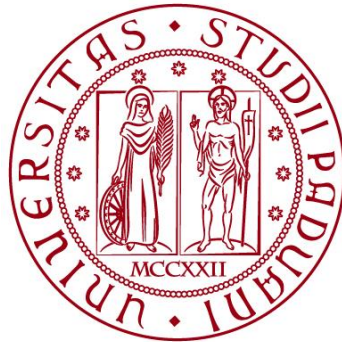


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



**TESI DI LAUREA IN VALUTAZIONE E MIGLIORAMENTO DELLA SICUREZZA DI
STRUTTURE ESISTENTI**

**L'EFFICACIA DEL CONFINAMENTO TRAMITE COMPOSITI
FRCM QUANDO SOGGETTO AD ALTE TEMPERATURE**

***The effectiveness of confinement through FRCM
composites when subjected to high temperatures***

Relatore:
Chiar.mo PROF. FLORA FALESCHINI
Correlatori:
Chiar.mo ING. KLAJDI TOSKA

Laureanda:
DANIELA FOGGETTI
Matricola 2007662

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

Indice

1. INTRODUZIONE	5
1.1 Obiettivi	7
2. I COMPOSITI FRCM	8
2.1 Composizione	9
2.2 Caratteristiche meccaniche della tipologia di rinforzo adottata	12
2.3 Caratterizzazione rinforzo esposto a condizionamento termico	14
3. MATERIALI E METODI	16
3.1 Piano Sperimentale	16
3.1.1 Caratterizzazione dei campioni e materiali utilizzati	16
3.2 Programma Sperimentale	24
3.3 Prove effettuate	27
4. RISULTATI	36
4.1 Comportamento tensione-deformazione assiale	45
4.1.1 Deterioramento della sollecitazione dovuto al carico ciclico	49
4.1.2 Caratterizzazione dei risultati attraverso indagine microscopica	51
4.2 Comportamento a trazione	55
4.3 Comportamento a trazione e compressione delle malte	56
5. DISCUSSIONE	63
5.1 Confronto tra risultati ottenuti e relative indagini derivanti da studi precedenti	63
5.1.1 Risultati derivanti da studi sperimentali precedenti	64
5.1.2 Risultati derivanti da studi numerici precedenti	74
5.2 Suggestimenti al fine di garantire risultati differenti o migliorare la ricerca	81
6. CONCLUSIONI	82
6.1 Lavori Futuri	84
BIBLIOGRAFIA	86

1. INTRODUZIONE

“L’interesse scientifico verso le applicazioni innovative degli FRCM per la riabilitazione strutturale da un lato, e la peculiarità del patrimonio edilizio italiano ampiamente variegato dall’altro, hanno attirato negli ultimi anni l’interesse di numerosi ricercatori operanti nei settori della Meccanica delle Strutture, delle Costruzioni, della Riabilitazione Strutturale e dell’Ingegneria Sismica.”¹

L’utilizzo dei materiali compositi, intesi come materiali ottenuti dall’unione di due o più costituenti con diverse caratteristiche ha origini antiche; sino ad arrivare ai giorni nostri, in cui i compositi fibrorinforzati sono entrati a pieno titolo tra i materiali di comune utilizzo in molti campi dell’ingegneria, in particolar modo nel settore delle costruzioni si stanno sempre più perfezionando nel corso degli anni, particolari accoppiamenti di compositi per far ottenere delle performance superiori. In particolar modo, negli ultimi anni la tecnologia dei compositi fibrorinforzati, per quanto riguarda l’ingegneria strutturale, si è orientata verso il recupero e la messa in sicurezza di opere strutturali danneggiate o verso l’incremento delle prestazioni richieste in seguito al cambio di destinazione d’uso.

Tra i campi di utilizzo di queste tecnologia, si annoverano situazioni in cui nel corso degli anni, le condizioni di carico della struttura hanno subito delle variazioni; come ad esempio variazione nella destinazione d’uso che comporti la nascita di sollecitazioni non previste dal progettista o ancora, un edificio che si presta a dover soddisfare nuovi requisiti di sicurezza relativi al comportamento sismico, che non risultano soddisfatti in base alle nuove norme antisismiche.

Altri campi di intervento mediante l’utilizzo di questa tecnologia possono riguardare i danni riportati in caso di incendi o di errori umani in fase di progettazione. Di fronte a queste situazioni ci si trova a dover ponderare la scelta di intervento in base ai costi e benefici, a decidere se optare per il recupero strutturale o la demolizione con successiva ricostruzione. Questo è il motivo principale per cui, nel corso di questi anni, la tendenza al recupero del patrimonio edilizio esistente, ha spinto progettisti e costruttori, a porre l’attenzione sullo studio di nuove tecniche e materiali per il

¹ “REDAZIONE Ingenio #Sicuro” - Data di pubblicazione: 07.03.2019

consolidamento, che possono conservare l'integrità delle opere e far fronte al degrado a cui è sottoposto il patrimonio edilizio e infrastrutturale esistente.

Negli ultimi anni i materiali compositi sono stati oggetto di notevole interesse e di sviluppo nel campo dell'ingegneria civile, in quanto, grazie ai progressi tecnologici legati alla lavorazione e innovazione dei materiali, si sono ottenuti nuovi compositi capaci di unire elevate prestazioni ad un peso modesto e ad un costo finale relativamente basso.

Tra i materiali compositi, i più utilizzati sono sicuramente i compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP); ma a causa dei loro limiti, spesso legati all'uso di resine epossidiche, costo del materiale, bassa resistenza al fuoco, bassa traspirabilità, la necessità di applicazione su superfici abbastanza planari per evitarne il distacco, la tossicità e il conseguente impiego di manodopera specializzata; hanno spostato l'interesse verso i materiali compositi fibrorinforzati a matrice cementizia (FRCM), che rispetto agli FRP, presentano una maggiore versatilità.

Scopo di questo lavoro è quello di analizzare il comportamento sperimentale di provini confinati in calcestruzzo, a seguito dell'esposizione ad alte temperature, soggetti a carico ciclico assiale o a trazione semplice. La variabile principalmente considerata, la cui influenza verrà discussa nel corso del lavoro, è la presenza di rete impregnata con resina epossidica o la presenza di rete secca.

Il secondo capitolo dà un inquadramento alla tecnologia e alla normativa che interessa i materiali compositi FRCM al fine di studiare i diversi meccanismi di resistenza

Il terzo capitolo presenta dapprima il piano sperimentale con relativa caratterizzazione dei campioni e, nella seconda parte, riporta il programma sperimentale e le prove effettuate

Nel quarto capitolo vengono riportati i risultati ottenuti a seguito delle prove effettuate e, inoltre, vengono proposte delle personali elaborazioni al fine di caratterizzare quanto ottenuto sperimentalmente

Nel quinto capitolo, è stata condotta una discussione, in cui vengono confrontati i risultati ottenuti in questo lavoro, con i risultati ottenuti in passato da altri autori, inerenti ricerche condotte nel campo di studio in esame

L'ultimo capitolo, infine, riassume il lavoro svolto e ne trae le conclusioni, proponendo quelli che potrebbero essere dei lavori futuri.

1.1 OBIETTIVI

Il percorso di sperimentazione e di analisi, relativamente all'efficacia del confinamento tramite compositi FRCM quando soggetto ad alte temperature, si pone lo scopo di:

- Indagare in che modo il condizionamento ad alte temperature influenza il campione e il rinforzo;
- Indagare la differenza delle conseguenze sulle due diverse serie di campioni analizzate, in particolare cilindri in calcestruzzo confinati con rete secca in carbonio e, cilindri in calcestruzzo confinati con rete in carbonio impregnata in resina;
- Verificare se i dati ottenuti erano stati oggetto in passato, anche se in modo differente, di studio da parte di altri autori e, in tale eventualità, confrontare i risultati ottenuti nel corso di questa sperimentazione con i risultati passati.

2. I COMPOSITI FRCM

2.1 COMPOSIZIONE

Per definizione, i materiali compositi sono costituiti da due o più materiali, detti fasi, di natura diversa e macroscopicamente distinguibili, ed almeno due delle fasi presentano caratteristiche fisiche e meccaniche sufficientemente diverse tra loro in modo da impartire al composito proprietà differenti da quelle dei costituenti. Gli elementi costituenti fondamentali di questi materiali compositi sono la matrice, formata da un materiale continuo ed isotropo, e il rinforzo, il quale immerso nella matrice costituisce l'elemento anisotropo del sistema.

La matrice ha il compito di avvolgere il rinforzo e, generalmente, contribuisce parzialmente alle caratteristiche meccaniche finali.

Il rinforzo ha il compito di assicurare rigidità e resistenza meccanica, assumendo su di sé, la maggior parte delle sollecitazioni a cui il composito è sottoposto.

L'interfaccia, uno strato molto sottile che, pur non contribuendo direttamente alle proprietà meccaniche globali del composito, è tuttavia fondamentale per il successo globale.

Una fetta dei materiali fibrorinforzati appartenenti al campo dell'adeguamento strutturale, appartiene alla famiglia dei materiali compositi FRCM.

Questi, denominati anche sistemi di rinforzo FRCM, sono ottenuti utilizzando reti realizzate con fili di acciaio ad alta resistenza, arammide, basalto, carbonio, PBO e vetro. I fili o anche i trefoli sono combinati con matrici inorganiche, realizzate ad esempio con leganti a base di calce o di cemento, con eventuale aggiunta di additivi.

Generalmente i sistemi di rinforzo FRCM, nel caso in cui sia presente una singola rete, hanno uno spessore compreso tra 5 e 15 mm, al netto del livellamento del supporto.

Nel caso di più reti lo spessore cresce, ma di solito è contenuto nei 30 mm. L'elevato rapporto fra resistenza e peso dei sistemi FRCM consente di esaltare le prestazioni meccaniche dell'elemento strutturale rinforzato, contribuendo a resistere agli sforzi di trazione, senza incrementarne la massa o modificarne significativamente la rigidità.

I rinforzi FRCM mostrano, una buona compatibilità con i substrati di calcestruzzo, una certa permeabilità al vapore; inoltre possono essere preparati ed applicati con semplicità mediante procedure tradizionali. Uno tra i vantaggi più importanti di questi

materiali è la capacità di resistenza al fuoco che è paragonabile a quella del substrato di calcestruzzo o muratura. Altra caratteristica importante risiede nella permeabilità che i compositi FRCM offrono. La matrice cementizia del composito permette gli scambi termo-igrometrici con l'esterno. Da non sottovalutare la possibilità di adesione da parte degli FRCM su superfici umide e la facilità di applicazione, nonostante la superficie possa essere irregolare.

Nonostante questa tecnica di rinforzo risulti più recente rispetto ad altre, sono presenti diversi lavori in letteratura che si sono occupati del suo studio. Ciò che contraddistingue questo lavoro di ricerca dagli altri sono le seguenti variabili: range di temperatura (a cui campioni sono stati esposti), tempo di esposizione dei campioni alle alte temperature, tipologie di prove effettuate.

2.2 CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLA TIPOLOGIA DI RINFORZO ADOTTATA

Il sistema di rinforzo, grazie all'impiego della matrice inorganica, offre maggiori prestazioni rispetto ad un sistema di rinforzo FRP, in particolar modo:

- Efficace collegamento tra la struttura dell'edificio e i sistemi di rinforzo applicati, per realizzare la continuità necessaria a garantire l'affidabilità del rinforzo;
- Elevata resistenza alle alte temperature: dopo l'indurimento della matrice, il sistema non è influenzato dalla temperatura esterna, a differenza degli FRP la cui resina perde le sue proprietà adesive tra 30°C e 80°C in funzione della sua temperatura di transizione vetrosa;
- Ottima reazione al fuoco: il sistema assicura una reazione identica a quella del supporto poichè la matrice inorganica mantiene inalterate le sue caratteristiche fino alla temperatura di 550°C, non è combustibile, ha scarsa emissione di fumo e non rilascia particelle incandescenti. In questo progetto infatti, si è potuto notare, l'emissione di fumo, nel corso del condizionamento termico dei campioni, solo nel caso della campagna n°2, in cui la rete è stata impregnata attraverso della resina epossidica;

- Ottima adesione a qualsiasi materiale delle strutture murarie, in laterizio o pietra; elevata durabilità in condizioni di umidità ambientale: la matrice inorganica non ne viene influenzata, mentre la resina epossidica si degrada con prolungate esposizioni a elevati tassi di umidità ambientale;
- Efficacia di posa in opera anche su supporti umidi: l'umidità favorisce l'adesione della matrice idraulica, mentre la stessa condizione riduce l'adesione al supporto delle resine organiche;
- Facilità di manipolazione: la preparazione della matrice inorganica avviene come per tutti i prodotti a base idraulica;
- Ampio campo di condizioni ambientali per l'applicabilità: nessuna limitazione tra 5°C e 40°C, al contrario degli FRP che invece presentano un range più ristretto;
- Atossicità delle matrici impiegate per gli operatori e per l'ambiente: sono infatti assimilabili ad una malta inorganica tradizionale, mentre le resine epossidiche sono nocive per inalazione e per contatto con la pelle (per tale motivo, nel caso della campagna n°2 sono state utilizzate adeguate protezioni, quali maschere respiratorie e guanti);
- Facilità nella pulizia delle attrezzature utilizzate: è sufficiente l'impiego di sola acqua; al contrario del caso in cui sono state utilizzate le resine epossidiche, in cui, è stato necessario l'utilizzo di solventi.

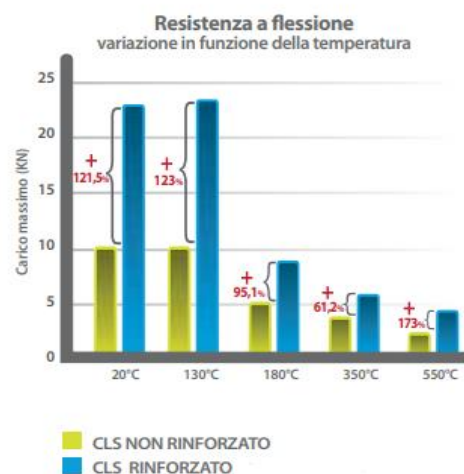


Figura 1_ Confronto Resistenza a flessione tra CLS non rinforzato e CLS rinforzato

Per quanto riguarda invece il legame costitutivo tensione-deformazione di un sistema FRCM in una prova di trazione monoassiale, questo, è assimilabile ad una polilinea costituita da tre rami consecutivi, corrispondenti allo stadio di campione non fessurato (Stadio A), a quello in fase di fessurazione (Stadio B) e a quello fessurato (Stadio C).

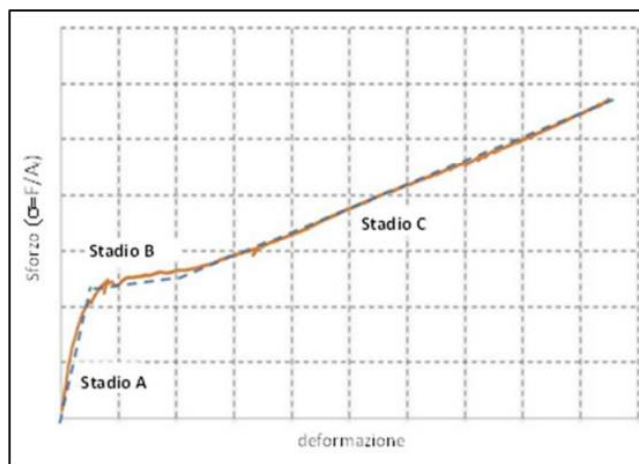


Figura 2 _Legame costitutivo tipo a trazione uniassiale di un provino di FRCM²

Però, quanto appena detto, non è sufficiente a caratterizzare il comportamento meccanico di un sistema FRCM, poiché l'impiego di quest'ultimo come rinforzo di un elemento strutturale porta a dover considerare i differenti meccanismi di crisi che possono verificarsi in seguito all'interazione substrato-rinforzo. In particolar modo, si può avere:

- a) Il distacco con rottura coesiva del supporto del rinforzo;
- b) Il distacco all'interfaccia matrice-supporto;
- c) Il distacco all'interfaccia matrice-tessuto;
- d) Lo scorrimento del tessuto nella matrice;
- e) Lo scorrimento del tessuto e fessurazione dello strato di malta più esterno;
- f) La rottura a trazione del tessuto.

² CNR-DT 215/2018 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati a Matrice Inorganica"

Proprio per i motivi sopra elencati, è necessario che la caratterizzazione meccanica includa, oltre alla prova di trazione del sistema FRCM e del tessuto secco, anche la prova di distacco del supporto, ed eventuali altre prove appropriate, in relazione alle caratteristiche specifiche del sistema.

Le caratteristiche fondamentali di tali rinforzi FRCM risultano:

- tensione limite convenzionale ($\sigma_{lim\ conv}$) e deformazione limite convenzionale ($\epsilon_{lim\ conv}$); in cui entrambe dipendono dalla tipologia di supporto;
- modulo di rigidezza a trazione del campione (E_1) nello stadio A;
- tensione ultima (σ_u) e deformazione ultima (ϵ_u) del composito FRCM a rottura per trazione;
- modulo elastico (E_f) del tessuto secco;
- deformazione ultima a trazione ($\epsilon_{u,f}$) del tessuto secco;
- resistenza a compressione della matrice ($f_{c,mat}$).

Alcune precisazioni da fare riguardo i parametri sopra riportati, vengono in aiuto al fine di interpretare in modo corretto le formule. In particolar modo, con *spessore equivalente di una rete di rinforzo ordito nella direzione della trama*, si intende il rapporto tra la grammatura dei soli fili/ trefoli nella direzione della trama ed il peso specifico delle fibre che sostituiscono la trama.³

2.3 CARATTERIZZAZIONE RINFORZO ESPOSTO A CONDIZIONAMENTO TERMICO

È stato dimostrato che il rinforzo esterno aumenta la capacità portante e migliora le proprietà elastiche degli elementi compressi confinati. In particolar modo, il rinforzo FRCM, utilizzando malta minerale, dovrebbe rendere il confinamento meno suscettibile all'esposizione alle temperature, rendendolo più competitivo rispetto ai confinamenti realizzati con FRP.

³ Definizione presente in CNR-DT 215/2018 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati a Matrice Inorganica"

Tuttavia, il legame tra gli elementi e la matrice inorganica è un problema critico nei compositi FRCM ed è fortemente influenzato da diversi fattori:

- dalla capacità della matrice cementizia di saturare i filati di fibre secche;
- dal legame tra gli elementi interni ed esterni all'interno dei filati;
- dal legame tra gli elementi esterni e la matrice in caso di tessuti secchi o, tra rivestimento e matrice in caso di tessuti rivestiti.

Le prestazioni degli FRCM esposti ad alte temperature, possono cambiare quando i tessuti sono pre-impregnati attraverso delle resine polimeriche. Studi sperimentali hanno dimostrato che l'uso di un rivestimento polimerico applicato sul tessuto di carbonio può aumentare significativamente la capacità meccanica del sistema sia per la resistenza a trazione che a taglio. Tuttavia, quando il rinforzo tessile è rivestito con un polimero, la performance di legame tra gli elementi e la matrice è fortemente influenzata dalla temperatura. E' stato dimostrato che, utilizzando FRCM rinforzati attraverso fibre di carbonio, si è generato un meccanismo di incastro tra i filamenti e la matrice quando il polimero è stato riscaldato. Questo si traduce in un significativo aumento di carico massimo con conseguente strappo.

In delle ricerche precedenti, si è concluso che, nel caso di pilastri confinati, questi devono essere monitorati per l'aumento della temperatura; in quanto, fino a quando la temperatura della resina rimane al di sotto della temperatura di distacco, il rinforzo manterrà la sua funzione. Ciò significa che, quando si considerano temperature elevate inferiori a temperatura di transizione vetrosa, la resina si plastifica senza perdere le sue proprietà adesive. Con l'aumento della temperatura, il modulo di elasticità della resina diminuisce e il rivestimento composito perde la sua rigidità.

E' possibile affermare che, dalle ricerche effettuate in precedenza, è stato possibile notare come l'impatto della temperatura, sulle prestazioni dei materiali compositi confinati in elementi compressi si è dimostrato significativo; a tal proposito è stato dedotto quanto segue:

- i sistemi FRCM possono fornire compatibilità con le alte temperature mantenendo le prestazioni meccaniche fino a temperature pari a 120°. Nel caso di FRCM realizzato con tessuto asciutto, sembra che i campioni non siano influenzati dalle

condizioni di temperatura, mantenendo un'adeguata resistenza e adesione al substrato;

- i sistemi FRCM realizzati con tessuti pre-impregnati, hanno mostrato differenze drastiche a seconda della temperatura di esposizione a cui sono stati sottoposti. La riduzione della capacità ultima di trazione è risultata pari al 70% sin da quando è stato testato alla temperatura di 80°, sino ad arrivare ad una temperatura di 120°. Nonostante ciò, si è concluso che FRCM realizzati con tessuti pre-impregnati, hanno mantenuto comunque la loro funzione strutturale, dopo l'esposizione alle alte temperature, sino ad una temperatura di 120°.

