

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Studio sperimentale sulle proprietà a trazione dei sistemi TRM (Textile Reinforced Mortar) al variare dello spessore della matrice inorganica.

Experimental study on the tensile properties of TRM (Textile Reinforced Mortar) systems by varying the thickness of the inorganic matrix.

Candidata:

Ilenia Orlando

Relatore:

Prof. Jacopo Donnini

Correlatore:

Prof.ssa Valeria Corinaldesi

Anno Accademico 2020-2021

Indice

1	Introduzione	1
2	I materiali compositi.....	3
2.1	Generalità.....	3
2.2	Classificazione dei materiali compositi	4
2.3	I materiali componenti	5
2.3.1	Le matrici.....	6
2.3.2	I rinforzi.....	7
2.4	Tipologie di prove sperimentali per la caratterizzazione dei compositi	10
2.4.1	Prove di trazione su provini di FRCM.....	10
2.4.1.1	Comportamento meccanico a trazione.....	10
2.4.2	Prove di distacco dal supporto.....	13
2.5	I limiti dei sistemi di rinforzo a matrice inorganica.....	14
2.6	Quadro normativo	16
2.7	Applicazioni dei sistemi FRCM	18
2.7.1	Applicazioni su strutture di muratura	19
2.7.2	Applicazioni su strutture in calcestruzzo armato.....	20
3	Programma sperimentale.....	23
3.1	Oggetto della sperimentazione.....	23
3.2	I materiali utilizzati	23
3.2.1	Rete di fibra Glasstex® Struktura 250 – Biemme S.r.l	23
3.2.2	Malta BM Idroplaster NHL – M15 – Biemme S.r.l	23
3.3	Preparazione dei provini di TRM	24
4	Prove di trazione su campioni di TRM	29
4.1	Elaborazione dei risultati	29
4.2	Risultati sperimentali	30
4.3	Confronto tra i risultati	34
5	Valutazione della resistenza a trazione della matrice.....	39
5.1	Prove di resistenza a flessione e a compressione.....	39
5.1.1	Elaborazione dei risultati	40
5.1.2	Risultati sperimentali.....	41
5.2	Prova a trazione uniassiale.....	44
5.2.1	Elaborazione dei risultati	44
5.2.2	Risultati sperimentali.....	44

5.3	Correlazione tra i risultati della prova a trazione uniassiale e delle prove a flessione e compressione.	50
5.4	Confronto tra la tensione di prima fessurazione e la tensione ultima a trazione della malta.	52
6	Stima del modulo elastico nel tratto fessurato dei campioni di TRM.	54
6.1	Confronto dei Moduli elastici delle diverse tipologie di provini.	57
7	Valutazione del modulo elastico dinamico della matrice.	60
	Osservazioni finali.	62
	Riferimenti.	64
	Allegati.	65

1 Introduzione

Il patrimonio edilizio italiano annovera costruzioni di rilevante valore storico e architettonico, oltre che realizzazioni più recenti di muratura, di calcestruzzo armato e acciaio. La maggior parte di questi, progettati prima della comparsa dei moderni codici di costruzione, necessita di interventi di riabilitazione strutturale, dovuti ad un degrado fisiologico delle strutture, a mutate condizioni di carico non previste in fase progettuale o ad adeguamenti nei confronti di nuove normative di sicurezza. I recenti eventi sismici in Italia hanno chiaramente evidenziato l'elevata vulnerabilità degli edifici esistenti, specialmente delle strutture in muratura, i quali sono spesso caratterizzati da materiali con basse prestazioni meccaniche, scarse connessioni tra le pareti e altre carenze strutturali. I materiali compositi sono stati dunque, negli ultimi anni, oggetto di notevole sviluppo nel campo dell'Ingegneria Civile, offrendo elevate prestazioni a bassa invasività degli interventi, rendendoli estremamente efficaci principalmente come sistemi di rinforzo di strutture esistenti in muratura e C.A. Il vantaggio di utilizzare sistemi a base inorganica risiede nella capacità della matrice di garantire una buona permeabilità al vapore, resistenza alle alte temperature, resistenza agli ambienti aggressivi e nella parziale reversibilità dell'intervento, la quale, non può essere garantita nel caso degli FRP (Fiber Reinforced Polymer). Il termine TRM (Textile Reinforced Mortar) venne introdotto per descrivere un nuovo materiale composito che combina fibre avanzate, in forma di tessuti a maglia aperta, con matrici inorganiche. In questa categoria rientrano gli FRCM (Fabric Reinforced Cementitious Matrix) e i CRM (Composite Reinforced Mortar) i quali risultano essere ad oggi i più diffusi. I primi solitamente hanno uno spessore compreso tra i 6 e i 15 mm e il rinforzo è costituito da fibre secche o parzialmente rivestite. I CRM sono caratterizzati da uno spessore maggiore, tipicamente tra i 30 e i 50 mm, le fibre sono completamente impregnate con una matrice polimerica termoindurente fino a formare una griglia relativamente rigida. Tuttavia, data la recente introduzione di questi materiali negli interventi di restauro e rinforzo strutturale, il loro utilizzo si scontra con la carenza di indicazioni normative. Per cui negli ultimi due decenni i lavori di ricerca sono stati incentrati sulla dimostrazione dell'efficacia dei sistemi di rinforzo applicati su diverse tipologie di elementi strutturali e sulla proposta di formulazioni analitiche volte alla progettazione degli interventi.

In questo elaborato di tesi verrà descritta la campagna sperimentale condotta sui sistemi TRM al fine di valutare l'effetto dello spessore della matrice cementizia sul

comportamento a trazione del composito. In seguito, saranno esposti i risultati ottenuti e l'elaborazione dei dati allo scopo di trarre delle correlazioni tra le proprietà a trazione del composito e le proprietà meccaniche della matrice cementizia.

2 I materiali compositi

2.1 Generalità

Si definisce materiale composito una miscela o combinazione di due o più materiali, definiti fasi, che differiscono nella forma, nella composizione chimica e nelle proprietà fisiche e che sono insolubili l'uno nell'altro. Il materiale ottenuto da tale combinazione è un sistema eterogeneo in cui i singoli costituenti sono fisicamente assemblati e risultano facilmente identificabili. I materiali compositi sono caratterizzati dalla presenza di una fase continua detta *matrice*, materiale che agisce da legante e definisce il volume finale del composito, al cui interno è dispersa una fase discontinua chiamata *rinforzo*, un materiale di natura fibrosa. Il materiale finale è caratterizzato da proprietà chimico-fisiche differenti rispetto a quelle dei singoli costituenti di base la cui sinergia determina le proprietà del composito stesso. La natura dei componenti che formano il composito contribuisce in maniera determinante alla definizione delle proprietà finali del materiale. Tuttavia, per ottenere un composito ad elevata resistenza meccanica, non è sufficiente utilizzare fibre “resistenti” è anche indispensabile garantire una buona adesione tra la matrice ed il rinforzo. Questo comporta la presenza di una terza fase, detta *interfaccia* o *interfase* (Figura 1), le cui caratteristiche possono essere modificate mediante l'utilizzo di agenti chimici in grado di creare legami che migliorano l'adesione interfacciale tra le fasi, contribuendo ad un miglior trasferimento delle tensioni tra di esse. Le prestazioni finali possono essere incrementate mediante l'aggiunta di *filler*, materiale in forma particellare che viene introdotto per migliorare alcune proprietà specifiche. A seconda della tipologia di filler impiegata è possibile modificare le proprietà di resistenza al fuoco, migliorare le proprietà di resistenza all'impatto e all'abrasione, ecc. [1]

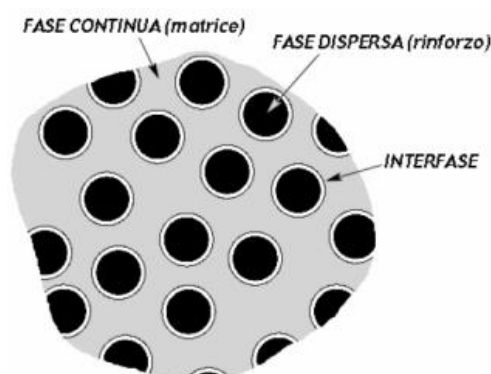


Figura 1 - Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito [1]

2.2 Classificazione dei materiali compositi

In letteratura i materiali compositi fibrorinforzati vengono menzionati con diversi acronimi, una classificazione comunemente utilizzata è basata sulla tipologia di matrice che costituisce il materiale composito e dipende dalla geometria e dalla disposizione della fibra di rinforzo. In figura è riportata una schematizzazione di tale classificazione.

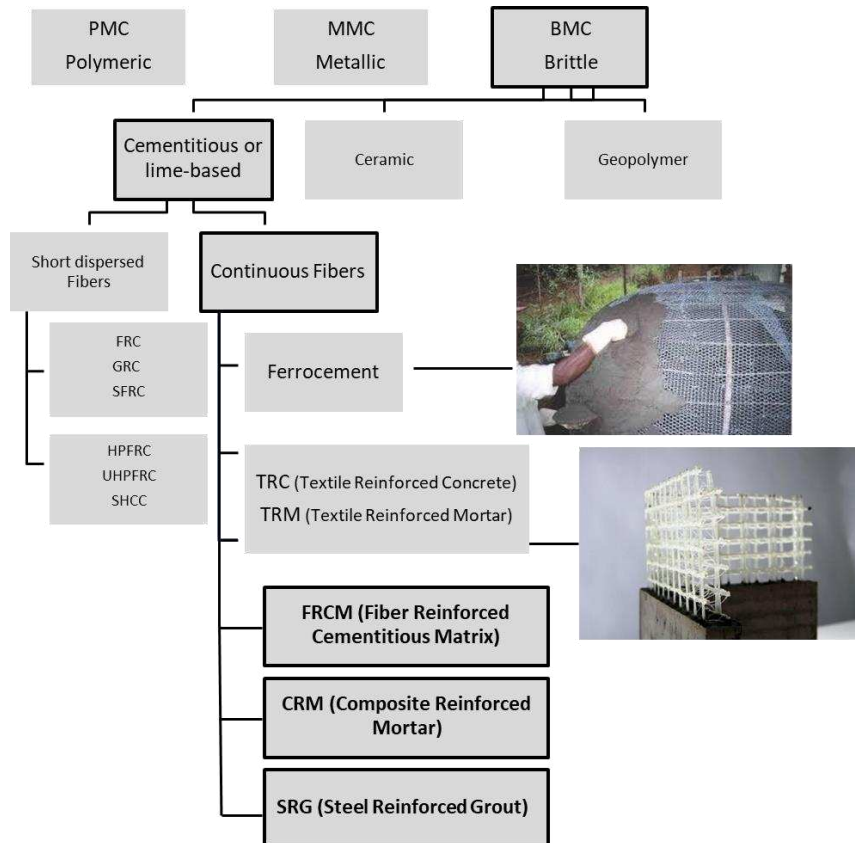


Figura 2 - Schematizzazione dei materiali compositi

In base alla natura della matrice, i compositi fibrorinforzati si distinguono in:

- PMC (Polymer-Matrix Composite), o più comunemente FRP (Fiber Reinforced Polymer), nei quali la matrice è costituita da resine di varia natura, come ad esempio le resine termoplastiche (come nylon e ABS) o termoindurenti (come le resine epossidiche);
- MMC (Metallic-Matrix Composite), costituiti da una matrice metallica, comunemente di alluminio o titanio e suoi derivati;
- BMC (Brittle-Matrix Composite), costituiti da carburo di silicio o allumina, malte cementizie oppure materiali a base di calce o malte geopolimeriche.

All'interno della matrice il rinforzo si presenta come una fase dispersa e discontinua, responsabile delle caratteristiche di rigidità e resistenza meccanica del materiale composito. Tra i materiali compositi BMC, quelli a matrice inorganica possono essere a loro volta raggruppati in due categorie in funzione della tipologia di fibra impiegata come rinforzo:

- Matrice inorganica rinforzata con fibre corte.

Questa tipologia di composito è indicata con l'acronimo FRC ed include tutti i compositi nei quali la matrice è rinforzata con fibre corte disperse internamente.

- Matrice inorganica rinforzata con fibre continue.

Comprende tutti quei prodotti costituiti da una matrice inorganica rinforzata con fibre lunghe continue disposte in modo tale da formare un tessuto o una rete. Si possono distinguere le seguenti due grandi categorie:

- Ferrocemento, ovvero elementi sottili in calcestruzzo costituiti comunemente da una malta cementizia idraulica rinforzata con una rete metallica continua a maglia stretta.
- Textile Reinforced Concrete (TRC), rappresenta un'ampia categoria di compositi a matrice cementizia (costituita da malta o calcestruzzo) rinforzata con reti metalliche, tessuti secchi o tessuti impregnati a maglia larga in forma bi o tridimensionale. La fibra di rinforzo può essere costituita da materiale di diversa natura (polimerica, sintetica, metallica, organica, ecc.), mentre la composizione e la granulometria della matrice saranno funzione del sistema di rinforzo impiegato. Un altro termine comunemente usato per questo composito è Textile Reinforced Mortar (TRM) o Mineral Based Composite (MBC). In questa categoria rientrano i Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) costituiti da uno strato di matrice inorganica, generalmente composta da una malta per muratura ed altri additivi, rinforzato con fibre secche sotto forma di tessuto a maglie larghe (rete di fibra).

2.3 I materiali componenti

Le principali componenti, definite fasi, che costituiscono i compositi sono la matrice ed il rinforzo, dalla cui combinazione scaturiscono materiali che manifestano caratteristiche prestazionali differenti in funzione della natura delle singole fasi e della loro interazione.

2.3.1 Le matrici

La matrice rappresenta la fase continua del composito ed ha il compito di fissare il rinforzo fibroso, garantendo sia l'adesione al supporto che la stabilità geometrica del sistema composito. In funzione del settore di applicazione, delle prestazioni richieste e delle condizioni di esercizio la matrice è costituita da materiali di natura organica (polimerica) o inorganica (cementizia). La matrice ha il ruolo di garantire la distribuzione dello sforzo tra le fibre per adesione e/o frizione, proteggere le fibre dagli agenti atmosferici, dall'abrasione meccanica e dalle azioni antropiche. La durabilità dei materiali compositi fibrorinforzati è notevolmente influenzata dal materiale che caratterizza la matrice, poiché da essa dipende il comportamento del composito rispetto ai fattori ambientali (alte temperature, umidità, aggressioni chimiche, ecc.). Nonostante il diffuso utilizzo, le matrici organiche presentano alcuni inconvenienti quali in cattivo funzionamento a temperature superiori alla loro temperatura di transizione vetrosa, il rischio di emissione di gas tossici in caso di incendio, i costi elevati, i potenziali rischi per la manodopera per tossicità da contatto o da inalazione, l'impossibilità di applicazione su superfici bagnate o in condizioni di bassa temperatura ambientale, la perdita di permeabilità al vapore, la necessità di un controllo della qualità delle reazioni chimiche per garantire la stabilità del composito. Negli ultimi anni si stanno diffondendo matrici di natura inorganica (malte idrauliche-cementizie o malte ibride polimero-legante idraulico); l'utilizzo di questo tipo di matrici per la realizzazione di compositi fibrorinforzati in campo civile è particolarmente accettato dagli addetti ai lavori per la maggiore familiarità con questi materiali.

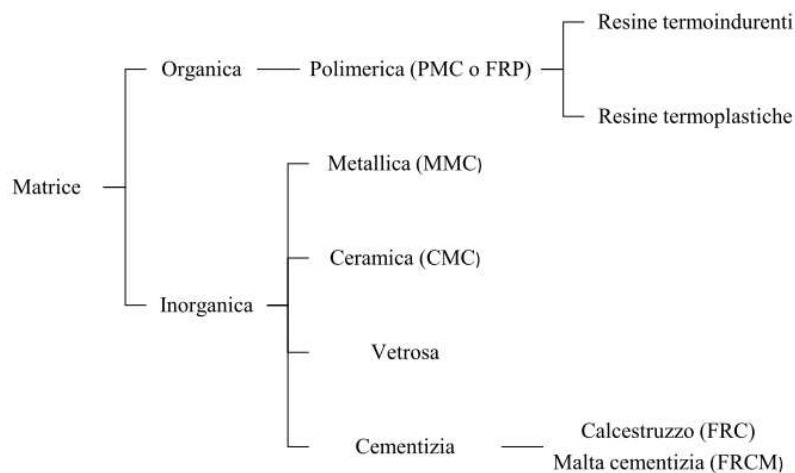


Figura 3 - Tipologie di matrici impiegate nei materiali compositi fibrorinforzati.

2.3.2 I rinforzi

Il rinforzo costituisce il componente principale del composito, sotto forma di fase discontinua fibrosa che ha il compito di assorbire gli sforzi assiali di trazione applicati al materiale, mentre alla matrice si demanda il solo compito di distribuzione degli stessi fra le fibre, determinando così una uniformità di sollecitazione tra queste. È costituito da fibre lunghe, secche o rivestite mediante un coating (nel caso di reti in fibra di carbonio o vetro) in grado di migliorare l'adesione con la matrice inorganica. Essendo costituite da filamenti continui molto sottili difficili da manipolare singolarmente, le fibre sono disponibili commercialmente in varie forme, di cui le più comuni sono descritte in seguito e riportate in Figura 4[2]:

- *Filamento (monofilament)*: elemento base con dimensioni di circa 10 μm di diametro;
- *Cavo di filatura (tow)*: è il prodotto della macchina di filatura ed è costituito da un fascio formato da un gran numero di filamenti (dell'ordine delle migliaia), destinato ad essere filato, ritorto o strappato per l'utilizzazione sotto forma di fibra discontinua;
- *Filo o filato (spun yarn)*: filo formato da fibre tenute insieme da torsione;
- *Filo assemblato (roving)*: fascio costituito da filati assemblati parallelamente.
-

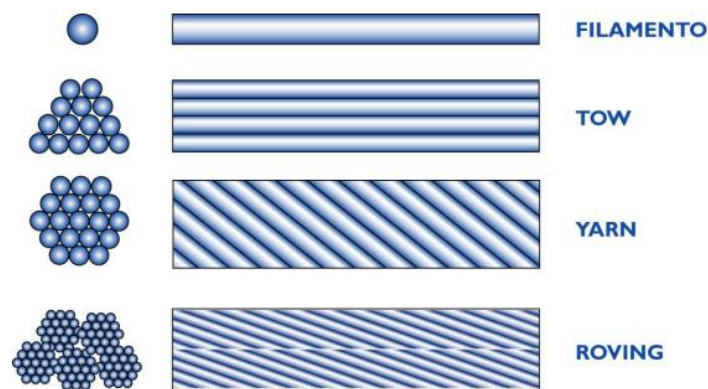


Figura 4 - Tipologie di fibre [2].

Le fibre sono composizioni opportunamente arrangiate in modo da formare una grande varietà di tessuti (*fabric*). In tal caso la disposizione delle fibre può essere tale da conferire ai corrispondenti compositi delle caratteristiche di quasi isotropia nel piano. Il rinforzo

può essere unidirezionale o bidirezionale. Nel primo caso le fibre sono orientate tutte nella stessa direzione e tenute assieme da una trama leggera di tipo strutturale. Essi presentano un'elevata resistenza a trazione secondo la direzione delle fibre stesse conferendo un comportamento anisotropo. Nel caso dei tessuti bidirezionali le fibre sono orientate in due direzioni preferenziali e il tessuto è caratterizzato da una direzione principale, detta ordito (*warp*), ed una trasversale ortogonale alla prima, detta trama (*weft*).

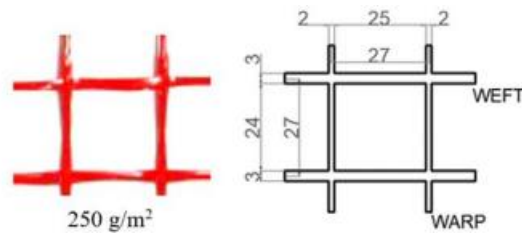


Figura 5 - Tessuto in fibra di vetro in cui sono distinguibili ordito e trama.

