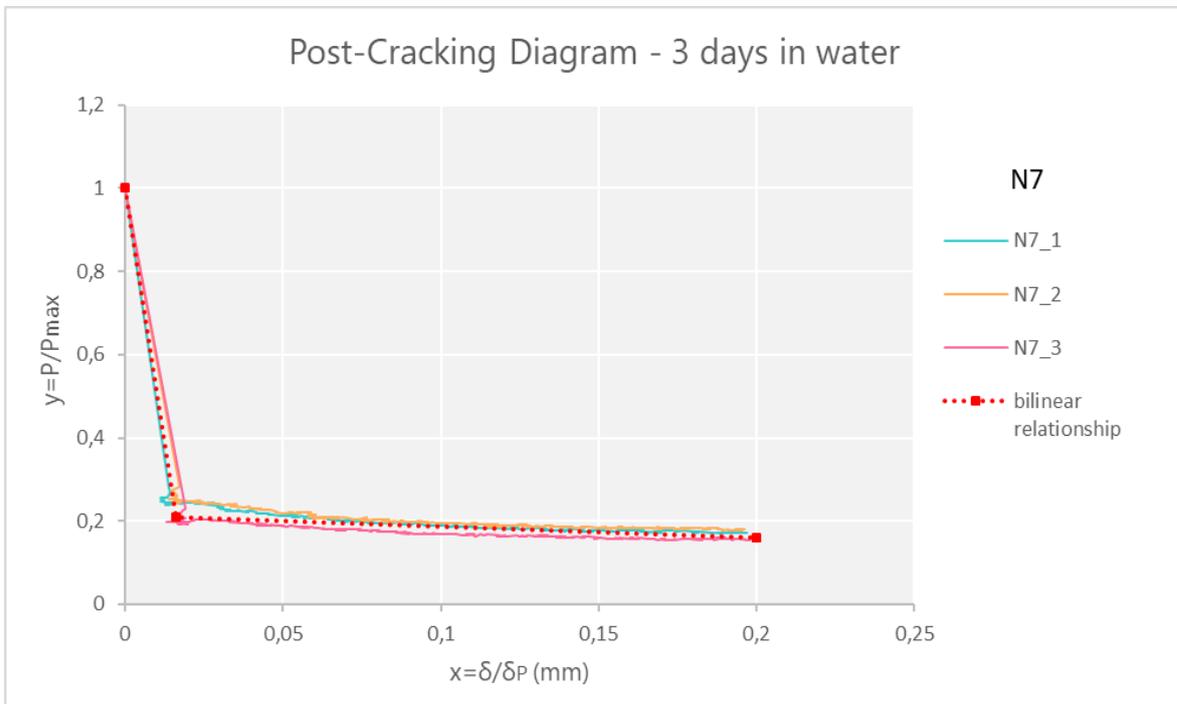
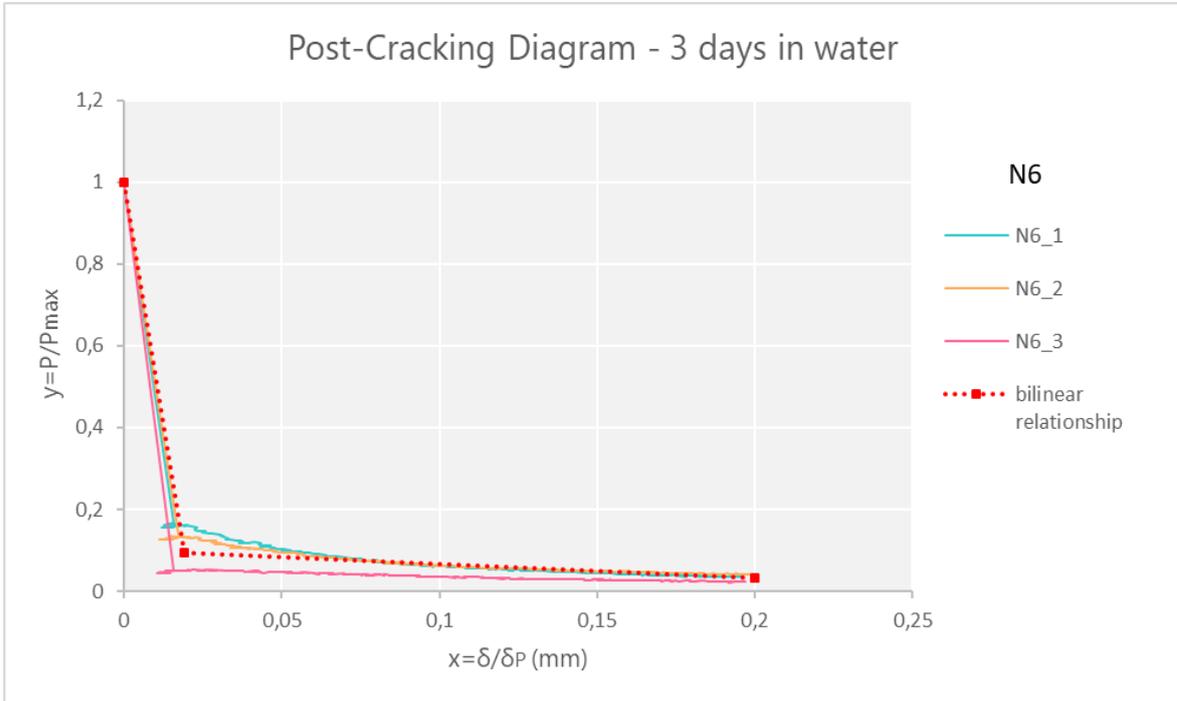
CEMENTO PORTLAND – SERIE N

Misura della duttilità



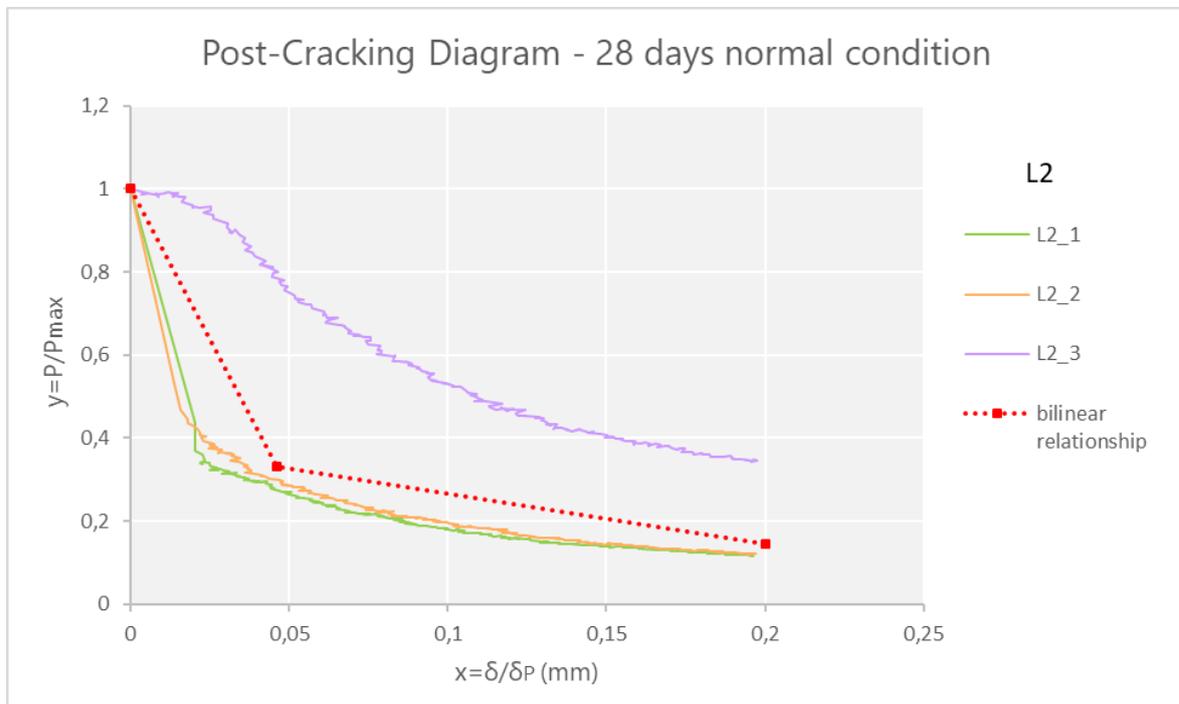
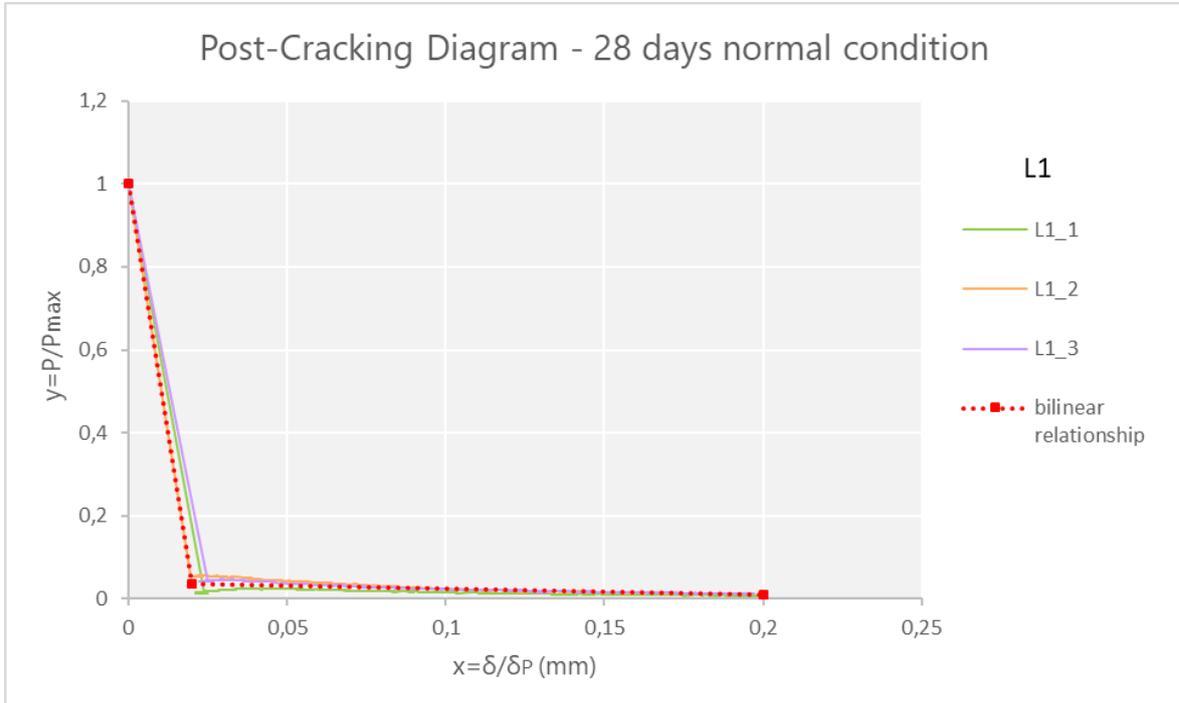
CEMENTO PORTLAND – SERIE N