2.3.1 Durabilità del sistema di rinforzo in funzione di umidità e temperature ambientali

I sistemi di rinforzo FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix) mantengono le prestazioni dichiarate indipendentemente dall'umidità e dalla temperatura di esercizio, a differenza degli FRP che le garantiscono solo in condizioni termo-igrometriche standard (20°C e 50% U.R.). Infatti, da sperimentazioni precedenti è emerso che nei sistemi FRP la presenza di umidità sulla superficie della struttura determina una variazione della tipologia di rottura che, da coesiva, ovvero nel supporto, diviene adesiva, cioè all'interfaccia tra supporto e rinforzo. Si è evidenziato inoltre che, la prolungata esposizione all'umidità determina un progressivo peggioramento della resistenza meccanica a taglio e flessione che, nell'intervallo 23/40 °C, diviene sempre più rapido all'aumentare della temperatura.

La norma ACI 440.2R-08 evidenzia che già a 30°C le resine epossidiche iniziano a trasformarsi dallo stato rigido a quello viscoso, con conseguente degrado delle prestazioni adesive e quindi meccaniche. Inoltre, essa stabilisce la temperatura di esercizio per cui il rinforzo è efficace, è quella che si ottiene diminuendo di 15°C la temperatura di transizione vetrosa della resina (T_g) dichiarata dal produttore in scheda tecnica.

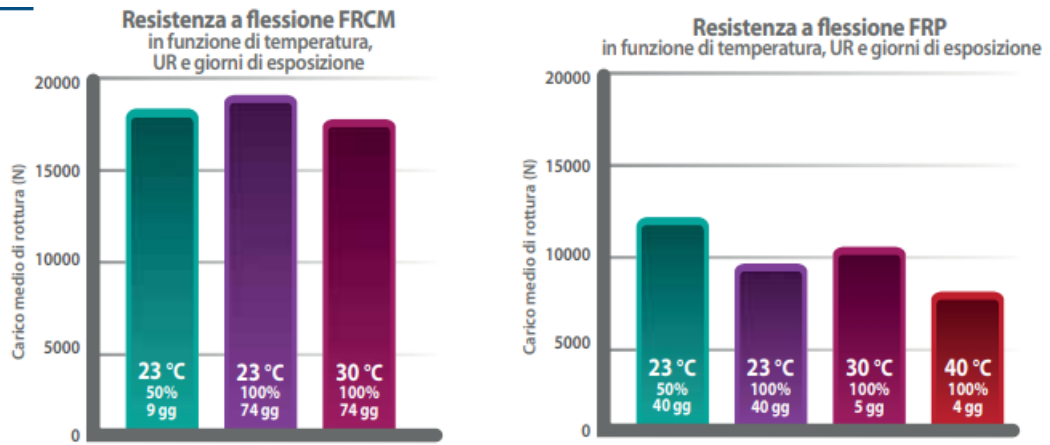


Figura 3_Confronto tra resistenza a flessione FRCM e FRP- Risultati ottenuti da uno studio di durabilità eseguito presso il laboratorio ITC-CNR di S. Giuliano Milanese.

3. MATERIALI E METODI

3.1 PIANO SPERIMENTALE

3.1.1 Caratterizzazione dei campioni e materiali utilizzati

Per valutare l'influenza della temperatura sugli elementi in calcestruzzo confinati con FRCM, sono stati realizzati 23 cilindri in calcestruzzo di dimensioni 15x30cm; al contrario ai fini della caratterizzazione della miscela di calcestruzzo, sono stati realizzati 3 cilindri di dimensioni 10x15cm. I provini più grandi sono stati realizzati in casseri in plastica, costituiti da tubi cilindrici con $D=15$ cm e $l=1.00$ m, ognuno dei quali è stato tagliato a 30 cm di altezza per allinearli con la larghezza del foglio di rete; al contrario, i provini più piccoli, sono stati realizzati in casseri in acciaio preimpostati.



Figura 4 _ Preparazione dei casseri

La miscela di calcestruzzo utilizzata per il getto viene specificata in *Tabella 1*, e il calcestruzzo C16/20, a bassa resistenza, presenta le caratteristiche meccaniche riportate in *Tabella 2*.

INERTE		asciutto	umido	umidità %	H ₂ O inerte	ass%	H ₂ O assorbita	H ₂ O effettiva
Classe (0:4)	sabbia	116,76	123,05	5,38	6,29	1,18	1,38	4,90
Classe (4:16)	ghiaia	142,70	142,70	0	0	0,75	1,07	0
Peso totale inerti Kg:		259,46	265,75		6,291		1,382	4,90
CEMENTO	II/A-LL	A-LL 32,5 R						
Provenienza:		Italcementi			densità (kg/l):		3,05	
Peso cemento Kg:		41,10			litri cemento		13,47	
ADDITIVO MAPEFLUID N200								
%		0,20			densità (kg/l):		1,20	
Peso additivo g:		82,20			volume (ml):		68,50	
ACQUA	(Umidità inerte)				H ₂ O necessaria			
Kg:		4,90						
(da immettere)		Kg:			24,66			
(immessa)		Kg:						
Volume inerti necessario		I:			96,05			
PESO TOTALE IMPASTO								
Kg:		331,59						

Tabella 1_ Mix design miscela di calcestruzzo

Caratteristiche meccaniche CALCESTRUZZO C16/20		
f_{ck}	16	MPa
R_{ck}	20	MPa
f_{cm}	24	MPa
f_{ctm}	2,49	MPa
$f_{ctk\ 0,05}$	1,75	MPa
E_{cm}	28600	MPa

Tabella 2_ Caratteristiche meccaniche calcestruzzo C16/20



Figura 5 _ Getto campioni

Trascorsi tre giorni dal getto, i campioni a seguito dello scassero, sono stati posti all'interno della camera climatica, per la maturazione. (Figura 6)

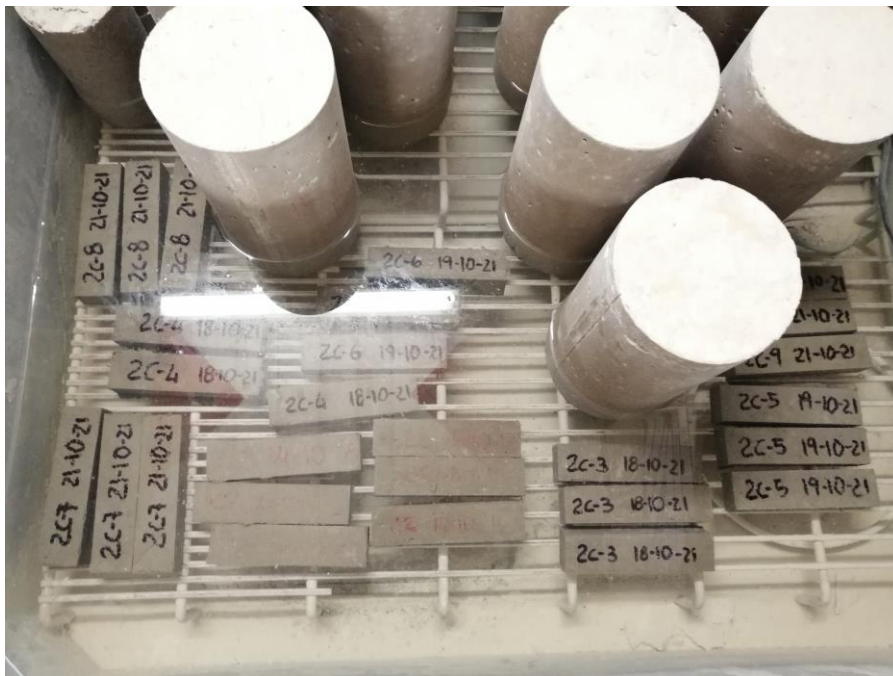


Figura 6_ Campioni posti in vasche con acqua all'interno di una camera climatica per maturazione

Dopo tale fase, si è proceduto a ricoprire entrambe le facce superiore e inferiore dei provini con malta ad alta resistenza per garantire una corretta distribuzione delle sollecitazioni in tutti i campioni (Figura 7) e, in seguito, è stato effettuato il rinforzo dei campioni.

Successivamente alla preparazione della superficie da rinforzare si è proceduto con la posa del tessuto. Tale operazione è stata eseguita con tecnica "dry lay up". Si applica il tessuto orientando le fibre nella direzione prevista dal progetto, quindi si impregna con resina epossidica o malta cementizia rispettivamente utilizzando rulli o spatole per una corretta ed uniforme stesura cercando il più possibile di eliminare bolle d'aria altrimenti nocive per la resa finale; in seguito verranno sovrapposti gli altri strati con la stessa modalità.

Nel caso in esame, per realizzare il sistema di confinamento FRCM è stata utilizzata la stessa tipologia di fibra con la differenza che, nella prima campagna è stata utilizzata a secco, nella seconda invece, prima di essere applicata, è stata impregnata con resina epossidica. La fasciatura di questo tipo di elementi, sottoposti in seguito a

compressione centrata, permette di aumentare la duttilità dell'elemento ed aumentare la capacità portante. La malta utilizzata è una matrice fibrorinforzata a basso modulo con legante polimerico ed inorganico con proprietà pozzolaniche, idratata con acqua. Le proprietà dei compositi sono elencate nelle tabelle seguenti. Il confinamento è stato realizzato nel seguente modo: In primo luogo, la superficie laterale del campione è stata bagnata con acqua; quindi è stato applicato il primo strato di malta, dove la fibra è stata sospinta delicatamente all'interno fino a coprire completamente la superficie, applicando una leggera tensione manuale alla fibra stessa per meglio aderire al supporto. Quindi è stato applicato il secondo strato di malta, ripetendo il procedimento sopra descritto fino all'ultimo strato, che è stato ricoperto e finito con l'ultima applicazione di malta. La fibra è stata applicata in continuo, adottando alla sua estremità una lunghezza di sovrapposizione di 200 mm per garantire un legame sufficiente ed evitare il distacco prematuro all'estremità.

Per ogni campione rinforzato, inoltre, sono stati prelevati tre campioni di malta, così da effettuare la caratterizzazione del materiale (*Figura 6*).

A questo punto, andremo ad illustrare brevemente i costituenti del rinforzo FRCM, utilizzati in questa campagna:

- Fibra di carbonio: la fibra è la parte costituente il rinforzo che ha il compito di esercitare la funzione resistente vera e propria. Il termine indica fibre con un contenuto di carbonio variabile tra l'80% e il 95%. Esibiscono un comportamento a rottura fragile caratterizzato da un assorbimento di energia relativamente modesto anche se le tensioni di rottura sono elevate, risultano però sensibili ai fenomeni di scorrimento viscoso e di fatica essendo contraddistinte da una modesta riduzione della resistenza a lungo termine. [*Tabella 7-8; Figura 8*];
- Matrice: le matrici cementizie sono prodotti di recentissima immissione nel campo dei materiali compositi con fibre. Costituite da un legante idraulico pozzolanico e da additivi specifici che favoriscono lo sviluppo di caratteristiche meccaniche e fisiche differenti rispetto alle matrici organiche a base polimerica. Le più utilizzate sono le resine epossidiche [*Tabella 5-6*];

<i>Dati Tecnici Rapid Cretre- Malta reoplastica tixotropica fibrorinforzata a presa rapida per ripristini strutturali- GeP intech</i>	
Resa	1600 Kg/m ³
Acqua d'impasto sulla malta	19%
Inizio presa a 20°C e 65% UR	20 min.
Resistenza ai solfati ASTM C-88	Nessun degrado dopo attacco in solfato di magnesio
Essudamento d'acqua (bleeding) UNI 8998	Assenza d'acqua essudata
Modulo elastico a 28 gg EN 13412	<18 GPa
Resistenza a compressione a 28 gg EN 12190	>40 MPa
Adesione al calcestruzzo a 28 gg EN 1542	>2,5 MPa
Contenuto ioni cloruro EN 1015-17	0,05%
Resistenza al fuoco EN 1015-1	EUROCLASSE 1
Indurimento completo	12 ore

Tabella 4



Figura 7 _ Linearizzazione della superficie dei campioni attraverso l'utilizzo di malta

<i>Dati tecnici Concrete Rock S- Malta monocomponente tixotropica fibrorinforzata a ritiro compensato e reattività pozzolanica per ripristini strutturali- GeP intech</i>	
Resa	ca. 1500 Kg/m ³
Acqua d'impasto	19% in peso sulla polvere
Tempo di lavorabilità (20°C e 65% UR)	>60 min.
Contenuto ioni cloruro	<0,05 %
Resistenza a compressione a 28 gg	25 N/mm ² (classe R3)
Modulo elastico a 28 gg	15000 N/mm ² ca. (classe R3)
Aderenza al mattone a 28 gg	>0,6 N/mm ²
Permeabilità al vapore acqueo μ	20
Assorbimento capillare	<0,5 Kg m ⁻² h ^{-0,5}
Reazione al fuoco EN 1015-1	classe A1
Resistenza ai cicli di gelo e disgelo	resistente
Resistenza ai solfati	nessun degrado dopo attacco in solfato di magnesio
Resistenza all'attacco degli oli lubrificanti	nessun degrado dopo immersione in olio a 40°C per 60 gg
Essudamento d'acqua (bleeding)	assenza d'acqua essudata
Temperatura di applicazione	da +5°C a +40°C

Tabella 5_ Caratteristiche meccaniche Concrete Rock S fornite dal produttore

<i>Dati tecnici Resin 70-75- Adesivi Epossidici per incollaggi strutturali- GeP intech</i>		
	Resin 70	Resin 75 (adesivo tixotropico)
Peso specifico	1,20 g/cm ³	1,20 g/cm ³
Pot life a 20°C	30 min.	30 min.
Fuori tatto a 20°C	4h	4h
Indurimento completo a 20°C	7 gg	7 gg
Resistenza alla compressione EN 12190	82 N/mm ²	82 N/mm ²
Resistenza alla flessione EN 12190	45 N/mm ²	45 N/mm ²
Modulo Elastico EN 13412	>4600 N/mm ²	>4600 N/mm ²
Adesione sul calcestruzzo EN 1542	>2,5 N/mm ²	>2,5 N/mm ²
Adesione su acciaio EN 1542	>14 N/mm ²	>14 N/mm ²
Adesione all'acciaio in funzione dell'angolo 50°-70° EN 12188	75-105 N/mm ²	75-105 N/mm ²
Temperatura minima di applicazione	10°C	10°C

Tabella 6_ Caratteristiche meccaniche Resin 70-75 fornite dal produttore



Figura 8_ Rete in carbonio impregnata attraverso adesivi epossidici prima del rinforzo dei campioni

<i>Dati Tecnici C-NET 170 BL- Rete in fibra di carbonio per rinforzo di strutture- GeP intech</i>	
Grammatura rete in carbonio	170 g/m ²
Dimensione maglia	15x15 mm
Spessore nominale rete	0,047 mm (per direzione 0°/90°)
Resistenza a trazione filamento	4900 N/mm ²
Modulo elastico a trazione filamento	240 GPa
Allungamento ultimo a trazione filamento	1,8%
Resistenza a trazione alla deformazione del 7,5‰	89 KN/m (per direzione 0°/90°)

Tabella 7_ Caratteristiche meccaniche C-NET 170 BL fornite dal produttore

<i>Dati Tecnici C-NET 220 BL- Rete in fibra di carbonio per rinforzo di strutture- GeP intech</i>	
Grammatura rete in carbonio	220 g/m ²
Dimensione maglia	15x15 mm
Luce maglia	10x10 mm
Spessore nominale rete per direzione	0,061 mm
Resistenza a trazione filamento	4900 N/mm ²
Modulo elastico a trazione filamento	240 GPa
Allungamento ultimo a trazione filamento	1,8%
Resistenza a trazione alla deformazione del 7,5‰ per direzione	89 KN/m (per direzione 0°/90°)

Tabella 8_ Caratteristiche meccaniche C-NET 220 BL fornite dal produttore



Figura 9_ Campione rinforzato (è assente lo strato finale di malta al fine di poter realizzare lo scatto riportato)

3.2 PROGRAMMA SPERIMENTALE

Obiettivo di tale programma, è stato quello di realizzare dei campioni cilindrici in calcestruzzo e, a seguito del rinforzo con FRCM, esporli a diversi range di temperatura e testarli, infine, attraverso prove a compressione ciclica.

Al fine di realizzare ciò, considerato il numero di campioni ottenuto in fase di getto, sono stati decisi i range di temperatura da considerare e i relativi campioni da esporre a ciascuno di essi.

I campioni ottenuti risultano:

- N°2 di dimensioni 10x15 cm
- N°23 di dimensioni 15x30 cm.

I range di temperatura considerati sono:

- T ambiente;
- T= 80° (corrispondente alla temperatura di transizione vetrosa);
- T= 100° (corrispondente alla perdita di umidità);
- T= 250°.

La temperatura del forno è stata monitorata costantemente attraverso delle termocoppie poste all'interno dello stesso e attraverso un termometro ambientale posto sulla superficie superiore.

I campioni di dimensioni 15x30 cm sono stati suddivisi nel seguente modo:

Tipologia rinforzo	Dimensioni campioni	N°campioni testati	Range Temperatura di esposizione
Rete in carbonio secca	15x30	3	T ambiente
	15x30	3	T=100°
	15x30	3	T=250°
Rete in carbonio impregnata	15x30	3	T ambiente
	15x30	3	T=80°
	15x30	3	T=100°
	15x30	3	T=250°

Tabella 9 _ Programma rinforzo campioni

Il programma sperimentale è stato realizzato considerando le seguenti fasi e periodi:

- Luglio 2021: Preparazione casseri e getto n°3 campioni 10x15 e n°23 campioni 15x30. Dopo cinque giorni di distanza è avvenuto lo scassero dei campioni e gli stessi sono stati posti in acqua all'interno della camera climatica;
- Trascorsi 28 giorni, tempo di maturazione in camera climatica, è iniziata la fase di rinforzo prima per i campioni e i coupon realizzati con rete secca e, in seguito, per quelli realizzati con rete impregnata con resina (si riportano i dettagli in *Tabella 10-11*);
- Febbraio 2022: Inizio prove su n°2 campioni 10*15, di cui uno testato per indagare il modulo elastico e per la prova di compressione, invece l'altro per la prova di trazione; n°6 campioni a T_{amb} di cui n°3 rinforzati con rete in carbonio secca e n°3 realizzati con rete in carbonio impregnata.
- Marzo 2022- Aprile 2022: esposizione n°15 campioni, i cui n°6 rinforzati con rete secca in carbonio e n°9 rinforzati con rete impregnata, all'interno di un forno per un tempo pari a 6h ai diversi range di temperatura. A seguito dell'esposizione, i campioni venivano testati a compressione nella stessa giornata.

Si riportano di seguito le tabelle illustrative, in cui viene etichettato ciascun campione e, per ognuno viene specificata la data dell'avvenuto rinforzo e la relativa temperatura di esposizione:

Caratteristiche provini confinati con rete in carbonio secca						
Denominazione	Data rinforzo	D [m]	h [m]	L rete [m]	n° strati	T esposizione
2C-1	14/10/2021	0,15	0,3	1,25	2	T amb
2C-2	14/10/2021	0,15	0,3	1,25	2	T amb
2C-3	18/10/2021	0,15	0,3	1,25	2	T amb
2C-4	18/10/2021	0,15	0,3	1,25	2	T=100°
2C-5	19/10/2021	0,15	0,3	1,25	2	T=100°
2C-6	19/10/2021	0,15	0,3	1,25	2	T=100°
2C-7	21/10/2021	0,15	0,3	1,25	2	T=250°
2C-8	21/10/2021	0,15	0,3	1,25	2	T=250°
2C-9	21/10/2021	0,15	0,3	1,25	2	T=250°

Tabella 10_ Caratteristiche provini confinati con rete in carbonio secca

Caratteristiche provini confinati con rete in carbonio impregnata in resina						
Denominazione	Data rinforzo	D [m]	h [m]	L rete [m]	n° strati	T esposizione
2CR-1	09/12/2021	0,15	0,3	1,25	2	T amb
2CR-2	09/12/2021	0,15	0,3	1,25	2	T amb
2CR-3	09/12/2021	0,15	0,3	1,25	2	T amb
2CR-4	10/12/2021	0,15	0,3	1,25	2	T=80°
2CR-5	10/12/2021	0,15	0,3	1,25	2	T=80°
2CR-6	10/12/2021	0,15	0,3	1,25	2	T=80°
2CR-7	18/01/2022	0,15	0,3	1,25	2	T=100°
2CR-8	18/01/2022	0,15	0,3	1,25	2	T=100°
2CR-9	18/01/2022	0,15	0,3	1,25	2	T=100°
2CR-10	19/01/2022	0,15	0,3	1,25	2	T=250°
2CR-11	19/01/2022	0,15	0,3	1,25	2	T=250°
2CR-12	19/01/2022	0,15	0,3	1,25	2	T=250°

Tabella 11_ Caratteristiche provini confinati con rete in carbonio impregnata in resina

Caratteristiche coupon realizzati con rete in carbonio secca						
Denominazione	Data rinforzo	Lunghezza [m]	Larghezza [m]	Spessore [m]	n° strati	T esposizione
Coupon 1	16/11/2021	0,6	0,1	0,01	1	T amb
Coupon 2	16/11/2021	0,6	0,1	0,01	1	T amb
Coupon 3	16/11/2021	0,6	0,1	0,01	1	T amb
Coupon 4	16/11/2021	0,6	0,1	0,01	1	T=100°
Coupon 5	16/11/2021	0,6	0,1	0,01	1	T=100°
Coupon 6	16/11/2021	0,6	0,1	0,01	1	T=100°
Coupon 7	16/11/2021	0,6	0,1	0,01	1	T=250°
Coupon 8	16/11/2021	0,6	0,1	0,01	1	t=250°
Coupon 9	16/11/2021	0,6	0,1	0,01	1	T=250°

Tabella 12_ Caratteristiche Coupon realizzati con rete in carbonio secca

Caratteristiche coupon realizzati con rete in carbonio impregnata						
Denominazione	Data rinforzo	Lunghezza [m]	Larghezza [m]	Spessore [m]	n° strati	T esposizione
Coupon CR-1	21/01/2022	0,6	0,1	0,01	1	T amb
Coupon CR-2	21/01/2022	0,6	0,1	0,01	1	T amb
Coupon CR-3	21/01/2022	0,6	0,1	0,01	1	T amb
Coupon CR-4	21/01/2022	0,6	0,1	0,01	1	T=80°
Coupon CR-5	21/01/2022	0,6	0,1	0,01	1	T=80°
Coupon CR-6	21/01/2022	0,6	0,1	0,01	1	T=80°
Coupon CR-7	21/01/2022	0,6	0,1	0,01	1	T=100°
Coupon CR-8	21/01/2022	0,6	0,1	0,01	1	T=100°
Coupon CR-9	21/01/2022	0,6	0,1	0,01	1	T=100°
Coupon CR-10	21/01/2022	0,6	0,1	0,01	1	T=250°
Coupon CR-11	21/01/2022	0,6	0,1	0,01	1	T=250°
Coupon CR-12	21/01/2022	0,6	0,1	0,01	1	T=250°

Tabella 13_ Caratteristiche Coupon realizzati con rete in carbonio impregnata in resina

I provini, come si può notare, sono stati etichettati come segue: l'acronimo 2C definisce i campioni rinforzati con rete in carbonio secca, al contrario invece, l'acronimo 2CR definisce i campioni rinforzati con rete in carbonio impregnata con resina epossidica. Il numero indica gli strati di fibra utilizzati nel rinforzo, la lettera C indica la geometria del campione (in questo caso cilindrico), la lettera R indica la presenza della resina epossidica.