Nel caso di tessuti unidirezionali o bidirezionali non bilanciati (con una quantità di fibra inferiore in una direzione), diversamente dai tessuti bidirezionali bilanciati, è possibile individuare una direzione principale lungo la quale si ha la massima risposta alle sollecitazioni. Vanno quindi disposte all'interno della matrice parallelamente alla direzione delle tensioni in maniera da fornire una risposta adeguata in termini di resistenza meccanica. In base a tale disposizione le proprietà del composito sono notevolmente inferiori nella direzione trasversale alle fibre. I materiali attualmente impiegati sono le fibre di carbonio, aramide, vetro, acciaio e PBO. A questi si è recentemente aggiunto il basalto, valido concorrente nel campo dei sistemi compositi fibrorinforzati.



Figura 6 - Tipologie di fibre impiegate nella realizzazione dei materiali compositi

Tipo di rinforzo	Proprietà (valori medi)					
	Densità (gr/cm ³)	Modulo elastico (GPa)	Resistenza a trazione (MPa)	Allungamento a rottura (%)	Coefficiente di dilatazione termica (10 ⁻⁶ /°C)	Resistenza al calore (°C)
Aramide	1,45 - 1,47	62 - 179	3600 - 3800	1,9 - 5,5	-2	300 - 350
PBO	1,56	270	5800	2,1	-6	250 - 315
Vetro E	2,54	70 - 80	2000 - 3500	3,5 - 4,5	5,2	400
Vetro S	2,49	85 - 90	3500 - 4800	4,5 - 5,5	1,6 - 2,9	400
Carbonio High strength	1,75	240 - 280	4100 - 5100	1,6 - 1,73	-0,75	350 - 400
Carbonio High modulus	1,85 - 1,90	390 - 760	2400 - 3400	0,5 - 0,8	-1,45	350 - 400
Acciaio	7,8	206	240 - 400 (snerv.) 350 - 600 (rott.)	20 - 30	10,4	700
Basalto	2,7	90	1800 - 2200	1,8 - 2,5	8,6	450 - 650

Figura 7 - Confronto tra le proprietà delle fibre di rinforzo. [1]

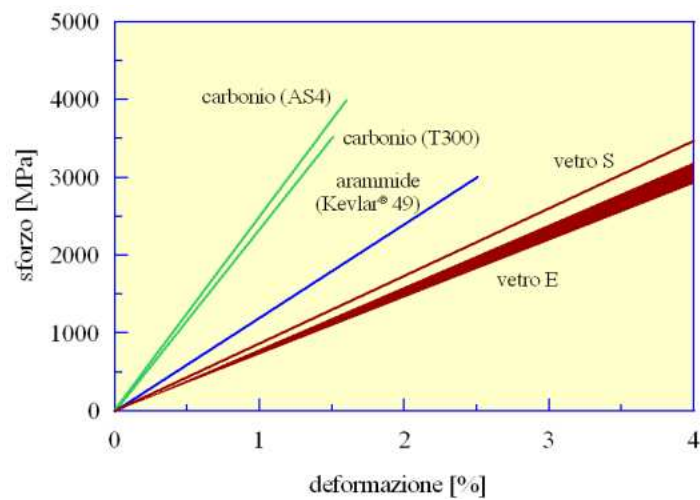


Figura 8 - Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo: comportamento a trazione monoassiale. [2]

2.4 Tipologie di prove sperimentali per la caratterizzazione dei compositi

Proprietà di trazione e adesione svolgono un ruolo fondamentale nel comportamento dei compositi. Ad oggi risulta necessario non solo un approfondimento della conoscenza relativa al comportamento di tali materiali, bensì anche la definizione di criteri comuni per le prove sperimentali. Queste possono essere distinte in due categorie:

- Prove di trazione diretta.
- Prove di adesione.

2.4.1 Prove di trazione su provini di FRCM

Tra le indagini sperimentali, le prove di trazione diretta forniscono i parametri fondamentali, quali il modulo di elasticità e la resistenza a trazione del composito e le proprietà di adesione matrice-fibra, che influiscono sul processo di cracking e sulla durabilità, per cui tali prove sono espressamente richieste dai codici standard esistenti (CNR-DT 200 R1 / 2013, AC434 2011) per la caratterizzazione meccanica dei compositi fibrorinforzati a matrice inorganica. Le caratteristiche meccaniche e le proprietà di adesione, risultanti dai test di trazione diretta, possono variare notevolmente non solo in funzione delle caratteristiche della rete e della matrice utilizzati, ma anche in base a diversi fattori relativi al set up di prova, tra cui il metodo di trasferimento del carico, la geometria del provino e le modalità di fabbricazione, nonché la tecnica di misurazione della deformazione. Per questo risulta necessario una standardizzazione della metodologia di prova e a tal proposito comitati tecnici scientifici (Comitato tecnico RILEM TC-250 CSM) e commissioni a livello nazionale ed europeo si sono attivati in questa direzione, coordinando ampi progetti di ricerca su tale argomento.

2.4.1.1 *Comportamento meccanico a trazione*

Mediante prove a trazione è possibile caratterizzare il comportamento del composito in modo da poter progettare correttamente il rinforzo con questo sistema. Il comportamento meccanico a trazione, in una prova di trazione monoassiale, è assimilabile ad una polilinea generalmente caratterizzata dal susseguirsi di tre fasi di risposta ben distinguibili. In Figura 9 viene illustrata la tipica risposta a trazione di un composito TRM nell'ipotesi di perfetta

adesione tra rinforzo e matrice. Nel primo ramo (*stadio I*) il provino si trova nella fase elastica lineare, il composito è nel suo stato iniziale non fessurato. Il campione, quindi, non è danneggiato e la risposta è lineare. Il passaggio allo *stadio II* è identificato dalla formazione della prima lesione. In questa fase si osserva una diminuzione della rigidità e un progressivo sviluppo della fessurazione. La lunghezza e la pendenza di questa fase dipendono dalle caratteristiche dei due materiali costituenti il composito, dalla qualità della loro adesione, dunque dalla capacità di trasferimento degli sforzi dalla matrice alle fibre. Il secondo punto di transizione, che segna il passaggio dalla seconda alla terza fase, si osserva quando, con il progredire della deformazione, non si ha la formazione di nuove lesioni, ma soltanto l'aumento in larghezza di quelle già formatesi nella seconda fase. La curva prosegue fino alla crisi, dovuta al raggiungimento della resistenza a trazione della fibra, o allo scorrimento della fibra rispetto alla matrice, o ad una loro combinazione. Nel terzo ramo (*stadio III*) l'unico apporto di resistenza è fornito dalla fibra, per cui la pendenza del tratto riflette il modulo elastico della fibra stessa e la crisi è, solitamente, di tipo fragile.

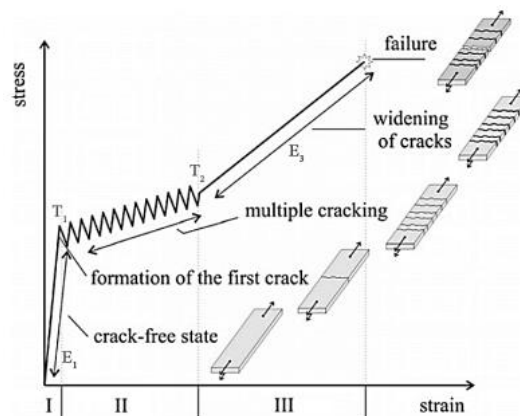


Figura 9 - Legame costitutivo ideale di compositi TRM nell'ipotesi di perfetta adesione. [3]

Per eseguire la prova di trazione “tensile test” è di fondamentale importanza definire il tipo di ancoraggio da utilizzare. Esistono due sistemi di ancoraggio, quello a cerniera (AC434) e quello a morsetto (Rilem TC-250). A seconda del sistema utilizzato varia il meccanismo di trasferimento degli sforzi al campione e la modalità di rottura, questo fornisce valori di caratterizzazione diversi.

Il tipo di ancoraggio suggerito dalle US Standard AC434 è quello a cerniera, in cui vengono applicate delle piastre metalliche all'estremità del provino e il trasferimento degli sforzi avviene attraverso azioni tangenziali che nascono tra la piastra e il provino

stesso. Questa configurazione simula al meglio il comportamento del sistema applicato in opera poiché esso lavora per aderenza al substrato.

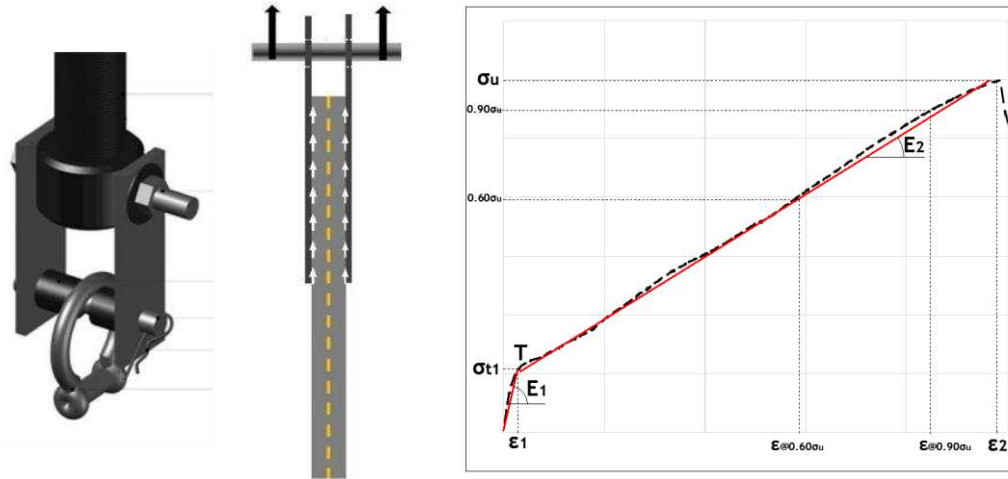


Figura 10 - Modalità di ancoraggio a cerniera e tipica curva tensione-deformazione con andamento bilineare.

Il secondo meccanismo di ancoraggio è quello a morsetto suggerito dalla Rilem TC-250 in cui il carico è applicato mediante uno sforzo normale di compressione al piano del campione. La curva ha andamento trilineare. Nel primo tratto non è fessurato, nel secondo tratto si formano le varie fessure e poi il provino segue lo stesso andamento della fibra secca perché la tipologia di ancoraggio evita che la rete scivoli all'interno della matrice.

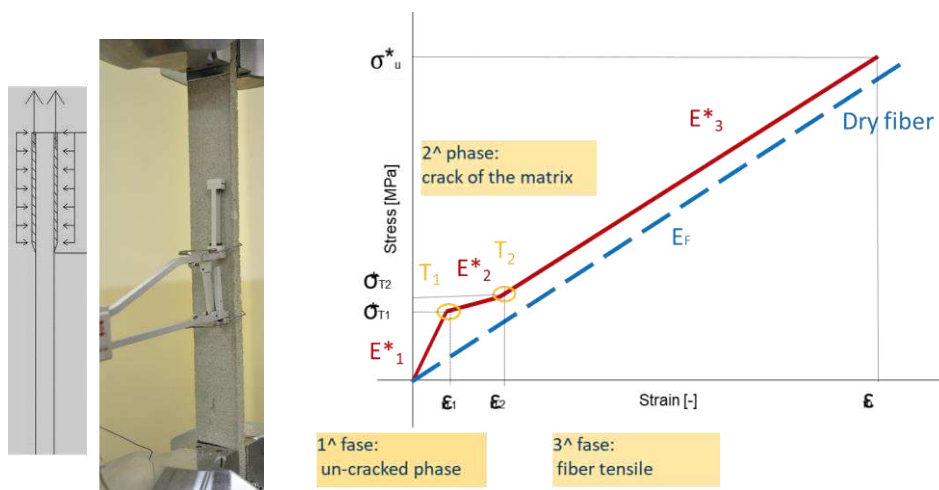


Figura 11 - Modalità di ancoraggio a morsetto e tipica curva tensione-deformazione con andamento trilineare.

Tuttavia tale legame non è sufficiente a caratterizzare il comportamento meccanico di un sistema FRCM. Infatti, esso si manifesta sulla base delle caratteristiche dei soli materiali costituenti e delle loro interazioni, senza considerare l'influenza del supporto sul rinforzo che andrà applicato. Pertanto occorre i molteplici meccanismi di crisi che possono verificarsi in seguito all'interazione substrato-sistema di rinforzo. [5]

2.4.2 Prove di distacco dal supporto

L'efficacia dei materiali compositi fibrorinforzati è strettamente dipendente dalle modalità di trasferimento degli stati tensionali dal supporto alla fibra di rinforzo, ovvero dall'adesione tra il sistema di rinforzo e il supporto. Le numerose sperimentazioni presenti in letteratura hanno dimostrato come la modalità di crisi possono verificarsi in funzione delle proprietà del supporto, della resistenza a taglio della matrice, della resistenza a trazione della rete e dalla capacità dei due materiali costituenti di ingranarsi tra di loro. I meccanismi di crisi sono descritti in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** ed includono:

- A. il distacco con rottura coesiva del supporto del sistema di rinforzo;
- B. il distacco all'interfaccia matrice-supporto;
- C. il distacco all'interfaccia matrice -rete;
- D. lo scorrimento della rete nella matrice;
- E. lo scorrimento della rete e fessurazione dello strato di malta più esterno;
- F. la rottura a trazione della rete.

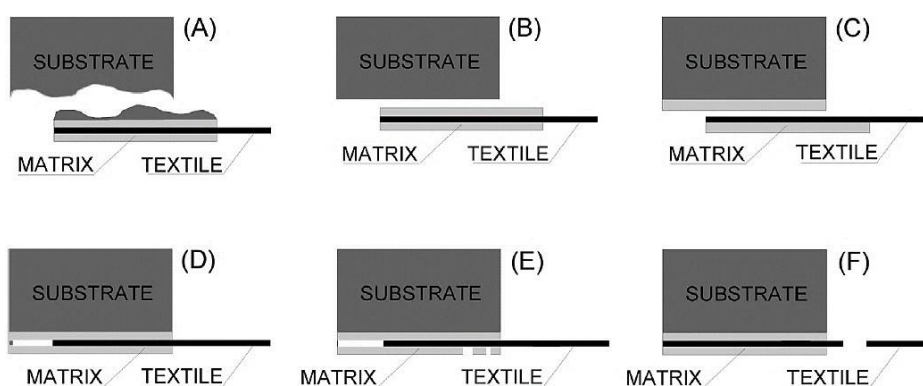


Figura 12 - Meccanismi di crisi. [5]

La matrice inorganica si caratterizza per valori di resistenza simili a quelli del substrato e, se correttamente applicata, per un'ottima compatibilità ad una buona adesione con il materiale di supporto. Questi fattori escludono il manifestarsi di una crisi di tipo A. a

meno di avere una superficie di supporto degradata o una matrice particolarmente rigida. Una superficie di supporto eccessivamente liscia può condurre all'insorgere di una crisi di tipo B.

Le diverse modalità di crisi danno luogo a dei grafici carico-spostamento (Figura 13) che si distinguono nell'andamento successivo al raggiungimento del carico di picco: nelle prime tre modalità (A, B e C) generalmente si osserva un ramo a carico quasi costante, seguito da una crisi di tipo fragile; la modalità di crisi di tipo D è generalmente connessa con la lenta diminuzione del carico dovuto alla progressiva perdita di attrito della rete, scorrevole all'interno della malta. Dunque la curva presenta un ramo decrescente seguito da un ramo finale a carico costante. Nel caso di crisi di tipo E, la rottura della fibra esterna alla matrice determina un comportamento di tipo fragile. La rottura dei multi-filamenti internamente alla matrice (modalità F) comporta una repentina perdita di carico; successivamente lo sfilamento dalla matrice di tali multi-filamenti ed il loro comportamento telescopico determinano un ramo finale a carico costante. Le prove di distacco dal supporto permettono di valutare l'efficacia del trasferimento del carico dal substrato al rinforzo consentendo l'attivazione del meccanismo di crisi più debole. [6]

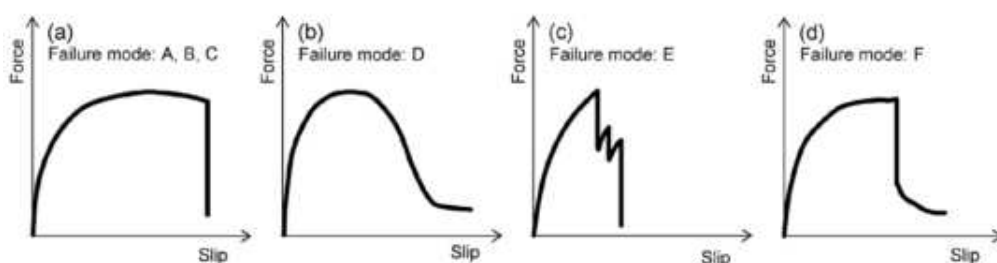


Figura 13 - Grafici forza-spostamento globale in relazione alla modalità di crisi di adesione in compositi FRCM. [6]

Si osserva che, inoltre, l'aderenza del composito dipende dall'adesione tra la rete (tessuto) e la matrice e dalle caratteristiche della matrice e del supporto, in termini meccanici (resistenza a trazione ed energia di frattura) e fisico-chimici (trattamento della superficie prima dell'applicazione, dimensione dei grani, presenza di porosità, compatibilità tra la matrice e il supporto, etc.) [5]

2.5 I limiti dei sistemi di rinforzo a matrice inorganica.

I limiti dei sistemi di rinforzo FRCM sono associati principalmente alle caratteristiche fragili della matrice inorganica, la quale non offre le stesse proprietà adesive di una resina epossidica. Il legame tra il tessuto e la matrice risulta dunque debole. La matrice infatti non è in grado di penetrare completamente tra i filamenti che costituiscono gli yarn del tessuto, poiché le dimensioni dei grani di cemento sono troppo grandi rispetto allo spazio tra i filamenti. L'impossibilità di controllare la penetrazione porta alla formazione di differenti caratteristiche di adesione all'esterno e all'interno dello yarn e quindi ad una cosiddetta "telescopic failure" (Figura 14), una rottura filamento dopo filamento a partire dall'esterno verso l'interno dello yarn. Con questo meccanismo di rottura non è possibile sfruttare al meglio le capacità del sistema perché lavorano principalmente i filamenti esterni.

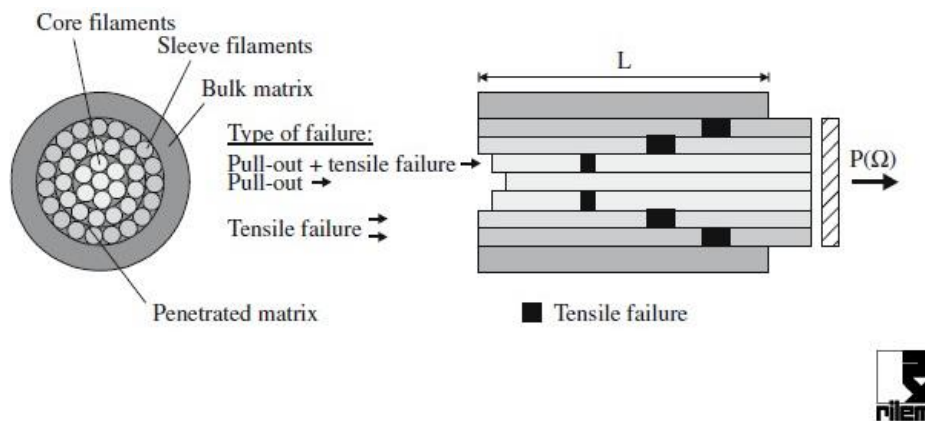


Figura 14 - Telescopic failure.

Per evitare questo fenomeno si utilizzano yarn impregnati con resina epossidica, la quale migliora l'adesione con la matrice inorganica e consente una distribuzione costante degli sforzi all'interno della sezione (Figura 15).