Misura della duttilità



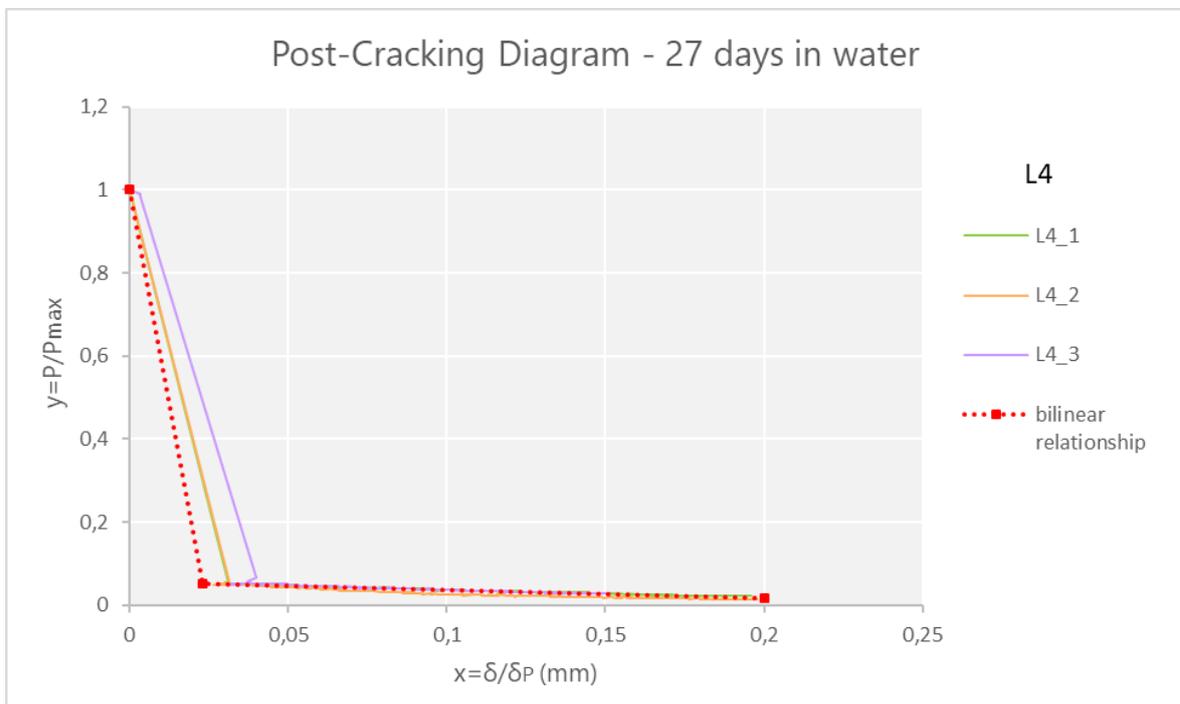
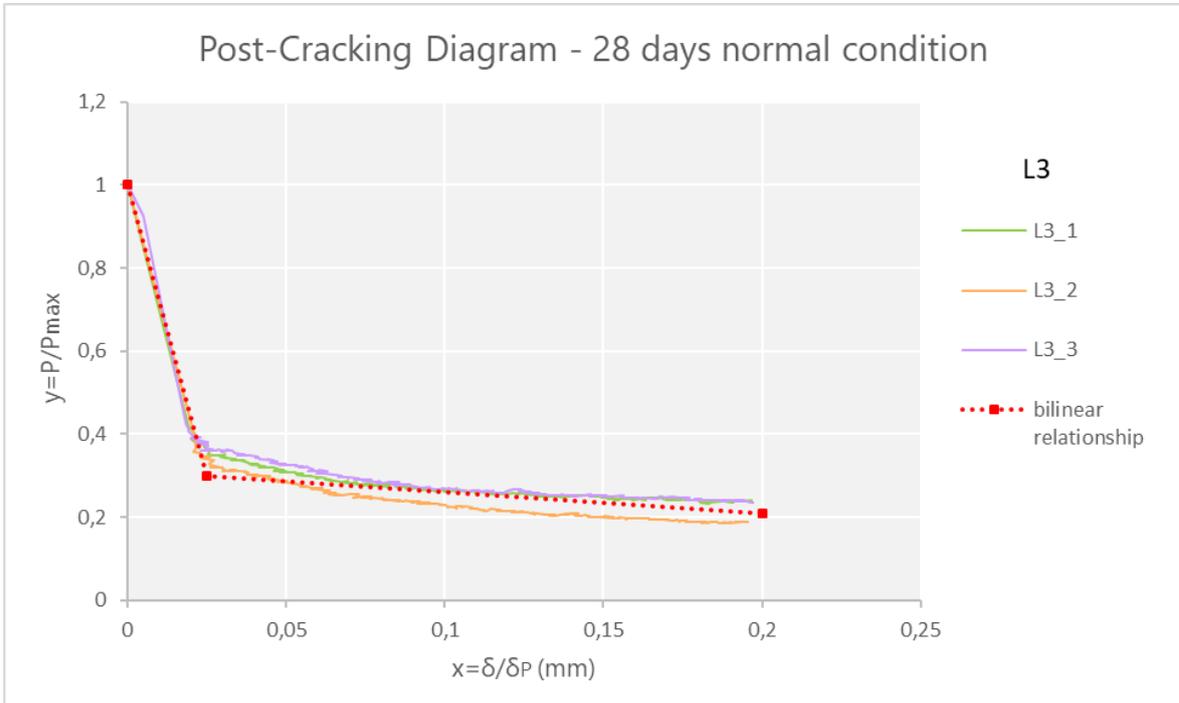
CEMENTO BASSO-ALCALINO – SERIE L