3.3 PROVE EFFETTUATE

Per quanto riguarda il programma di prova, bisogna fare sin da subito una distinzione, poiché sono stati seguiti due protocolli differenti in base ai campioni che si andavano a testare. In particolar modo, è stata effettuata una prova di compressione ciclica sui campioni cilindrici e una prova di trazione semplice sui coupon.

Per quanto riguarda la configurazione del test di compressione, i campioni sono stati caricati assialmente con la macchina di caricamento universale sotto il controllo delle modalità di spostamento. La macchina di carico è stata impostata a 0,6 mm/min sia nel ramo di carico che in quello di scarico. Sono stati applicati dei cicli di compressione singola con segmenti di scarico e ricarica ad ogni incremento di spostamento prescritto. Un carico assiale pari a 10 KN è stato mantenuto durante i cicli di scarico/ricarico per prevenire qualsiasi movimento del provino. Per quanto riguarda la strumentazione, la cella di carico della macchina universale è stata utilizzata per acquisire il carico contemporaneamente alla misura della deformazione. Tali variabili, sono state monitorate adottando una serie di tre potenziometri standard (POT) [Figura 10] e tre potenziometri di precisione (DD1) [Figura 11], tutti posizionati attorno alla circonferenza del campione, a distanza l'uno dall'altro [Figura 14]. Il rilevamento meccanico dei movimenti lineari, è stato effettuato da un'asta cilindrica di spinta guidata anteriormente, la quale era posta in tensione puntando sulla piastra mobile della macchina di prova.



Figura 10_ Trasduttore di spostamento lineare



Figura 11_ Sensore di spostamento lineare



Figura 12_ Posizionamento potenziometri durante la prova

La scelta di adottare entrambe le tipologie di potenziometri, è stata effettuata da un lato con lo scopo di avere un numero sufficiente di letture, dall'altro dalla volontà di ottenere delle misure il più precise possibile.

Il programma di prova, è stato organizzato nel seguente modo:

- Giorno 1: Prova di compressione ciclica: NC-1, NC-2 (*Figura 13*);
- Giorno 2: Prova di compressione ciclica: 2C-1, 2C-2, 2C-3 (*Figura 14*);
- Giorno 3: Prova di compressione ciclica: 2CR-1, 2CR-2, 2CR-3; (*Figura 17*)
- Giorno 4: Esposizione in forno per $t=6h$ a $T=100^\circ$ e in seguito prova di compressione ciclica: 2C-4, 2C-5, 2C-6 (*Figura 15*);
- Giorno 5: Esposizione in forno per $t=6h$ a $T=250^\circ$ e in seguito prova di compressione ciclica: 2C-7, 2C-8, 2C-9 (*Figura 16*);
- Giorno 6: Esposizione in forno per $t=6h$ a $T=80^\circ$ e in seguito prova di compressione ciclica: 2CR-4, 2CR-5, 2CR-6; (*Figura 18*)
- Giorno 7: Esposizione in forno per $t=6h$ a $T=100^\circ$ e in seguito prova di compressione ciclica: 2CR-7, 2CR-8, 2CR-9; (*Figura 19*)
- Giorno 8: Esposizione in forno per $t=6h$ a $T=250^\circ$ e in seguito prova di compressione ciclica: 2CR-10, 2CR-11, 2CR-12; (*Figura 20*)
- Giorno 9: Prova di trazione semplice Coupon 1-2-3, Coupon CR 1-2-3;
- Giorno 10: Esposizione in forno per $t=6h$ a $T=80^\circ$ e in seguito prova di trazione semplice Coupon CR 4-5-6;
- Giorno 11: Esposizione in forno per $t=6h$ a $T=100^\circ$ e in seguito prova di trazione semplice Coupon 4-5-6, Coupon CR 7-8-9;
- Giorno 12: Esposizione in forno per $t=6h$ a $T=250^\circ$ e in seguito prova di trazione semplice Coupon 7-8-9, Coupon CR 10-11-12.

È da tener presente che, in ogni giorno di prova prima elencato, a seguito delle prove effettuate sui campioni 15×30 , sono state effettuate prove di trazione e compressione semplice su ciascun gruppo di $n^\circ 3$ provini di malta realizzati in fase di rinforzo del campione al fine di caratterizzare il materiale. Inoltre, si sottolinea che, tali provini, sono stati esposti alle alte temperature per lo stesso tempo in cui sono stati esposti i relativi campioni.

Le prove sui singoli campioni e sulle malte, è stato possibile effettuarle trascorsi 28 giorni dalla data in cui è avvenuto il rinforzo con FRCM.

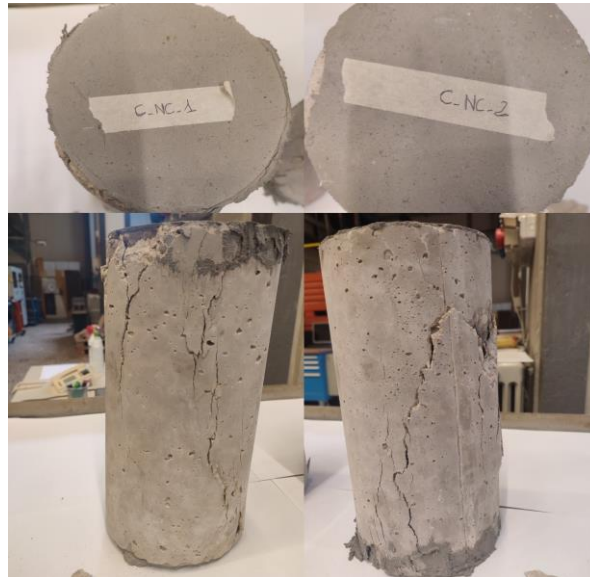


Figura 13_ Campioni NC a T=Amb dopo prova di compressione semplice



Figura 14_ Campioni C2 a T=Amb dopo prova di compressione semplice



Figura 15_Campioni C2 a T=100° dopo prova di compressione semplice



Figura 16_Campioni C2 a T=250° dopo prova di compressione semplice



Figura 17_Campioni 2CR a $T=Amb$ dopo prova di compressione semplice



Figura 18_Campioni 2CR a $T=80^{\circ}$ dopo prova di compressione semplice



Figura 19_Campioni 2CR a T=100° dopo prova di compressione semplice



Figura 20_Campioni 2CR a T=250° dopo prova di compressione semplice

Prima di affrontare la configurazione per il test di trazione semplice effettuato sui coupon, è necessario fare una premessa. Al fine di poter testare i campioni, a seguito dei giorni di maturazione e della relativa esposizione in forno agli stessi range in cui sono stati esposti i campioni cilindrici, è stato effettuato un processo intermedio. Questo, consisteva nell'andare a fissare attraverso della resina epossidica, su entrambi

lati dei coupon in ogni estremità e per una $l=20$ cm delle piastre metalliche con la presenza di un foro nella parte più esterna. I fori di entrambe le piastre posizionate all'estremità dovevano risultare paralleli allo scopo di far passare al loro interno un bullone e permettere il fissaggio, successivo, alla macchina di prova.

La prova di trazione, solitamente, risulta essere la più semplice e più veloce al fine della caratterizzazione del materiale. La macchina di prova dispone di un alloggiamento a forma di chiave e di un ritaglio circolare ad incasso utile per caricare rapidamente e correttamente il provino. Questo sistema assicura che sia applicato il carico assiale, riducendo le occorrenze di fuori centro del carico e i momenti flettenti indesiderati.

Per quanto concerne la configurazione del test nel caso in esame, i campioni, dopo essere stati fissati alle due estremità tramite bulloni, sono stati caricati assialmente con la macchina di caricamento universale sotto il controllo della modalità di spostamento. La prova, consiste, nell'applicare uno spostamento a velocità costante, all'estremità di un provino, avendo cura di misurare l'allungamento dello stesso e la forza di trazione applicata. La prova termina con la rottura, ovvero con la separazione fisica delle due estremità del provino. Tale rottura, avviene in condizioni quasi statiche, in quanto il carico viene applicato lentamente. Al fine di ottenere una corretta misura dello spostamento e misurare eventuali scorrimenti, sulla superficie del coupon posizionata dal lato interno della macchina di prova, sono stati fissati 3 trasduttori di spostamento lineare [POT] (gli stessi che in precedenza sono stati utilizzati nel caso dei campioni cilindrici). (Figura 21)



Figura 21_ Posizionamento potenziometri durante prova di trazione sui coupon

4. RISULTATI

4.1 COMPORTAMENTO TENSIONE- DEFORMAZIONE ASSIALE

Al fine di verificare il grado di precisione degli spostamenti rilevati dai tre potenziometri di precisione applicati attorno ai campioni cilindrici, in un primo momento, sono stati generati dei grafici che mettono in relazione i tre diversi andamenti. È stato possibile constatare che, tutte le spezzate, seguivano all'incirca lo stesso andamento e dunque, le misure ottenute appartengono tutte allo stesso range.

Procediamo a questo punto mettendo a confronto i risultati ottenuti per le tre diverse tipologie di campioni testati: Non confinati, Confinati con rete in carbonio secca, Confinati con rete in carbonio impregnata con resina.

Trattasi di tre campioni di controllo per ciascun range di temperatura e per ciascun gruppo, ad eccezione della tipologia “non confinato” in cui, i campioni di controllo sono stati due; testati sotto carico ciclico assiale.

Le curve carico-deformazione ottenute a seguito delle prova di compressione ciclica effettuata su ciascun campione cilindrico, sono del tipo indicato in *Figura 22*.

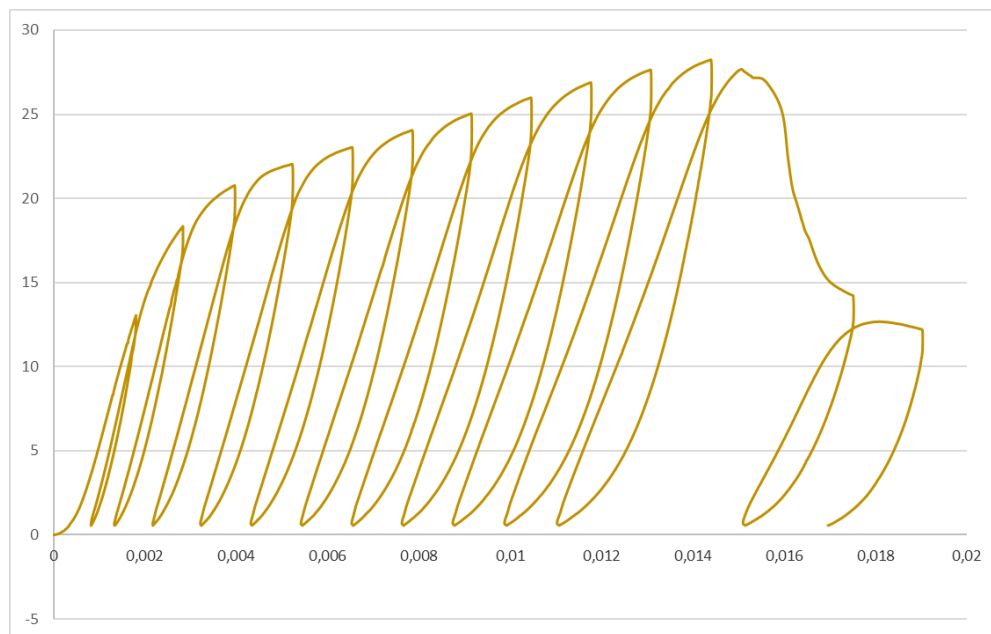
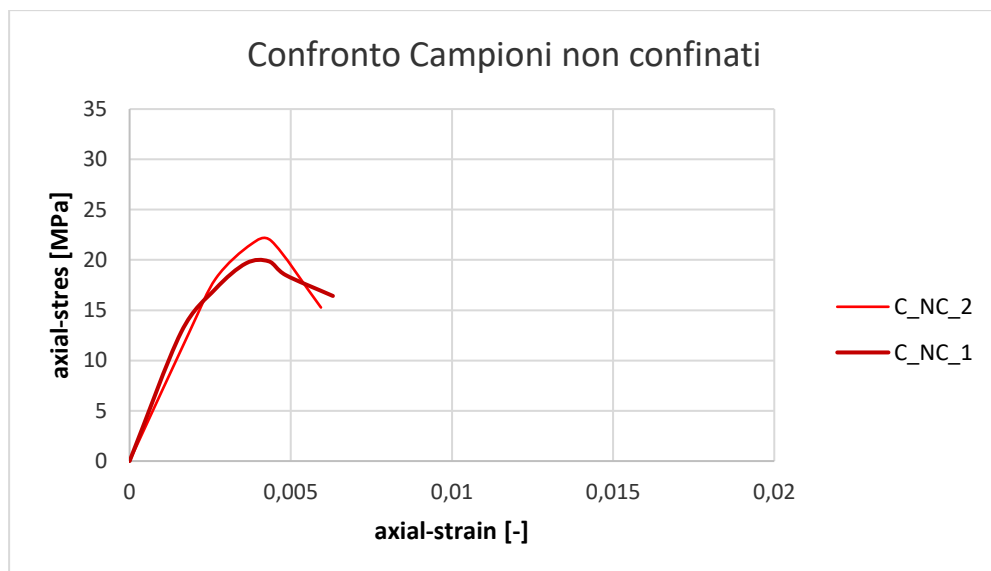
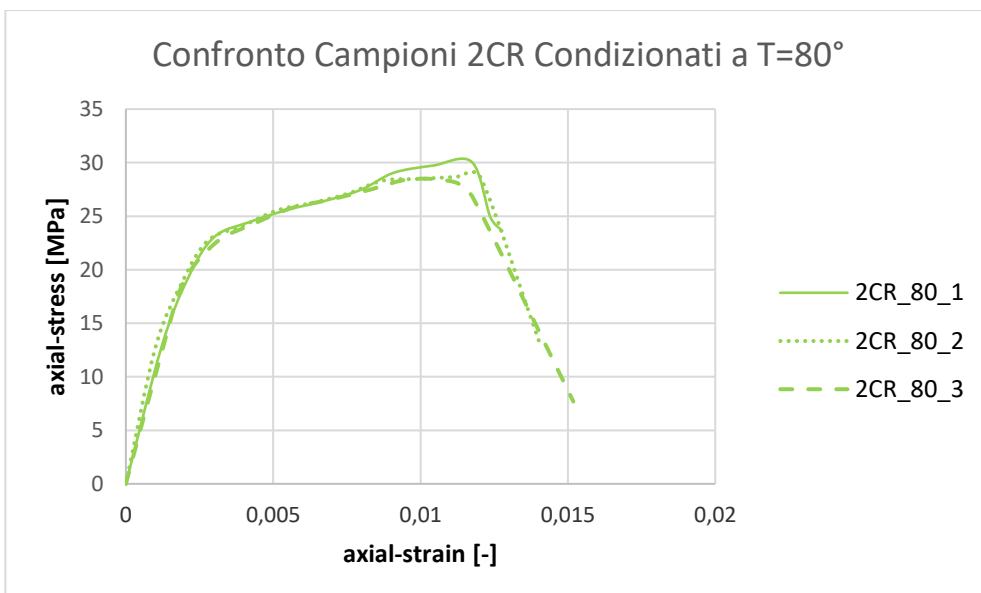
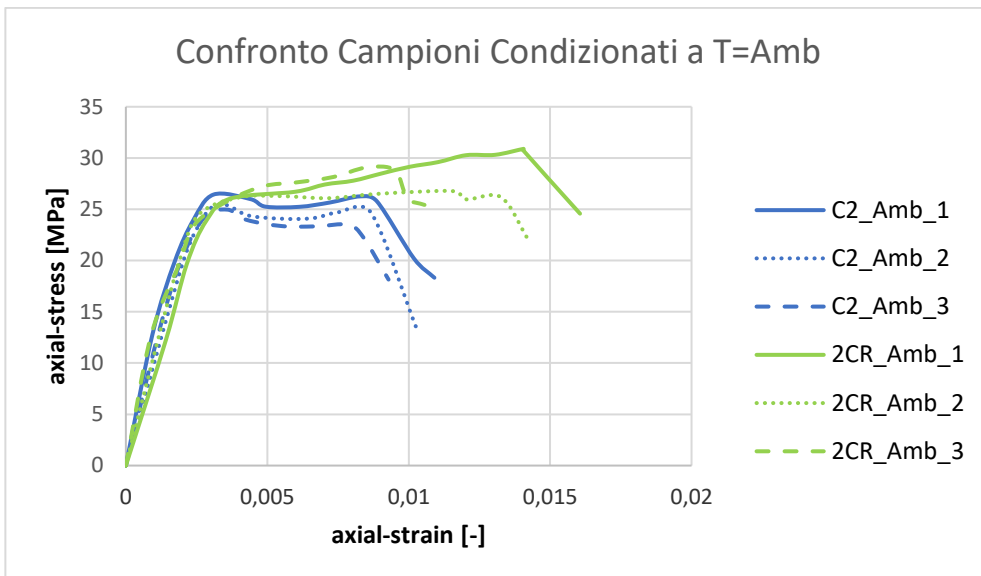


Figura 22_ Grafico ottenuto da prova ciclica provini cilindrici

In seguito, i grafici ottenuti sono stati linearizzati e considerando i valori massimi delle curve di inviluppo di ciascun provino, sono stati elaborati i diagrammi carico-deformazione che riportiamo nelle immagini sottostanti [Figura 23].

In particolar modo, al fine di rendere più definite le differenze tra le diverse campagne di prova, sono state rappresentate in *blu*, le curve relative alla campagna 1, in cui è stata utilizzata delle rete in carbonio secca; in *verde*, le curve relative alla campagna 2, in cui è stata utilizzata la rete in carbonio impregnata attraverso della resina epossidica. Al contrario invece, attraverso due differenti tonalità di *rosso*, sono state indicate le curve relative i cilindri non confinati e non condizionati termicamente.