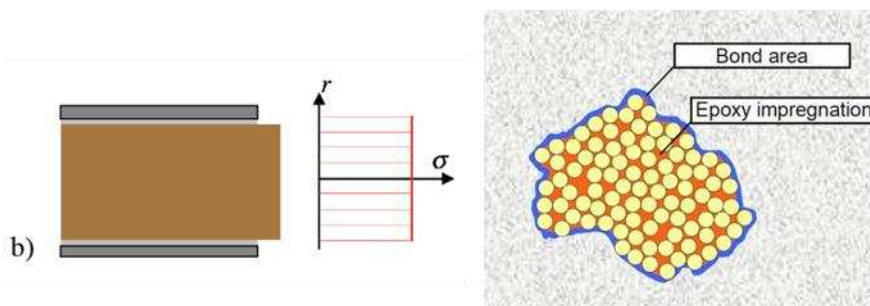


Figura 15 - Yarn impregnato con resina epossidica.

Dai risultati di prove di trazione (Figura 16) emerge che la resistenza ultima a trazione degli FRCM costituiti da fibre impregnate aumenta notevolmente, anche la rigidezza del sistema aumenta ed in particolare maggiore è il grado di impregnazione maggiore è la pendenza della curva. Per quanto riguarda il comportamento post-fessurativo, questo sarà degradante (softening) in presenza di fibre secche e incrudente (hardening) in presenza di fibre impregnate. Ad un miglioramento delle prestazioni meccaniche corrisponde però una riduzione della resistenza alle alte temperature del composito.

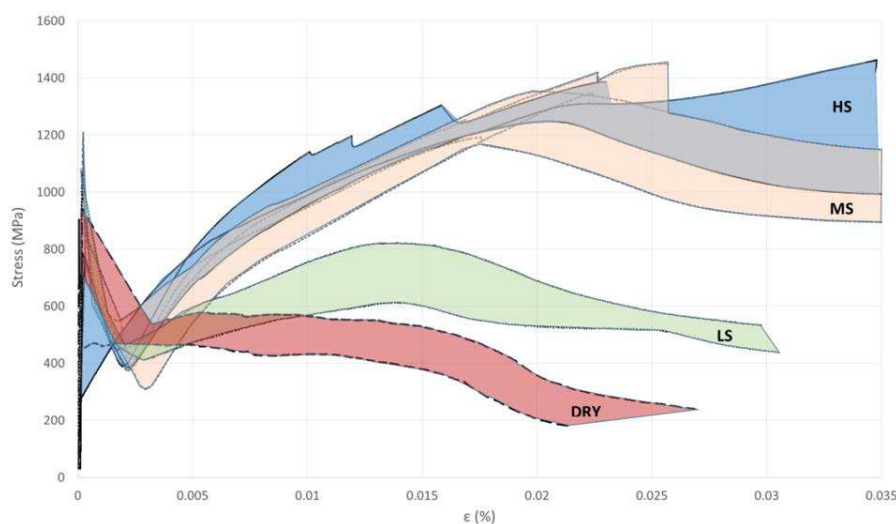


Figura 16 - Andamento del diagramma tensione-deformazione per yarn secchi e impregnati.

2.6 Quadro normativo

In Italia lo strumento legislativo attualmente vigente per la progettazione edilizia è quello delle Norme tecniche per le costruzioni 17/01/2018, nelle quali la progettazione con FRCM non è espressamente analizzata. Nel capitolo 8.6 delle stesse però si sottolinea che *“Gli interventi sulle strutture esistenti devono essere effettuati con i materiali previsti dalle presenti norme; possono altresì essere utilizzati materiali non tradizionali, purché nel rispetto di normative e documenti di comprovata validità di cui al Capitolo 12.”*

Al capitolo 12 si evidenzia che:

“Per quanto non diversamente specificato nella presente norma, si intendono coerenti con i principi alla base della stessa, le indicazioni riportate nei seguenti documenti:

- Eurocodici strutturali pubblicati dal CEN, con le precisazioni riportate nelle Appendici Nazionali;

- *Norme UNI EN armonizzate i cui riferimenti siano pubblicati su Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea;*
- *Norme per prove su materiali e prodotti pubblicate da UNI.*

Inoltre, a integrazione delle presenti norme e per quanto con esse non in contrasto, possono essere utilizzati i documenti di seguito indicati che costituiscono riferimenti di comprovata validità:

- *Istruzioni del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;*
- *Linee Guida del Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;*
- *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale e successive modificazioni del Ministero per i Beni e le Attività Culturali, previo parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici sul documento stesso;*
- *Istruzioni e documenti tecnici del Consiglio Nazionale delle Ricerche (C.N.R.).”*

Con queste precisazioni, sono qui riportati i documenti italiani attualmente di riferimento e orientamento per i professionisti:

- *Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti (Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Luglio 2015);*
- *Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCM) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti (Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Luglio 2018);*
- *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati (CNR-DT 200/2013);*
- *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati a matrice inorganica (CNR-DT 215/2018).*

Nella Normativa si precisa inoltre che:

“Per quanto non trattato nella presente norma o nei documenti di comprovata validità sopra elencati, possono essere utilizzati anche altri codici internazionali; è

responsabilità del progettista garantire espressamente livelli di sicurezza coerenti con quelli delle presenti Norme tecniche.”

Negli Stati Uniti esiste già un codice per la qualificazione dei sistemi FRCM a seguito di prove di caratterizzazione eseguite in laboratori accreditati, che dimostrino la conformità del sistema ai criteri di accettazione individuati dal documento AC434 sviluppato dall’International Code Council Evaluation Service (ICC-ES). Questo documento stabilisce le linee guida per la caratterizzazione degli FRCM, valutandone le proprietà a trazione, flessione e taglio, le prestazioni a diverse condizioni ambientali, l’esposizione ad incendi o ad alte temperature, le procedure di progettazione strutturale.

La qualificazione dei sistemi FRCM è concepita per caratterizzare il composito formato da matrice e rinforzo fibroso e non i singoli costituenti separatamente. La caratterizzazione del sistema è specifica per ogni applicazione e fornisce risultati validi solo per il substrato (muratura in mattoni, in pietra, calcestruzzo) su cui è stato testato. Le procedure e le raccomandazioni in fase di installazione devono essere seguite per garantire le prestazioni del materiale riportate dal produttore.

Quindi il quadro normativo da considerare è composto dalle:

- *ACI1549.4 R13: “Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures”;*
- *AC434: “Acceptance Criteria for Masonry and Concrete Strengthening Using Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composite Systems”.*
- *RILEM TC 210-TR 2006- State of the art report TRC;*
- *RILEM TC 250-CSM- Composites for sustainable strengthening of masonry.*

2.7 Applicazioni dei sistemi FRCM

I sistemi di rinforzo FRCM possono essere efficacemente utilizzati come strumento di riabilitazione delle strutture in muratura ed in calcestruzzo armato. Vengono utilizzati nei casi in cui si presenta una di queste condizioni:

- Degrado dei materiali: che può provocare sia la diminuzione della sezione resistente che il decadimento delle caratteristiche meccaniche della struttura;

- Variazione della destinazione d'uso di un edificio, che può provocare un aumento dei carichi negli elementi portanti;
- Danni causati da eventi imprevedibili come cedimenti delle fondazioni, forti impatti, incendi e terremoti;
- Richiesta di adeguamento sismico della struttura alle nuove norme tecniche delle costruzioni.

2.7.1 Applicazioni su strutture di muratura

Si riportano di seguito alcune applicazioni significative di rinforzo di strutture murarie mediante compositi a matrice inorganica.

- Rinforzo di pannelli murari: applicando il rinforzo con FRCM sulle superfici murarie può essere incrementata la capacità portante a taglio e a pressoflessione di un maschio murario. La stesura del tessuto può avvenire sia con continuità che per fasce.
- Rinforzo di volte e archi: l'obiettivo è quello di sopperire alla mancanza di resistenza a trazione dell'apparecchio murario contenendo la formazione delle cerniere. Per perseguire questo obiettivo gli FRCM possono essere applicati su volte ed archi murari sia al loro estradosso che all'intradosso. Il rinforzo può essere diffuso o applicato per fasce e può essere collegato ai vari elementi oltre che per adesione, con particolari connettori. In genere, se possibile, questo intervento è abbinato alla costruzione di frenelli in muratore di mattoni e all'inserimento di catene in acciaio.
- Cordolature di piano e sommitali: si può realizzare una cordolatura esterna costituita da fasce di tessuto che cingono l'edificio con la finalità di scongiurare cinematismi di ribaltamento di macroelementi murari. Inoltre, si possono realizzare cordoli sommitali in muratura armata inserendo nei giunti orizzontali di malta dei tessuti di rinforzo.
- Confinamento di pilastri di muratura: fasciando elementi sottoposti a compressione centrata o in presenza di piccole eccentricità si può incrementare la

duttilità e la capacità portante degli elementi stessi. Gli avvolgimenti possono essere realizzati in continuo o con fasce fra loro discontinue. [4]



Figura 17 – Rinforzo di pannelli murari con rete di basalto (a sinistra); Applicazione di fasce di tessuto metallico galvanizzato unidirezionale e malta per il rinforzo estradossale di volte murarie (a destra). [4]



Figura 18 – Cordolo sommitale realizzato con tessuti a base di reti di acciaio (a sinistra); Confinamento di pilastro in muratura con rete di vetro A.R. (a destra). [4]

2.7.2 Applicazioni su strutture in calcestruzzo armato

La versatilità del rinforzo permette l'utilizzo di sistemi FRCM su supporti in c.a. in diverse tipologie di intervento:

- Rinforzo a flessione di travi, pilastri e travetti di solaio: si applicano strisce di tessuto al lembo teso dell'elemento di cui si vuole incrementare la capacità flessionale. In questo modo si riducono le deformazioni sotto i carichi di servizio e si limitano gli stati fessurativi;
- Rinforzo a taglio di travi e pilastri: applicando strisce di tessuto alla superficie esterna dell'elemento si realizza il rinforzo a taglio. Questo può essere continuo, applicando ogni striscia di tessuto in adiacenza alla precedente, o discontinuo,

intervallando con spazi vuoti le strisce di rinforzo. È inoltre possibile avvolgere completamente la sezione o creare una configurazione ad U.

- Confinamento di pilastri: la fasciatura di elementi sottoposti a compressione centrata o in presenza di piccole eccentricità permette, come per le murature, di aumentare la duttilità e la capacità portante degli elementi.
- Rinforzo di nodi trave-pilastro: avvolgendo in continuo le estremità degli elementi che convergono nei nodi travi-pilastri si può incrementare la duttilità dei nodi.
- Rinforzo di setti in calcestruzzo armato.
- Rinforzo di solai (antisfondellamento): l'applicazione del sistema FRCM permette di rinforzare i travetti in calcestruzzo danneggiati o sottodimensionati. Inoltre, dopo aver terminato il rinforzo statico dei travetti, risulta utile procedere alla posa del rinforzo su tutta la superficie del solaio come protezione attiva rispetto all'eventualità di distacco di parti di pignatta in laterizio.
- Rinforzo antiribaltamento delle tamponature: le tamponature possono essere rinforzate e rese solidale al telaio strutturale in c.a. attraverso i sistemi FRCM, scongiurando possibili ribaltamenti causati da eventi sismici.
- Rinforzo di ponti.



Figura 19 - Rinforzo a flessione di trave mediante placcaggio con strisce di tessuto unidirezionale realizzate con rete di acciaio e malta cementizia (a sinistra); Confinamento di pilastro con tessuto metallico unidirezionale e malta (a destra).

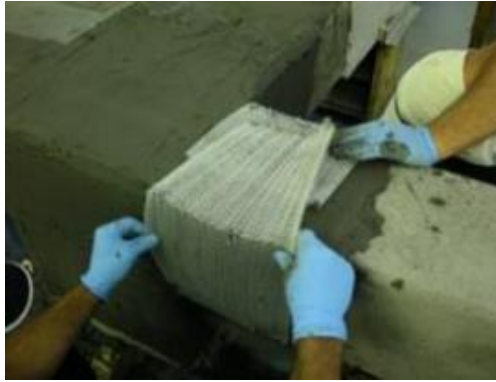


Figura 20 - Rinforzo di nodi travi-pilastro con tessuto metallico unidirezionale e malta (a sinistra); Rinforzo antiribaltamento di pareti con rete di fibra di vetro, malta e fiocchi di fibra di vetro (a destra).

3 Programma sperimentale

3.1 Oggetto della sperimentazione

La campagna condotta ha previsto la realizzazione di una serie di prove sperimentali al fine di valutare l'effetto dello spessore della matrice sul comportamento a trazione del composito. Nella trattazione saranno esposti i risultati ottenuti e l'elaborazione dei dati allo scopo di trarre delle correlazioni tra le proprietà a trazione del composito e le proprietà meccaniche della matrice cementizia. Tutte le prove sono state condotte nel "Laboratorio Sperimentale per le Prove sui Materiali da Costruzione" del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica e nel "Laboratorio di Progettazione Meccanica e Costruzione di Macchine" del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'Università Politecnica delle Marche.

3.2 I materiali utilizzati

3.2.1 Rete di fibra Glasstex® Struktura 250 – Biemme S.r.l

Si tratta di una rete costituita da fibra di vetro AR GLASS (Alcalino Resistente) con contenuto di zirconio minimo del 16 % costruita a giro inglese, trattata con appretto polimerico termoidurente. La scheda tecnica fornita dal produttore dal produttore descrive l'utilizzo di tale rete in abbinamento con una selezione di matrici inorganiche fornite dalla medesima ditta produttrice, tra le quali la matrice costituita da malta di calce idraulica BM idroplaster NHL – M15. In allegato si riporta la scheda tecnica del prodotto fornita dalla ditta produttrice.

3.2.2 Malta BM Idroplaster NHL – M15 – Biemme S.r.l

BM Idroplaster NHL – M15 è una malta premiscelata in classe M15 a base di calce idraulica naturale NHL 5 e cemento conforme alla UNI EN 998-2 con sistema di certificazione 2+. Il prodotto è idoneo per la realizzazione di intonaci strutturali traspiranti per interni ed esterni a mano o a macchina, di interventi di rincoccatura o di scuci/cuci e di rinforzi strutturali su elementi architettonici (archi, volte pilastri). In allegato si riporta la scheda tecnica del prodotto fornita dalla ditta produttrice.

3.3 Preparazione dei provini di TRM

La campagna sperimentale è stata condotta su provini con dimensioni in lunghezza e larghezza rispettivamente di 40 cm e 7,5 cm e con altezze differenti, rispettivamente di 10, 20 e 30 mm. Per ogni altezza sono stati realizzati 8 provini di cui 4 con rete e 4 senza rete. Per un totale di 24 provini.

Inizialmente sono stati realizzati i casseri in legno, uno per ogni altezza, necessari per poter realizzare i campioni di TRM (Figura 21). A seguire è stato applicato sul cassero del disarmante per evitare un'eccessiva aderenza tra la malta e il cassero stesso. Dai rotoli è stata ritagliata la rete con dimensioni in larghezza di 3 yards (7,5 cm) e in lunghezza di 40 cm. I campioni di rete sono stati messi in forno per il tempo necessario ad ottenere una certa complanarità che facilitasse la posa dell'elemento nel cassero.



Figura 21 - Realizzazione casseri con altezze di 10, 20 e 30 mm.

Successivamente si è proceduto alla realizzazione della malta, confezionata in sacchi, già pronta per la miscelazione con sola acqua (22-24% in peso della polvere). Dopo aver lavorato la malta e raggiunta la giusta consistenza, è stato posto un primo strato con spessore uniforme nel cassero. Dopodiché è avvenuto il posizionamento del rinforzo (Figura 22), la stesura del secondo strato di malta e a seguire il composito è stato

compattato disponendo i casseri su una tavola a scosse. Infine i provini sono stati messi ad asciugare, protetti con uno strato di pellicola in modo tale da mantenere lo stato umido ed evitare incurvatures dovute ad un ritiro elevato durante la stagionatura (Figura 25). Dopo circa 7 giorni dalla realizzazione, tutti i provini sono stati scasserati, catalogati e messi a stagionare in ambiente interno (laboratorio) per riprodurre le condizioni di normale maturazione fino al raggiungimento dei 28 giorni di stagionatura (Figura 26, Figura 27, Figura 28). I provini sono stati definiti attraverso una sigla composta dall'altezza del campione, dalla lettera R che indica la rete (se presente) e dal numero sequenziale, "mm_R_n" dove:

- mm indica il valore dell'altezza del campione.
- _R indica la presenza della rete.
- _n indica il numero del campione.



Figura 22 - Applicazione del primo strato di malta e della rete.



Figura 23 - Provini senza rete (a sinistra) e provini con rete (a destra).



Figura 24 - Applicazione secondo strato di malta.



Figura 25 - Provini messi ad asciugare con pellicola protettiva.



Figura 26 - Provini da 10 mm scasserati e catalogati. A sinistra provini con rete, a destra provini senza rete.



Figura 27 - Provini da 20 mm scasserati e catalogati. A sinistra provini con rete, a destra provini senza rete.



Figura 28 - Provini da 30 mm scasserati e catalogati. A sinistra provini con rete, a destra provini senza rete.

In concomitanza con il confezionamento della malta costituente la matrice del composito, sono stati preparati 6 campioni dedicati ai test di caratterizzazione della sola malta. I provini sono stati realizzati tramite l'impiego di opportune casseforme ed hanno forma prismatica di dimensione 40x40x160 mm. Le prove sono state condotte a maturazione avvenuta.



Figura 29 -Confezionamento dei provini di malta.

Per poter eseguire le prove di trazione sui campioni di TRM utilizzando la modalità di ancoraggio a cerniera, è necessario incollare delle piastre di acciaio inox su ogni lato dei provini, per un totale di quattro piastre su ogni campione (Figura 30). L'incollaggio delle piastre sulla superficie del campione è stato realizzato mediante l'utilizzo di una resina epossidica. Prima dell'applicazione della resina sono state smussate le imperfezioni sui provini in maniera tale da rendere liscia ed uniforme la loro superficie, inoltre sono state pulite anche le piastre con dell'acquaregia per eliminare residui di grasso e assicurare così una buona aderenza con il campione. Per poter fissare le piastre alla giusta distanza sui provini è stato predisposto un cassero con dei perni in acciaio aventi la funzione di guida

per l'incollaggio delle piastre. La resina è stata spalmata mediante una spatola sia sulla piastra che sul campione. Tale procedura è stata seguita per tutti i campioni. Le prove di trazione possono essere eseguite dopo che sia completato il processo di indurimento della resina epossidica (dopo almeno 24 ore, necessarie per permettere lo sviluppo della sua completa resistenza).

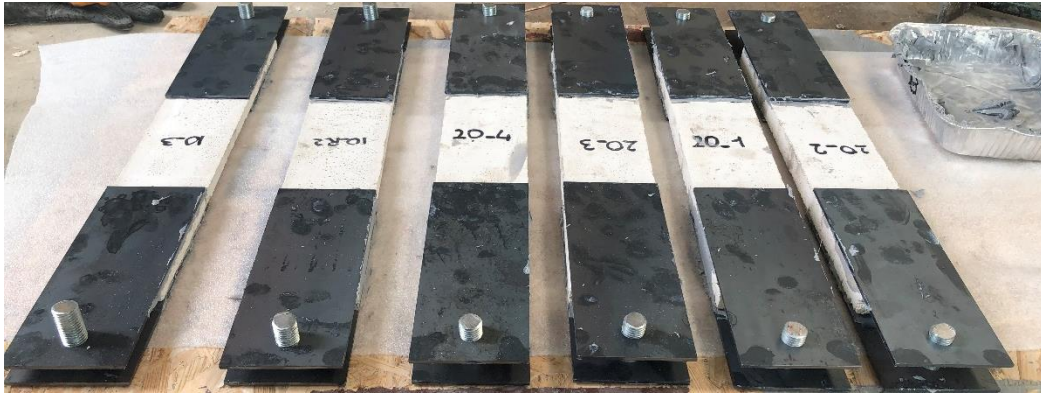


Figura 30 - Incollaggio delle piastre di acciaio con resina epossidica.

4 Prove di trazione su campioni di TRM

Per eseguire il test a trazione sui campioni di TRM è stata utilizzata la macchina di prova a trazione Zwick/Roell Z050 (capacità 50 kN). Il carico è stato applicato con modalità a controllo di spostamento con velocità della traversa impostata a 0,5 mm/min. La tipologia di configurazione utilizzata è a cerniera (clevis grip), in questo modo il carico a trazione viene trasferito ai provini solo attraverso sforzi di taglio, evitando di applicare forze normali alle estremità dei provini stessi. Nella Figura 31 è riportato il setup di prova.