Misura della duttilità



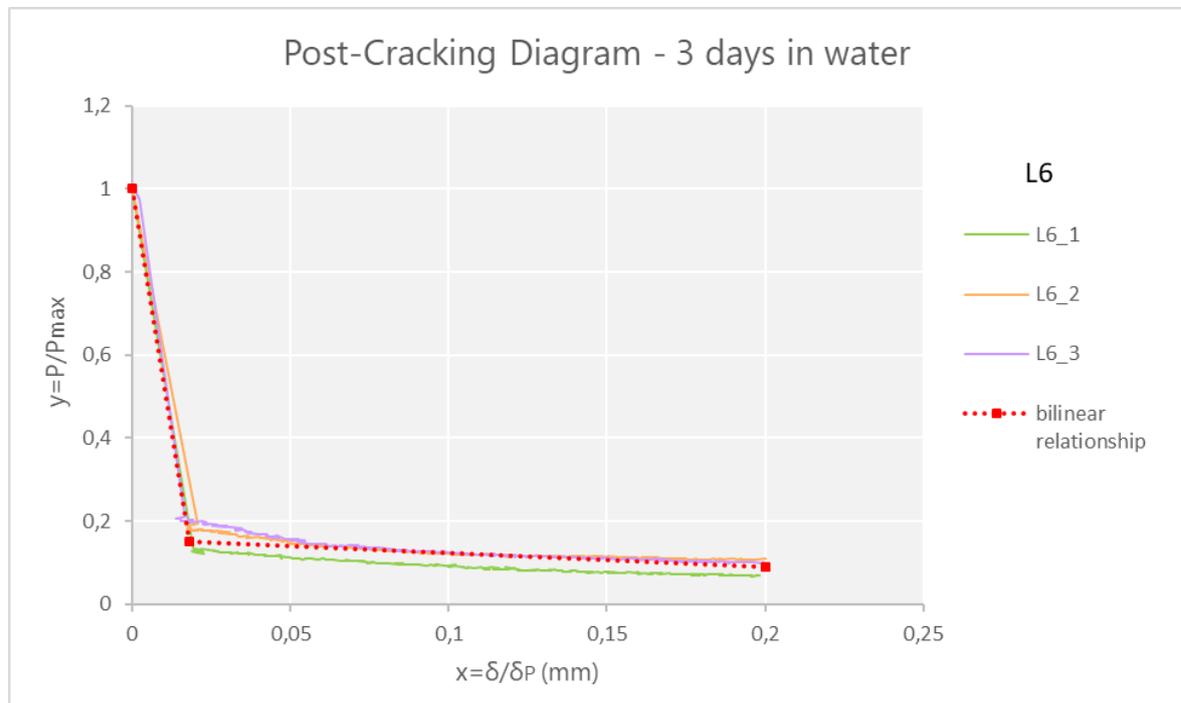
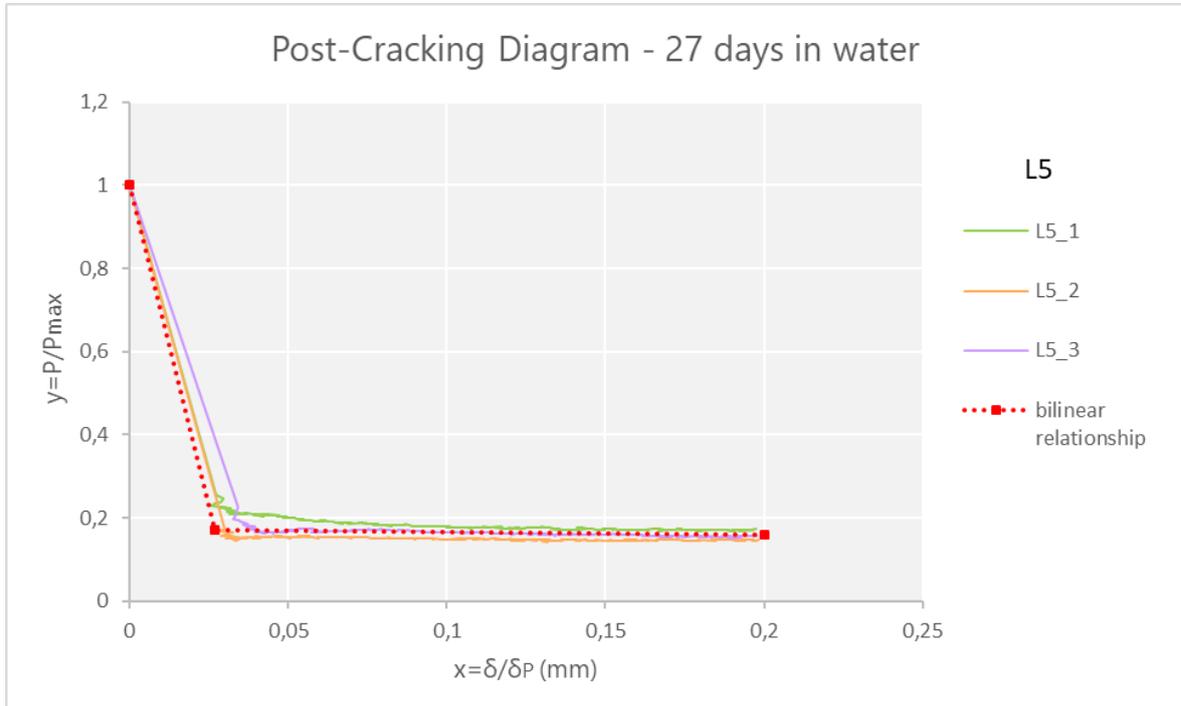
CEMENTO BASSO-ALCALINO – SERIE L