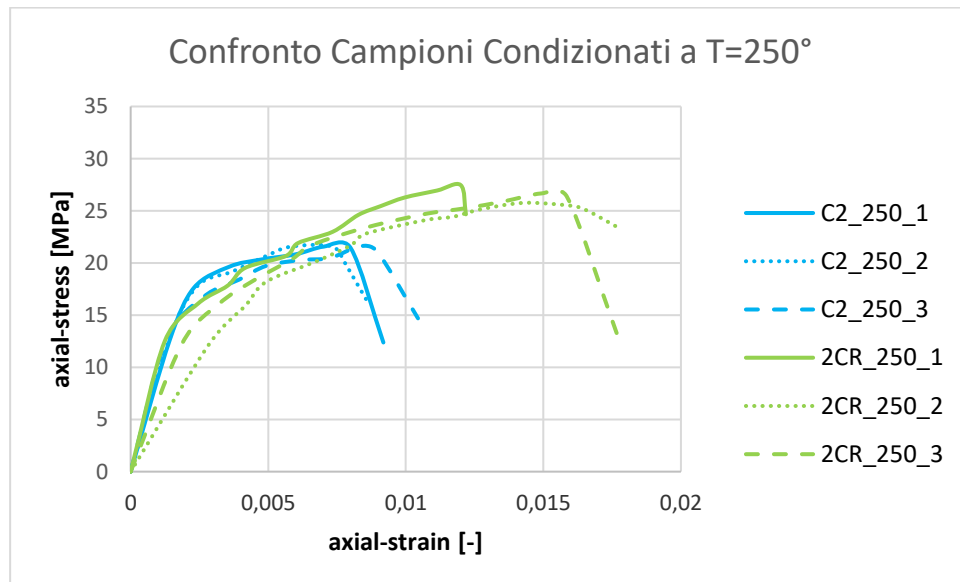
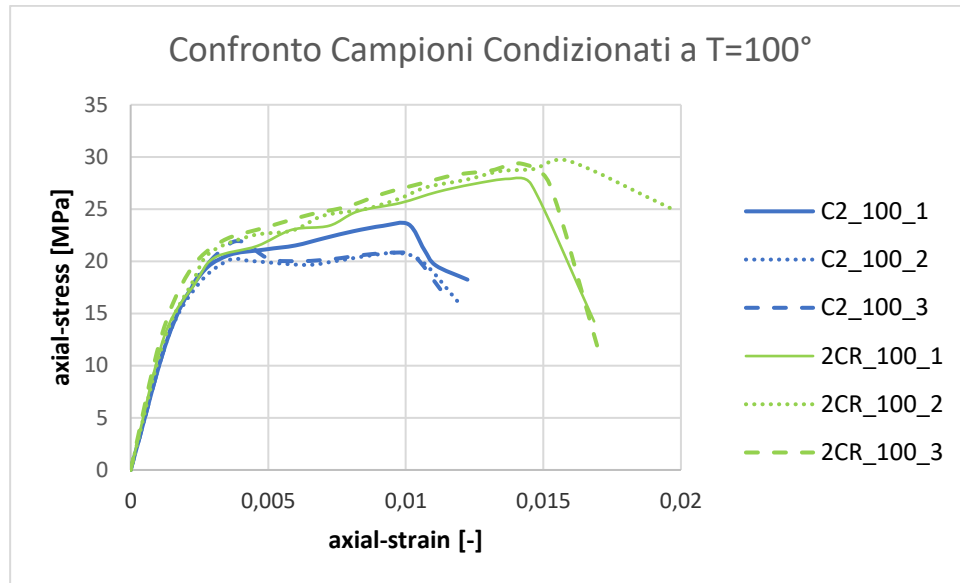


Figura 23_ Curve carico-deformazione campioni oggetto di studio

Come è possibile notare dal primo grafico presente in *Figura 23*, nel caso dei campioni C_ NC-1 e C_ NC-2, il picco della curva carico-deformazione viene raggiunto nel terzo step di carico. Nel corso del ciclo successivo, tale valore rimane costante e, in seguito al raggiungimento dello stesso, si assiste ad una deflessione seguita da un plateau prima della rottura, avvenuta al termine del ciclo in esame.

Il secondo grafico, mostra i risultati ottenuti a seguito della prova sulle due campagne di provini con esposizione a $T=Amb$.

Dall'analisi effettuata è stato possibile notare che, nel caso di C2_ Amb-1, C2_ Amb-2 e C2_ Amb-3, il carico massimo è stato raggiunto nel quarto ciclo. Raggiunto tale valore, si assiste ad un leggero rammollimento della curva prima di passare alla successiva fase di scarico e, riprendere in seguito i successivi cicli fino alla perdita di resistenza del campione, giunta a seguito dello step 8 di carico nel caso di C2_ Amb-2 e C2_ Amb-3, al contrario di C2_ Amb-1 per il quale è avvenuta a seguito dello step di carico 9. Per quanto riguarda invece 2CR_ Amb-1, 2CR_ Amb-2, 2CR_ Amb-3 la situazione è un po' differente, poiché in questa circostanza, i campioni, hanno raggiunto il carico massimo nel corso di step differenti.

In particolar modo, 2CR_ Amb-1, ha avuto un aumento di carico costante nel corso di tutti i cicli precedenti il raggiungimento del carico massimo, avvenuto durante lo step di carico 13. Per quanto riguarda invece i campioni 2CR_ Amb-2 e 2CR_ Amb-3, la situazione è un po' differente dalla precedente ma, circa uguale nei due casi. Ciò significa che, in questi casi, si è assistito ad un aumento costante del carico fino allo step in cui è stato raggiunto il carico massimo, corrispondente allo step di carico 9, nel caso del campione 2, e allo step di carico 8 nel caso del campione 3. A seguito del raggiungimento dello stesso, così come nel caso del campione 1, si è assistito ad una perdita di resistenza graduale avvenuta nei cicli di carico successivi ma, precedenti la rottura del campione, giunta a seguito dello step di carico 16, per il campione 1, step di carico 11 per il campione 2 e, step di carico 10, per il campione 3. In tutti i casi, a seguito del raggiungimento del carico di rottura, durante l'ultimo ciclo di scarico, è stato possibile notare un breve tratto di stabilizzazione, prima della fine dello stesso.

Al fine di seguire un iter crescente nei range di temperatura di esposizione, trattiamo a questo punto i risultati ottenuti a seguito della prova inerente i campioni 2CR_80.

Riguardo i tre campioni appartenenti a questa campagna di prova, è possibile notare dal terzo grafico presente in *Figura 23* come, tutti hanno seguito un andamento costante crescente, nonostante abbiano raggiunto il carico massimo in fasi differenti. In particolar modo il campione 2CR_80-1, ha raggiunto il carico massimo nel corso dello step di carico 10; il campione 2CR_80-2 nel corso dello step 11; il campione 2CR_80-3 nel corso dello step di carico 9. Ciò che è stato possibile notare in tutti e tre i casi però, riguarda la seguente situazione: seppur i campioni hanno raggiunto il carico massimo negli step sopra indicati, nessuno di questi è giunto a rottura in quell'istante.

Al contrario, in corrispondenza del raggiungimento di tale carico si sono create le prime fessure e, nel corso dello step successivo, seppur con un carico inferiore, a seguito della perdita di resistenza caratterizzata da un tratto di deflessione nel diagramma e successivo plateau, abbiamo assistito alla rottura del rinforzo.

Passiamo a questo punto all'analisi dei risultati ottenuti dalle prove effettuate sui campioni esposti a $T=100^{\circ}$.

Come è possibile notare dal grafico in cui sono state messe a confronto le due campagne di prova, i risultati ottenuti, presentano delle evidenti differenze, vediamo a questo punto in quali termini.

Il campione 2C_100-1, a seguito di un andamento crescente costante, ha raggiunto il suo carico massimo nel corso dello step 9; il campione 2C_100-2 ha raggiunto tale valore nel corso dello step 8. Ciò che cattura in questa campagna di prova la nostra attenzione, riguarda il campione 2C_100-3, il quale ha raggiunto il suo carico massimo nel corso dello step 4 e, a seguito di tre cicli, in cui si è assistito ad una leggera diminuzione dello stesso, si è raggiunto nuovamente il massimo, con lo stesso valore registrato nel caso precedente, nel corso dello step 8. La caratteristica che accomuna i tre campioni, riguarda invece la fase successiva. Trattasi di una perdita di resistenza graduale avvenuta nel corso dei cinque cicli successivi, fino alla rottura definitiva del rinforzo, giunta al termine dell'ultimo step.

Per quanto riguarda invece i campioni confinati con rete impregnata in resina, è stato possibile notare un comportamento analogo nel caso di 2CR_100-1 e 2CR_100-3, in cui a seguito di un incremento graduale e costante, è stato raggiunto il carico massimo nel corso dello step 11 in corrispondenza del quale è avvenuta l'apertura delle prime fessure e, nel corso dello step successivo avvenuto ad un carico inferiore, nel tratto di curva decrescente a seguito di una breve fase di stabilizzazione, è avvenuta la perdita di resistenza totale dei provini con conseguente rottura del rinforzo. Situazione differente quella rilevata nei dati relativi al campione 2CR_100-2, in cui l'incremento di carico costante si è protratto fino allo step di carico 13, corrispondente al raggiungimento del carico massimo, a seguito del quale, è stato effettuato un unico ciclo in cui è avvenuta la perdita di resistenza con apertura improvvisa delle fessure e rottura del campione.

In ultima analisi, esaminiamo i risultati ottenuti dalle prove effettuate sui provini esposti a $T=250^{\circ}$.

I campioni 2C_250-1, 2C_250-2, 2C_250-3 in questo caso hanno avuto, nel corso della prova di compressione ciclica, lo stesso andamento. In particolar modo, sono avvenuti dei cicli di carico crescenti e costanti fino allo step di carico 7, corrispondente al raggiungimento del carico massimo. A seguito di ciò, si nota come i cicli successivi risultino più ampi rispetto ai precedenti; caratterizzati da un perdita graduale e costante di resistenza, fino al raggiungimento della rottura del rinforzo.

Al contrario, per quanto riguarda i campioni confinati con rete impregnata, notiamo come 2CR_250-1 e 2CR_250-2 si comportino in modo più o meno analogo. Sono caratterizzati da cicli di carico più stretti, con andamento crescente e costante, fino al raggiungimento del carico massimo nel corso dello step 12, a seguito del quale si assiste ad una leggera diminuzione del carico ma ad un ampliamento del ciclo stesso, alla fine del quale avviene la perdita di resistenza totale con conseguente rottura del rinforzo.

Per quanto riguarda il campione 2CR_250-3, questo come i precedenti, ha una crescita costante fino al raggiungimento del carico massimo, avvenuto nello step di carico 12; ma, a differenza dei precedenti campioni, quello in oggetto, appena raggiunto tale carico, ha avuto un'immediata perdita di resistenza con conseguente rottura.

A seguito di questa prima analisi globale è possibile fare alcune considerazioni:

- Innanzitutto, è possibile notare come, i campioni confinati attraverso rete in carbonio impregnata in resina, abbiano avuto una resistenza maggiore; in particolar modo sono stati caratterizzati da cicli più lunghi e hanno mostrato le prime fessurazioni in step successivi rispetto ai campioni confinati con rete in carbonio secca
- Inoltre, all'interno della campagna dei provini confinati con rete impregnata, è possibile notare come gli stessi, hanno raggiunto delle deformazioni maggiori, in un range compreso tra 0.015 e 0.02, rispetto ai campioni appartenenti all'altra campagna in esame
- I campioni 2CR_ $T=Amb$ hanno raggiunto dei valori di carico maggiori, seppur con una deformazione minore, rispetto ai campioni 2CR_ $T250$,

in cui il carico è risultato leggermente minore ma con deformazioni maggiori

A questo punto, seguendo le indicazioni riportate in CNR-DT 215/2018 e considerando i parametri derivanti dai materiali utilizzati, è stata determinata la pressione efficace di confinamento e la resistenza a compressione dell'elemento confinato; anche al fine di analizzare le differenze dal punto di vista dei parametri meccanici, una volta applicato il rinforzo.

Di seguito vengono riportate due differenti tabelle in cui sono stati determinati i parametri sopra detti, suddivise in base alla tipologia di rete adottata nel corso delle due campagne di prova.

In particolar modo, la *Rete C-NET 170BL* e la *Rete C-NET 220BL*.

Rete 170BL		Rete 220BL	
E_f [Mpa]	240000	E_f [Mpa]	240000
t_f [mm]	0,047	t_f [mm]	0,061
ϵ_{uf}	0,0081	ϵ_{uf}	0,0081
γ_m	1,5	γ_m	1,5
η_a	0,9	η_a	0,9
t_{mat} [mm]	10	t_{mat} [mm]	10
$f_{c,mat}$ [Mpa]	30	$f_{c,mat}$ [Mpa]	30
n_f	2	n_f	2

Tabella 14_Caratteristiche meccaniche rete in carbonio

$D_{cilindro}$ [mm]	150
$H_{cilindro}$ [mm]	300
f_{cm} [Mpa]	24
FC	1,2
γ_c	1,5
f_{cd} [Mpa]	13,33

Tabella 15

In cui:

- E_f modulo elastico longitudinale della rete;
- t_f spessore equivalente della rete;
- ϵ_{uf} deformazione di rottura della rete;

- γ_m fattore parziale della rete;
- η_a fattore di conversione ambientale interno;
- t_{mat} spessore della matrice del singolo strato di FRCM;
- $f_{c,mat}$ resistenza a compressione di progetto della matrice FRCM
- n_f numero di strati di FRCM
- D diametro campioni cilindrici;
- H altezza campioni cilindrici;
- f_{cm} resistenza media a compressione del calcestruzzo;
- f_{cd} resistenza a compressione di progetto del calcestruzzo.

I parametri determinati risultano i seguenti:

$$\rho_{mat} = \frac{4n_f t_{mat}}{D}$$

$$k_{mat} = 0.217 \left(\rho_{mat} \frac{f_{c,mat}}{f_{cd}} \right)^{\frac{3}{2}}$$

$$\varepsilon_{ud,rid} = \min \left(k_{mat} \eta_a \frac{\varepsilon_{uf}}{\gamma_m}; 0.004 \right)$$

$$f_l = \frac{2n_f t_f E_f \varepsilon_{ud,rid}}{D}$$

$$f_{l,eff} = k_h f_l$$

$$f_{cc,d} = f_{cd} + 2.6 f_{cd} \left(\frac{f_{l,eff}}{f_{cd}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Dove:

- ρ_{mat} percentuale geometrica di matrice di FRCM;
- k_h coefficiente di efficacia;
- k_{mat} coefficiente di efficacia della matrice di FRCM;
- $\varepsilon_{u,rid}$ deformazione di calcolo del composito FRCM;
- f_l pressione di confinamento;
- $f_{l,eff}$ pressione efficace di confinamento
- f_{ccd} resistenza di progetto del campione confinato con FRCM.

Si riportano di seguito i risultati ottenuti:

Rete 170BL		Rete 220BL	
ρ_{mat} [-]	0,53	ρ_{mat} [-]	0,53
k_h [-]	1	k_h [-]	1
k_{mat} [-]	0,24	k_{mat} [-]	0,24
$\epsilon_{u,rid}$ [-]	0,0012	$\epsilon_{u,rid}$ [-]	0,0012
f_i [MPa]	0,36	f_i [MPa]	0,47
$f_{i,eff}$ [MPa]	0,36	$f_{i,eff}$ [MPa]	0,47
f_{ccd} [MPa]	16,44	f_{ccd} [MPa]	17,03

Tabella 16

4.1.1 Deterioramento della sollecitazione dovuto al carico ciclico

Per determinare il deterioramento della sollecitazione dovuto all'effetto del carico ciclico, viene definito un rapporto di deterioramento della sollecitazione (β) nel seguente modo:

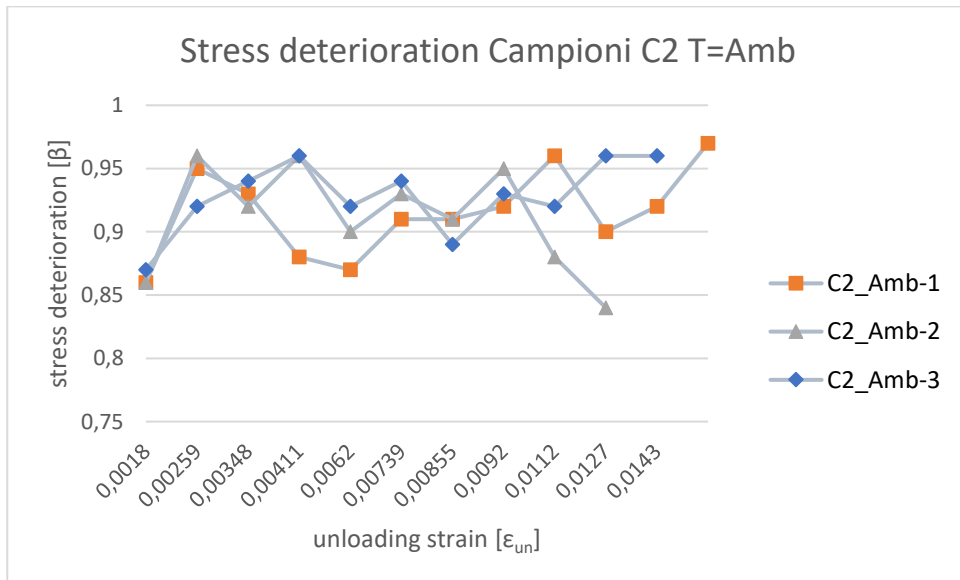
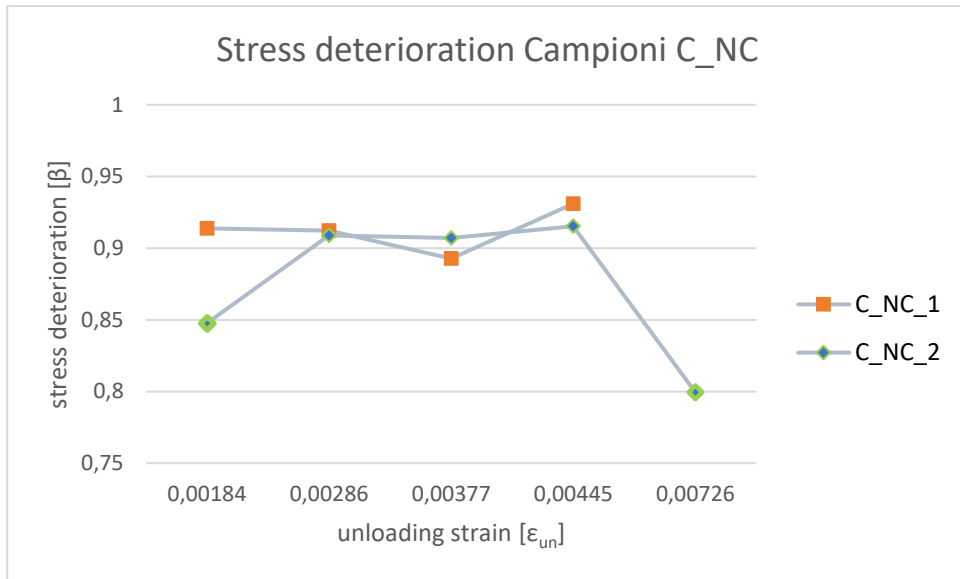
$$\beta = f_{new}/f_{un}$$

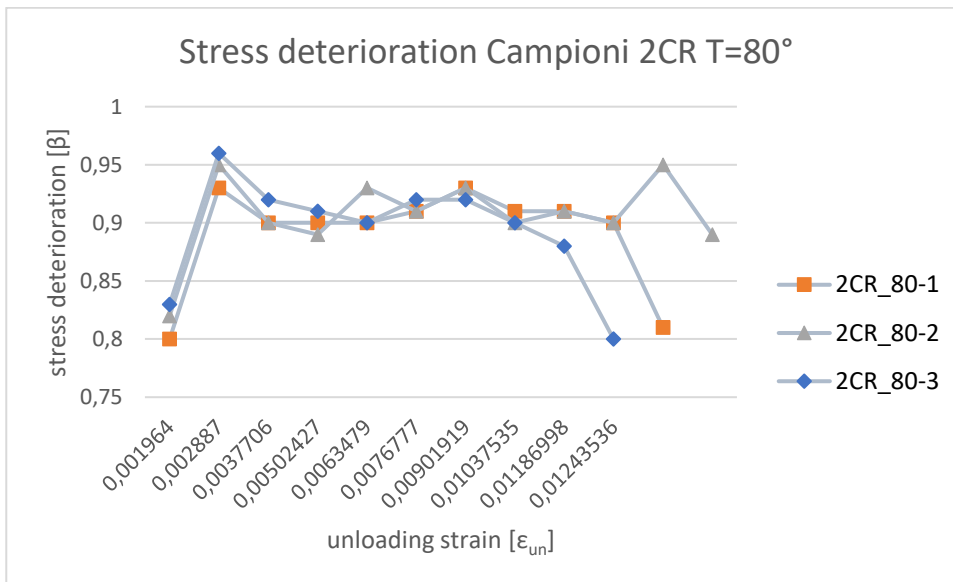
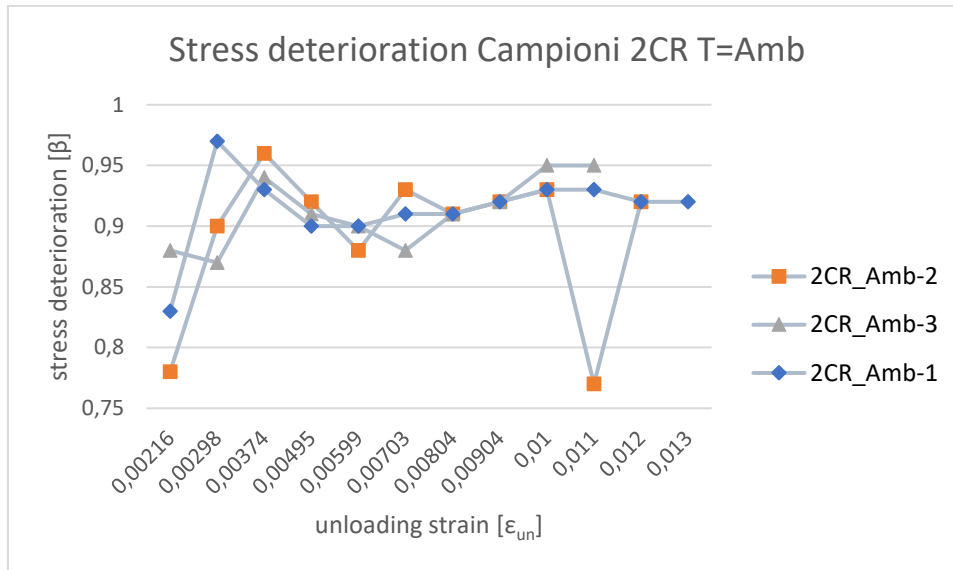
in cui:

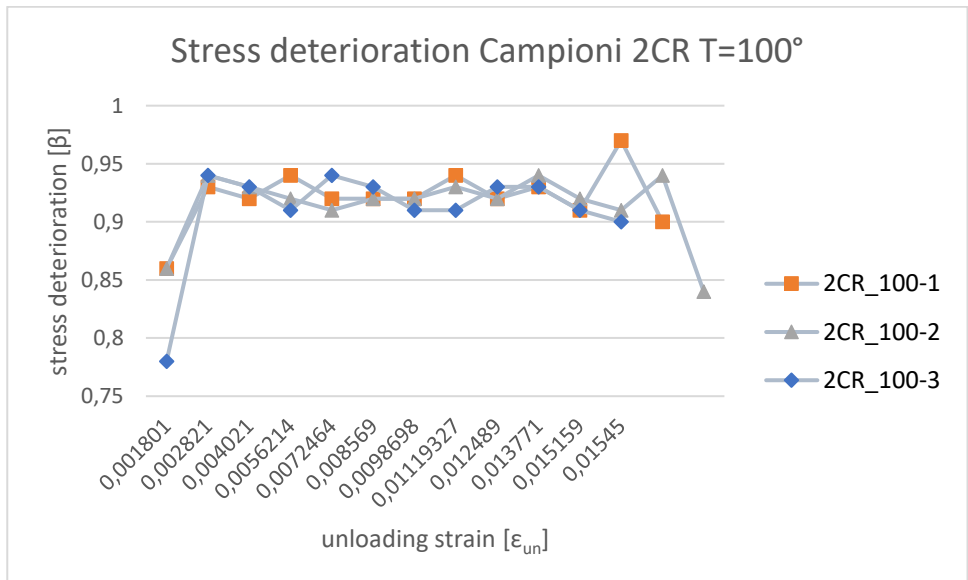
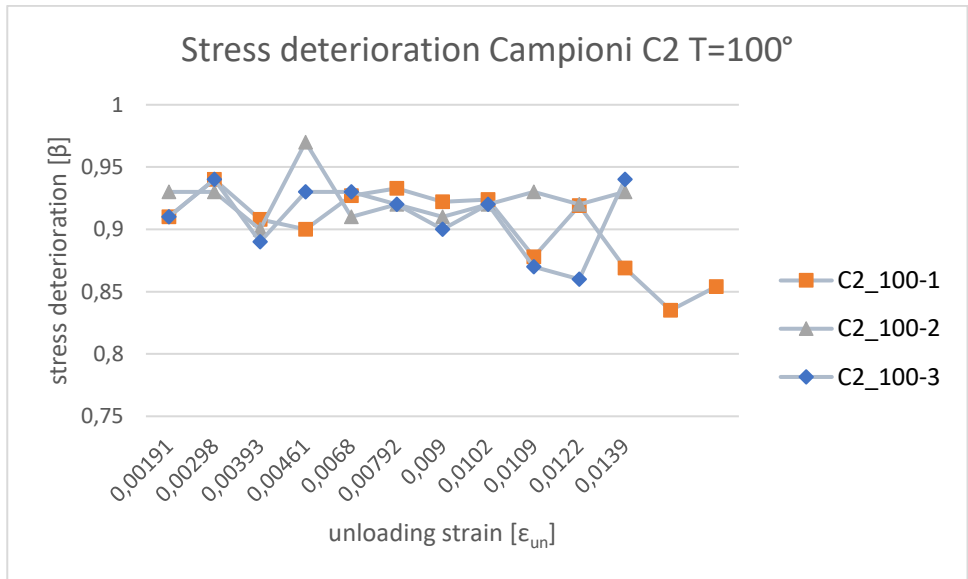
- f_{new} rappresenta la forza accumulata nel percorso di scarico;
- f_{un} rappresenta la sollecitazione nel percorso di ricarica corrispondente alla massima deformazione assiale nel percorso di scarico dell'involucro ϵ_{un} .

Nelle seguenti immagini verranno illustrate le correlazioni tra ϵ_{un} e β per i diversi campioni analizzati, andando a confrontare le due tipologie di campioni nei diversi range di temperatura. Come si può notare, in tutti i casi in cui si hanno piccoli valori di deformazioni allo scarico, il deterioramento della sollecitazione è molto piccolo e β varia in un intervallo costante tra 0,98 e 0,90. All'aumentare delle deformazioni di scarico, il valore di β diminuisce e si stabilizza con valori compresi tra 0,90 e 0,80.

In alcuni casi, è stato possibile notare come, a seguito del raggiungimento del picco, il rapporto sia rimasto costante fino al momento in cui è terminato l'ultimo ciclo. (Figura 24)







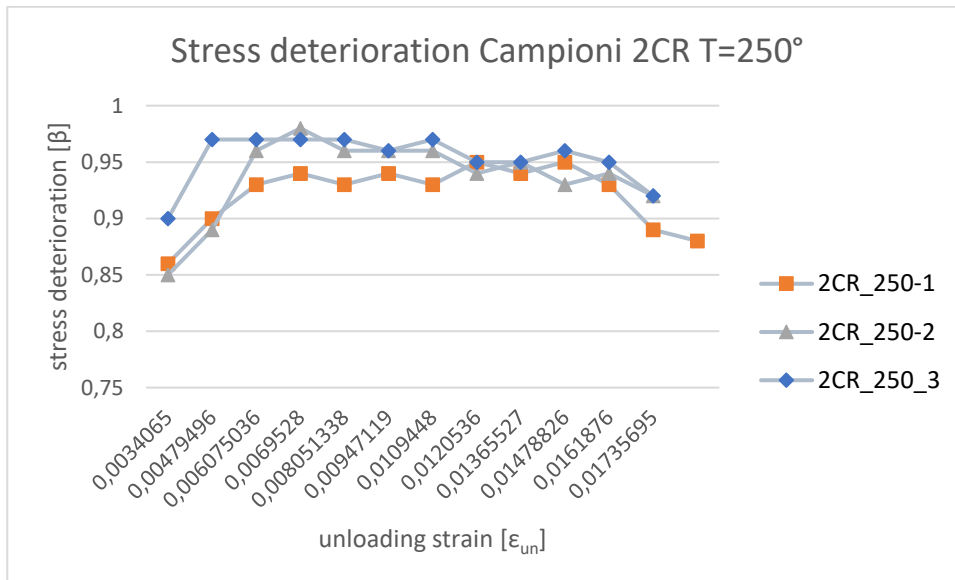
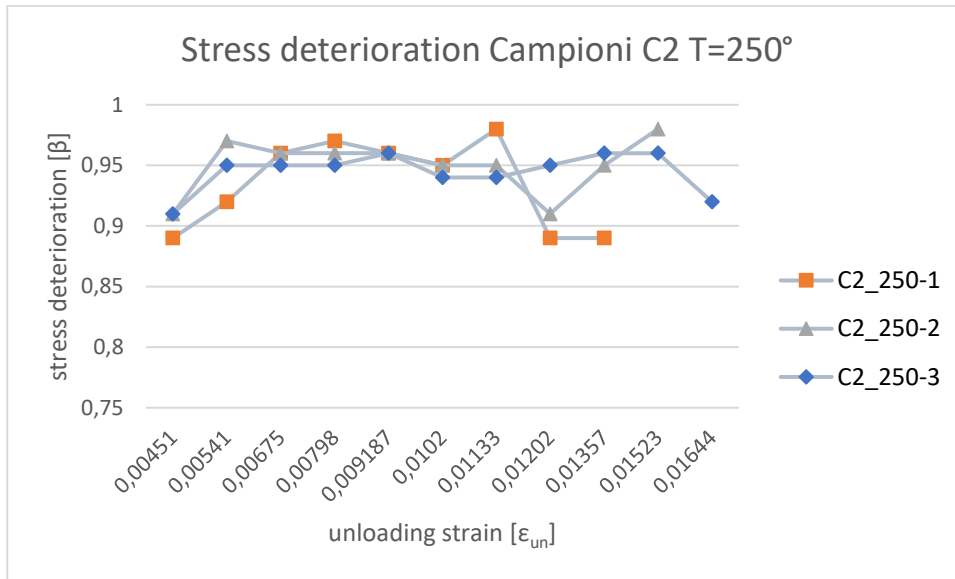


Figura 24_ Grafici stress deterioration campioni oggetto di studio

4.1.2 Caratterizzazione dei risultati attraverso indagine microscopica

In seguito alla prova di compressione ciclica è stato prelevato, da ciascun cilindro, un campione con spessore equivalente allo spessore del rinforzo realizzato (malta-rete in carbonio-malta-rete in carbonio-malta), al fine di eseguire una caratterizzazione microscopica dello stesso e poter notare, in che modo la fibra in carbonio, negli strati

più interni, ha reagito alle sollecitazioni subite e dunque, in che modo è avvenuto lo strappo.

Si riportano di seguito due immagini con diverso grado di precisione, reperite nel corso dell'indagine microscopica.

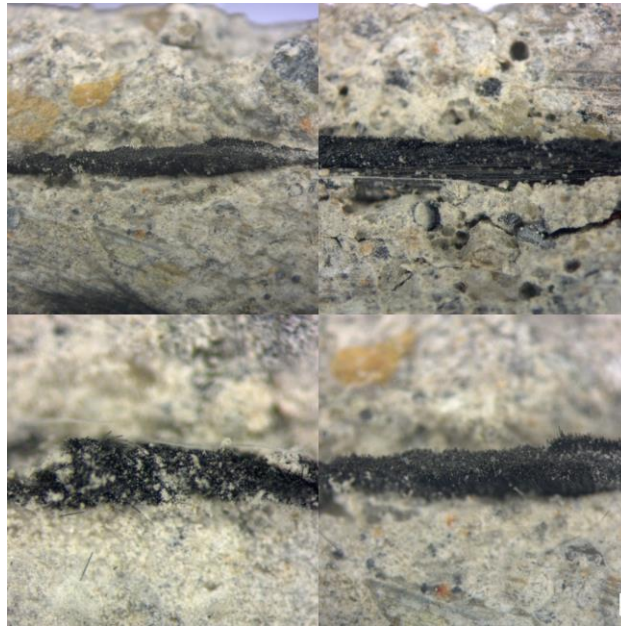


Figura 25_Dettaglio n°1 indagine microscopica

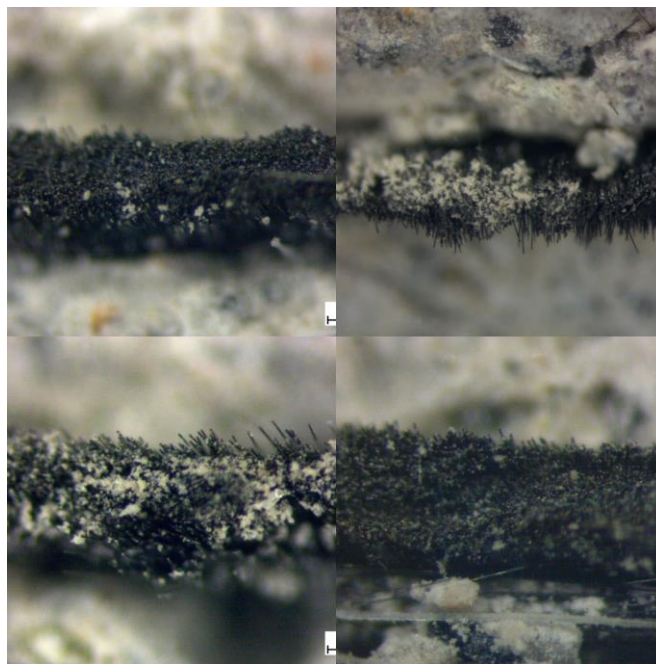


Figura 26_Dettaglio n°2 indagine microscopica

In *Figura 25* è possibile notare, lo scivolamento del tessuto all'interno della malta; invece, in *Figura 26*, attraverso uno zoom ulteriore si nota il modo in cui è avvenuto lo strappo della rete a seguito delle sollecitazioni agenti sul provino cilindrico nel corso della prova ciclica.

4.2 COMPORTAMENTO A TRAZIONE

Per quanto riguarda i risultati ottenuti a seguito della prova a trazione effettuata sui diversi coupon, è necessario fare delle precisazioni, prima di procedere.

Procediamo a questo punto mettendo a confronto i risultati ottenuti per le diverse tipologie di campioni testati: Confinati con rete in carbonio secca, Confinati con rete in carbonio impregnata con resina.

Trattasi di tre campioni di controllo per ciascun range di temperatura e per ciascun gruppo, proprio come nel caso della prova effettuata sui campioni cilindrici.

Si riportano di seguito alcuni momenti della prova. È possibile notare, nei diversi casi, le differenti modalità di rottura o, meglio, i diversi punti in cui è avvenuta la rottura.

Nel paragrafo successivo, andremo ad analizzare i risultati analitici.

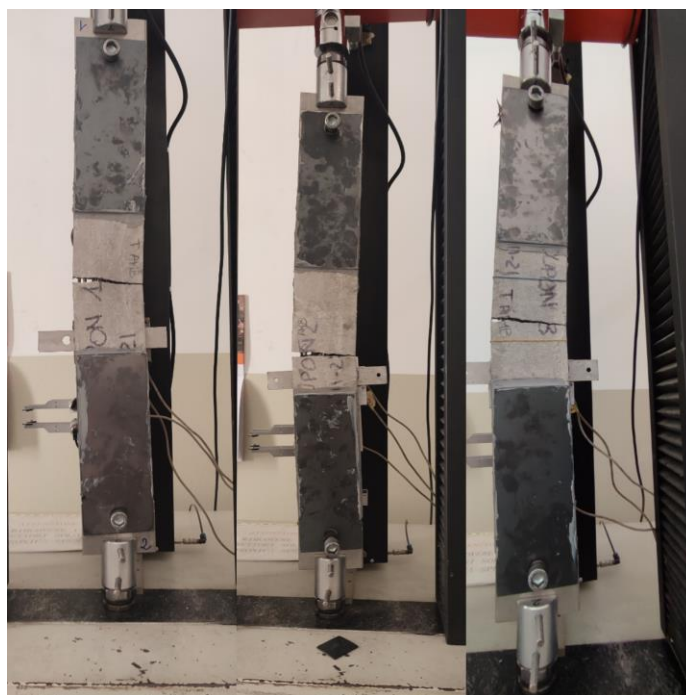


Figura 27_ Coupon rinforzati con rete in carbonio secca esposti a T=Amb



Figura 28_ Coupon rinforzati con rete in carbonio secca esposti a $T=100^{\circ}$

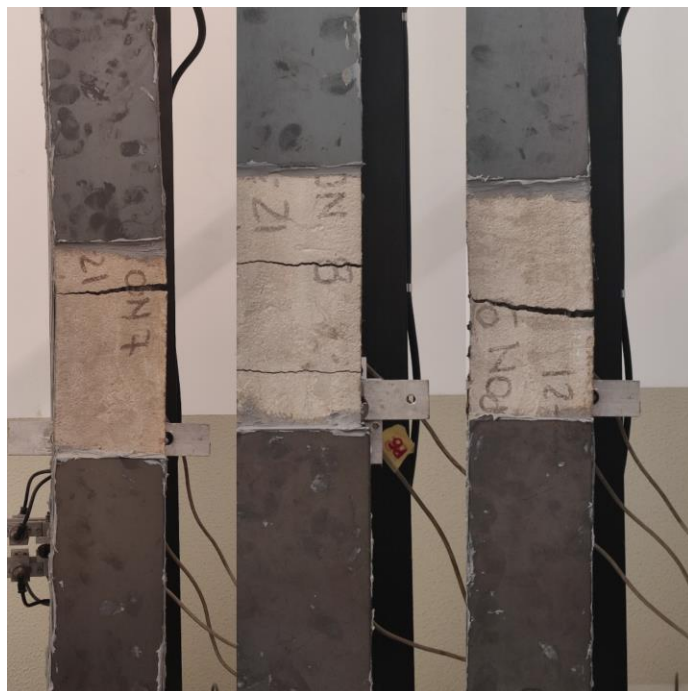


Figura 29_ Coupon rinforzati con rete in carbonio secca esposti a $T=250^{\circ}$



Figura 30_ Coupon rinforzati con rete in carbonio impregnata in resina esposti a $T=Amb$



Figura 31_ Coupon rinforzati con rete in carbonio impregnata in resina esposti a $T=80^{\circ}$



Figura 32_ Coupon rinforzati con rete in carbonio impregnata in resina esposti a $T=100^{\circ}$

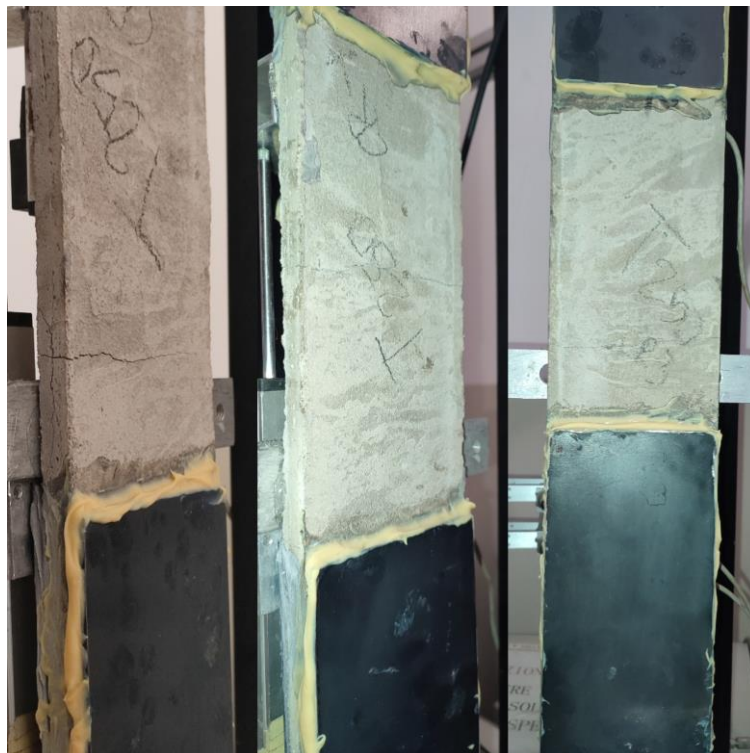


Figura 33_ Coupon rinforzati con rete in carbonio impregnata in resina esposti a $T=250^{\circ}$

4.2.1 Risultati ottenuti

I grafici ottenuti per ciascun coupon, a seguito della prova di trazione, risultano avere un andamento uguale a quello riportato in *Figura 34*.

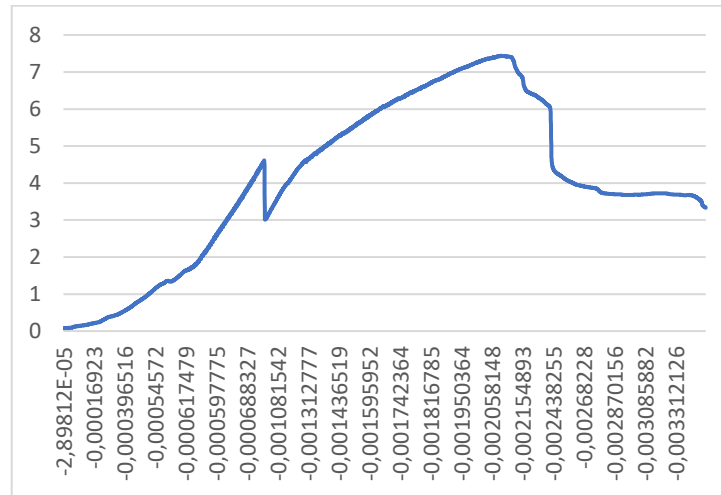


Figura 34 _Curva ottenuta a seguito della prova di trazione

In tutti i campioni testati, è stato possibile notare come la durata della prova sia risultata inferiore rispetto a quanto ci si aspettasse. I motivi di tali rotture, quasi immediate al momento, non sono ben chiari, in quanto tale fenomeno è avvenuto indipendentemente dall'esposizione alle alte temperature a cui sono stati sottoposti i Coupon. Un'ipotesi avanzata a tal proposito, riguarda la possibilità di una scarsa aderenza tra fibra e malta, in quanto, nella maggior parte dei casi è stato possibile constatare come la rottura sia avvenuta o nel centro del provino o, immediatamente al limite delle placche metalliche applicate per effettuare la prova (*Figura 35*).