Figura 31 – Tensile test setup.

4.1 Elaborazione dei risultati

Per la costruzione dei grafici rappresentativi del comportamento dei provini è necessario eseguire la rielaborazione dei dati restituiti dal macchinario di prova. Dunque il primo passo è stato quello di definire lo sforzo σ [N/mm²] come il rapporto tra la forza, fornita dalla macchina, e l'area della sezione trasversale della rete di rinforzo nella direzione del carico, che in questo caso è pari a $3A_y$. Dopo aver individuato lo sforzo è stato possibile

costruire i grafici sforzo-spostamento delle varie prove effettuate, differenziandole per tipo di provino. Ogni tipologia è caratterizzata da un grafico contenente quattro curve, o tre in alcuni casi.

4.2 Risultati sperimentali

Nelle figure seguenti vengono riportati i diagrammi tensione-spostamento, relativi alle diverse tipologie di provini e le tabelle contenenti i valori dei parametri individuati.

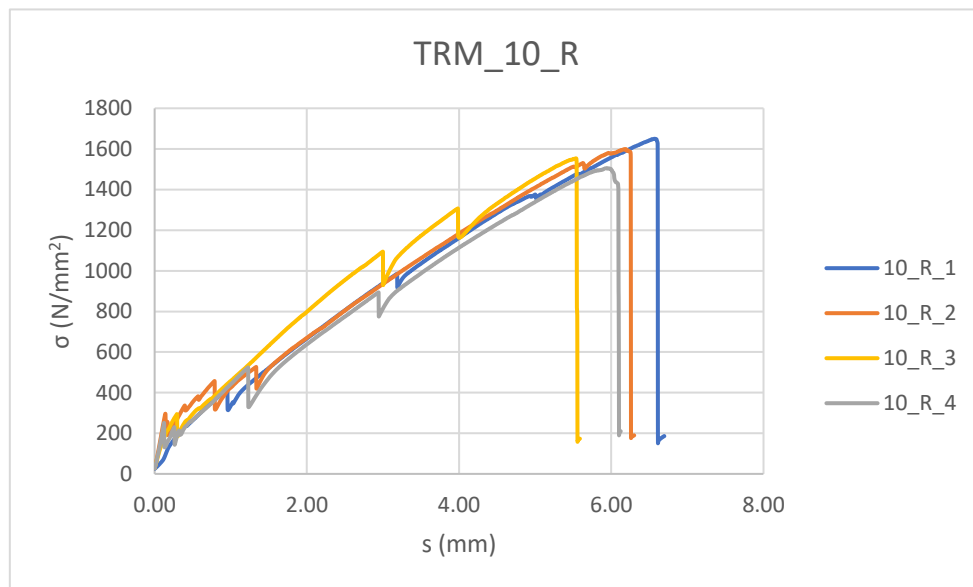


Figura 32 – Diagramma tensione-spostamento, provini spessore 10 mm con rete.

Tabella 1 - Risultati derivanti da prova di trazione uniassiale su provini di TRM da 10 mm.

Provino	$F_{max,TRM}$ [N]	$\sigma_{t,M}$ [MPa]	$\sigma_{u,TRM}$ [MPa]	$S_{t,M}$ [mm]	$S_{u,TRM}$ [mm]	Tipo di rottura
10_R_1	3906.26	1.33	1650.30	0.96	6.57	Rottura fibre
10_R_2	3787.48	0.96	1600.12	0.14	6.19	Rottura fibre
10_R_3	3678.61	1.01	1554.12	0.29	5.54	Rottura fibre
10_R_4	3562.38	0.82	1505.02	0.12	5.96	Rottura fibre
Media	3790.78	1.10	1601.51	0.46	6.10	
Dev. Standard	113.86	0.20	48.10	0.43	0.52	

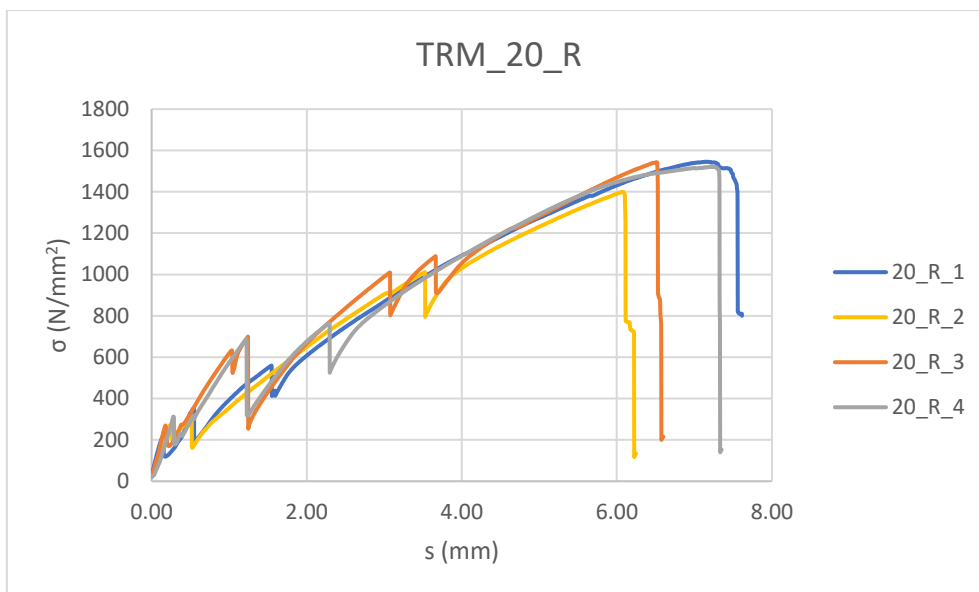


Figura 33 - Diagramma tensione-spostamento, provini spessore 20 mm con rete.

Tabella 2 - Risultati derivanti da prova di trazione uniassiale su provini di TRM da 20 mm.

Provino	$F_{max,TRM}$ [N]	$\sigma_{t,M}$ [MPa]	$\sigma_{u,TRM}$ [MPa]	$s_{t,M}$ [mm]	$s_{u,TRM}$ [mm]	Tipo di rottura
20_R_1	3657.77	0.33	1545.32	0.15	7.16	Rottura fibre
20_R_2	3313.62	0.40	1399.92	0.24	6.07	Rottura fibre
20_R_3	3652.43	0.40	1543.06	0.18	6.51	Rottura fibre
20_R_4	3599.76	0.49	1520.81	0.28	7.24	Rottura fibre
Media	3636.65	0.41	1536.40	0.20	6.97	
Dev. Standard	32.06	0.08	13.55	0.07	0.40	

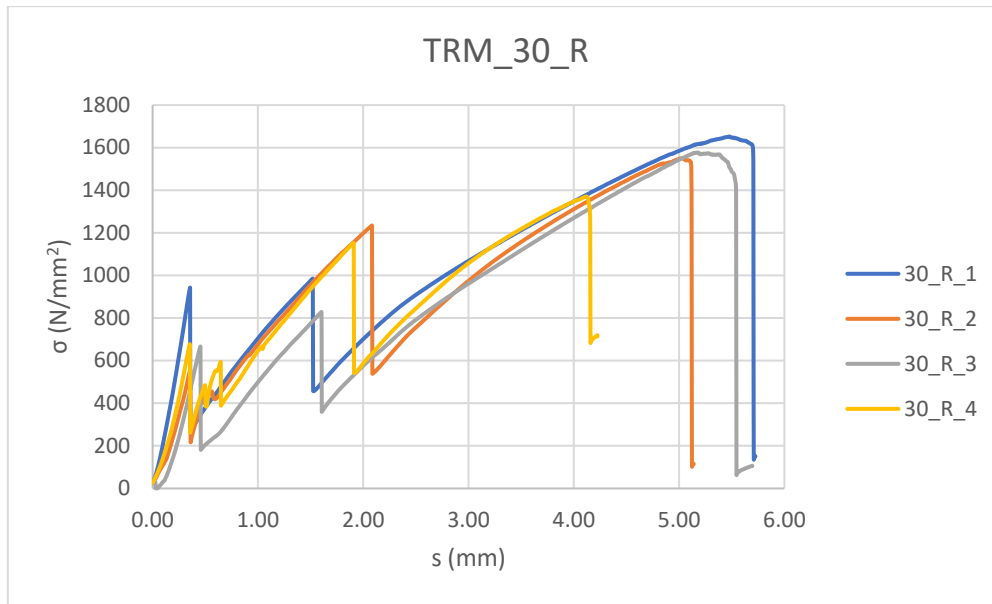


Figura 34 - Diagramma tensione-spostamento, provini spessore 30 mm con rete.

Tabella 3 - Risultati derivanti da prova di trazione uniassiale su provini di TRM da 30 mm.

Provino	$F_{max,TRM}$ [N]	$\sigma_{t,M}$ [MPa]	$\sigma_{u,TRM}$ [MPa]	$s_{t,M}$ [mm]	$s_{u,TRM}$ [mm]	Tipo di rottura
30_R_1	3910.91	1.01	1652.27	0.36	5.48	Rottura fibre
30_R_2	3670.13	0.58	1550.54	0.36	5.05	Rottura fibre
30_R_3	3733.26	0.72	1577.21	0.45	5.18	Rottura fibre
30_R_4	3243.09	0.73	1370.13	0.35	4.12	Rottura fibre
Media	3771.43	0.77	1593.34	0.39	5.24	
Dev. Standard	124.85	0.22	52.75	0.06	0.22	

Considerazioni:

Dall'andamento dei grafici e dai valori ottenuti in tabella si evince una bassa variabilità dei risultati ricavati dai diversi campioni. Le curve rappresentative dei provini 10_R_4, 20_R_2 e 30_R_4 sono caratterizzate da valori di carico massimo e tensione ultima lievemente inferiori rispetto agli altri campioni, che invece presentano maggiore uniformità, per cui tali risultati non sono stati presi in considerazione nel calcolo delle medie. Per tutti i campioni la modalità di rottura è stata per rottura delle fibre dopo la formazione di macrofessure.

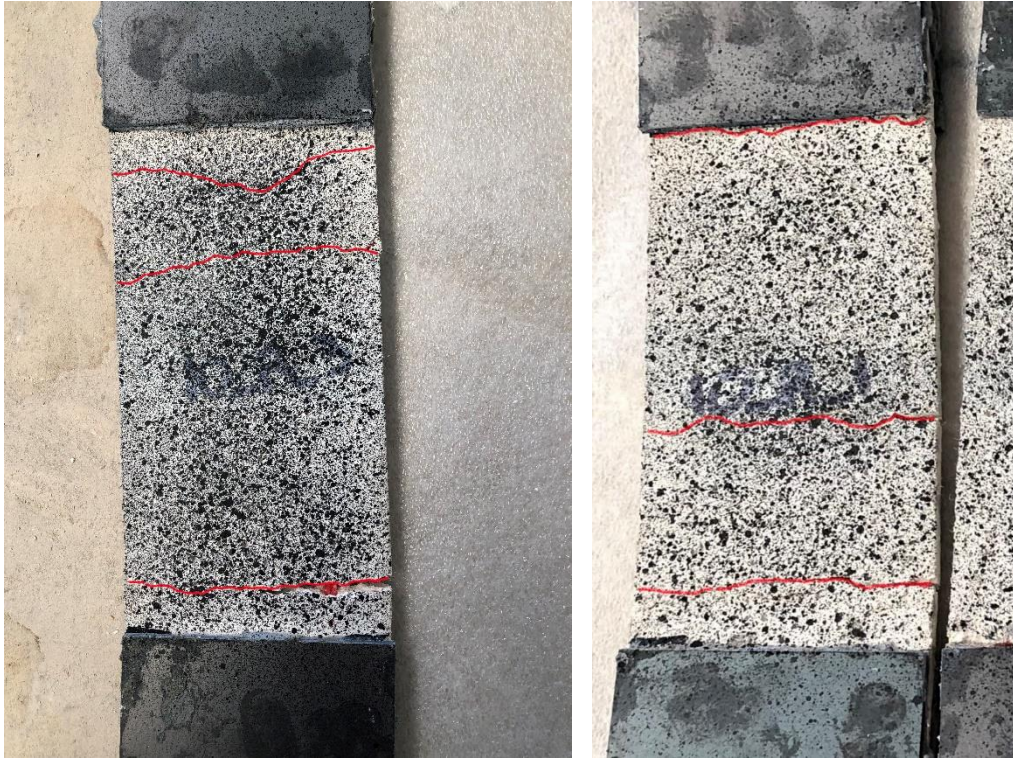


Figura 35 - Provini TRM 10_R fessurati.

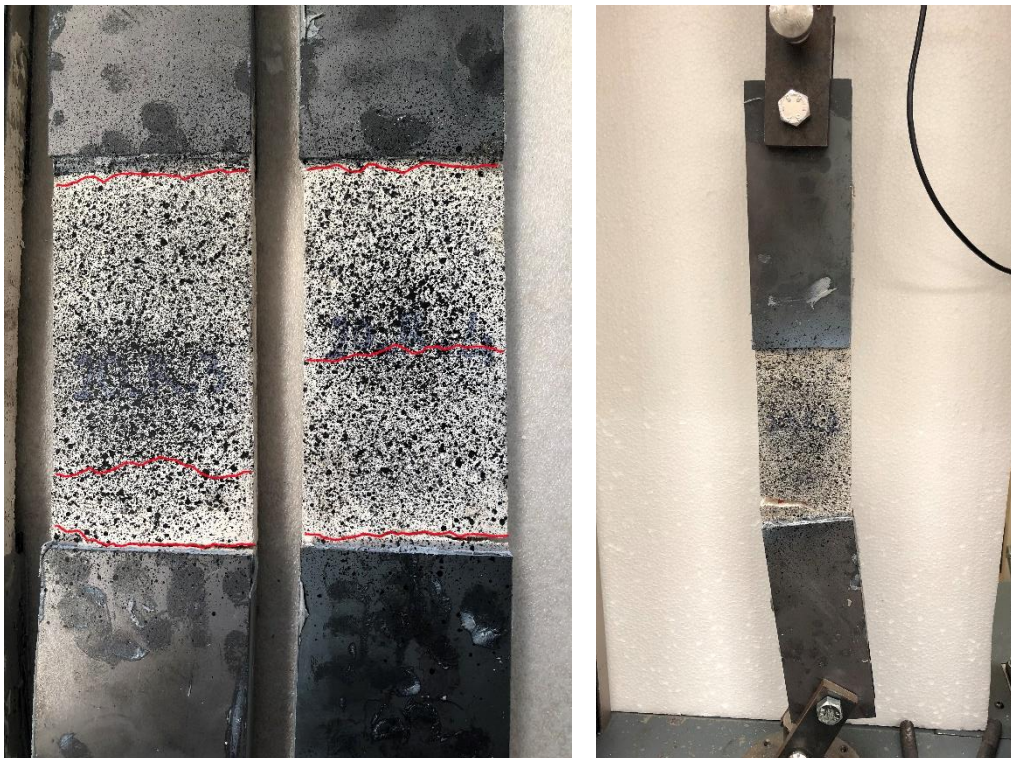


Figura 36 - Provini TRM 20_R fessurati.



Figura 37 - Provino TRM 30_R fessurato.

4.3 Confronto tra i risultati

Dal confronto dei parametri ottenuti dalle prove di trazione, eseguite sui campioni con diverso spessore della matrice emerge che:

Tabella 4 - Confronto tra i parametri relativi ai campioni TRM.

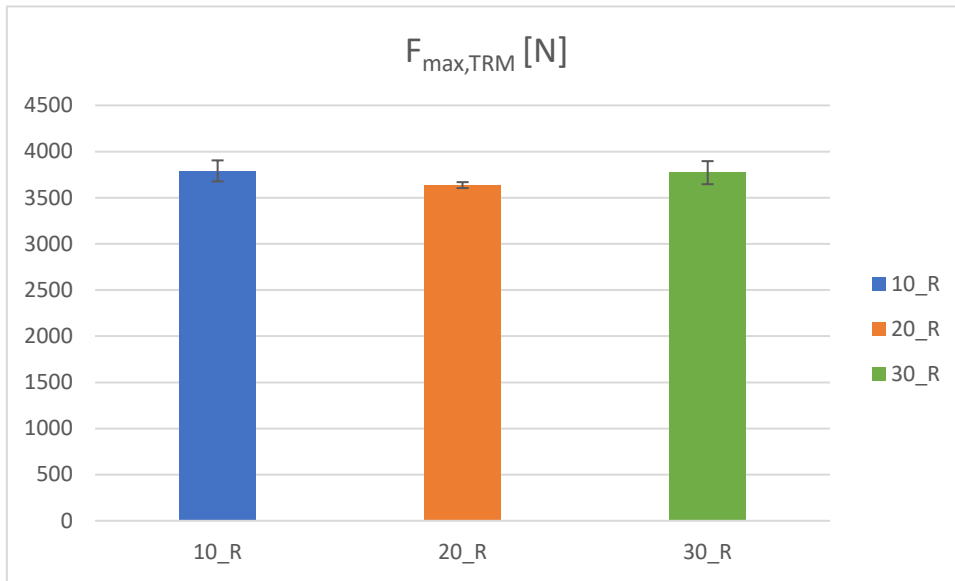
Tipologia	$F_{\max,TRM}$ [N]	$\sigma_{t,M}$ [MPa]	$\sigma_{u,TRM}$ [MPa]	$s_{t,M}$ [mm]	$s_{u,TRM}$ [mm]
10_R	3790.78	1.10	1601.51	0.46	6.10
20_R	3636.65	0.41	1536.40	0.20	6.97
30_R	3771.43	0.77	1593.34	0.39	5.24

Considerazioni:

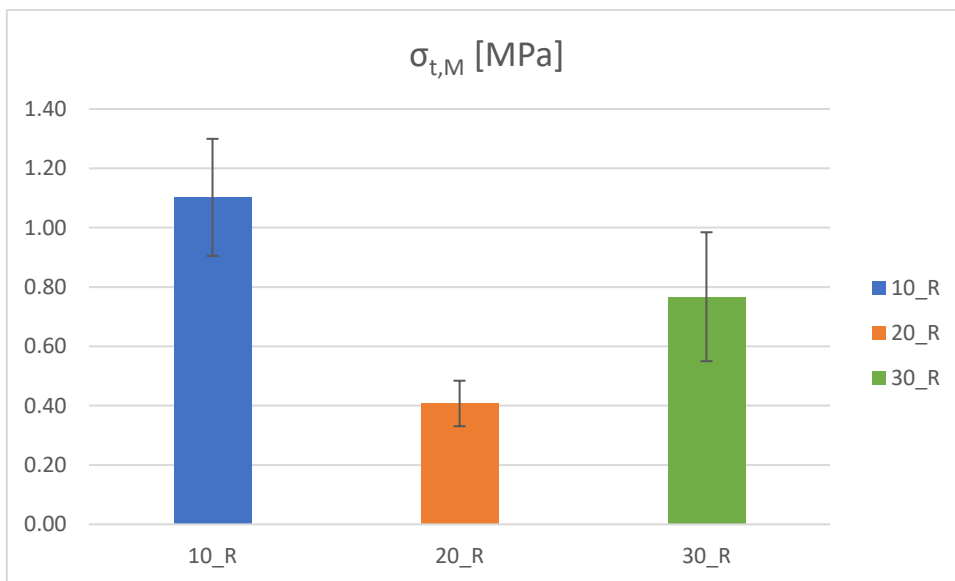
Il carico massimo raggiunto durante la prova è all'incirca lo stesso per i vari spessori. Così come la tensione massima, che non presenta grande variabilità dei risultati a seconda dello spessore. Questo perché viene raggiunta sempre la capacità massima della rete, per cui lo spessore incide poco sulla resistenza. La tensione di prima fessurazione, riferita all'area della sola malta, presenta invece grande variabilità dovuta alla forma dei provini stessi e al fatto che viene testato a trazione un materiale fragile. In particolare il valore

più alto lo otteniamo per lo spessore della matrice da 10 mm. Probabilmente perché, avendo una sezione trasversale più piccola la possibilità di incontrare difetti al suo interno è più bassa. Questa assunzione però non è coerente con il valore ottenuto per il campione da 20 mm, che risulta essere più basso rispetto al provino da 30 mm, probabilmente c'è stato qualche problema in fase di realizzazione, sarebbe dunque necessario effettuare altre prove per verificare il valore individuato. Per quanto riguarda gli spostamenti, quelli in corrispondenza della tensione massima risultano essere più grandi per gli spessori da 10 e 20 mm mentre risultano essere più bassi per lo spessore da 30 mm. Gli spostamenti corrispondenti alla tensione di prima fessurazione hanno invece un valore maggiore per lo spessore da 10 e 30 mm e minore per gli spessori da 20 mm. Osservando la forma delle diverse tipologie di curve, emerge che il comportamento del provino cambia a seconda dello spessore. La prima parte della curva, controllata dalle proprietà meccaniche della malta, è lineare fino alla formazione della prima fessura. Una volta che la malta è giunta a rottura il carico viene trasferito attraverso la rete. Il punto che segna il passaggio dallo stato non fessurato a quello fessurato è chiamato punto di transizione, in corrispondenza di esso si osserva una caduta del carico che varia a seconda dello spessore del provino. In particolare si registra un "salto" la cui ampiezza aumenta all'aumentare dello spessore della matrice. Probabilmente dovuto al fatto che l'area della sezione trasversale della rete è modesta rispetto a quella della malta, per cui non riesce a contrastare la maggior energia rilasciata dai provini di spessore più grande. La seconda parte della curva tensione-spostamento presenta ulteriori "salti", dovuti alla formazione di ulteriori fessure, ed anche questi sono caratterizzati da ampiezze maggiori all'aumentare dello spessore della malta. Di seguito si riportano degli istogrammi che consentono di notare più rapidamente le differenze che emergono al variare dello spessore. Al di sopra di ogni istogramma sono state aggiunte barre di variazione della deviazione standard, per valutare la variabilità dei risultati rispetto alla media.