Misura della duttilità



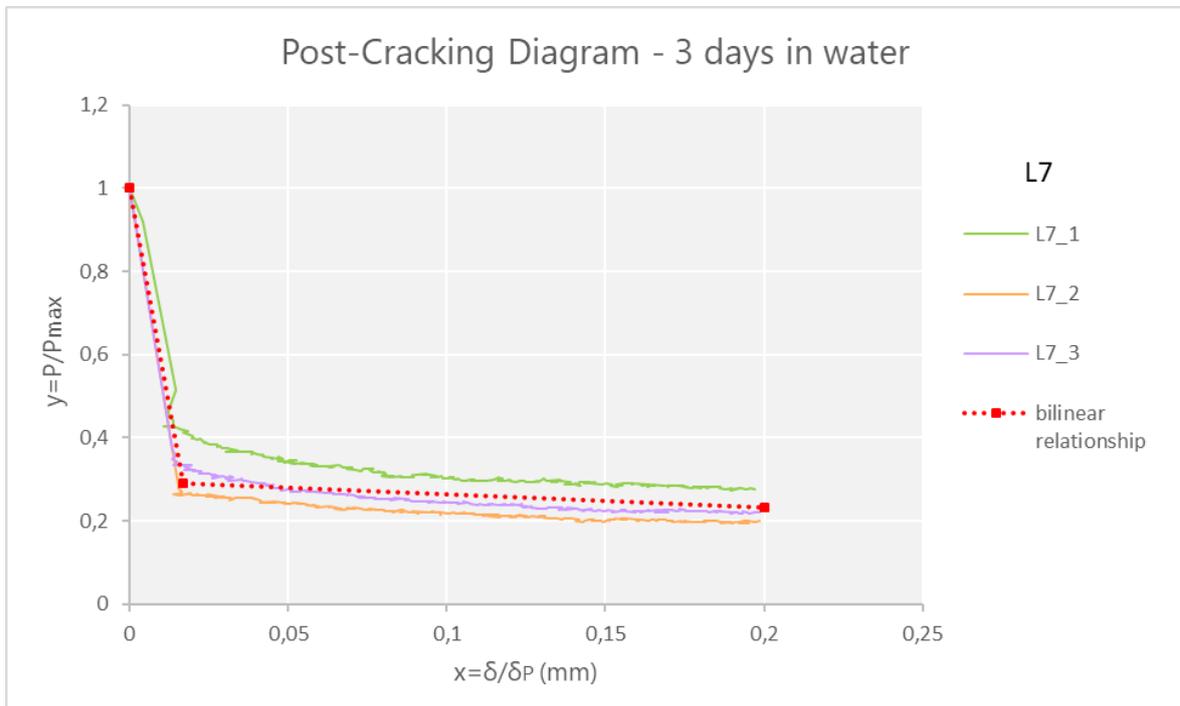
CEMENTO BASSO-ALCALINO – SERIE L

Misura della duttilità



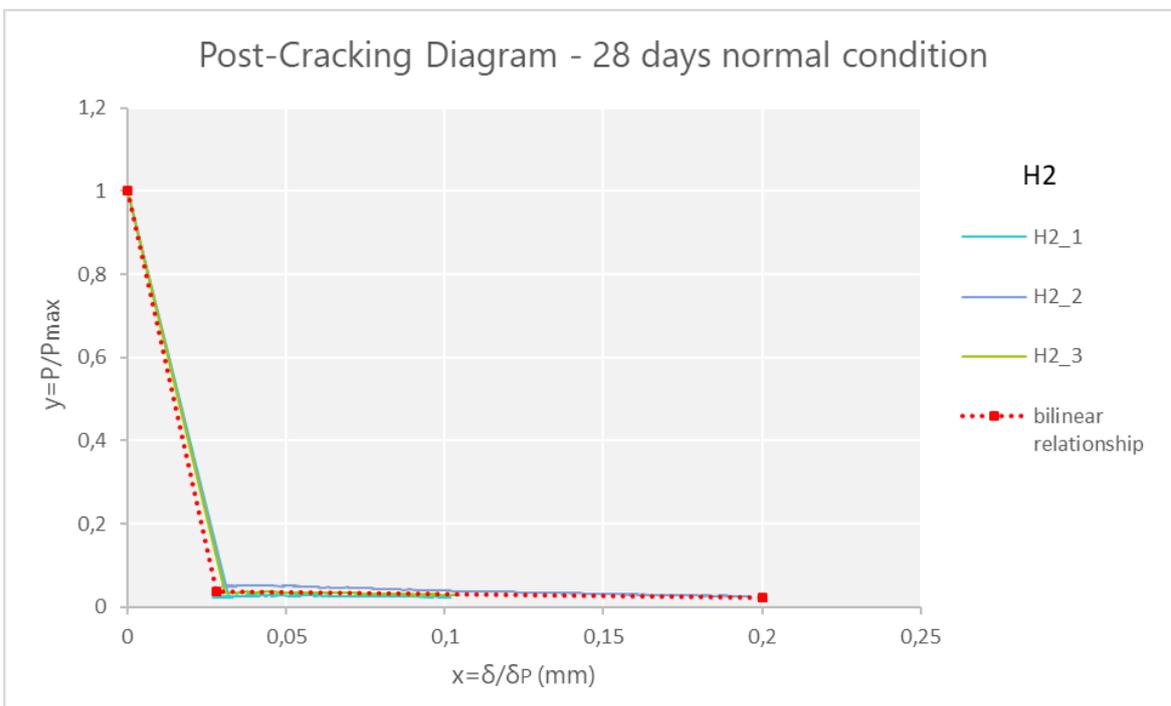
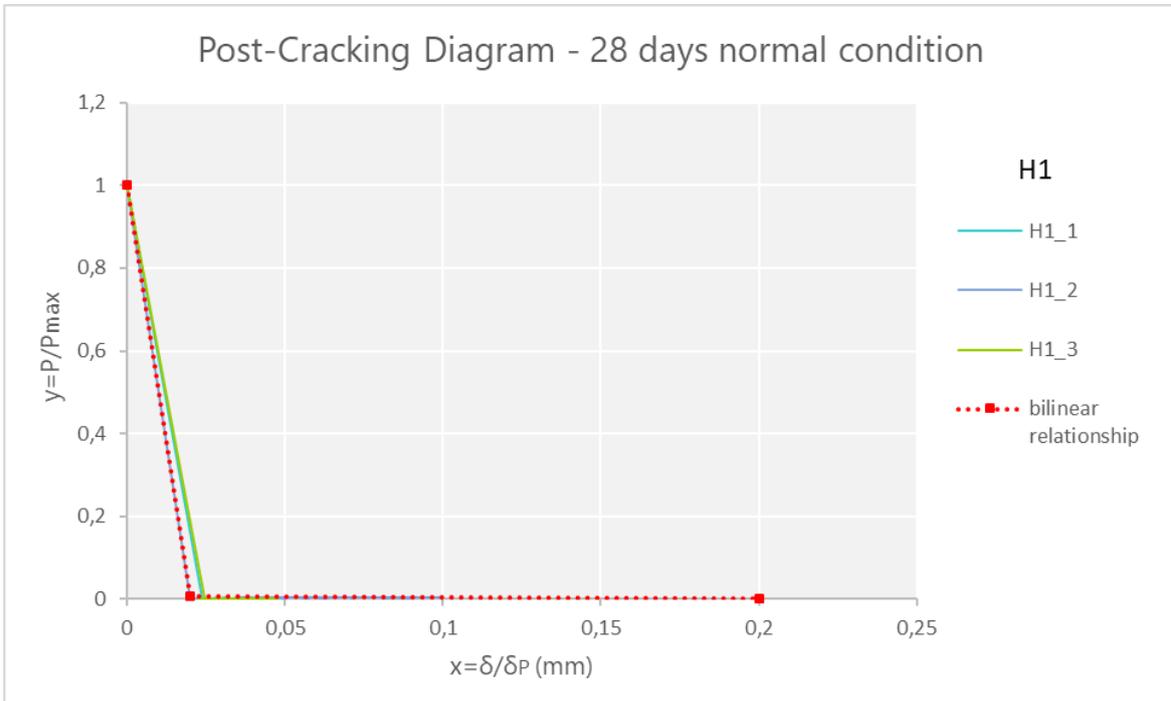
CEMENTO BASSO-ALCALINO – SERIE L

Misura della duttilità



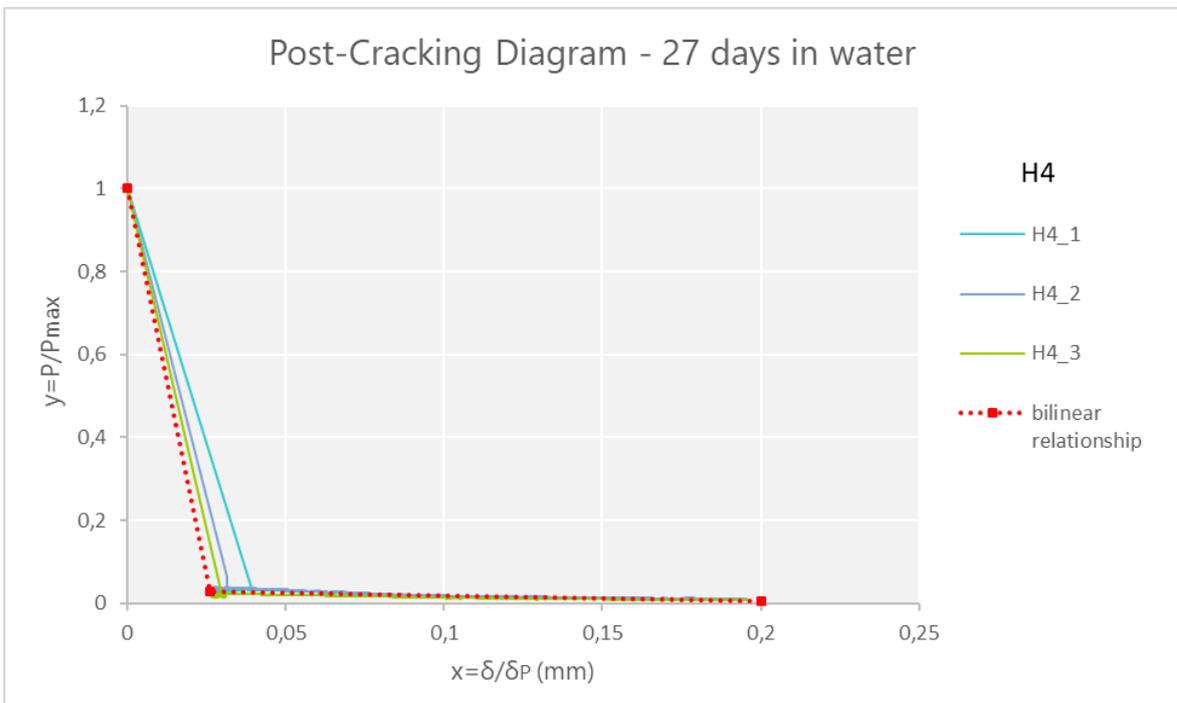
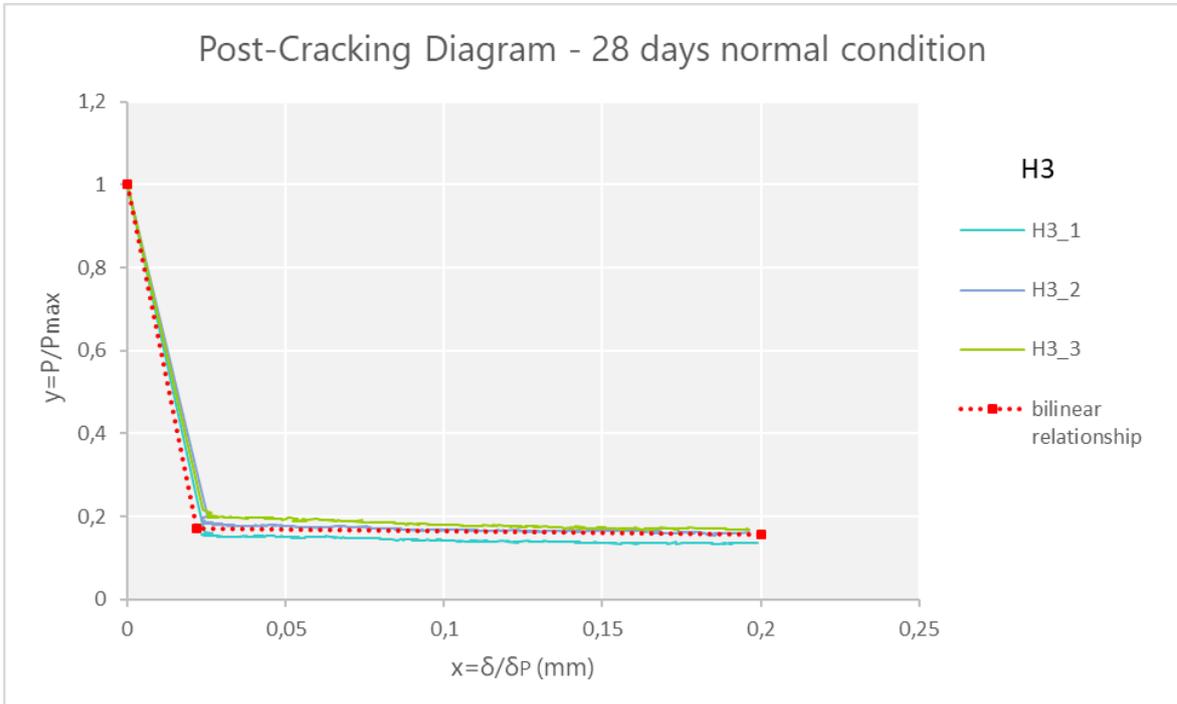
CEMENTO ALTO-ALCALINO – SERIE H