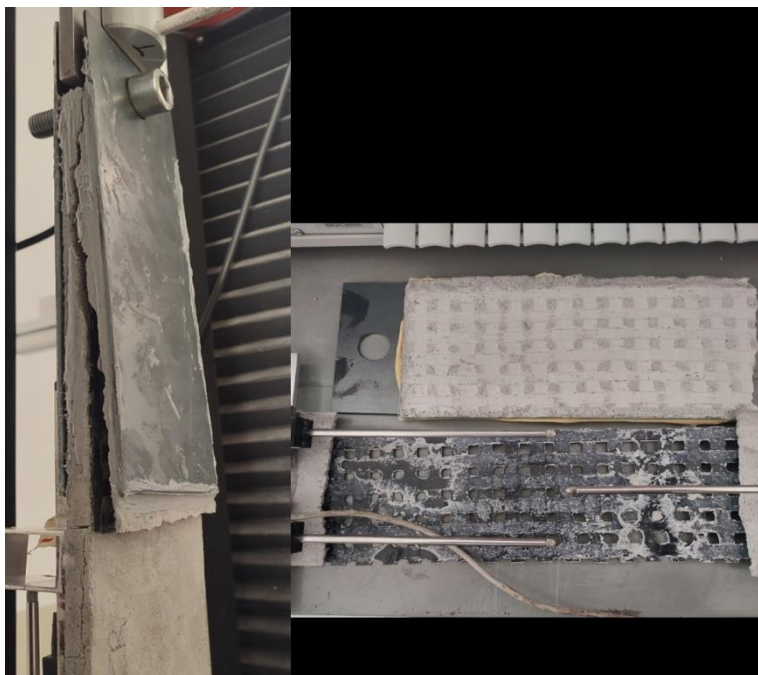


Figura 35_ Modalità di rottura prevalente e conseguente distacco fibra-matrice

Tutto sommato, il meccanismo di rottura non è stato istantaneo anche se, come accennato in precedenza, è avvenuto in una zona ben definita in tutti i campioni. I primi punti di collasso delle curve, sono stati registrati in corrispondenza della comparsa della prima fessura secondo l'asse orizzontale (anche se le fessure registrate per tutti i campioni sono state al massimo due). In seguito a ciò, con l'aumento della forza impressa, la fessura presente ha continuato a propagarsi, sino ad interessare lo spessore del coupon, provocando, in corrispondenza del raggiungimento del picco, il distacco del sistema.

In *Figura 32* è possibile osservare in particolar modo, oltre che la modalità di rottura, anche il modo in cui è avvenuto il distacco del sistema.

4.3 COMPORTAMENTO A TRAZIONE E COMPRESSIONE DELLE MALTE

Come anticipato, a seguito di ciascun rinforzo effettuato sui campioni cilindrici e sui coupon, sono stati realizzati tre campioni di malta, al fine di caratterizzare successivamente, il materiale. Questi, sono stati sottoposti, proprio come i campioni cilindrici, agli stessi range di temperatura e allo stesso tempo di esposizione all'interno

del forno e, in seguito, sono state eseguite prove di trazione semplice e di compressione.

Su un medesimo prisma di malta si eseguono due tipi di prove: una prova a flessione e una a compressione normate dall'Ente Italiano di Unificazione nella norma UNI EN 1015-11 "*Metodi di prova per malta per opere murarie. Parte 11: determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita*".

La prova consiste nel sottoporre a flessione il prisma precedentemente confezionato e portarlo a rottura applicando il carico in tre punti e, successivamente, sono state provate a compressione le due parti rimanenti dalla prova a flessione.

I campioni sono stati posizionati all'interno di stampi metallici costituiti da un telaio aperto formato da parte rimovibili che, compongono tre compartimenti. I campioni sono dei prismi a base quadrata aventi dimensioni (160x40x40 mm); la prova di flessione si esegue posizionando il campione all'interno della macchina di prova costituita da due rulli inferiori, a sostegno del campione, e uno superiore per applicare il carico nella mezzzeria del provino. Prima di eseguire tale prova, è risultato necessario ripulire i campioni da eventuali aggregati non inglobati e, dopo, sono stati posizionati nell'apparecchiatura di prova con una delle facce che erano a contatto con l'acciaio rivolta verso i due rulli di appoggio; è stato poi applicato il carico ad una velocità costante. La resistenza a flessione del singolo provino è stata determinata come:

$$f = 1.5 \frac{Fl}{bd^2}$$

Per quanto concerne la prova di compressione, questa risulta essere normata sempre dalla UNI EN 1015-11. Per eseguire tale prova è stata utilizzata una macchina avente la piastra superiore in grado di allinearsi liberamente quando viene a contatto con il provino. La prova di compressione è stata eseguita sulle due parti ottenute dalla rottura dei prismi sottoposti precedentemente alla prova di flessione. Per ogni campione è stato registrato il valore del carico che lo ha portato a rottura e, diviso per l'area trasversale, ha fornito il valore della resistenza a compressione.

I dati raccolti, vengono riassunti nelle tabelle sottostanti.

Si riportano, dapprima, i risultati relativi alle prove effettuate sui campioni realizzati nel corso della prima campagna di prova (*Figura 36*); in seguito quelli ottenuti nel corso della seconda (*Figura 37*).

Nome campione	Peso [Kg]	Flessione	Compressione	Flessione	Compressione
		F _m [N]	F _m [N]	[Mpa]	[Mpa]
C2_1A_amb	0,51	1829,75	40035	4,29	25,02
C2_1B_amb	0,51	1829,75	40178	4,29	25,11
C2_1C_amb	0,52	2126,38	41355	4,98	25,85
C2_1D_amb	0,52	2126,38	42803	4,98	26,75
C2_1E_amb	0,51	1851,38	42735	4,34	26,71
C2_1F_amb	0,51	1851,38	42769	4,34	26,73
C2_2A_amb	0,51	2013,25	40523	4,72	25,33
C2_2B_amb	0,51	2013,25	44228	4,72	27,64
C2_2C_amb	0,51	2284,63	48023	5,35	30,01
C2_2D_amb	0,51	2284,63	47385	5,35	29,62
C2_2E_amb	0,51	2111,50	45184	4,95	28,24
C2_2F_amb	0,51	2111,50	46913	4,95	29,32
C2_3A_amb	0,52	2040,63	49376	4,78	30,86
C2_3B_amb	0,52	2040,63	49594	4,78	30,99
C2_3C_amb	0,52	2161,63	52429	5,07	32,77
C2_3D_amb	0,52	2161,63	52035	5,07	32,52
C2_3E_amb	0,52	2252,25	42761	5,28	26,73
C2_3F_amb	0,52	2252,25	39983	5,28	24,98

Nome campione	Peso [Kg]	Flessione	Compressione	Flessione	Compressione
		F _m [N]	F _m [N]	[MPa]	[MPa]
C2_1A_100	0,48	1848,25	43691	4,33	27,31
C2_1B_100	0,48	1848,25	44715	4,33	27,95
C2_1C_100	0,49	2189,00	44753	5,13	27,97
C2_1D_100	0,49	2189,00	43744	5,13	27,34
C2_1E_100	0,48	1867,13	43624	4,38	27,27
C2_1F_100	0,48	1867,13	45210	4,38	28,26
C2_2A_100	0,49	1908,38	46346	4,47	28,97
C2_2B_100	0,49	1908,38	46759	4,47	29,22
C2_2C_100	0,50	1918,25	45158	4,49	28,22
C2_2D_100	0,50	1918,25	46654	4,49	29,16
C2_2E_100	0,51	2359,00	47835	5,53	29,89
C2_2F_100	0,51	2359,00	47190	5,53	29,49
C2_3A_100	0,49	1762,63	39870	4,13	24,92
C2_3B_100	0,49	1762,63	39724	4,13	24,83
C2_3C_100	0,48	1787,00	41059	4,19	25,66
C2_3D_100	0,48	1787,00	41479	4,19	25,92
C2_3E_100	0,47	1827,75	40778	4,28	25,49
C2_3F_100	0,47	1827,75	42566	4,28	26,60

Nome campione	Peso [Kg]	Flessione	Compressione	Flessione	Compressione
		F _m [N]	F _m [N]	[MPa]	[MPa]
C2_1A_250	0,44	2751,38	52789	6,45	32,99
C2_1B_250	0,44	2751,38	53183	6,45	33,24
C2_1C_250	0,44	2839,88	53865	6,66	33,67
C2_1D_250	0,44	2839,88	53546	6,66	33,45
C2_1E_250	0,44	2819,63	52973	6,61	33,11
C2_1F_250	0,44	2819,63	55354	6,61	34,60
C2_2A_250	0,45	2933,63	57668	6,88	36,04
C2_2B_250	0,45	2933,63	56490	6,88	35,31
C2_2C_250	0,46	2393,75	53843	5,61	33,65
C2_2D_250	0,46	2393,75	49965	5,61	31,23
C2_2E_250	0,46	2684,75	49950	6,29	31,22
C2_2F_250	0,46	2684,75	55875	6,29	34,92
C2_3A_250	0,44	2555,00	49268	5,99	30,79
C2_3B_250	0,44	2555,00	51113	5,99	31,95
C2_3C_250	0,44	2892,50	52639	6,78	32,90
C2_3D_250	0,44	2892,50	51810	6,78	32,38
C2_3E_250	0,44	2550,38	49436	5,98	30,90
C2_3F_250	0,44	2550,38	52200	5,98	32,62

Figura 36_ Tabelle riguardanti i risultati delle prove effettuate sui campioni di malta realizzati nel corso della prima campagna di prova

Nome campione	Peso [Kg]	Flessione	Compressione	Flessione	Compressione
		F _m [N]	F _m [N]	[MPa]	[MPa]
2CR1_A_amb	0,50	1759,63	38441	4,12	24,03
2CR1_B_amb	0,50	1759,63	40785	4,12	25,49
2CR1_C_amb	0,49	1782,25	36998	4,18	23,12
2CR1_D_amb	0,49	1782,25	36338	4,18	22,71
2CR2_A_amb	0,45	1833,38	30919	4,30	19,32
2CR2_B_amb	0,45	1833,28	31571	4,30	19,73
2CR2_C_amb	0,45	1487,88	30818	3,49	19,26
2CR2_D_amb	0,45	1487,88	31725	3,49	19,83
2CR2_E_amb	0,46	1783,50	34020	4,18	21,26
2CR2_F_amb	0,46	1783,50	31853	4,18	19,91
2CR3_A_amb	0,46	1988,88	33619	4,66	21,01
2CR3_B_amb	0,46	1988,88	35423	4,66	22,14
2CR3_C_amb	0,47	1717,50	32925	4,03	20,58
2CR3_D_amb	0,47	1717,50	32569	4,03	20,35
2CR3_E_amb	0,47	1941,13	33240	4,55	20,77
2CR3_F_amb	0,47	1941,13	36690	4,55	22,93

Nome campione	Peso [Kg]	Flessione	Compressione	Flessione	Compressione
		F _m [N]	F _m [N]	[MPa]	[MPa]
2CR1_A_80	0,49	2144,63	46414	5,03	29,01
2CR1_B_80	0,49	2144,63	42405	5,03	26,50
2CR1_C_80	0,50	2416,25	50456	5,66	31,54
2CR1_D_80	0,50	2416,25	47089	5,66	29,43
2CR1_E_80	0,49	2401,88	43778	5,63	27,36
2CR1_F_80	0,49	2401,88	43718	5,63	27,32
2CR2_A_80	0,46	2226,50	37958	5,22	23,72
2CR2_B_80	0,46	2226,50	36638	5,22	22,90
2CR2_C_80	0,45	1831,75	38149	4,29	23,84
2CR2_D_80	0,45	1831,75	38749	4,29	24,22
2CR2_E_80	0,47	1982,50	39420	4,65	24,64
2CR2_F_80	0,47	1982,50	39056	4,65	24,41
2CR3_A_80	0,47	1593,00	38010	3,73	23,76
2CR3_B_80	0,47	1593,00	41408	3,73	25,88
2CR3_C_80	0,46	1921,88	37526	4,50	23,45
2CR3_D_80	0,46	1921,88	36551	4,50	22,84
2CR3_E_80	0,46	2292,25	36716	5,37	22,95
2CR3_F_80	0,46	2292,25	38021	5,37	23,76

Nome campione	Peso [Kg]	Flessione	Compressione	Flessione	Compressione
		F _m [N]	F _m [N]	[MPa]	[MPa]
2CR1_A_100	0,47	1764,00	34046	4,13	21,28
2CR1_B_100	0,47	1764,00	32243	4,13	20,15
2CR1_C_100	0,49	2032,38	30473	4,76	19,05
2CR1_D_100	0,49	2032,38	34395	4,76	21,50
2CR1_E_100	0,50	2320,75	37020	5,44	23,14
2CR1_F_100	0,50	2320,75	38929	5,44	24,33
2CR2_A_100	0,47	1701,75	31886	3,99	19,93
2CR2_B_100	0,47	1701,75	31594	3,99	19,75
2CR2_C_100	0,48	2467,25	32779	5,78	20,49
2CR2_D_100	0,48	2467,25	30435	5,78	19,02
2CR2_E_100	0,46	1707,13	32209	4,00	20,13
2CR2_F_100	0,46	1707,13	31474	4,00	19,67
2CR3_A_100	0,45	2130,00	28883	4,99	18,05
2CR3_B_100	0,45	2130,00	28755	4,99	17,97
2CR3_C_100	0,44	1963,00	29134	4,60	18,21
2CR3_D_100	0,44	1963,00	29306	4,60	18,32
2CR3_E_100	0,45	1282,38	29153	3,01	18,22
2CR3_F_100	0,45	1282,38	29201	3,01	18,25

Nome campione	Peso [Kg]	Flessione	Compressione	Flessione	Compressione
		F _m [N]	F _m [N]	[MPa]	[MPa]
2CR1_A_250	0,43	2026,63	42529	4,75	26,58
2CR1_B_250	0,43	2026,63	45360	4,75	28,35
2CR1_C_250	0,43	2037,25	46249	4,77	28,90
2CR1_D_250	0,43	2037,25	44636	4,77	27,90
2CR1_E_250	0,44	2356,38	42754	5,52	26,72
2CR1_F_250	0,44	2356,38	46845	5,52	29,28
2CR2_A_250	0,43	2585,38	42998	6,06	26,87
2CR2_B_250	0,43	2585,38	43298	6,06	27,06
2CR2_C_250	0,43	2550,25	45709	5,98	28,57
2CR2_D_250	0,43	2550,25	43920	5,98	27,45
2CR2_E_250	0,43	2291,50	44674	5,37	27,92
2CR2_F_250	0,43	2291,50	43789	5,37	27,37
2CR3_A_250	0,39	1838,50	29989	4,31	18,74
2CR3_B_250	0,39	1838,50	28223	4,31	17,64
2CR3_C_250	0,39	1595,25	28256	3,74	17,66
2CR3_D_250	0,39	1595,25	28635	3,74	17,90
2CR3_E_250	0,39	1659,38	29246	3,89	18,28
2CR3_F_250	0,39	1659,38	26891	3,89	16,81

Figura 37_ Tabelle riguardanti i risultati delle prove effettuate sui campioni di malta realizzati nel corso della prima campagna di prova

Prove malte coupon					
Nome campione	Peso [Kg]	Flessione	Compressione	Flessione	Compressione
		F _m [N]	F _m [N]	N/mm	N/mm
Coupon T80-A CR	0,48	3327,63	48750	7,80	30,47
Coupon T80-B CR	0,48	3327,63	47243	7,80	29,53
Coupon T100-A CR	0,45	2032,38	41591	4,76	25,99
Coupon T100-B CR	0,45	2032,38	45563	4,76	28,48
Coupon Tamb A	0,42	3475,25	62599	8,14	39,12
Coupon Tamb B	0,42	3475,25	60784	8,14	37,99
Coupon T100 A	0,42	2817,88	51383	6,60	32,11
Coupon T100 B	0,42	2817,88	51570	6,60	32,23
Coupon T250 A	0,39	3093,38	48334	7,25	30,21
Coupon T250 B	0,39	3093,38	45563	7,25	28,48

Figura 38_ Tabelle riguardanti i risultati delle prove effettuate sui campioni di malta realizzati nel corso del rinforzo effettuato sui coupon

In tutte le prove di compressione effettuate sui campioni, è stato possibile constatare come le malte reagiscono dapprima in modo lineare; dopodiché si instaura un regime fessurativo che porta il materiale al degrado delle proprietà meccaniche. Inoltre, dai grafici sopra riportati, è possibile notare come, in base ai differenti getti effettuati, alcuni dei campioni abbiano raggiunto prima il limite e siano arrivati a rottura, talvolta anche con valori più bassi rispetto ad altri.

5. DISCUSSIONE

5.1 CONFRONTO TRA RISULTATI OTTENUTI E RELATIVI STUDI EFFETTUATI IN PRECEDENZA

Negli ultimi anni, seppur in modo differente, l'argomento oggetto di questo progetto di tesi, è stato affrontato da diversi autori Europei. In particolar modo, l'autore *Tomasz Trapko*, ha affrontato tale argomento in diversi elaborati, trattando di volta in volta aspetti differenti. Pertanto, al fine di confrontare i risultati ottenuti in questa campagna di prove con quelli ottenuti in precedenza, diversi articoli scientifici sono stati oggetto di studio e di analisi.

In particolar modo, le differenze sostanziali rilevate riguardano i seguenti aspetti:

- geometria del campione, in quanto in precedenza oltre ad utilizzare i provini cilindrici, sono stati utilizzati dei provini cubici;
- tempo di esposizione all'interno della camera climatica, nel nostro caso pari a 6h, in ricerche precedenti pari a 24h;
- diversi range di temperatura ai quali i campioni sono stati esposti;
- n° strati di rete utilizzati per il rinforzo.

Si riportano di seguito alcune tabelle illustrative, all'interno delle quali è possibile notare le differenze tra le diverse campagne di indagine condotte in passato e quella attuale e, in aggiunta, vengono riportati alcuni grafici che mettono in relazione alcuni tra i parametri indagati in precedenza.

5.1.1 Risultati derivanti da studi sperimentali precedenti

Nel primo articolo preso in esame “*The effect of high temperature on the performance of CFRP and FRCM confined concrete elements*” è stata effettuata una ricerca sugli elementi in calcestruzzo confinati con FRCM ed esposti ad alte temperature: +40°, +60°, +80° per un periodo di 24h. Ecco dunque che è possibile notare, quanto appena detto, ossia la differenza inerente i range di temperatura e il tempo di esposizione. In particolar modo, nell’articolo in esame, vengono discussi i modelli di danno e viene presentata l’analisi della capacità di carico limite basata sia sugli esperimenti di laboratorio che sui calcoli analitici. (Figura 39-40)

The effect of high temperature on the performance of CFRP and FRCM confined concrete elements	Tomasz Trapko	Parametri meccanici e geometrici del materiale di rinforzo			
		FRCM		Matrice a base di cemento	
		Spessore dello strato [mm]	0,0455	Resistenza a trazione [MPa]	3,5
		Larghezza del tessuto [mm]	1000	Resistenza a compressione [MPa]	29
		Carico Ultimo [KN/m]	240	Modulo di Young [Gpa]	6
		Resistenza a trazione [MPa]	5270/5800		

Programma di ricerca e dettagli campioni					
T= 40°C		T= 60°C		T= 80°C	
Es. non confinati	Es. Confinati FRCM	Es. non confinati	Es. confinati FRCM	Es. non confinati	Es. confinati FRCM
40 C1	40 M1	60 C1	60 M1	80 C1	80 M1
40 C2	40 M2	60 C2	60 M2	80 C2	80 M2
	40 M3		60 M3		80 M3

Risultati Test Effettuati											
Sollecitazioni empiriche elementi confinati con FRCM			Dati per calcolare f_l								
Campione	N_u [KN]	f'_{cc} [MPa]	T [°C]	D [mm]	f'_{cd} [MPa]	f'_u [MPa]	n°strati rinforzo	k_l	f'_{cc_exp} [MPa]	f_l [MPa]	f'_{cc_the} [MPa]
40M1	409,63	40,85	40	113	18,26	5270	2	2,5	40,85	8,49	39,48
40M2	367,48	36,64	40	113	18,26	5270	2	2,5	36,64	8,49	39,48
40M3	395,44	39,43	40	113	18,26	5270	2	2,5	39,43	8,49	39,48
60M1	398,97	39,78	60	113	18,26	5270	2	2,5	39,78	8,49	39,48
60M2	374,46	37,34	60	113	18,26	5270	2	2,5	37,34	8,49	39,48
60M3	324,86	32,39	60	113	18,26	5270	2	2,5	32,39	8,49	39,48
80M1	326,67	32,57	80	113	18,26	5270	2	2,5	32,57	8,49	39,48
80M2	365,74	36,47	80	113	18,26	5270	2	2,5	36,47	8,49	39,48
80M3	370,36	36,93	80	113	18,26	5270	2	2,5	36,93	8,49	39,48

Campione	T_{esp} [°C]	N_u [KN]	T_{esp} [°C]	N_u [MPa]
40M1	40	409,63	40	3,848242
40M2	40	367,48	40	3,452267
40M3	40	395,44	40	3,714935
60M1	60	398,97	60	3,748098
60M2	60	374,46	60	3,51784
60M3	60	324,86	60	3,051876
80M1	80	326,67	80	3,06888
80M2	80	365,74	80	3,435921
80M3	80	370,36	80	3,479323