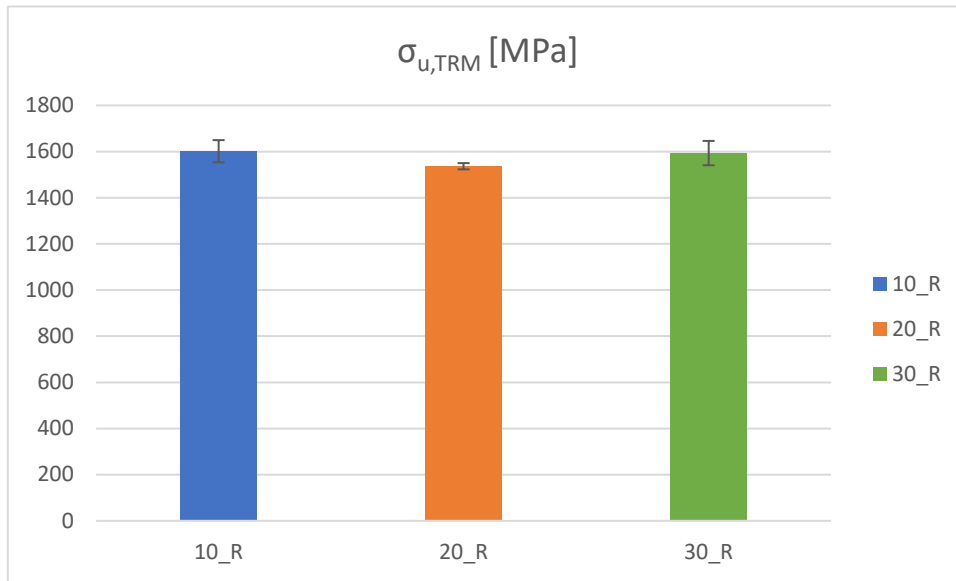
Istogramma 1 - Confronto tra i carichi massimi a trazione per campioni di TRM con diversi spessori.



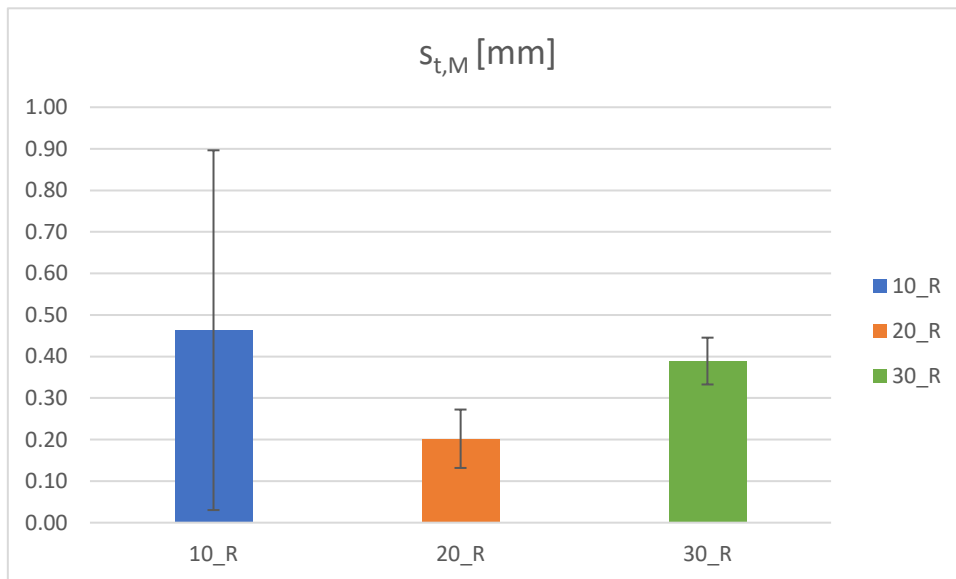
Istogramma 2 - Confronto tra le tensioni di prima fessurazione per campioni di TRM con diversi spessori.



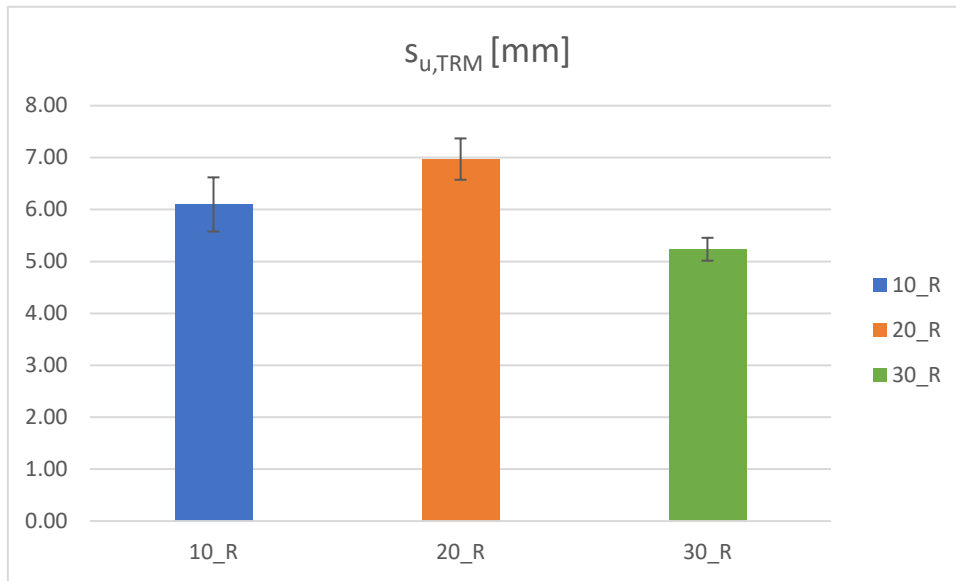
Istogramma 3 - Confronto tra le tensioni massime a trazione per campioni di TRM con diversi spessori.



Istogramma 4 - Confronto tra gli spostamenti in corrispondenza del punto di transizione per campioni di TRM con diversi spessori.



Istogramma 5 - Confronto tra gli spostamenti in corrispondenza della tensione massima per campioni di TRM con diversi spessori.



5 Valutazione della resistenza a trazione della matrice

Nella presente trattazione la valutazione della resistenza a trazione della malta è avvenuta considerando due differenti tipologie di prove e diverse forme dei provini. Le prove eseguite sono la prova a trazione diretta (test di trazione uniassiale) e la prova a flessione su tre punti. Per quanto riguarda la forma dei provini sono stati considerati prismi di dimensioni 40x40x160 mm e prismi aventi le stesse dimensioni dei campioni utilizzati per la caratterizzazione a trazione del sistema di rinforzo TRM ma senza la fibra all'interno della matrice. Le prove sono state condotte al fine di ricavare delle considerazioni sulla relazione tra resistenza a trazione pura e resistenza a flessione.

5.1 Prove di resistenza a flessione e a compressione

Sui provini prismatici relativi alla matrice inorganica sono state eseguite prove di resistenza meccanica a flessione e a compressione. I test sono stati condotti utilizzando la macchina di prova Zwick/Roell Z050 (capacità 50 kN). Il carico è stato applicato con modalità a controllo di spostamento con velocità della traversa impostata a 0,5 mm/min. La prova per la determinazione della resistenza a flessione prevede l'utilizzo di uno strumento che vincola il provino, disposto longitudinalmente, alle estremità attraverso dei ritegni a rullo distanti 10 cm. Centralmente un terzo rullo imprime un carico progressivamente crescente a velocità costante. Tale configurazione impone che nel mezzo del provino si generi un momento flettente crescente fino al raggiungimento del valore di rottura.

Avvenuta la rottura per flessione, i due spezzoni risultanti sono stati sottoposti a prova di resistenza meccanica per compressione semplice. La prova è eseguita esercitando una forza di compressione su una superficie di dimensione 40x40 mm. (Figura 38)

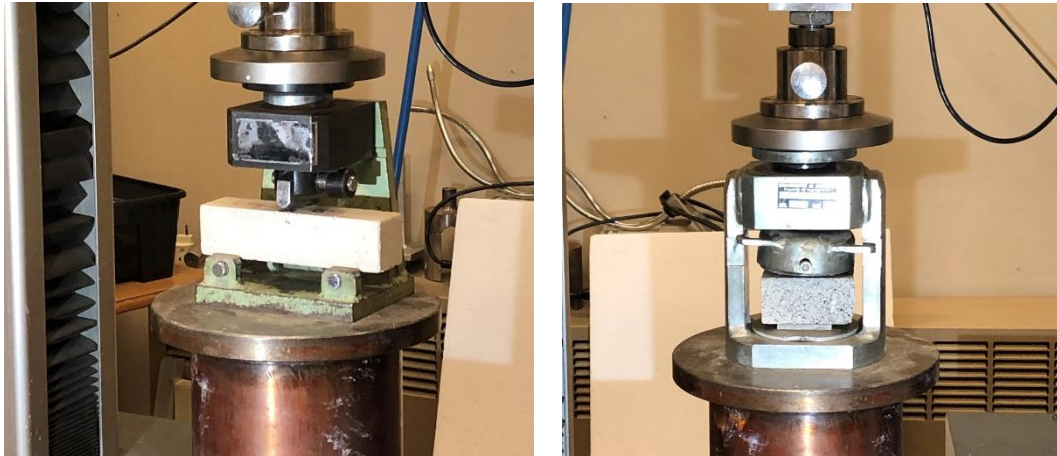


Figura 38 - Prove di resistenza a flessione e a compressione.

5.1.1 Elaborazione dei risultati

La cella di carico è collegata ad una centralina di acquisizione e rielaborazione dei dati provenienti dalla macchina di prova che ci ha permesso di ottenere i valori relativi alle forze esercitate (N). La forza è stata poi trasformata in una tensione espressa in MPa.

La resistenza a compressione è stata determinata dividendo la forza F (in N) per la superficie A (in mm²) sulla quale essa è stata applicata, ovvero un'area di 40x40 mm secondo la formula: $\sigma = F/A$.

La sollecitazione di rottura a flessione è stata invece calcolate tenendo conto della metodologia di applicazione del carico schematizzata in Figura 39.

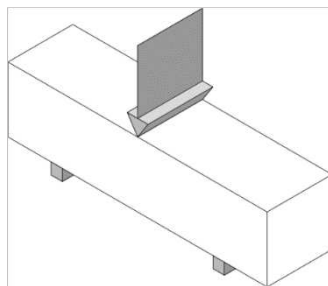


Figura 39 - Schema di carico per la prova di flessione.

Il valore della resistenza a flessione, ovvero a trazione per flessione, del singolo provino di malta indurita si calcola con la seguente formula:

$$\sigma = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} [\text{MPa}]$$

in cui F è il valore del carico massimo applicato (in N), b e d sono rispettivamente i valori (in mm) di larghezza e altezza del provino e con l si indica la distanza (in mm) tra gli assi dei supporti (pari a 100 mm nel caso specifico).

5.1.2 Risultati sperimentali

La curva tensione-spostamento tipica ottenuta dalla prova a trazione diretta mostra, come previsto, un comportamento elastico lineare fragile, senza capacità residua dopo la formazione della prima fessura. Si è potuto osservare che lo sviluppo della fessura è graduale, grazie all'intervento di fibre disperse nella malta che impediscono uno sviluppo rapido e immediato della stessa.



Figura 40 - Provini fessurati dopo essere stati sottoposti a prova di flessione e compressione.

Nelle figure seguenti vengono riportati i diagrammi tensione-spostamento relativi alle prove a flessione e a compressione e le tabelle contenenti i valori dei parametri individuati.

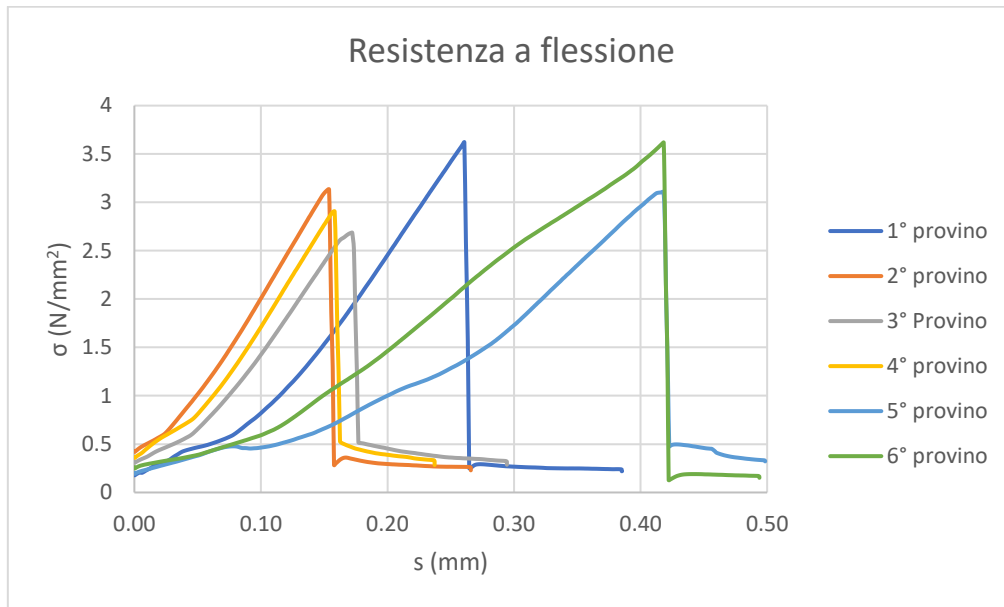


Figura 41 - Diagramma dei provini testati a flessione.

Tabella 5 - Risultati derivanti da prova a flessione su provini di malta 40x40x160.

Provino	A [mm ²]	F _{max} [N]	σ _{t,flex} [MPa]
IO M15 01	1600	1544.92	3.62
IO M15 02	1600	1337.82	3.14
IO M15 03	1600	1146.75	2.69
IO M15 04	1600	1239.84	2.91
IO M15 05	1600	1326.09	3.11
IO M15 06	1600	1544.49	3.62
Media		1356.65	3.18
Dev. Standard		161.07	0.38

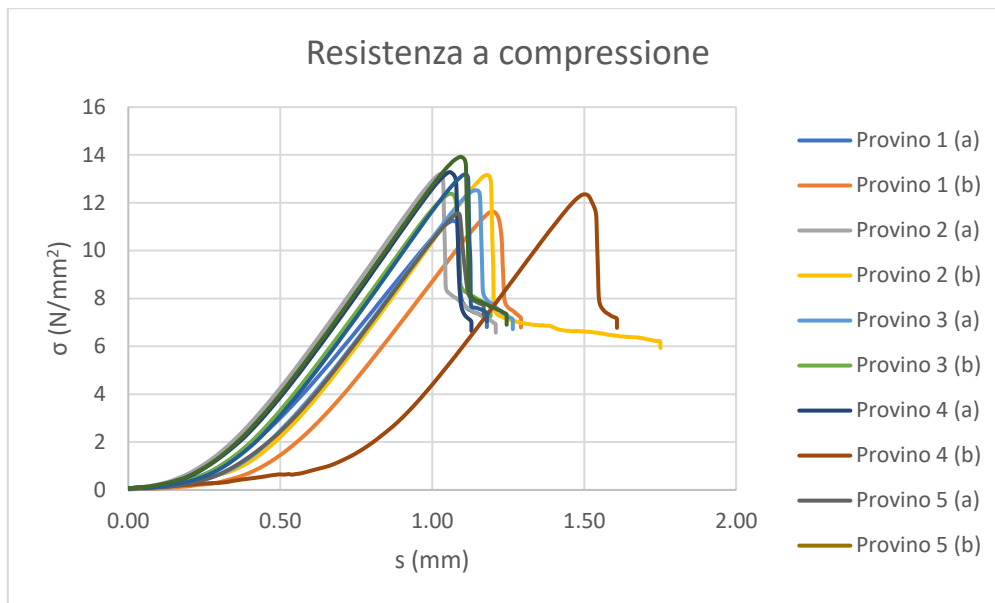


Figura 42 - Diagramma dei provini testati a compressione.

Tabella 6 - Risultati derivanti da prova a compressione su provini di malta 40x40x160.

Provino	A [mm ²]	Fmax [N]	f _{cm} [MPa]
IO M15 01a	1600	17993.89	11.25
IO M15 01b	1600	18600.25	11.63
IO M15 02a	1600	21134.00	13.21
IO M15 02b	1600	21060.61	13.16
IO M15 03a	1600	20035.11	12.52
IO M15 03b	1600	19803.88	12.38
IO M15 04a	1600	21253.65	13.28
IO M15 04b	1600	19765.69	12.35
IO M15 05a	1600	18495.78	11.56
IO M15 05b	1600	19328.64	12.08
IO M15 06a	1600	21096.67	13.19
IO M15 06b	1600	22270.06	13.92
Media		20069.85	12.54
Dev. Standard		1260.67	0.79

5.2 Prova a trazione uniassiale

Per valutare la resistenza alla trazione pura dei diversi tipi di provini sono state effettuate prove a trazione uniassiale, attraverso il set up di prova comunemente utilizzato per la caratterizzazione dei provini di TRM. Come già descritto, per la prova a trazione diretta, il sistema di aggancio tra il provino e la macchina di prova è stato realizzato mediante l'incollaggio agli estremi del provino di piastre metalliche forate, solidarizzate con resina epossidica alla malta. Per eseguire il test a trazione sui campioni è stata utilizzata la macchina di prova a trazione Zwick/Roell Z050 (capacità 50 kN). Il carico è stato applicato con modalità a controllo di spostamento con velocità della traversa impostata a 0,5 mm/min.

5.2.1 Elaborazione dei risultati

Per la costruzione dei grafici rappresentativi del comportamento dei provini è necessario eseguire la rielaborazione dei dati restituiti dal macchinario di prova. Dunque il primo passo è stato quello di definire lo sforzo σ [N/mm²] come il rapporto tra la forza, fornita dalla macchina, e l'area della sezione trasversale del campione di malta. Dopo aver individuato lo sforzo è stato possibile costruire i grafici sforzo-spostamento delle varie prove effettuate, differenziandole per tipo di provino. Ogni tipologia è caratterizzata da un grafico contenente quattro curve, o tre in alcuni casi.