Misura della duttilità



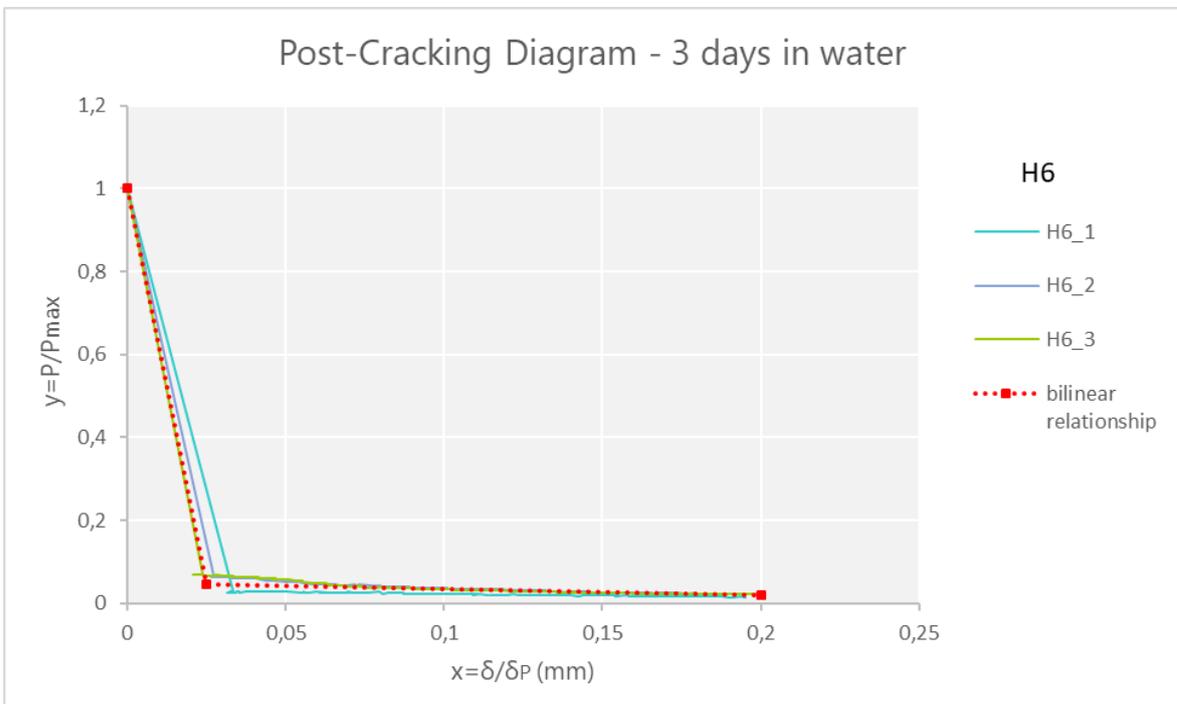
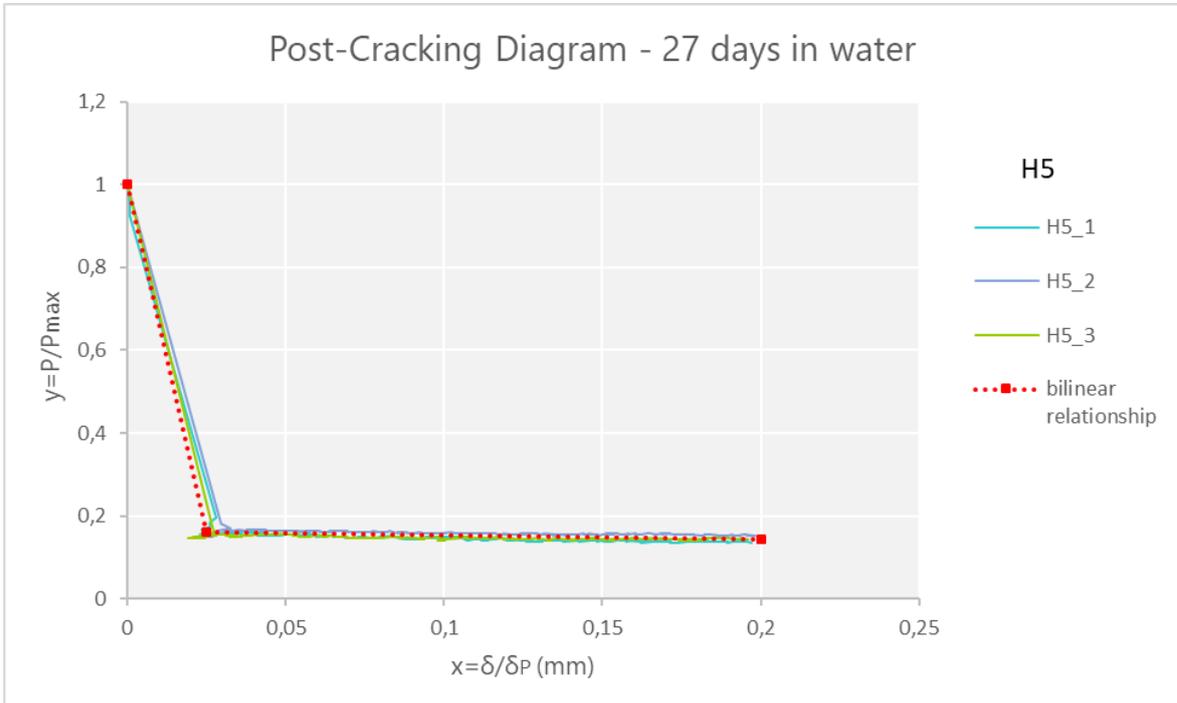
CEMENTO ALTO-ALCALINO – SERIE H