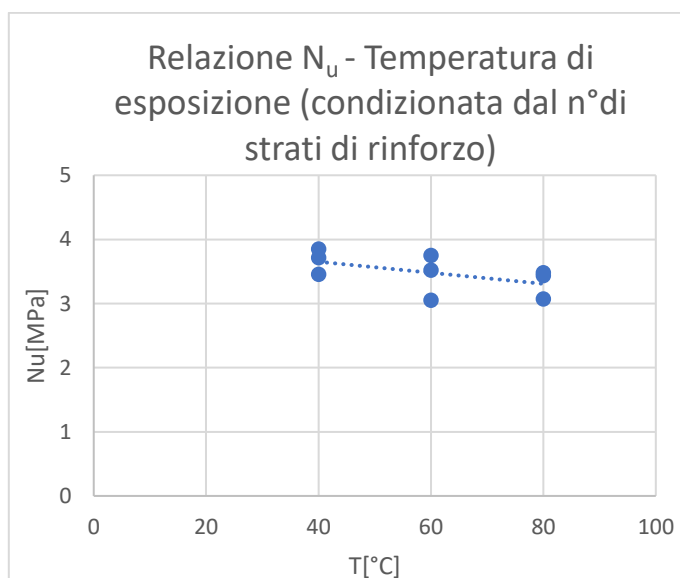


Figura 39_ Dati ed elaborazioni articolo 1

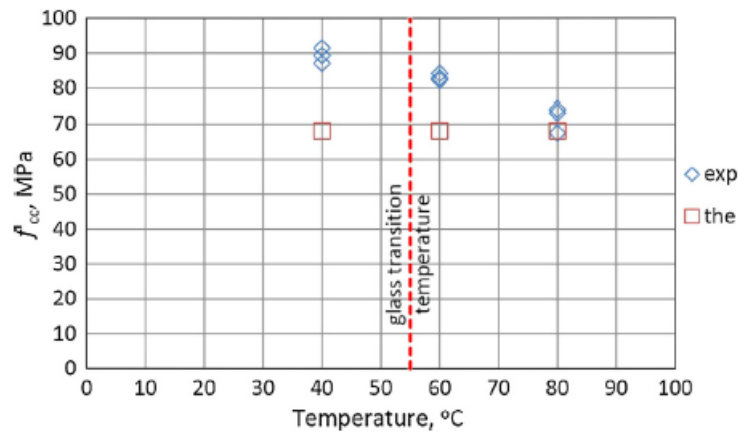


Figura 40_ Resistenza a compressione empirica e analitica f_{cc} rispetto alla temperatura $T_g=55^\circ$ -
Elaborazione presente nell'articolo in oggetto

Nel secondo articolo oggetto di confronto “*Stress strain model for FRCM confined concrete elements*” è stata presentata una proposta di modello sforzo-deformazione per elementi confinati con FRCM. I campioni oggetto di studio in questo caso risultavano cilindrici, e la differenza rispetto alla campagna di prova oggetto di tesi, e quella proposta nel precedente articolo, risiede nel fatto che tali provini non sono stati esposti ad alcun range di temperatura ed inoltre, la fibra applicata risultava essere secca. Si andava ad indagare in questo caso l’influenza del rafforzamento del composito, sollecitazione ultima e deformazione critica. (Figura 41)

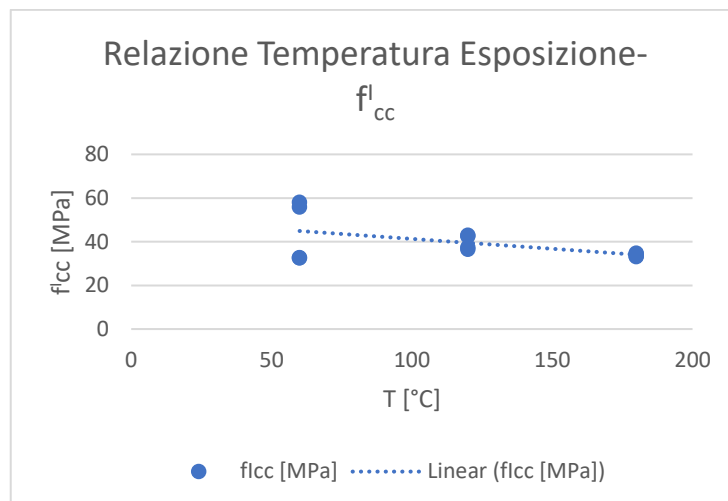
Stress Strain Model for FRCM confined concrete elements	Tomasz Trapko	Parametri Tecnici fibre PBO-FRCM	
		Resistenza alla trazione [MPa]	5800
		Modulo di elasticità [Gpa]	270
		Allungamento a rottura [%]	2,15
		Densità delle fibre [g/cm ³]	1,56
		Spessore di progetto del tessuto [mm]	0,0455

Programma di ricerca campioni				
Elementi non esposti alla temperatura		Elementi esposti a temperatura		
Denominazione campione	n° strati	Denominazione campione	n° strati	T esposizione [°C]
20C_1	0	60C_1	0	60
20C_2	0	60C_2	0	60
20M1_1	1	120C_1	0	120
20M1_2	1	120C_2	0	120
20M2_1	2	60M1_1	1	60
20M2_2	2	60M1_2	1	60
20M3_1	3	120M1_1	1	120
20M3_2	3	120M1_2	1	120
		180C_1	0	180
		180C_2	0	180
		180M1_1	1	180
		180M1_2	1	180

Sollecitazioni empiriche e analitiche campioni confinati				
Campione	Valori empirici		Valori analitici	
	f_{cc}^l [MPa]	f_{cc}^l/f_{c0}	f_{cc}^l [MPa]	f_{cc}^l/f_{c0}
20M1_1	32,48	1,44	33,22	1,47
20M1_2	32,66	1,44	33,22	1,47
20M2_1	42,48	1,88	43,83	1,94
20M2_2	42,96	1,9	43,83	1,94
20M3_1	58,07	2,57	54,44	2,41
20M3_2	55,8	2,47	54,44	2,41
60M1_1	37,32	1,65	33,22	1,47
60M1_2	36,45	1,61	33,22	1,47
120M1_1	33,36	1,18	33,22	1,47
120M1_2	33,13	1,47	33,22	1,47
180M1_1	34,71	1,54	33,22	1,47
180M1_2	34,34	1,52	33,22	1,47

Deformazione empirica e analitica campioni confinati				
Campione	Valori empirici		Valori analitici	
	ϵ_{cc} [%]	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{c0}$	ϵ_{cc} [%]	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{c0}$
20M1_1	-6,184	2,51	-7,31	2,97
20M1_2	-6,983	2,84	-7,31	2,97
20M2_1	-12,119	4,92	-12,16	4,94
20M2_2	-11,369	4,62	-12,16	4,94
20M3_1	-18,108	7,36	-17,01	6,91
20M3_2	-17,048	6,93	-17,01	6,91
60M1_1	-3,573	1,55	-3,48	1,51
60M1_2	-3,593	1,56	-3,48	1,51
120M1_1	-3,537	1,6	-3,49	1,52
120M1_2	-3,473	1,57	-3,49	1,52
180M1_1	-3,575	1,39	-3,65	1,58
180M1_2	-3,518	1,37	-3,65	1,58

T esposizione [°C]	f'_{cc} [MPa]
60	32,48
60	32,66
120	42,48
120	42,96
60	58,07
60	55,8
120	37,32
120	36,45
180	33,36
180	33,13
180	34,71
180	34,34



T esposizione [°C]	ϵ_{cc} [%]
60	-6,184
60	-6,983
120	-12,119
120	-11,369
60	-18,108
60	-17,048
120	-3,573
120	-3,593
180	-3,537
180	-3,473
180	-3,575
180	-3,518

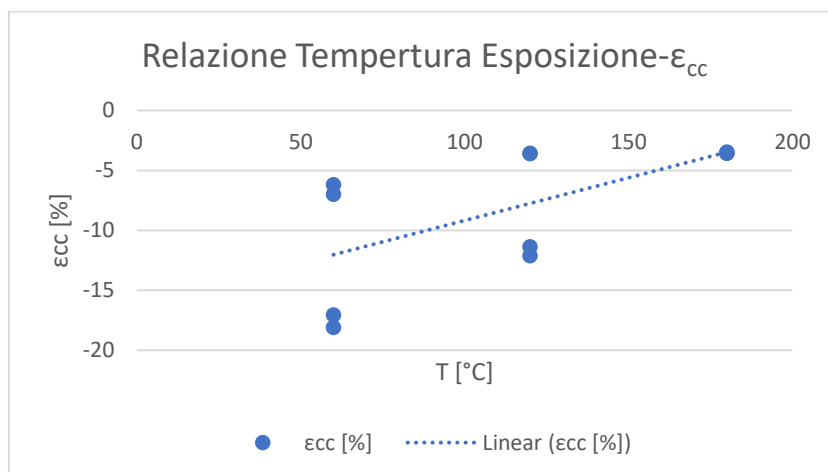


Figura 41_Dati ed elaborazioni Articolo 2

Infine, nell'ultimo articolo oggetto di confronto, è stata condotta una ricerca per valutare l'efficacia del confinamento con FRCM e il relativo comportamento degli elementi. Tale campagna è stata suddivisa in più fasi, ognuna delle quali corrispondente ad una tipologia differente di provino oggetto di studio; ognuno dei quali, differiva dagli altri per il numero di strati di rinforzo e, al contrario, ciò che accomuna, è l'esposizione dei campioni a temperature elevate. Tale ricerca, aveva come obiettivo fondamentale, quello di testare la capacità del carico limite. (Figura 42)

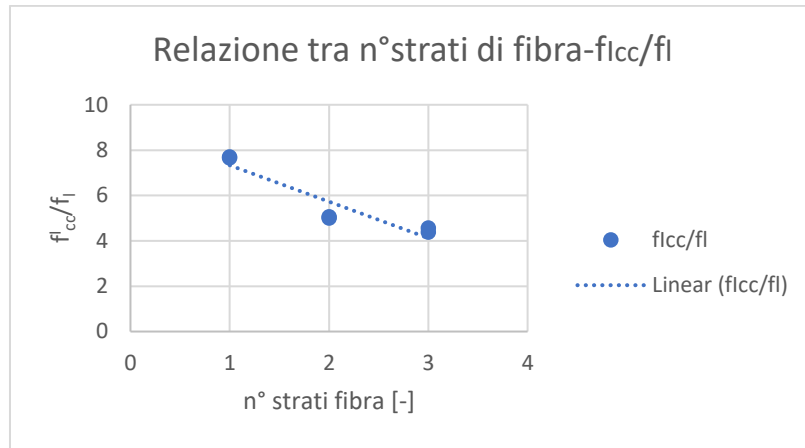
Fiber Reinforced Cementitious matrix confined concrete elements	Tomasz Trapko	Parametri Tecnici Fibre FRCM		Parametri Tecnici della maglia	
		Resistenza alla trazione [MPa]	5800	Modulo di elasticità [KN/mm ²]	–
		Modulo di elasticità [Gpa]	270	Carico Ultimo [KN/m]	264
		Allungamento a rottura [%]	2,15	Resistenza alla trazione [MPa]	5800
		Densità delle fibre [g/cm ³]	1,56	Larghezza del tessuto [mm]	1000
		Spessore di progetto del tessuto[mm]	0,0455		

Programma di ricerca campioni				
Elementi non esposti alla temperatura		Elementi esposti a temperatura		
Denominazione campione	n° strati	Denominazione campione	n° strati	T esposizione [°C]
20C_1	0	60C_1	0	60
20C_2	0	60C_2	0	60
20M1_1	1	120C_1	0	120
20M1_2	1	120C_2	0	120
20M2_1	2	60M1_1	1	60
20M2_2	2	60M1_2	1	60
20M3_1	3	120M1_1	1	120
20M3_2	3	120M1_2	1	120
		180C_1	0	180
		180C_2	0	180
		180M1_1	1	180
		180M1_2	1	180

Risultati dei Test di fallimento				
Campione	N_u [KN]	f'_{cc} [MPa]	$\epsilon_{v,lim}$ [%]	$\epsilon_{h,lim}$ [%]
20M1_1	325,69	32,48	-6,184	7,3‰
20M1_2	327,55	32,66	-6,983	7,3‰
20M2_1	426,01	42,48	-12,118	7,3‰
20M2_2	430,83	42,96	-11,369	7,3‰
20M3_1	582,4	58,07	-18,107	7,3‰
20M3_2	559,65	55,8	-17,048	7,3‰
60M1_1	374,29	37,32	-3,573	7,3‰
60M1_2	365,28	36,45	-3,593	7,3‰
120M1_1	334,52	33,36	-3,537	7,3‰
120M1_2	332,27	3,13	-3,473	7,3‰
180M1_1	348,13	34,71	-3,575	7,3‰
180M1_2	344,36	34,34	-3,518	7,3‰

f'_{cc}/f_i Relazione relativa allo spessore equivalente delle fibre				
Campione	f'_{cc} [MPa]	f_i [MPa]	t [mm]	f'_{cc}/f_i
20M1_1	32,48	4,24	0,0455	7,66
20M1_2	32,66		0,0455	7,70
20M2_1	42,42	8,49	0,091	5,00
20M2_2	42,96		0,091	5,06
20M3_1	58,07	12,73	0,1365	4,56
20M3_2	55,8		0,1365	4,38

n° strati fibra	f'_{cc}/f_i
1	7,66
1	7,7
2	5,00
2	5,06
3	4,56
3	4,38



Relazione tra stress critico σ_k e stress ultimo σ_u					Deformazione critica ϵ_k e sollecitazione σ_k		
Campione	ϵ_k [%]	σ_k [MPa]	σ_u [MPa]	σ_k / σ_u	Campione	ϵ_k [%]	σ_k [MPa]
20M1_1	-3,468	31,72	32,48	0,97	60M1_1	-3,573	37,32
20M1_2	-3,554	32,08	32,66	0,98	60M1_2	-3,593	36,45
20M2_1	-3,517	35,89	42,48	0,84	120M1_1	-3,537	33,36
20M2_2	-3,566	34,89	42,96	0,81	120M1_2	-3,473	33,13
20M3_1	-3,562	34,19	58,07	0,59	180M1_1	-3,575	34,71
20M3_2	-3,555	37,57	55,8	0,67	180M1_2	-3,518	34,34

n° strati fibra	σ_k / σ_u
1	0,97
1	0,98
2	0,84
2	0,81
3	0,59
3	0,67

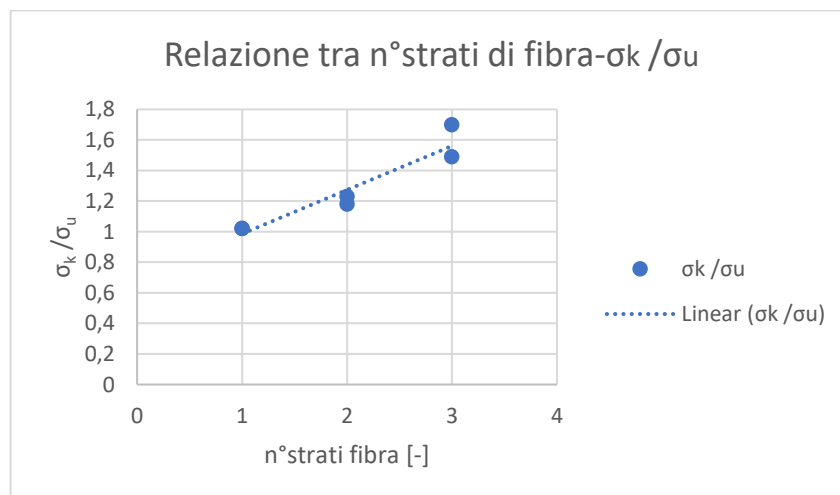


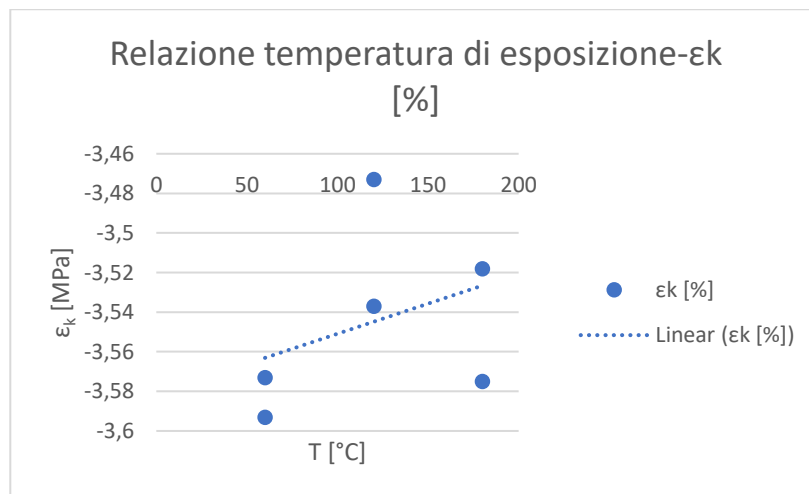
Figura 42_Dati ed elaborazioni articolo 3- Parte I

E' possibile notare da queste prime elaborazioni riportate come, l'aumento del numero di strati di fibra, causi due andamenti differenti, in funzione del parametro con il quale questo viene posto in relazione; in particolar modo:

- L'aumento del numero di strati di fibra utilizzati per il rinforzo provoca una diminuzione del rapporto f_{cc}^d/f_i ;
- L'aumento del numero di strati di fibra utilizzati per il rinforzo provoca un aumento del rapporto σ_k/σ_u .

In aggiunta a ciò, sono state effettuate delle elaborazioni riguardanti l'influenza dell'esposizione alla temperatura che riportiamo di seguito.

T esposizione	ϵ_k [%]
60	-3,573
60	-3,593
120	-3,537
120	-3,473
180	-3,575
180	-3,518



T esposizione	σ_k [MPa]
60	37,32
60	36,45
120	33,36
120	33,13
180	34,71
180	34,34

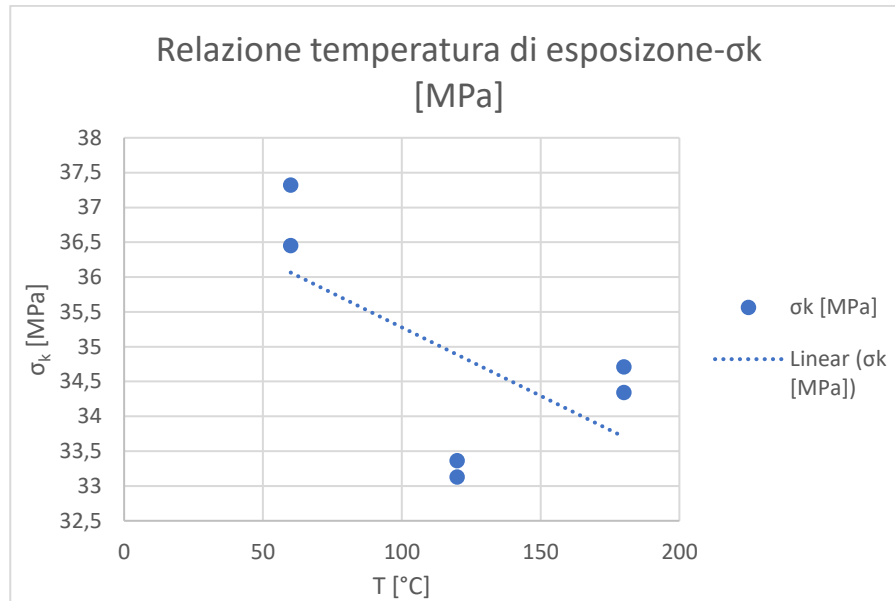


Figura 43_Dati ed elaborazioni articolo 3- Parte II

5.1.2 Risultati derivanti da studi numerici precedenti

Oltre agli studi sopra riportati, i quali andavano ad indagare il comportamento del rinforzo FRCM quando condizionato termicamente e in relazione al numero di strati di rinforzo dal punto di vista sperimentale; oggetto del nostro confronto sono state anche due analisi di tipo numerico.

Nel primo articolo "*Fabric reinforced cementitious matrix behavior at high temperature- experimental and numerical results*" di J.Donnini-F.DeCaso-V.Corinaldesi, è stato sviluppato un modello numerico che utilizza un approccio variazionale della frattura, basato sulla minimizzazione incrementale dell'energia. Ha come scopo quello di simulare il comportamento del rinforzo FRCM in prove di taglio doppio condizionato a diverse temperature di esposizione.