5.2.2 Risultati sperimentali

La curva tensione-spostamento tipica ottenuta dalla prova a trazione diretta mostra, come previsto, un comportamento elastico lineare fragile, senza capacità residua dopo la formazione della prima fessura (Figura 43), la quale avviene nella lunghezza libera del provino, per alcuni campioni, ma soprattutto in prossimità delle piastre di ancoraggio. Questo potrebbe essere dovuto ad una possibile sollecitazione di flessione ma anche dal fatto che il provino presenta la stessa sezione per tutta la sua lunghezza, per cui si verifica una concentrazione di tensione in prossimità delle piastre.



Figura 43 - Provini fessurati.

Nelle figure seguenti vengono riportati i diagrammi tensione-spostamento, relativi alle diverse tipologie di provini e le tabelle contenenti i valori dei parametri individuati.

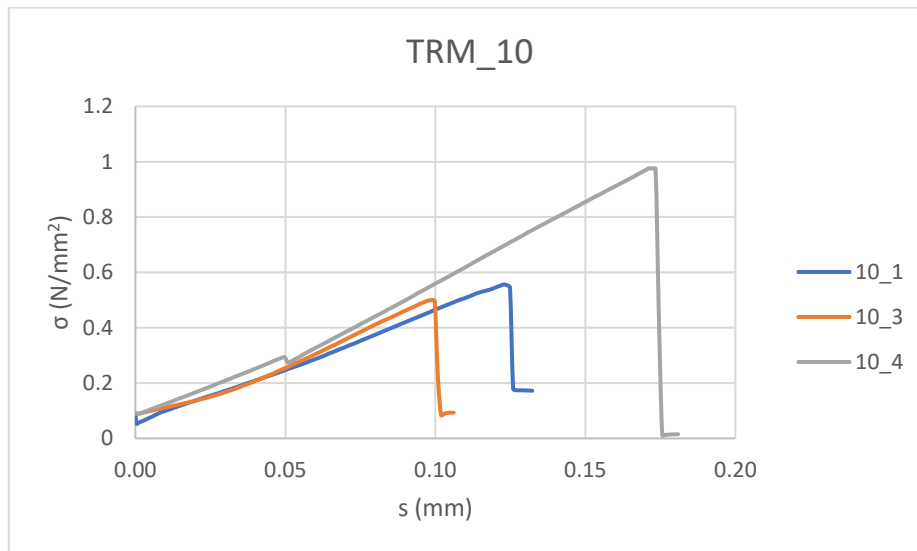


Figura 44 - Diagramma σ -s dei provini a trazione uniassiale.

Tabella 7- Risultati derivanti da prova di trazione uniassiale su provini di sola malta.

Provino	$F_{\max,t}$ [N]	σ_t [MPa]	s_t [mm]
10_1	415.82	0.56	0.12
10_3	382.77	0.50	0.10
10_4	728.69	0.98	0.17
Media	509.09	0.68	0.13
Dev. Standard	190.89	0.26	0.04

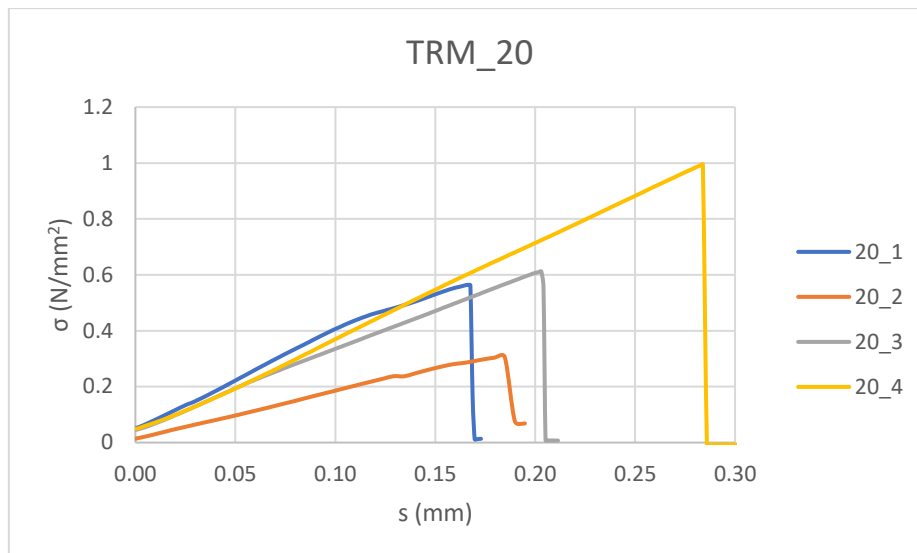


Figura 45 - Diagramma σ - s dei provini a trazione uniassiale.

Tabella 8 - Risultati derivanti da prova di trazione uniassiale su provini di sola malta.

Provino	$F_{\max,t}$ [N]	σ_t [MPa]	s_t [mm]
20_1	848.94	0.56	0.17
20_2	459.98	0.31	0.18
20_3	906.41	0.61	0.20
20_4	1421.01	1.00	0.28
Media	909.09	0.62	0.21
Dev. Standard	394.71	0.28	0.05

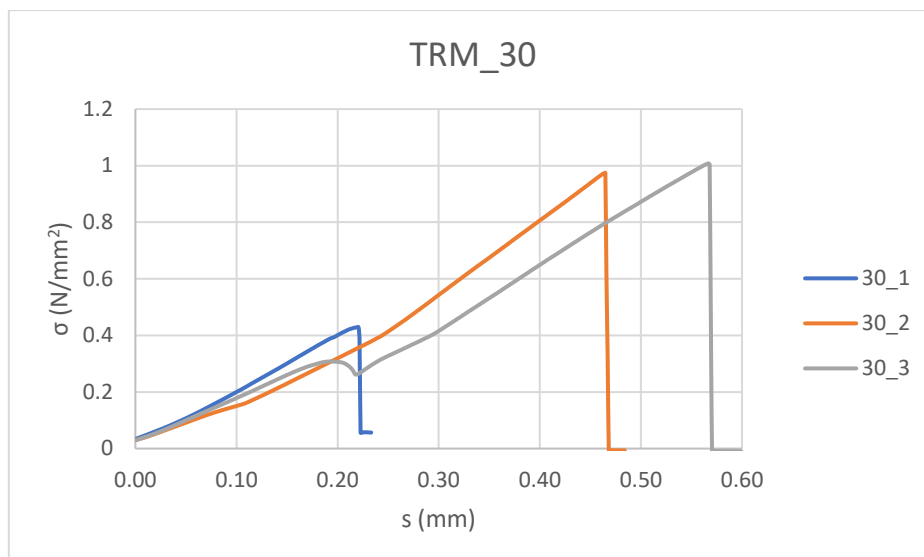


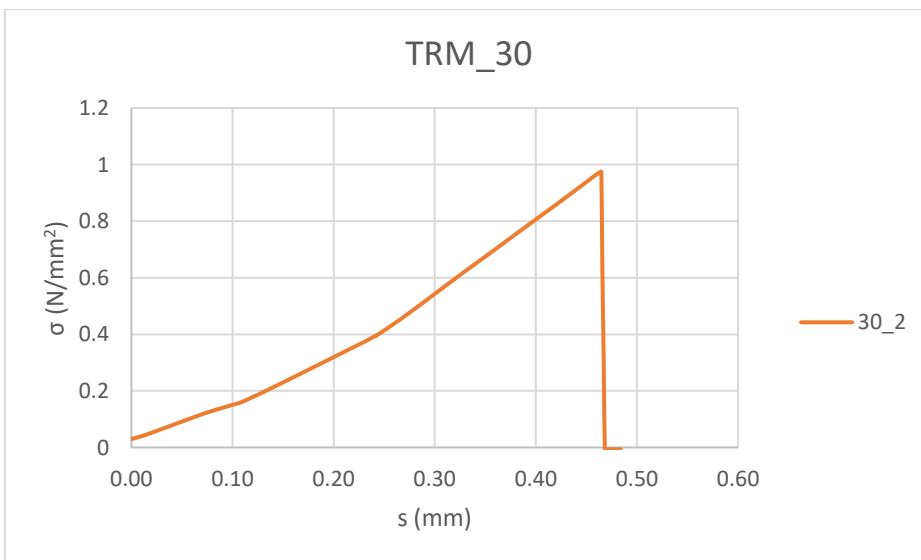
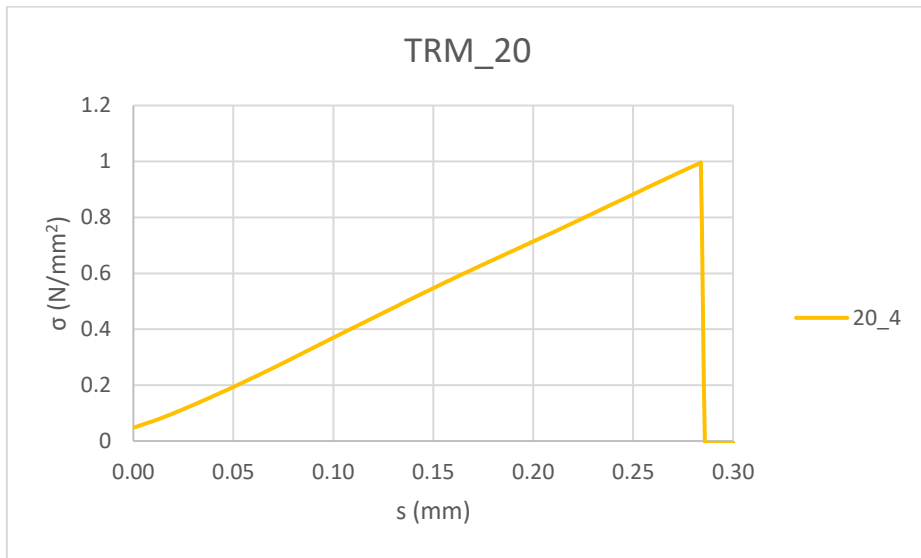
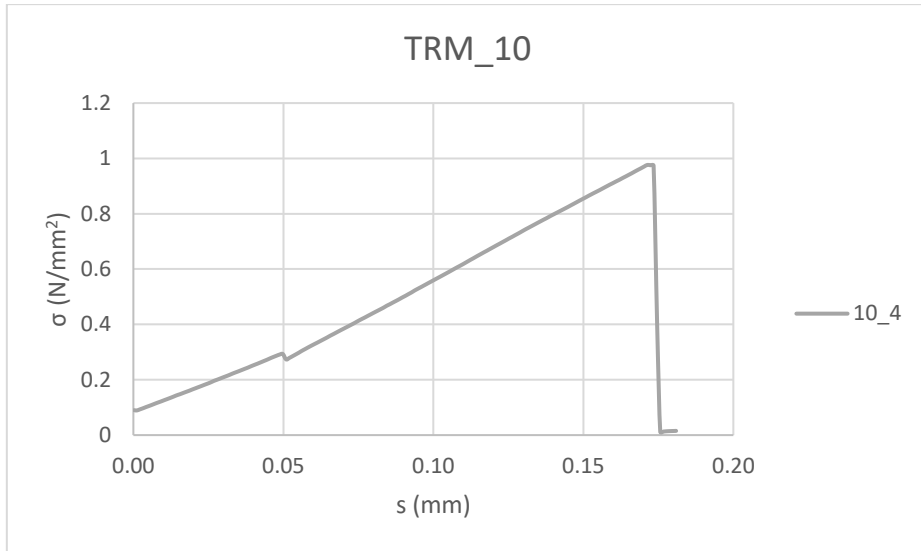
Figura 46 - Diagramma σ - s dei provini a trazione uniassiale.

Tabella 9 - Risultati derivanti da prova di trazione uniassiale su provini di sola malta.

Provino	$F_{\max,t}$ [N]	σ_t [MPa]	s_t [mm]
30_1	930.13	0.43	0.22
30_2	2173.98	0.97	0.46
30_3	2175.18	1.01	0.57
Media	1759.77	0.80	0.42
Dev. Standard	718.48	0.32	0.18

Considerazioni:

Poiché dal valore della deviazione standard emerge un'elevata dispersione dei risultati, dovuta al fatto che testiamo a trazione un materiale fragile, considerare la media potrebbe non essere significativo. Dunque è stato preso in considerazione solo il valore di tensione più alto per ogni tipologia di provino, scartando invece quelli più bassi. Così facendo si ottiene uniformità dei risultati, con un valore di tensione pari a circa 1 MPa per tutte le tipologie. Nelle figure seguenti si riportano le curve a cui ci si riferisce:



5.3 Correlazione tra i risultati della prova a trazione uniassiale e delle prove a flessione e compressione.

Ad oggi non c'è un metodo standardizzato per la determinazione della resistenza a trazione della matrice che costituisce i sistemi TRM. Il FIB model code 2010 propone una formulazione che ci consente di determinare la resistenza a trazione partendo da quella a flessione:

$$f_{t,M} = \frac{f_f \cdot 0.06 \cdot h_b^{0.7}}{1 + 0.06 \cdot h_b^{0.7}}$$

Dove h_b è la profondità del provino utilizzato per la prova a flessione su tre punti (pari a 40 mm in questo caso). Con questa relazione si ottiene una resistenza a trazione pari a 1,41 MPa, quindi il rapporto $\sigma_{t,flex} / \sigma_t$ è di circa 2.25. I valori ottenuti sperimentalmente si discostano di poco dalla previsione fatta con la formulazione precedente. Se consideriamo soltanto il valore più alto per prove di trazione pura otteniamo un valore di resistenza simile per tutti e tre gli spessori, pari a circa 1 MPa. Dunque il rapporto $\sigma_{t,flex} / \sigma_t$ è di poco superiore a 3. Da altri studi effettuati [7] emerge che il rapporto tra i due metodi è di circa 2 per malte a base di calce idraulica e 3 per malte a base cementizia, per cui il valore di correlazione rientra nell'ordine di grandezza individuato in letteratura.

Tabella 10 – Confronto tra i risultati sperimentali a trazione pura e a trazione per flessione.

Tipo di malta	Spessore [mm]	σ_t [MPa]	$\sigma_{t,mean}$ [Mpa]	$\sigma_{t,flex}$ [MPa]	$\sigma_{t,flex,mean}$ [MPa]	Rapporto $\sigma_{t,flex} / \sigma_t$
NHL-M15	10	0.56	0.98	3.62	3.18	3.26
		0.50				
		0.98				
	20	0.56	1.00	3.14	3.18	3.20
		0.31				
		0.61				
		1.00				
	30	0.43	0.97	3.11	3.18	3.26
		0.97				
1.01						

Tabella 11 - Confronto tra i risultati sperimentali a trazione pura e a compressione.

Tipo di malta	Spessore [mm]	σ_t [MPa]	$\sigma_{t,mean}$ [Mpa]	σ_c [MPa]	$\sigma_{c,mean}$ [MPa]	Rapporto σ_c / σ_t
NHL-M15	10	0.56	0.98	11.25	12.54	12.85
		0.50		11.63		
		0.98		13.21		
				13.16		
	20	0.56	1.00	12.52		
		0.31		12.38		
		0.61		13.28		
		1.00		12.35		
	30	0.43	0.97	11.56		
		0.97		12.08		
		1.01		13.19		
				13.92		
					12.87	

Considerazioni:

Nella Tabella 10 l'ultima colonna rappresenta il rapporto tra le resistenze a trazione ottenute dalle due diverse tipologie di prova, dimostrando che non sono coincidenti. La differenza tra i risultati ottenuti dipende dal modo in cui le sollecitazioni vengono distribuite nei due metodi di prova: in maniera uniforme per le prove di trazione pura e fortemente variabili per le prove di flessione. In quest'ultimo i difetti, distribuiti casualmente, sono critici solo quando sono localizzati in prossimità della superficie del prisma in trazione, in questo caso il campione ha una limitata capacità di redistribuzione delle sollecitazioni verso la parte interna del provino. Nel primo caso la concentrazione di difetti in una data sezione trasversale può produrre una rottura fragile, senza alcuna capacità di redistribuzione delle sollecitazioni.

Questi risultati aprono un dibattito sulle prove più idonee da adottare per la caratterizzazione meccanica della malta. Come emerso dal presente lavoro e da studi presenti in letteratura [7] la prova di flessione standard, attualmente ampiamente adottata, potrebbe portare ad una sovrastima delle effettive proprietà meccaniche della malta utilizzata per i TRM. In questo quadro, le prove di trazione pura su campioni di malta, eseguite con lo stesso apparato sperimentale utilizzato per le prove di trazione su provini FRCM, sono l'unico metodo affidabile per una corretta valutazione della resistenza a trazione della matrice. I risultati sperimentali hanno mostrato che la capacità a trazione della malta non dipende dallo spessore del campione dunque in questo caso è possibile

una correlazione tra i due metodi di prova con un valore, come detto all'inizio del paragrafo, di poco superiore a 3. Poiché le prove di trazione pura sono difficili da eseguire, l'obiettivo è quello di promuovere un ampliamento del database sperimentale necessario per confermare o calibrare i valori di correlazione ottenuti, in modo da eseguire in futuro semplici prove standard di flessione che diano una corretta stima della reale resistenza a trazione dei materiali utilizzati all'interno dei sistemi di rinforzo FRCM.

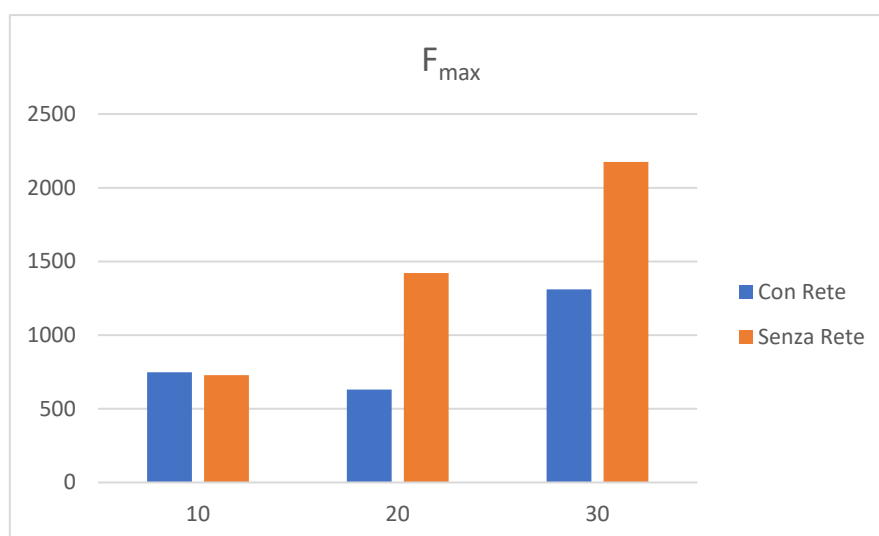
5.4 Confronto tra la tensione di prima fessurazione e la tensione ultima a trazione della malta.

Tipologia	$F_{max,t,M}$	$\sigma_{t,M}$ [MPa]	$s_{t,M}$ [mm]
10_R	746.82	1.10	0.46
20_R	631.17	0.41	0.20
30_R	1309.51	0.77	0.39

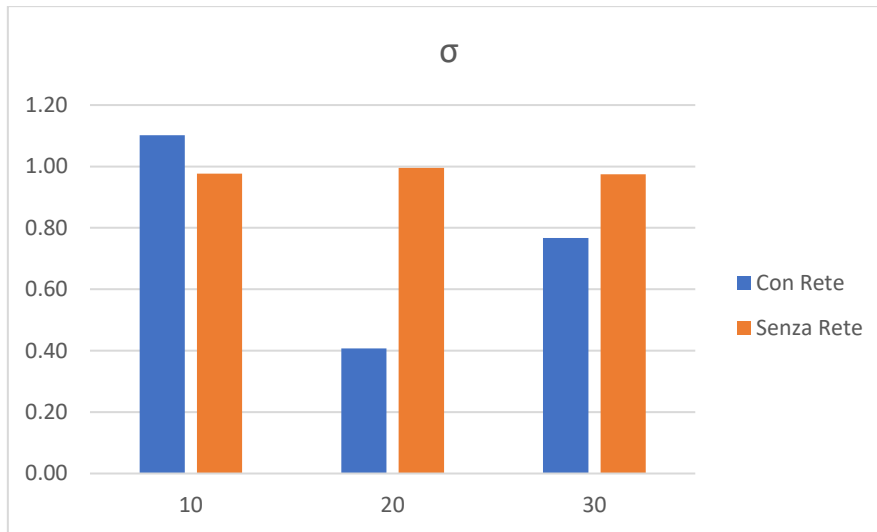
Tipologia	$F_{max,t}$ [N]	σ_t [MPa]	s_t [mm]
10	509.09	0.98	0.17
20	1058.79	1.00	0.28
30	2174.58	0.97	0.46

Di seguito si riportano degli istogrammi che consentono di notare più rapidamente le differenze che emergono al variare dello spessore:

Istogramma 6 – Confronto del carico massimo raggiunto dai campioni con e senza rete.