Misura della duttilità



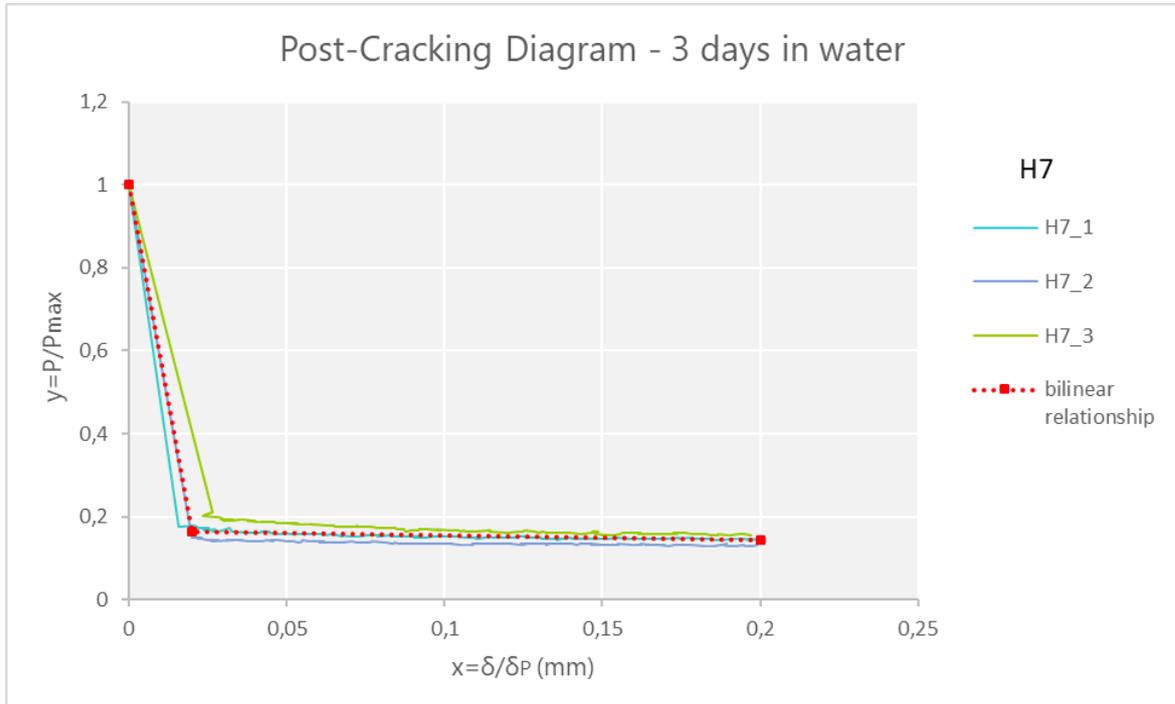
CEMENTO ALTO-ALCALINO – SERIE H

Misura della duttilità



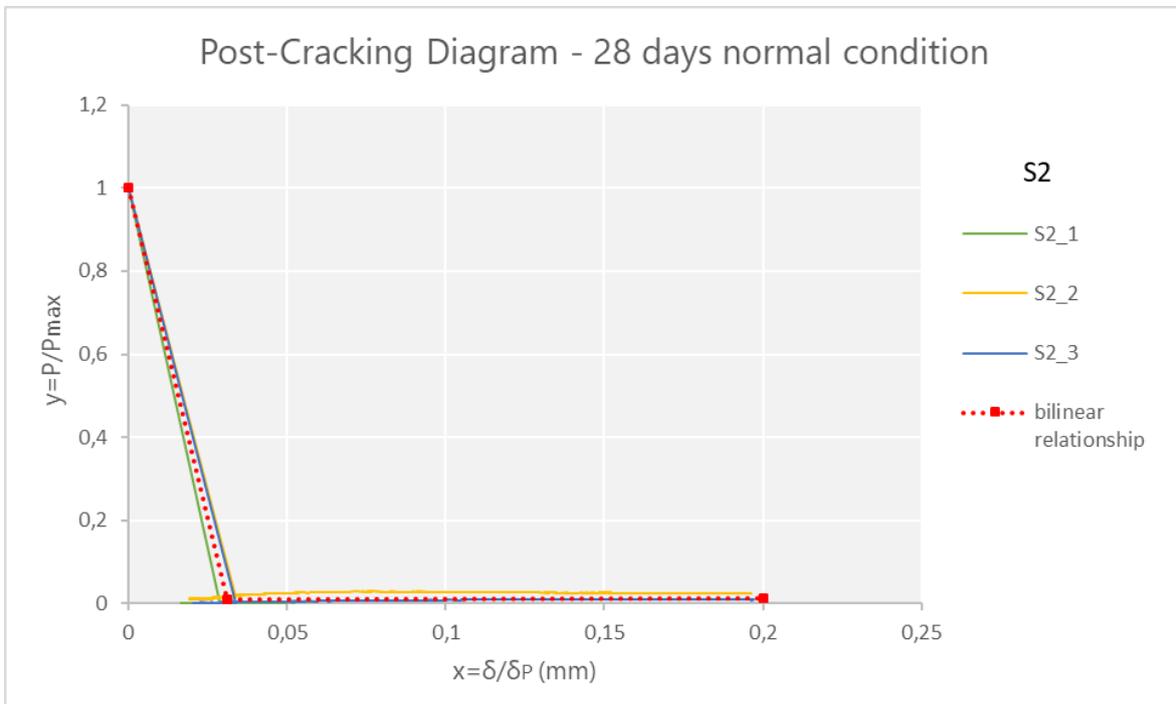
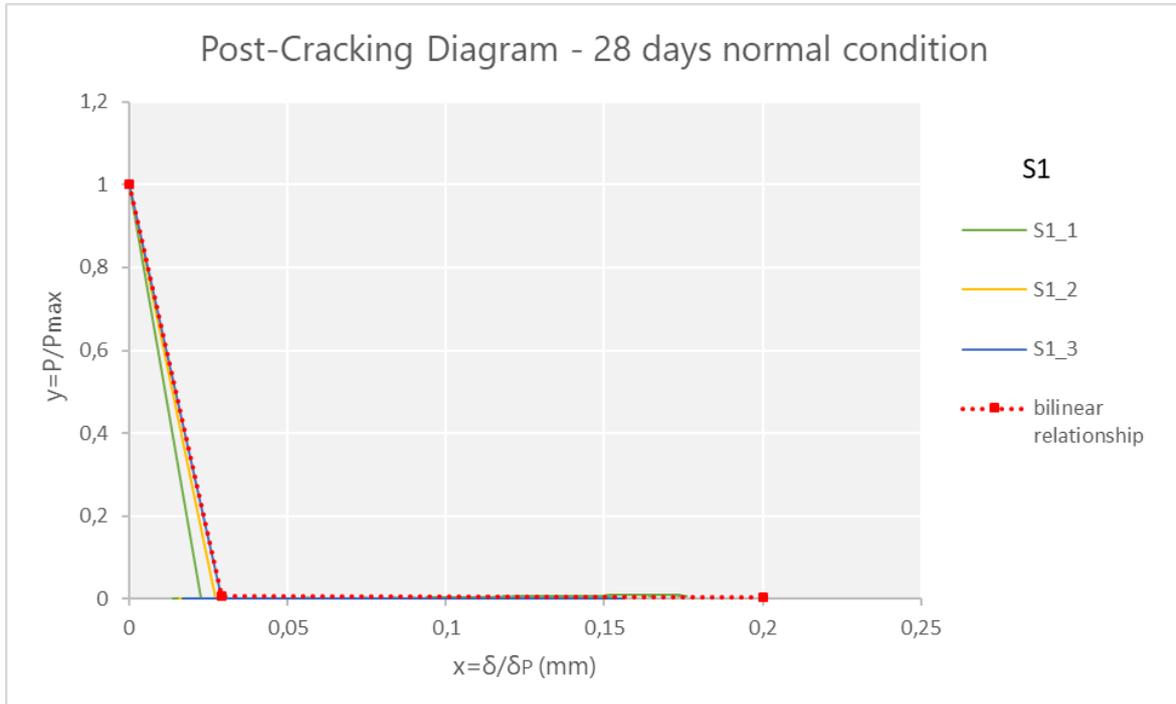
CEMENTO ALTO-ALCALINO – SERIE H

Misura della duttilità



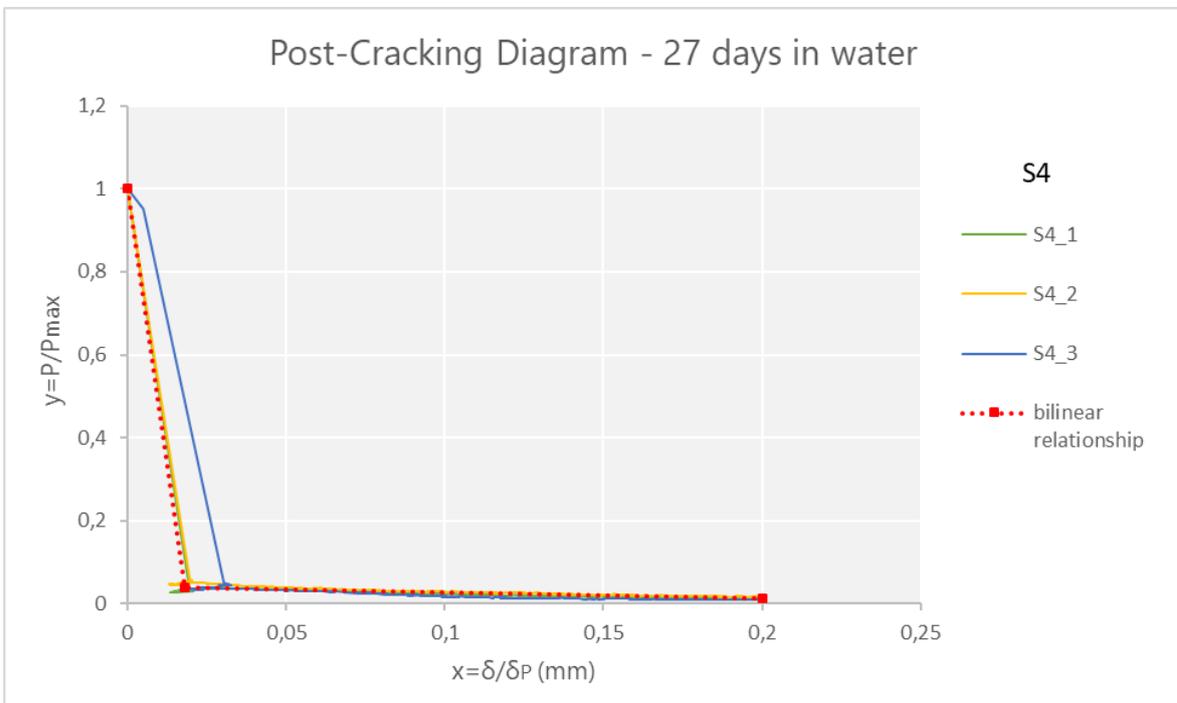
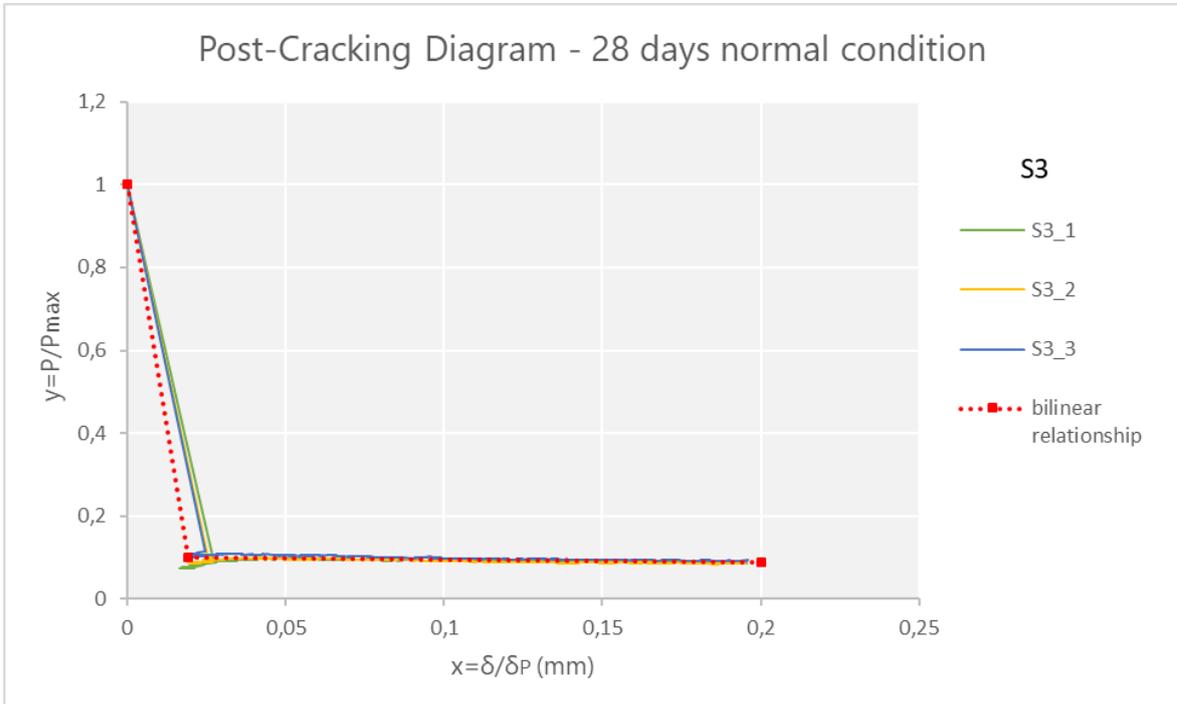
CEMENTO SOLFOALLUMINOSO – SERIE S