Istogramma 7 - Confronto della tensione massima raggiunto dai campioni con e senza rete.



Considerazioni:

Dal confronto tra i risultati della prova a trazione condotta sui provini TRM e sui provini di sola malta, si può notare come, nello spessore da 10 mm, la presenza della rete non vada ad influire sulle caratteristiche della malta stessa, per cui si registra una tensione di prima fessurazione che si avvicina alla resistenza ultima del materiale. La stessa considerazione può essere fatta per lo spessore da 30 mm. Il valore della tensione di prima fessurazione, infatti, non si discosta molto dalla resistenza ultima del campione senza rete. Per i provini da 20 mm non è possibile fare considerazioni certe, poiché il valore di prima fessurazione è molto basso, da valutare con ulteriori prove.

È da sottolineare che questo confronto è stato fatto riferendoci ad un unico valore di resistenza a trazione della matrice, quello più alto, sulla base delle considerazioni fatte nel §5.2, per cui il confronto vuole essere una stima da verificare attraverso ulteriori prove.

6 Stima del modulo elastico nel tratto fessurato dei campioni di TRM

Nel seguente capitolo si esegue una stima approssimativa del modulo elastico dei campioni TRM nel tratto fessurato. La procedura è stata quella di depurare dal dato di spostamento della cella di carico, fornito dal macchinario di prova, la posizione iniziale della traversa. Dividendo il valore ottenuto per la lunghezza totale del campione si riesce ad ottenere quello che è l'allungamento del provino. Successivamente si valuta il modulo elastico nel tratto fessurato seguendo le indicazioni suggerite dalla normativa AC434.

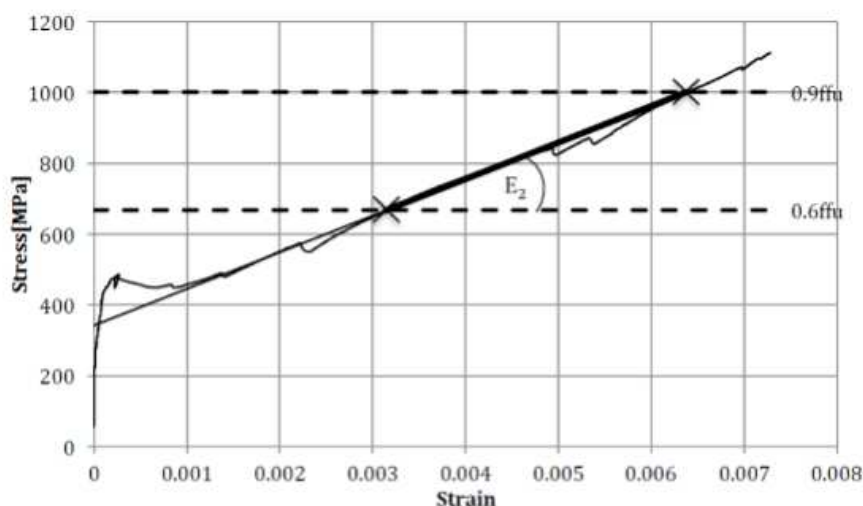


Figura 47 - Intervallo di interpolazione indicato nelle AC434.

Sul segmento della curva di risposta, corrispondente al tratto fessurato, si selezionano i due punti corrispondenti ad una sollecitazione di entità pari al 90% di $\sigma_{u,TRM}$ e al 60% di $\sigma_{u,TRM}$. La pendenza della retta che collega questi due punti rappresenta il modulo elastico. Per cui la relazione utilizzata è la seguente:

$$E_f = \frac{\Delta f}{\Delta \varepsilon} = \frac{(0.90f_{fu} - 0.60f_{fu})}{(\varepsilon_{f@0.90f_{fu}} - \varepsilon_{f@0.60f_{fu}})}$$

Nelle figure seguenti vengono riportati i diagrammi tensione-deformazione ottenuti. Si riportano inoltre le tabelle con i valori dei moduli elastici individuati per ogni provino e la media.

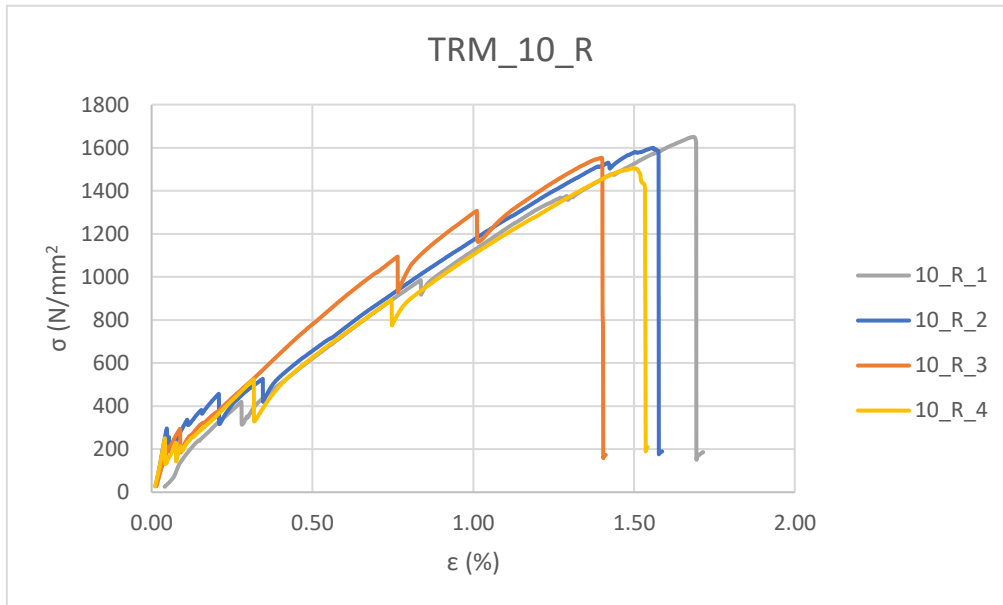


Figura 48 - Diagramma tensione-deformazione, provini spessore 10 mm con rete.

Tabella 12 - Modulo elastico nel tratto fessurato, provini spessore 10 mm con rete.

Provino	E_f [MPa]
10_R_1	86033.50
10_R_2	93812.24
10_R_3	79636.31
10_R_4	96180.19
Media	88915.56

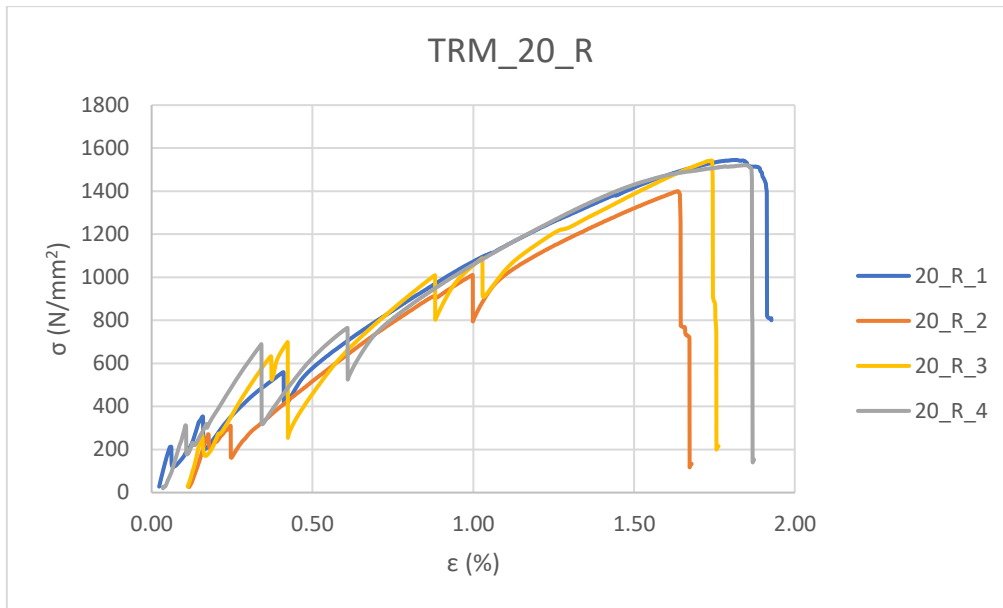


Figura 49 - Diagramma tensione-deformazione, provini spessore 20 mm con rete.

Tabella 13 - Modulo elastico nel tratto fessurato, provini spessore 20 mm con rete.

Provino	E_f [MPa]
20_R_1	74195.27
20_R_2	69054.87
20_R_3	66830.98
20_R_4	82936.60
Media	73254.43

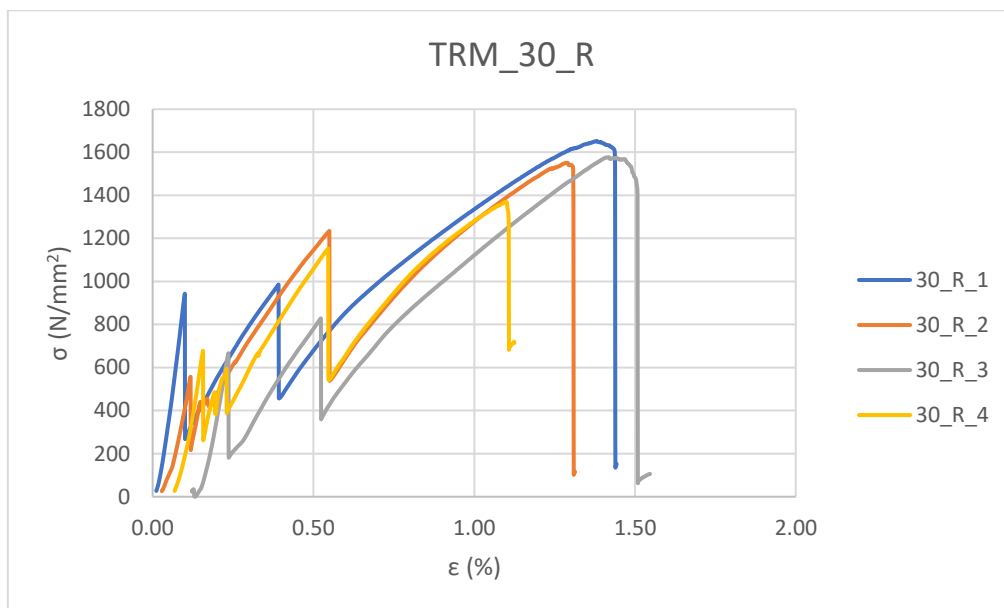


Figura 50 - Diagramma tensione-deformazione, provini spessore 30 mm con rete.

Tabella 14 - Modulo elastico nel tratto fessurato, provini spessore 30 mm con rete.

Provino	E_f [MPa]
30_R_1	109831.78
30_R_2	131835.41
30_R_3	120540.89
30_R_4	149084.49
Media	127823.14

6.1 Confronto dei Moduli elastici delle diverse tipologie di provini.

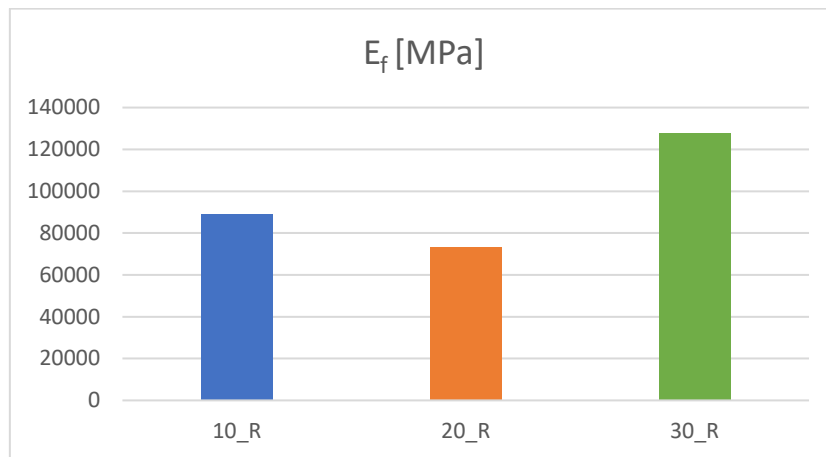
Attraverso questa procedura si ottengono valori del modulo elastico molto più alti rispetto a quelli tipici del TRM rinforzato con la rete in vetro, poiché si tratta di una valutazione approssimativa. Per cui ciò che è stato fatto è un'ipotesi del valore di questo parametro al fine di valutare come lo spessore della matrice influenzi il comportamento post-fessurativo del composito.

Tabella 15 - Confronto dei Moduli elastici relativi ai diversi provini.

Tipologia	E_f [MPa]	E_f [GPa]
10_R	88915.56	88.92
20_R	73254.43	73.25
30_R	127823.14	127.82

Di seguito si riportano degli istogrammi che consentono di notare più rapidamente le differenze che emergono al variare dello spessore.

Istogramma 8 - Confronto dei Moduli elastici relativi ai diversi provini.



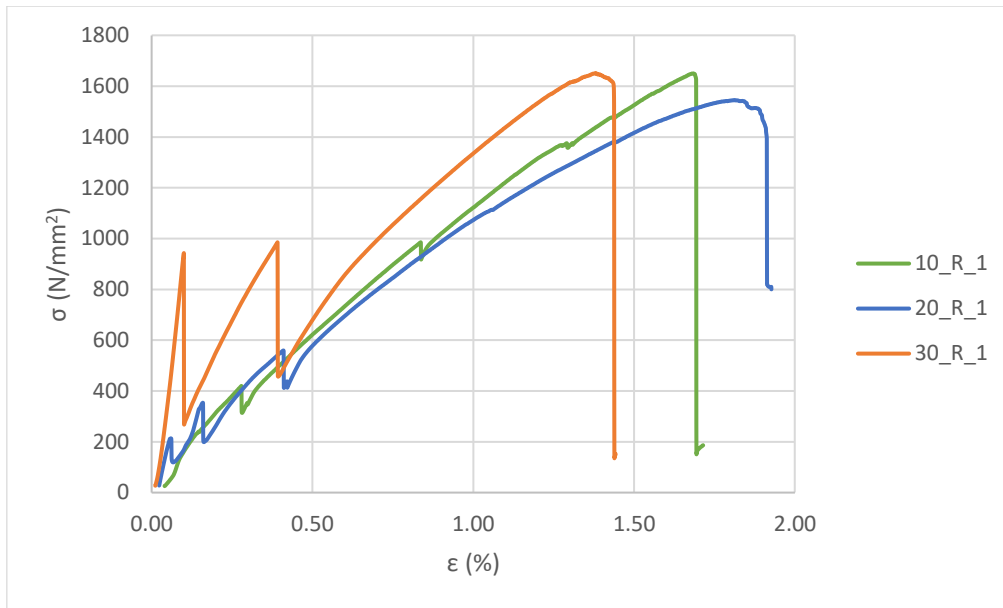


Figura 51 - Sovrapposizione delle curve relative ai diversi provini.

Considerazioni:

Dalla sovrapposizione delle curve possiamo avere un'idea della pendenza del tratto compreso tra il 90% e il 60% di $\sigma_{u,TRM}$. Possiamo notare come il provino con lo spessore più grande abbia, nel tratto fessurato, una pendenza maggiore nella prima parte. Questo potrebbe essere dovuto ad un effetto di irrigidimento che la malta conferisce al provino fessurato, poi tende a stabilizzarsi e ad assumere la stessa pendenza degli altri provini.

7 Valutazione del modulo elastico dinamico della matrice

I provini 40x40x160 di matrice inorganica, prima dello svolgimento delle prove di resistenza meccanica a flessione e a compressione, sono stati sottoposti a prova sonica per la determinazione del modulo elastico dinamico con l'obiettivo di avere un ulteriore parametro di riferimento. Il metodo consiste nel valutare la velocità di attraversamento delle onde ultrasoniche nei provini, il valore di velocità ottenuto viene poi associato al modulo elastico dinamico E_d del materiale attraverso la seguente relazione:

$$v = k \cdot \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad \text{con} \quad k = \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}}$$

Dove:

- v è la velocità delle onde espressa in m/s;
- E_d indica il modulo di elasticità dinamico in N/m²;
- r è la massa volumica del materiale espressa in kg/m³ (valutata dividendo il peso di ciascun provino per il proprio volume apparente);
- k è una costante dipendente dal modulo di Poisson, ν , supposto pari a 0,30 per i provini di matrice inorganica.

La velocità v è stata ricavata dividendo la lunghezza del percorso compiuto dalle onde ultrasoniche, 16 cm in questo caso, per il tempo impiegato, misurato in μ s.



Figura 52 - Strumentazione utilizzata per lo svolgimento della prova sonica.

Il valore del modulo elastico individuato deriva dalla media dei risultati ottenuti da una serie di 4 provini. Dalla elaborazione dei risultati della prova sonora derivano le tabelle seguenti:

Provino	T (μs)			T _{medio} (μs)	T _{medio} (s)
1	61.8	62	61.5	61.77	0.00006177
2	61.3	61.2	60.8	61.10	0.00006110
3	61.2	61.6	62.4	61.73	0.00006173
4	61	61.2	61.2	61.13	0.00006113

	1	2	3	4	
L (m)	0.16	0.16	0.16	0.16	
T (s)	0.0000618	0.0000611	0.0000617	0.0000611	
v (m/s)	2590.25	2618.66	2591.93	2617.37	
P (kg)	0.3815	0.3795	0.3913	0.3865	
V (m ³)	0.000256	0.000256	0.000256	0.000256	
ρ	1490.35	1482.50	1528.48	1509.61	
E _{din} (N/m ²)	7428117989	7551922953	7628014303	7682473336	
E _{din} (MPa)	7428.12	7551.92	7628.01	7682.47	Media
E _{din} (GPa)	7.43	7.55	7.63	7.68	7.57

Osservazioni finali

La campagna di prove sperimentali è stata condotta mediante la realizzazione di campioni di TRM, formati da una rete in fibra di vetro immersa in una matrice avente diversi spessori, e sottoponendo tali campioni a prove di trazione. Dall'esecuzione di queste prove è emerso che aumentando lo spessore della matrice non abbiamo un aumento del carico massimo poiché la rottura si verifica sempre, su tutti i provini, per il raggiungimento della massima capacità del sistema TRM con la rottura della rete in fibra di vetro. Tale rottura è dovuta alla buona aderenza tra la matrice ed il rinforzo.

Un ulteriore obiettivo è stato quello di valutare la resistenza a trazione di provini TRM di sola malta, quindi di individuare la resistenza a trazione pura della matrice costituente il composito sottoponendo i campioni a prove di trazione uniassiale. I valori di resistenza ottenuti sono stati poi confrontati con la tensione di prima fessurazione, riferita all'area della malta dei campioni di TRM con rete, e con la resistenza a trazione e compressione ottenuta da prove tradizionali condotte su provini prismatici 40x40x160 mm.

Dal primo confronto è emerso che, nel campione avente spessore di 10 mm, la presenza della rete non influisce sulle caratteristiche della matrice, la quale mostra una tensione di prima fessurazione paragonabile alla resistenza del provino di sola malta di pari spessore. La stessa considerazione può essere fatta per lo spessore da 30 mm che, pur avendo un valore di resistenza di poco più basso rispetto al campione da 10 mm, si avvicina alla resistenza ultima del campione senza rete. Per i provini da 20 mm, invece, non è possibile fare considerazioni certe, poiché il valore di prima fessurazione è molto basso, dovuto forse a problematiche sorte in fase di realizzazione dei provini. Il confronto appena descritto è una stima, da verificare attraverso ulteriori prove poiché è stato fatto riferendoci ad un unico valore di resistenza a trazione pura della matrice, quello più alto, sulla base delle considerazioni fatte nel §5.2.