Misura della duttilità



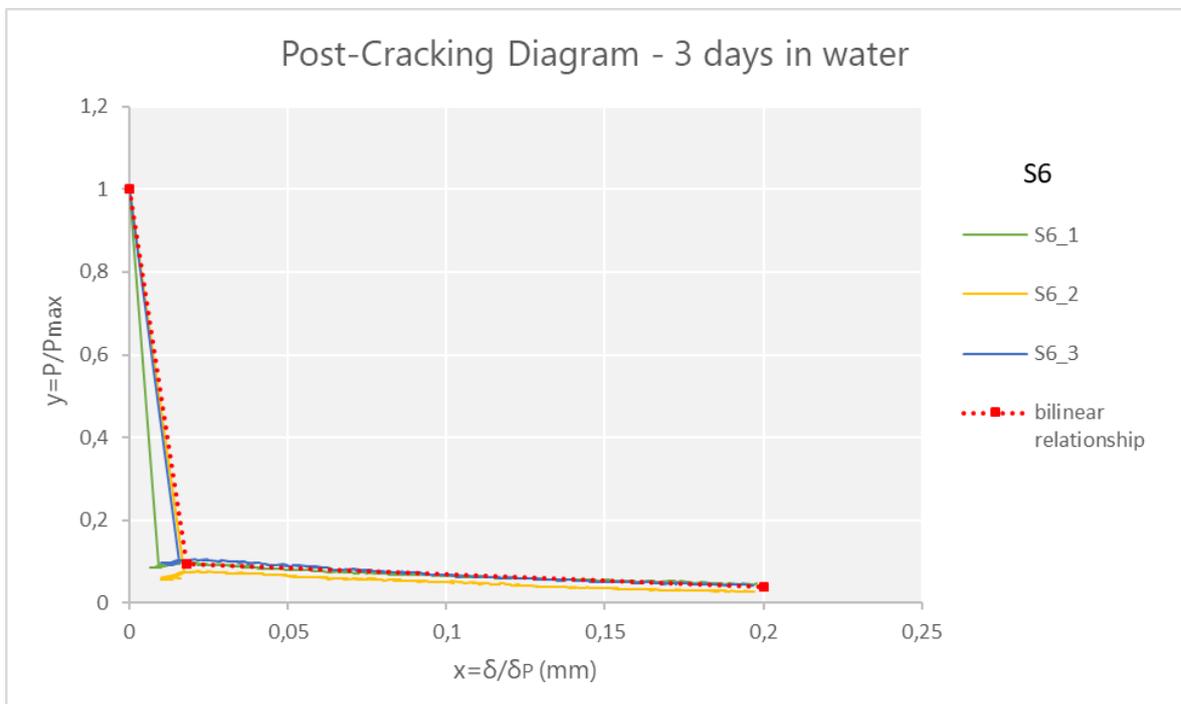
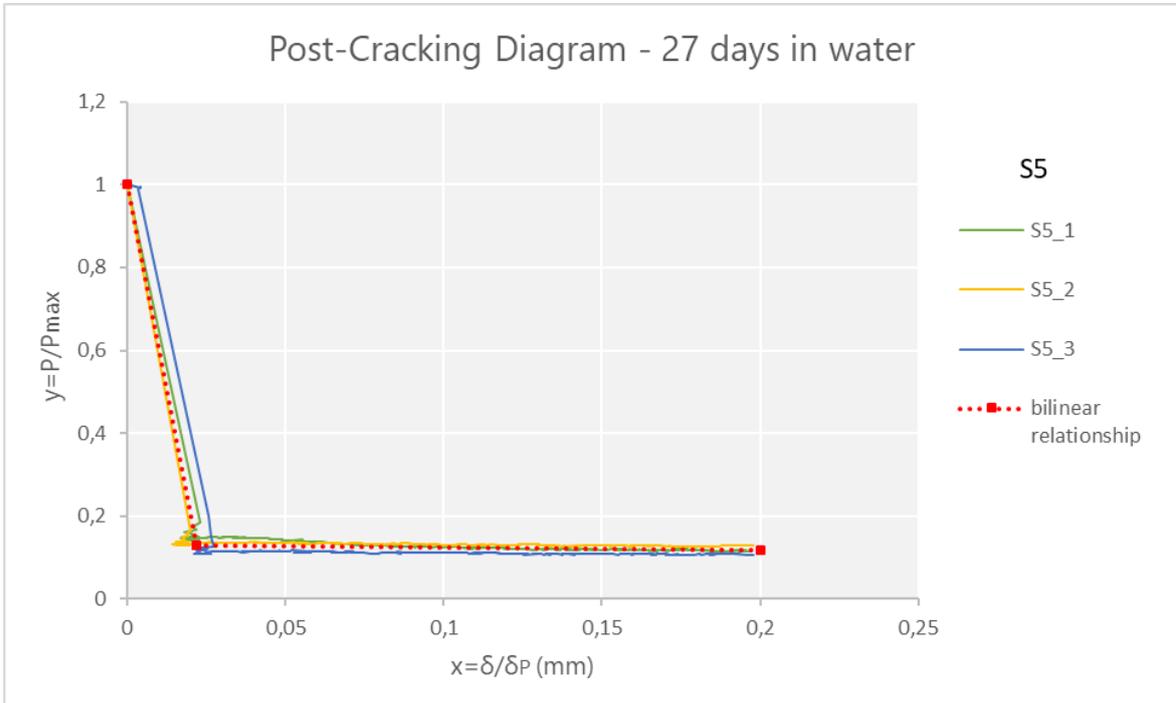
CEMENTO SOLFOALLUMINOSO – SERIE S

Misura della duttilità



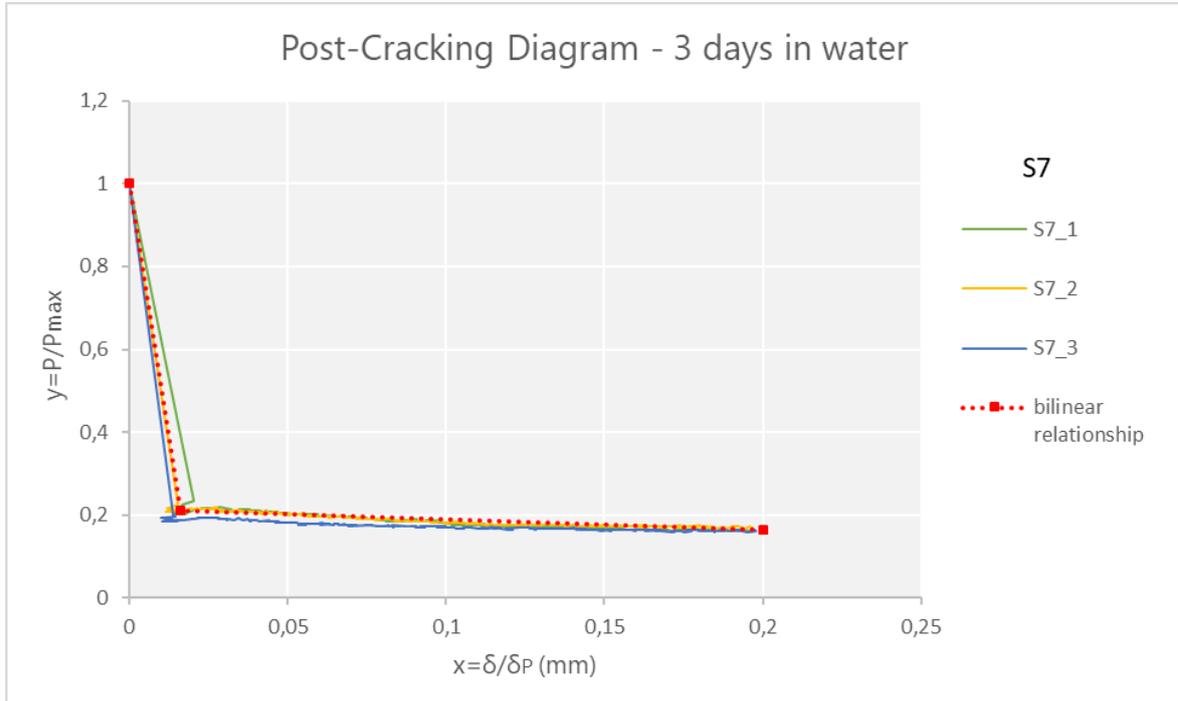
CEMENTO SOLFOALLUMINOSO – SERIE S

Resistenza a flessione



CEMENTO SOLFOALLUMINOSO – SERIE S

Resistenza a flessione



BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Galbiati, L. Granzini e C. Macchia, I calcestruzzi fibrorinforzati - Produzione e applicazione, Rimini: Maggioli Editore, 1996.
- [2] A. Magarò, «Calcestruzzi e polimeri: materiali compositi versatili dalle prestazioni,» Università Degli Studi Roma Tre, Roma, Aprile 2016.
- [3] CNR, «Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione e il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato,» CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE, Roma, 18 Giugno 2007 - rev. 4 Febbraio 2008.
- [4] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *Aggiornamento delle «Norme tecniche per le Costruzioni»*, Roma, 2018.
- [5] A. Faresin, *Architettura in calcestruzzo*, Torino: UTET- Scienze tecniche, 2012.
- [6] A. E. Naaman, *Fiber reinforced cement and concrete composites*, Sarasota, Florida, USA: Techno Press 3000, 2017.
- [7] M. Di Prisco, G. A. Plizzari e L. Vandewalle, «Calcestruzzo fibrorinforzato nel nuovo codice modello FIB,» in *Progettare e realizzare elementi strutturali in calcestruzzo fibrorinforzato*, Roma, 2011.
- [8] A. E. Naaman e H. W. Reinhardt, «Modeling bond components of deformed steel fibers in FRC composites,» in *High performance fiber reinforced composites, volume 1*, Ann Arbor, USA, RILEM Publications, 2003, pp. 35-48.
- [9] A. Bentur e S. Mindess, *Fibre reinforced cementitious composites*, CRC Press, 2014.
- [10] Hilti, «Hilti corporation,» Ottobre 2015. [Online]. Available: https://hilti.it/content/dam/documents/pdf/e4/engineering/manuals/Hilti_Corrosion-Handbook_W4412_it.pdf. [Consultato il giorno 4 Luglio 2018].
- [11] W. Kwana, C. Cheah, M. Ramli e K. Chang, «Alkali-resistant glass fiber reinforced high strength concrete in simulated aggressive environment,» *Materiales de Construcción*, vol. 68, n. 329, 2018.

- [12] E. Axinte, «Glasses as engineering materials: A review,» *Materials and Design*, n. 32, p. 1717–1732, 2011.
- [13] H. Saechtling, *Manuale delle materie plastiche*, Tecniche nuove, 2006.
- [14] G. Bertolotti e V. Capitelli, *Dizionario delle materie plastiche*, Milano: Tecniche Nuove, 2007.
- [15] A. M. Brandt, «Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering,» *Composite Structures*, vol. I, n. 86, pp. 3-9, 2008.
- [16] Y. Hao, L. Cheng, H. Hao e M. A. Shahin, «Enhancing fiber/matrix bonding in polypropylene fiber reinforced cementitious composites by microbially induced calcite precipitation,» *Cement and Concrete Composites*, n. 88, pp. 1-7, 2018.
- [17] L. Akand, M. Yang e X. Wang, «Effectiveness of chemical treatment on polypropylene fibers as reinforcement in pervious concrete,» *Construction and Building Materials*, n. 163, pp. 32-39, 2018.
- [18] S. J. Park, *Carbon Fibers*, Singapore: Springer, 2018.
- [19] P. Thakur e K. Singh, «A Review: Effect Of Carbon Fiber On Different Mixes Of Concrete,» *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 5, pp. 3996-3999, 2018.
- [20] W. Chuang, J. Geng-shengb, L. Bing-lianga, P. Leia, F. Yinga, G. Nia e L. Ke-zhic, «Dispersion of carbon fibers and conductivity of carbon fiber-reinforced,» *Ceramics International*, n. 43, p. 15122–15132, 2017.
- [21] S. K. Ramamoorthy, M. Skrifvars e A. Persson, «A Review of Natural Fibers Used in Biocomposites: Plant, Animal and Regenerated Cellulose Fibers,» *Polymer Reviews*, n. 55, p. 107–162, 2015.
- [22] F. Pacheco-Torgal e S. Jalali, «Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review,» *Construction and Building Materials*, n. 25, p. 575–581, 2011.

- [23] O. Faruk, A. K. Bledzki, H.-P. Fink e M. Sain, «Progress Report on Natural Fiber Reinforced Composites: Review,» *Macromolecular Materials and Engineering*, n. 299, pp. 9-26, 2014.
- [24] O. Onuaguluchi e N. Banthia, «Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review,» *Cement and Concrete Composites*, n. 68, pp. 96-108, 2016.
- [25] K. Hasan, «Textile Study Center,» Marzo 2018. [Online]. Available: <https://textilestudycenter.com/jute-fibre-properties-and-end-uses/>. [Consultato il giorno 19 Luglio 2018].
- [26] N. T. Mascia, R. M. Mayer e R. W. Moraes, «Analysis of wood laminated beams reinforced with sisal,» *Key Engineering Materials*, vol. 600, pp. 97-104, 2014.
- [27] M. E. Alves Fidelis, T. Vitorino Castro Pereira, O. d. F. M. Gomes e F. & T. F. R. D. de Andrade Silva, «The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers,» *Materials Research and Technology*, n. 2, pp. 149-157, 2013.
- [28] L. Zou, H. Jin, W.-Y. Lu e X. Li, «Nanoscale structural and mechanical characterization of the cell wall of bamboo fibers,» *Materials Science and Engineering*, vol. C, n. 29, p. 1375–1379, 2009.
- [29] H. Rajabinejad, I.-I. Bucîşcanu e S. S. Maier, «Current approaches for a raw wool waste management and unconventional valorization: a review,» pp. 1-36, 2018.
- [30] E. Martuscelli, *La fibra naturale che ha segnato la storia di popoli e nazioni. L'arte della lana dalla preistoria alla rivoluzione industriale*, Consiglio Nazionale delle Ricerche, 2003.
- [31] S. Nina, M. Bojan e M. S. Jakov, «Cement composites reinforced with sheep's wool,» Zagreb, Croatia, 2014.
- [32] A. P. Fantilli, S. Sicardi e F. Dotti, «The use of wool as fiber-reinforcement in cement-based mortar,» *Construction and Building Materials*, n. 139, pp. 562-569, 2017.
- [33] C. M. Helepiciuc, «SHEEP WOOL—A NATURAL MATERIAL USED IN CIVIL ENGINEERING,» *Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. Sectia Constructii, Arhitectura*, vol. 63, 2017.

- [34] R. D. Toledo Filho, K. Scrivener, G. L. England e K. Ghavami, «Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites,» *Cement & Concrete Composites*, n. 22, pp. 127-143, 2000.
- [35] J. Wei e C. Meyer, «Improving degradation resistance of sisal fiber in concrete through fiber surface treatment,» *Applied Surface Science*, n. 289, p. 511– 523, 2014.
- [36] A. P. Fantilli, D. Józwiak-Niedźwiedzka, K. Gibas e J. Dulnik, «THE COMPATIBILITY BETWEEN WOOL FIBERS AND CEMENTITIOUS MORTARS,» in *2nd International Conference on Bio-based Building Materials & 1st Conference on ECOlogical valorisation of GRANular and Fibrous materials*, Clermont-Ferrand, France, 2017.
- [37] UNI, EN. "196-1," *Metodi di prova dei cementi–Parte 1.*, 2005.
- [38] Buzzi Unicem, «Next: Legante idraulico a base di clinker solfoalluminato - Manuale di utilizzo,» Casale Monferrato [AL], 2017.
- [39] G. Valenti, «Leganti idraulici per calcestruzzi eco-compatibili e cementi innovativi a base di solfoalluminato di calcio,» *ENCO Journal*, pp. 14-19, 2010.
- [40] UNI EN 1008 : *Acqua d'impasto per il calcestruzzo - Specifiche di campionamento, di prova e di valutazione dell'idoneità dell'acqua, incluse le acque di recupero dei processi dell'industria del calcestruzzo, come acqua d'impasto del calcestruzzo*, 2003.
- [41] A. P. Fantilli, S. Sicardi e F. Dotti, «The use of wool as fiber-reinforcement in cement-based mortar,» *Construction and Building Materials*, n. 139, p. 562–569, 2017.
- [42] UNI EN 14889-2; *Fibre per calcestruzzo - Parte 2: Fibre polimeriche - Definizioni, specificazioni e conformità*, 2006.
- [43] Mapei, «Mapei,» Novembre 2016. [Online]. Available: https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider2/products-documents/751-mapefibrens12-it52c61f7479c562e49128ff01007028e9.pdf?sfvrsn=cc4d7d0e_0. [Consultato il giorno 31 Luglio 2018].