Dal confronto tra i risultati ottenuti da prove a trazione uniassiale e a trazione per flessione si può notare come quest'ultima fornisca valori di resistenza maggiori. L'obiettivo è quello di individuare un valore di correlazione che ci permetta di ottenere la reale resistenza a trazione della malta, a partire dai risultati di prove a flessione che sono quelle più comunemente utilizzate per la caratterizzazione di tale materiale. Nel caso in esame è stato individuato un valore di correlazione pari all'incirca a 3 valido per tutti gli spessori. Data l'elevata variabilità dei risultati, come detto precedentemente, è stato più conveniente considerare il valore massimo ottenuto per ogni tipologia, pari a circa 1 MPa.

Le stesse considerazioni sono state fatte anche con i valori di resistenza ottenuti da prove di compressione sulla malta, i quali rapportati con i valori di resistenza a trazione pura forniscono un valore di correlazione paragonabile per tutti i provini.

Un'ulteriore osservazione è stata fatta sul valore (stimato con un metodo approssimativo) del modulo elastico nel tratto fessurato, quello più grande è stato ottenuto per il provino con spessore da 30 mm. Questo dimostra come la malta conferisca un effetto di irrigidimento al campione fessurato. Mentre i provini da 10 e 20 mm presentano valori più bassi ed in particolare i provini con spessore da 20 mm sono quelli caratterizzati da valori minori.

Riferimenti

- [1] BELLOMO M, D'AMBROSIO V. Fibrorinforzati in architettura. Le tecnologie FRP e FRCM nel recupero delle strutture in c.a. CLEAN EDIZIONI, 2009.
- [2] CNR-DT 200, 2004 “Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati”.
- [3] Mechtcherine, V. (2013). Novel cement-based composites for the strengthening and repair of concrete structures. *Construction and Building Materials*, 41, 365-373.
- [4] Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati a matrice inorganica. Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-DT 215/2018), Roma 23 Ottobre 2018.
- [5] Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCM) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti. Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Servizio Tecnico Centrale, Luglio 2018.
- [6] Ascione L, de Felice G, De Santis S. A qualification method for externally bonded Fibre Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) strengthening systems. *Composites Part B* 2015; 78:497-506.
- [7] Bellini A, Bovo M, Incerti A, Mazzotti C. An alternative approach for FRCM matrix tensile strength evaluation.

Allegati



SCHEDA TECNICA – Technical data sheet	N. A 1000 06-19	
GLASSTEX® STRUKTURA 250 - Art. GT AR 250		
RETE STRUTTURALE IN FIBRA DI VETRO AR GLASS CONTENENTE BISSIDO DI ZIRCONIO > DEL 16% COSTRUITA A GIRO INGLESE APPRETTATA "APPRETTO POLIMERICO TERMOINDURENTE"		
<p>Prodotto idoneo per il rinforzo strutturale e il consolidamento delle murature, volte e pavimentazioni come massetti pedonabili o drenanti per arredo urbano.</p> <p>Rete certificata per l' antisfondellamento dei solai.</p>		

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE	VALORE NOMINALE	TOLLERANZE	NORMATIVA
PESO TESSUTO APPRETTATO	280 g/m ²	+/- 5 %	ISO 3374:2000
PESO TESSUTO GREGGIO	182 g/m ²	+/- 5 %	ISO 3374:2000
CONTENUTO di BISSIDO DI ZIRCONIO	> 16 %	-	-
SPESSORE MEDIO TESSUTO APPRETTATO	1,10 mm	+/- 5 %	VIM JCGM 200:2012
DIMENSIONE MAGLIE	25x25 mm	+/- 5 %	VIM JCGM 200:2012
AREA NOMINALE SINGOLO FILO	0,789 mm ²	-	CERTIFICATO 2018/0251 POLIMI
COLORE	ROSSO	-	-
SPESSORE EQUIVALENTE (ordito)	0,0339 mm	+/- 5%	CNR-DT 200 R1/2013
SPESSORE EQUIVALENTE (trama)	0,0339 mm	+/- 5%	CNR-DT 200 R1/2013
ALLUNGAMENTO A ROTTURA	1,70 %	-	CERTIFICATO 2018/0251 POLIMI
LARGHEZZA MEDIA DEL FILO	3,00 mm	-	-
NUMERO FILI IN ORDITO	41	-	-
NUMERO FILI IN TRAMA	41	-	-
ALTEZZA ROTOLO	100/200 cm	-	UNI 9311/2
LUNGHEZZA ROTOLO	50/50 m	-	UNI 9311/2

BIEMME srl Via Tevere, 26 – 61030 Lucrezia di Cartoceto (PU) Italia - tel. 0721.899901 fax 0721.899902
 Cap. soc. € 90.000,00 int. Vers. – Cod. R.E.A. 155044 – CCIAA di PU - P.I. 02108810413
www.biemmebiagiotti.com – info@biemmebiagiotti.com – biemme@metapec.com

1



CARATTERISTICHE DI PROGETTO	VALORE NOMINALE	TOLLERANZE	NORMATIVA
DENSITA' VETRO	2,68 g/cm ³	+/- 5 %	-
MODULO ELASTICO VETRO	72.000 N/mm ²	+/- 5%	-
RESISTENZA A TRAZIONE SINGOLO FILO (ordito) velocità di trazione 1 mm/min	0,998 kN	+/- 5%	CERTIFICATO 2018/0251 POLIMI
RESISTENZA A TRAZIONE SINGOLO FILO (ordito) velocità di trazione 10 mm/min	1,340 kN		SECONDO NORMA ISO 527-4,5 : 1997
RESISTENZA A TRAZIONE SINGOLO FILO (ordito) velocità di trazione 100 mm/min	1,600 kN		SECONDO NORMA ISO 10406-1:2015 STS-17/0013
RESISTENZA A TRAZIONE SINGOLO FILO (trama) velocità di trazione 1 mm/min	0,998 kN	+/- 5%	CERTIFICATO 2018/0251 POLIMI
RESISTENZA A TRAZIONE SINGOLO FILO (trama) velocità di trazione 10 mm/min	1,410 kN		SECONDO NORMA ISO 527-4,5 : 1997
RESISTENZA A TRAZIONE SINGOLO FILO (trama) velocità di trazione 100 mm/min	1,570 kN		SECONDO NORMA ISO 10406-1:2015 STS-17/0013
RESISTENZA A TRAZIONE (ordito) velocità di trazione 1 mm/min	41 kN/m	+/- 5%	-
RESISTENZA A TRAZIONE (ordito) velocità di trazione 10 mm/min	55 kN/m		
RESISTENZA A TRAZIONE (ordito) velocità di trazione 100 mm/min	65 kN/m		
RESISTENZA A TRAZIONE (trama) velocità di trazione 1 mm/min	44 kN/m	+/- 5%	-
RESISTENZA A TRAZIONE (trama) velocità di trazione 10 mm/min	58 kN/m		
RESISTENZA A TRAZIONE (trama) velocità di trazione 100 mm/min	64 kN/m		
SEZIONE RESISTENTE (ordito)	33,95 mm ² /m	+/- 5%	CNR-DT 200 R1/2013
SEZIONE RESISTENTE (trama)	33,95 mm ² /m	+/- 5%	CNR-DT 200 R1/2013
MODULO ELASTICO RETE (ordito)	58.441 N/mm²	+/- 5%	CERTIFICATO 2018/0251 POLIMI
MODULO ELASTICO RETE (trama)	61.097 N/mm²	+/- 5%	CERTIFICATO 2018/0251 POLIMI



Vantaggi

- Rapidità e facilità di applicazione
- Leggerezza e ridotto spessore
- Ottime caratteristiche meccaniche in trama e ordito
- Resistenza agli agenti atmosferici
- Facile da tagliare e maneggevole
- Utilizzabile in ambienti aggressivi
- Durabilità
- Idonea ad ogni tipologia di supporto
- Utilizzabile con malte a base calce e/o cemento
- Radiotrasparente

Preparazione del supporto

Per la preparazione del supporto seguire accuratamente quanto indicato nelle schede tecniche del prodotto con cui la rete **Glasstex Struktura 250** viene abbinata:

- Malte linea Clay Line;
- Malte linea Concrete Line.

Applicazione

Procedere alla realizzazione di fori di idoneo diametro ed inclinazione (almeno 4 al m²) in funzione del sistema di connessione scelto: *Vortex*, *Glass Connector* o *Fiocchi* (vedi schede tecniche).

Applicare un primo strato di malta (vedi scheda tecnica del prodotto scelto), posa della rete **Glasstex Struktura 250** sulla malta ancora fresca avendo cura di garantire almeno 15 cm sulle sovrapposizioni, posa del secondo strato di malta.

Integrare le indicazioni sopracitate facendo riferimento al quaderno tecnico applicativo Biemme della linea *Armatex*, ultima versione scaricabile dal sito:

<http://biemmebiagiotti.com/wp-content/uploads/2017/06/QUADERNO-TECNICO-APPLICATIVO.pdf>

Per utilizzi diversi da quelli riportati contattare il nostro ufficio tecnico.

Voce di capitolato

Rete strutturale in fibra di vetro AR GLASS (Alcalino resistente) contenente biossido di zirconio > del 16% realizzata con la tecnica del giro inglese e apprettata, idonea per il rinforzo strutturale, antisfondellamento dei solai e il consolidamento di murature in pietra, mattoni, tufo e miste, volte e pavimentazioni quali massetti pedonabili per arredo urbano e massetti drenanti (tipo GLASSTEX STRUKTURA 250 di Biemme S.r.l.) avente le seguenti caratteristiche: peso tessuto apprettato 280 g/m², peso tessuto greggio 182 g/m², dimensioni maglie 25x25 mm, resistenza alla trazione (ordito) 55 kN/m, resistenza alla trazione (trama) 58 kN/m.

Le indicazioni riportate nella presente documentazione circa le modalità d'uso o di impiego dei nostri prodotti, pur corrispondendo alla nostra migliore esperienza e allo stato attuale delle nostre conoscenze, sono da ritenersi, in ogni caso, puramente indicative e non comportano alcuna responsabilità sul risultato finale dell'opera. Pertanto è responsabilità dell' acquirente verificare l'idoneità dei nostri prodotti per l'uso e gli scopi che si prefigge. Biemme srl non è responsabile per un utilizzo improprio del materiale. Fare sempre riferimento all' ultima versione aggiornata della scheda tecnica, disponibile sul sito: www.biemmebiagiotti.com. Biemme srl si riserva la facoltà di apportare in qualsiasi momento le modifiche che ritenesse opportune senza alcun obbligo di notifica.



BIEMME srl Via Tevere, 26 – 61030 Lucrezia di Cartoceto (PU) Italia - tel. 0721.899901 fax 0721.899902
 Cap. soc. € 90.000,00 int. Vers. – Cod. R.E.A. 155044 – CCIAA di PU - P.I. 02108810413
www.biemmebiagiotti.com – info@biemmebiagiotti.com – biemme@metapec.com

 **Polirex**[®] polietilene espanso
 **Fioccotex**[®] geotessuto
 **Glasstex**[®] rete in fibra di vetro

 **Fibromix**[®] fibre di polipropilene
 **Sistema Armatex**[®]
 rinforzo strutturale/antiribaltamento
 antisfondellamento/antisismico



SCHEDA TECNICA – *Technical data sheet* N. A 1023 06-20

BM IDROPLASTER NHL – M15 - Art. BM CI 30

MALTA PREMISCELATA IN CLASSE M15 A BASE DI CALCE IDRAULICA NATURALE NHL 5 E CEMENTO CONFORME ALLA UNIEN 998-2 CON SISTEMA DI CERTIFICAZIONE 2+

Prodotto idoneo per la realizzazione di intonaci strutturali traspiranti per interni ed esterni a mano o a macchina, di interventi di rincocciatura o di scuci/cuci e di rinforzi strutturali su elementi architettonici (archi, volte, pilastri).



DATI CARATTERISTICI	VALORE
ASPETTO	Polvere
TEMPERATURA DI APPLICAZIONE	+5 / +35 °C
pH	>10,5
INTERVALLO GRANULOMETRICO UNI EN 1015-1	0 – 2 mm
PESO SPECIFICO UNI EN 1015-10	1800 – 1900 kg/m ³
ACQUA D'IMPASTO	0,19-0,20 l/kg ca. 5,5 l/sacco
RESISTENZA A COMPRESSIONE Rif. 998-2	>15 N/mm ² Classe M15
MODULO ELASTICO A COMPRESSIONE	ca. 15000 N/mm ²
RESISTENZA ALLO SFILAMENTO DELLA BARRA DI ACCIAIO	>2 N/mm ²
ADESIONE PER TRAZIONE DIRETTA UNI EN 1015-12	>1 N/mm ²
RESISTENZA ALLA DIFFUSIONE DEL VAPORE UNI 9233	μ=15
CLASSE DI REAZIONE AL FUOCO	A1
RESA	18 – 19 kg/m ² per cm di spessore

BIEMME srl Via Tevere, 26 – 61030 Lucrezia di Cartoceto (PU) Italia - tel. 0721.899901 fax 0721.899902
 Cap. soc. € 90.000,00 int. Vers. – Cod. R.E.A. 155044 – CCIAA di PU - P.I. 02108810413
www.biemmebiagiotti.com – info@biemmebiagiotti.com – biemme@metapec.com

1



Vantaggi

- Elevata traspirabilità;
- Elevata lavorabilità;
- Previene la formazione di muffe e condense mantenendo gli ambienti salubri;
- Facile e veloce da applicare sia a mano che a macchina intonacatrice;
- Compatibile con le murature di edifici storici e vincolati;
- Contribuisce al risanamento di murature storiche;
- Non reattiva in presenza di solfati contenuti nella muratura.

Preparazione del supporto

- Assicurarsi che il supporto sia completamente indurito, resistente e privo di parti incoerenti che si distaccano;
- In presenza di intonaco esistente degradato scarnificare la superficie fino ad ottenere un supporto dotato di sufficiente resistenza;
- Pulizia e saturazione del supporto mediante lavaggio a bassa pressione;
- Asportare eventuali efflorescenze e sali tramite lavaggio o sistemi meccanici quali spazzolatura, sabbiatura o idrosabbiatura;
- Su supporti particolarmente irregolari o poco assorbenti prima dell'applicazione della malta strutturale prevedere uno strato di rinzafo;
- La temperatura del supporto deve essere compresa tra +5°C e +35°C;
- Non applicare su supporti gelati.

Confezioni

Sacchi da: 30 kg.
Bancale: 1500 kg.

Miscelazione

BM Idroplaster NHL-M15 si prepara impastando la polvere solamente con acqua in ragione di 5,5 l/sacco.

La miscelazione può essere effettuata a mano, con betoniera, coclea impastatrice o con adeguati sistemi automatici di miscelazione con acqua. In caso di applicazione a macchina intonacatrice alimentata con il prodotto in polvere, utilizzare polmoni idonei a bassa portata e tubazioni aumentate nella sezione per una maggiore facilità di pompaggio del prodotto impastato. La miscelazione in betoniera deve avvenire per non più di 3 minuti. Evitare l'aggiunta al prodotto di altri leganti o inerti per non modificarne le resistenze meccaniche o le caratteristiche di applicazione.

Applicazione

Dopo aver preparato con cura il supporto, prima dell'applicazione del primo strato di malta strutturale bagnare con acqua a bassa pressione fino a completa saturazione dello stesso; l'eventuale non saturazione potrebbe causare la non adesione e fessurazioni della malta. Se necessario eseguire un rinzafo o con prodotto idoneo o con lo stesso prodotto **BM Idroplaster NHL-M15**.

Procedere alla realizzazione di fori di idoneo diametro ed inclinazione (almeno 4 al m²) in funzione del sistema di connessione scelto: *Vortex*, *Glass Connector* o *Focchi* (vedi schede tecniche).

Applicare a mano (con cazzuola o spatola in acciaio inox) o con macchina intonacatrice un primo strato di malta strutturale **BM Idroplaster NHL-M15** uno spessore di circa 1,5 cm lasciando la superficie sufficientemente ruvida per permettere l'adesione dello strato successivo. Posizionare la rete in fibra di vetro apertata alcalino resistente della linea Glasstex Struktura (vedi scheda tecnica del prodotto scelto), appoggiandola sulla malta ancora fresca facendo passare i connettori (per la metodologia di connessione alla muratura vedi scheda tecnica del connettore adottato) all'interno della maglia della rete. Applicare a finire un secondo strato di malta **BM Idroplaster NHL-M15** per uno spessore di circa 1,5 cm.

2



Applicare il prodotto ad una temperatura compresa tra +5°C e +35°C.
 Proteggere il prodotto dal gelo e da agenti atmosferici (pioggia e umidità) durante la fase di asciugatura evitando inoltre forti sbalzi termici. E' consigliabile pertanto non utilizzare **BM Idroplaster NHL-M15** con temperature inferiori a +5°C e superiori a +35°C.

Per portare a finitura la malte è possibile applicare rasanti o idonee pitture per interni o esterni a seconda del campo d'impiego dell'intervento.

Integrare le indicazioni sopracitate facendo riferimento al quaderno tecnico applicativo Biemme della linea *Armatex*, ultima versione scaricabile dal sito:

<http://biemmebiaggiotti.com/wp-content/uploads/2017/06/QUADERNO-TECNICO-APPLICATIVO.pdf>

Per utilizzi diversi da quelli riportati contattare il nostro ufficio tecnico.

Stoccaggio e Sicurezza

Conservare all'asciutto non oltre i 12 mesi.
 Usare opportune precauzioni nelle attività di movimentazione, trasporto e stoccaggio al fine di evitare danneggiamenti. Durante la movimentazione e l'applicazione indossare indumenti, occhiali e guanti protettivi.

Voce di capitolato

Malta strutturale, reoplastica, antiritiro, fibrata, ad alta resistenza meccanica classe M15 a base di calce idraulica naturale NHL 5 (tipo BM IDROPLASTER NHL – M15 di Biemme S.r.l.), idonea per il rinforzo strutturale e il consolidamento di murature in pietra, mattoni, tufo e miste avente le seguenti caratteristiche: diametro massimo granulometria inerte 2 mm, resistenza meccanica a compressione a 28 gg. >15 N/mm², permeabilità al vapore acqueo $\mu \approx 15$, reazione al fuoco classe A1.

Avvertenze

Prodotto destinato ad uso professionale. Verificare prima dell'uso l'integrità della confezione e non utilizzare il prodotto con presenza di grumi. Non rimescolare il prodotto aggiungendo acqua una volta che ha iniziato la presa. Eventuali piccole variazioni cromatiche non danneggiano in alcun modo le prestazioni tecniche finali del prodotto. In caso di applicazione suintonaci di recente realizzazione, attendere almeno 3 settimane prima di applicare il prodotto. Le caratteristiche del prodotto sopra elencate rispondono a condizioni ambientali standard (20-23°C e 65% U.R.).

Le indicazioni riportate nella presente documentazione circa le modalità d'uso o di impiego dei nostri prodotti, pur corrispondendo alla nostra migliore esperienza e allo stato attuale delle nostre conoscenze, sono da ritenersi, in ogni caso, puramente indicative e non comportano alcuna responsabilità sul risultato finale dell'opera. Pertanto è responsabilità dell'acquirente verificare l'idoneità dei nostri prodotti per l'uso e gli scopi che si prefigge. Biemme srl non è responsabile per un utilizzo improprio del materiale. Fare sempre riferimento all'ultima versione aggiornata della scheda tecnica, disponibile sul sito: www.biemmebiaggiotti.com. Biemme srl si riserva la facoltà di apportare in qualsiasi momento le modifiche che ritenesse opportune senza alcun obbligo di notifica.



BIEMME srl Via Tevere, 26 – 61030 Lucrezia di Cartoceto (PU) Italia - tel. 0721.899901 fax 0721.899902
 Cap. soc. € 90.000,00 int. Vers. – Cod. R.E.A. 155044 – CCIAA di PU - P.I. 02108810413
www.biemmebiaggiotti.com – info@biemmebiaggiotti.com – biemme@metapec.com