Si riportano nelle tabelle sottostanti dapprima, le caratteristiche meccaniche dei materiali utilizzati per tale campagna di prova; in seguito, i parametri indagati e i risultati dell'indagine :

Fabric reinforced cementitious matrix behavior at high temperature: Experimental and numerical results	Jacopo Donnini	Tessuto in carbonio secco, bidirezionale, bilanciato		Sistema epossidico a due componenti	
	Francisco De Caso y Basalo Valeria Corinaldesi Giovanni Lancioni Antonio Nanni	Area Resistente [mm/mm]	0,052	Resistenza alla trazione [MPa]	0,8
		Peso del tessuto [g/m]	180	Densità [g/m]	1,12
		Resistenza alla trazione della fibra [MPa]	4900	Temperatura Massima di funzionamento raccomandata [°C]	50
		Modulo elastico della fibra [GPa]	240		
		Allungamento a rottura della fibra [%]	2	Ceppo alla rottura [%]	70
		Resistenza alla trazione del filato [MPa]	1850	Picco esotermico [°C]	58-68
		Modulo elastico del filato E_f [Gpa]	150	Viscosità della resina a 25°C [MPa]	6000
		Rapporto di Poisson del filato η	0,3	Viscosità dell'indurente a 25°C [MPa]	1350

Matrice del Test di Trazione e risultati del Test									
Tessuto di carbonio DRY									
T [°C]	t [min]	n° campioni		E_2 [Gpa]	% E_2 rispetto a T= 20°C	σ_u [MPa]	% σ_u rispetto a T=20°C	ϵ_2 [%]	Failure Mode
T= 20°C	100	3	Average	–	–	986	–	0,01	Slippage
			CoV [%]	–	–	9	–	30	
T= 80°C	100	3	Average	–	–	955	-3	0,012	Slippage
			CoV [%]	–	–	11	–	18	
T= 120°C	100	3	Average	–	–	874	-11	0,008	Slippage
			CoV [%]	–	–	12	–	12	

Tessuto di carbonio HS									
T [°C]	t [min]	n° campioni		E ₂ [Gpa]	% E ₂ rispetto a T= 20°C	σ _u [MPa]	% σ _u rispetto a T=20°C	ε ₂ [%]	Failure Mode
T= 20°C	100	3	Average	49	–	1366	–	0,026	Fabric Failure/ Slippage
			CoV [%]	25		18		22	
T= 80°C	100	3	Average	36	-27	411	-70	0,012	Slippage
			CoV [%]	14		6		10	
T= 120°C	100	3	Average	35	-29	407	-70	0,004	Slippage
			CoV [%]	17		10		22	

Figura 44_ Dati Articolo 4

Al fine dell'indagine avente, tra gli altri, lo scopo di ottenere un modello numerico che utilizzi un approccio variazionale della frattura, sulla base dello schema geometrico⁴ di seguito riportato, è stato possibile determinare l'energia totale del sistema:

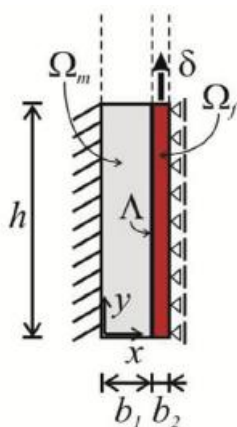


Figura 45_ Schema geometrico di riferimento per lo studio dell'energia

Si considera un sistema di coordinate cartesiane (O;x,y), vengono definiti i seguenti parametri:

- Energia del filato (1);
- Energia della matrice (2)

⁴ "Jacopo Donnini, Francisco De Caso y Basalo, Valeria Corinaldesi, Giovanni Lancioni, Antonio Nanni- Fabric reinforced cementitious matrix behavior at high temperature: Experimental and numerical results"

$$1. E_f(u) = \int_{\Omega_f} (\mu_f(\nabla u)^2 + \frac{\lambda_f}{2}(\operatorname{div}u)^2)dx$$

$$2. E_m(u, \alpha) = \int_{\Omega_f} (W_s^-(u) + (1 - \alpha)^2(W_s^+(u) + W_D(u)))dx + \int_{\Omega_f} d(\alpha + \frac{l_m^2}{2}(\nabla \alpha)^2)dx$$

Alcune considerazioni riguardo i termini presenti nelle equazioni sopra riportate:

- μ_f e λ_f presenti nella prima equazione vengono definiti coefficienti di Lamé, i quali risultano correlati al modulo di Young e al coefficiente di Poisson;
- l'equazione n°2, relativa all'energia della matrice, dipende dallo spostamento u ;
- si nota come, l'equazione n°2, oltre a dipendere dallo spostamento u , dipende anche dal parametro α . In particolar modo, quando $\alpha=0$ il materiale è completamente intatto; al contrario quando $\alpha=1$, il materiale è completamente fratturato;
- W_s^+ e W_s^- sono le parti sferiche dell'energia valutate nei punti $\operatorname{div}u>0$ e $\operatorname{div}u<0$; W_D invece, risulta essere l'energia deviatorica;
- Il secondo integrale presente all'interno dell'equazione n°2, rappresenta l'energia di danno, ed è la somma di un termine lineare locale e di un termine di gradiente quadratico non locale.

Oltre, le precedenti, è presente anche un terzo termine che contribuisce a determinare l'energia totale, e viene definito Energia di Interfaccia:

$$3. E_s(\delta, \alpha) = \int_0^h (1 - \alpha)^2 \frac{1}{2} K \delta * \delta dy + \int_0^h \alpha \left(\frac{1}{q} ((1 - \alpha)^{-q} - 1) + \frac{1}{2} l_s^2 (\nabla \alpha)^2 \right) dy$$

L'energia totale del sistema è dunque pari a: $E_f + E_m + E_s$.

In aggiunta a tale sperimentazione numerica, è stata effettuata la cosiddetta *Analisi SEM*. In particolar modo, l'interfaccia tra il filo di carbonio rivestito e la malta

circostante è stata osservata al SEM⁵ (ad una magnificazione che va da 30X a 50X) nei campioni condizionati a temperatura ambiente e in seguito all'esposizione alla temperatura di 120°C.

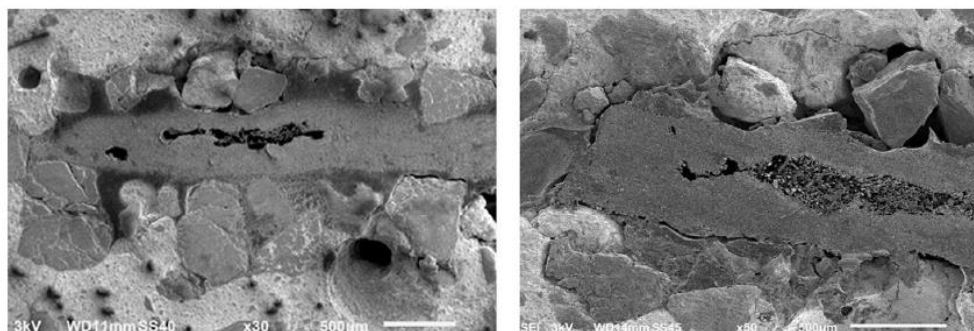


Figura 46

È visibile il distacco del filato dalla matrice dopo la prova di trazione con il conseguente scivolamento del tessuto all'interno della malta. Il filato rivestito è libero di scivolare all'interno della malta dopo che la resina ha superato la T_g , mentre i grani di sabbia utilizzati per migliorare il legame di interfaccia rimangono attaccati alla matrice cementizia.

Un'ultima indagine riportata in questo lavoro, oggetto di attenzione è quella presente in "*Structural strengthening of concrete with Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) at ambient and elevated temperature*" di J.Michels-D. Zwiky-J.Scherer-Y.E.Harmanci-M.Motavalli. Trattasi di un'indagine numerica differente rispetto alle precedenti in quanto va ad indagare il rinforzo FRCM condizionato dalle alte temperature applicato in elementi bidimensionali, quali delle lastre. Nonostante abbia obiettivi differenti rispetto alla campagna di indagine oggetto di tale elaborato, risulta utile al fine di comprendere il legame che sussiste tra la rete utilizzata per il rinforzo e il calcestruzzo.

Si riportano di seguito le proprietà meccaniche e geometriche dei materiali utilizzati, oltre che i risultati ottenuti nel corso dell'indagine:

⁵ "Jacopo Donnini, Francisco De Caso y Basalo, Valeria Corinaldesi, Giovanni Lancioni, Antonio Nanni- Fabric reinforced cementitious matrix behavior at high temperature: Experimental and numerical results"

ARTICOLO	AUTORI	Proprietà delle maglie composite		
			Tipo 1	Tipo 2
Structural Strengthening of	Julien Michels	Prodotto	ARMO- Mesh L200	Rete ARMO L500
Concrete with Fiber Reinforced	Daia Zwiky	Configurazione	1 1600 tex/filo- 50 fili/m	2 1600 tex/filo- 58,5 fili/m
Cementitious Matrix (FRCM) at	Josef Scherer	Modulo Elastico E_{mesh} [Gpa]	240	240
Ambient end Elevated	Yunus Emre Harmanci	Modulo Elastico di Progetto $E_{d,mesh}$ [Gpa]	160	160
Temperature	Masoud Motavalli	Resistenza alla trazione delle fibre $C_{fu,c}$ [MPa]	4300	4300
		Deformazione alla rottura $[u,c\%]$	1,75	1,75
		Peso d'area delle fibre nella direzione principale $[g/m^2]$	80	187
		Densità $[g/cm^3]$	1,79	1,79
		Sezione teorica A_{mesh} (direzione principale del cuscinetto) $[mm^2]$	44	105
		Forza alla rottura in trazione F_u [KN/m]	185	450

Proprietà geometriche dei campioni di lastra							
Test	Larghezza della lastra b [mm]	Altezza (iniziale) della lastra h [mm]	Profondità effettiva acciaio d_s [mm]	Rete		Calcestruzzo	
				n° strati	tipologia	n° strati	spessore [mm]
D0	850	220	181	2	–	–	–
D1	850	220	181	2	1	2	15
D2	850	220	181	2	2	3	20

Risultati selezionati per le prove su lastre							
Test	F_{cr} [KN]	c_r [mm]	F_y [KN]	y [mm]	F_u [KN]	u [mm]	F_{res} [KN]
D0	4,6	1,8	38,7	61	47,2	176,5	47,2
D1	6,1	1,2	42,1	62	63,8	141,7	52,4
D2	6,6	1,4	44,4	58	80	132,7	56,2

Figura 47_ Dati acquisiti articolo 5

In aggiunta a ciò, attraverso un modello numerico sono stati studiati due casi differenti inerenti la tipologia di legame che si possono verificare all'interfaccia tra le componenti del sistema, in particolar modo:

- a) Legame rigido tra i filamenti di carbonio e il calcestruzzo proiettato;
- b) Nessun legame tra i due componenti

Per ognuna delle categorie sopra riportate, a seguito delle prove effettuate, è stata ottenuta la curva forza-deformazione⁶ di seguito riportata:

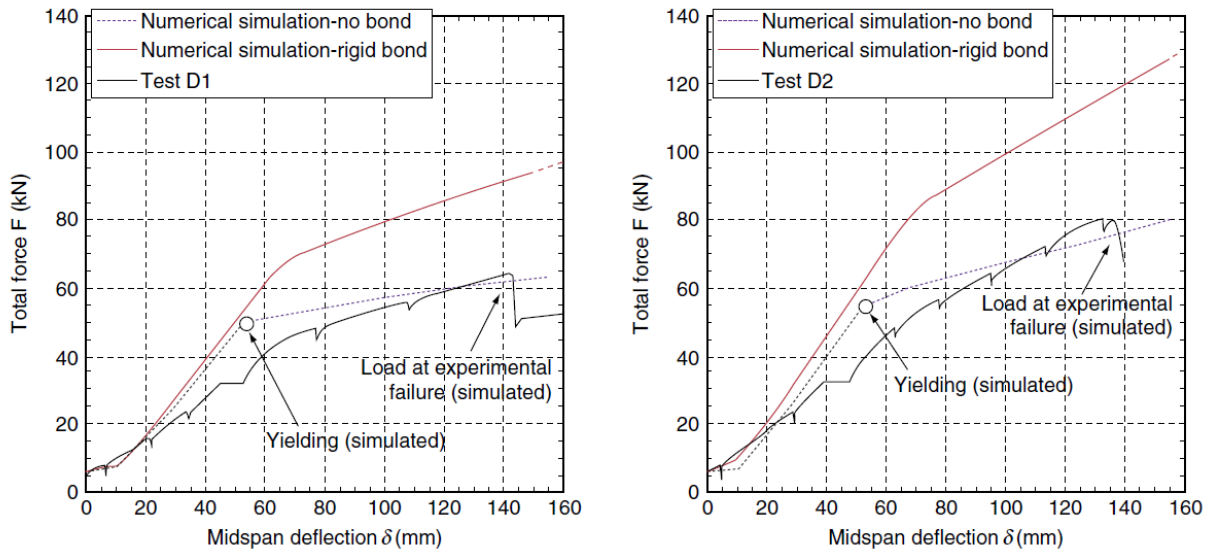


Figura 48_Simulazioni numeriche delle due tipologie di lastre esaminate

Dalle prove effettuate e dalle curve ottenute, è possibile dimostrare che è necessaria una certa quantità di stiramento affinché la rete composita sviluppi la sua piena rigidità e quindi contribuisca alla capacità di carico. In seguito, la maglia nel calcestruzzo proiettato perde gradualmente il suo legame e quindi, lo strato di rinforzo FRCM subisce una degradazione della rigidità prima di fallire definitivamente con l'ancoraggio delle maglie. Per quanto riguarda invece il caso in cui non sussiste legame tra le due componenti, è possibile notare come la rigidità del materiale è attivata fin dall'inizio e non diminuisce durante l'intera procedura di carico, poiché la maglia è modellata con un ancoraggio finale costantemente fisso.

⁶ "Julien Michels, Daia Zwicky, Josef Scherer, Yunus Emre Harmanci e Masoud Motavalli- Structural Strengthening of Concrete with Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) at Ambient and Elevated Temperature- Recent Investigations in Switzerland"

E' possibile concludere tale trattazione affermando che, ognuno degli articoli riportati, oltre ad essere oggetto di confronto con la campagna sperimentale proposta in questo elaborato, è stato anche oggetto di studio e ulteriore approfondimento al fine di avere una conoscenza più ampia e multidisciplinare riguardo questa tecnologia di rinforzo strutturale.

5.2 SUGGERIMENTI AL FINE DI GARANTIRE RISULTATI DIFFERENTI O MIGLIORARE LA RICERCA

Al fine di migliorare la ricerca in questo campo, data la sua rapida espansione soprattutto negli ultimi anni, si potrebbe pensare di mettere a punto una campagna di prove, comune ai diversi ricercatori, in cui, dopo aver messo in evidenza i punti salienti delle precedenti campagne effettuate da colleghi, si adotti una linea comune circa le caratteristiche da indagare e i materiali da utilizzare.

Nel paragrafo precedente, attraverso il metodo tabellare, si è cercato di riassumere quelli che sono stati i tratti principali di ciascun lavoro, ponendo particolare attenzione a mettere in risalto quelle caratteristiche comuni anche al progetto di tesi.

Certo è che, data l'evoluzione di questi materiali, e l'introduzione delle linee guida per il loro utilizzo, al fine di effettuare una caratterizzazione quanto più scrupolosa possibile e che fornisca dei risultati tali da poter effettuare confronti futuri, si potrebbe pensare all'introduzione di linee guida che specificano ad esempio i tempi di esposizione all'interno di camere climatiche; o ancora, dei range specifici di temperatura a cui sottoporre i campioni, o anche dei parametri particolarmente importanti da determinare a seguito delle prove, che consentano di avere una caratterizzazione migliore e che, miri, soprattutto, ad una diffusione sempre più avanzata di tale tecnologia, anche in quegli ambienti apparentemente ostili.

6. CONCLUSIONI

In questa sperimentazione si è cercato di indagare il comportamento dei compositi fibrorinforzati, in particolar modo di materiali compositi fibrorinforzati a matrice cementizia (FRCM- Fiber Reinforced Cementitious Matrix) quando sottoposti a diversi range di alte temperature.

In seguito al breve approccio teorico per comprendere la natura della ricerca si è affrontato l'aspetto sperimentale decisamente più rilevante in termini di dati acquisiti e di nozioni apprese. Sono state dunque condotte delle prove di compressione ciclica e di trazione diretta, su due diversi tipi di campioni rinforzati attraverso FRCM, uno composto da un rete in fibre di carbonio secca e malta come matrice, mentre l'altro utilizzava una rete di carbonio impregnata in resina e sempre malta come matrice. Per entrambe le campagne di prova sono stati adottati gli stessi range di temperatura di esposizione, con la differenza che, nel caso dei provini rinforzati attraverso fibre di carbonio impregnate in resina, l'esposizione è stata effettuata anche alla temperatura di 80°.

Attraverso questa indagine si è riusciti a raccogliere dei dati circa il meccanismo di rottura dei diversi campioni. Di seguito si cercherà di riassumere i dati ricavati.

Le prove di compressione ciclica effettuate sui provini rinforzati con rete in carbonio secca, hanno dato delle risposte in termini sforzo-deformazione differenti rispetto a quelle ottenute dalle prove effettuate sui provini rinforzati con rete impregnata con resina. In particolar modo, le differenze principali sono state riscontrate nel numero di cicli effettuati prima di arrivare a rottura, nel primo caso e, per tutti i range di temperatura, inferiori rispetto al secondo caso; proprio da ciò deriva anche la differenza di durata delle prove, nel primo caso inferiore.

Un'altra differenza riscontrata, risiede nella resistenza massima raggiunta dai campioni; infatti, quelli appartenenti alla seconda campagna di prova, hanno raggiunto dei valori di resistenza molto più alti.

In quasi tutti i campioni però, è stato possibile constatare come la perdita totale di resistenza sia avvenuta nel momento in cui, a seguito della fessurazione avvenuta nei cicli precedenti, è avvenuta la rottura del rinforzo. Si è trattato, nella maggior parte dei

casi di fessure verticali che, a seguito del raggiungimento del picco, si sono aperte provocando un forte rumore, a causa del contemporaneo distacco del rinforzo dal campione e, apertura totale della fessura.

Quanto appena detto, vuole evidenziare che, nel corso di questa prova, il sistema di rinforzo è rimasto compatto in tutti i suoi strati e, non sono avvenuti dei distacchi tra le interfacce dei materiali costituenti il sistema.

L'analisi condotta, riguardo il deterioramento della sollecitazione dovuta all'effetto del carico, ha messo in evidenza come i risultati di entrambe le campagne, hanno riportato dei piccoli valori di deformazione a seguito dello scarico e comunque, i valori di β ottenuti, non hanno mai superato il range massimo di appartenenza del valore compreso tra 0,80 e 0,98.

Nelle prove di trazione diretta condotte sulle due campagne di coupon, si è potuto notare come il meccanismo di collasso sia stato analogo in tutti i casi.

Le informazioni fornite da tali prove non sono risultate particolarmente importanti, in quanto, non si è potuta identificare una sostanziale differenza nel raggiungimento del picco prima e nella rottura poi, poiché la resistenza è stata relativamente bassa. Come è stato possibile notare, in tutti i campioni, la fessurazione, così come la successiva rottura, è avvenuta nella parte centrale, quella non interessata dalle placche in acciaio e dalla resina. Si è assistito dunque, ad una rottura totale del campione con il distacco di ogni singolo strato componente il sistema di rinforzo.

In seguito, sono stati riportati degli studi, circa delle sperimentazioni effettuate in passato sullo stesso argomento, al fine di poter effettuare un confronto e delle successive proposte per lavori futuri.

Relativamente alla sperimentazione mostrata in questo elaborato, si può affermare che, soprattutto per quanto riguarda le prove di compressione ciclica effettuate sui campioni cilindrici, di notevole efficacia si è dimostrato il rinforzo con FRCCM utilizzando la rete impregnata in resina. Questo perché, oltre a consentire un controllo migliore nel corso

della prova, ha fornito valori migliori rispetto a quelli ottenuti utilizzando della rete in carbonio secca, nonostante, ci si aspettasse il contrario.

6.1 LAVORI FUTURI

La tecnologia dei compositi FRCM appare un'ottima forma di completamento a quello che è il panorama dei rinforzi fibrorinforzati, in quanto va a colmare alcuni difetti presenti all'interno dei sistemi FRP (materiali fibrorinforzati a matrice polimerica). Tali materiali compositi, danno la possibilità di essere impiegati in tutti quei casi in cui si dimostri di fondamentale importanza la compatibilità in termini termometrici e fisico chimici tra il composito e il substrato in calcestruzzo e in cui sia fondamentale la resistenza alle alte temperature. Le poche informazioni reperibili in letteratura e, delle linee guida poco approfondite, relative soprattutto all'impiego di questi materiali in ambienti sottoposti alla presenza di alte temperature, penalizza in parte l'utilizzo di questa tecnologia e ne limita l'utilizzo anche in campo professionale. Lo studio appena presentato, si propone di migliorare la comprensione del processo per l'utilizzo di tali compositi in questi ambienti ostili; oltre a voler dare un incipit per approfondimenti futuri in questo ambito, tenendo presenti magari le linee guida seguite in questo progetto.

Ad ogni modo le conclusioni dedotte sono attribuibili unicamente a questa campagna sperimentale e, pertanto, non estendibili per via generale a lavori futuri inerenti i rinforzi FRCM quando sottoposti all'esposizione ad alte temperature.

E' quindi auspicabile un proseguimento nel campo della sperimentazione atto a creare un quadro completo circa le caratteristiche meccaniche e la risposta di tali tecnologie, soprattutto quando utilizzate in nuovi campi.

BIBLIOGRAFIA

- Redazione INGENIO #SICURO, Il testo delle istruzioni per la progettazione di interventi di consolidamento con FRCM del CNR, 07.03.2019, <https://www.ingenio-web.it/articoli/il-testo-delle-istruzioni-per-la-progettazione-di-interventi-di-consolidamento-con-frcm-del-cnr/>;
- Norma Tecnica, Roma 06.02.2019, CNR-DT 215/2018, Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati a Matrice Inorganica;
- Istituto per le Tecnologie della costruzione, Materiali nuovi o tradizionali , utilizzati in modo innovativo e nuove soluzioni tecnologiche, <https://www.itc.cnr.it/sede-e-unita-operative/sede-di-san-giuliano-milanese/servizi-di-alta-qualificazione/laboratori/lab-tecnologie-edilizie/>;
- Scheda Tecnica GeP Intech, 2020, Rete in Carbonio C-NET-170BL, <https://www.gpintech.com/wp-content/uploads/2020/11/Rete-in-carbonio-C-NET-170BL-Sch.-Tec.-FS06-170BL.pdf>;
- Scheda Tecnica GeP Intech, 2020, Rete in Carbonio C-NET-220BL, <https://www.gpintech.com/wp-content/uploads/2021/05/Rete-in-carbonio-C-NET-220-BL-Sch.-Tec.-FS06-220BL.pdf>;
- Scheda Tecnica GeP Intech, 2018, Adesivo epox collante RESIN 70-75, <https://www.gpintech.com/wp-content/uploads/2018/07/Adesivo-epox.-collante-RESIN-70-75-Sch.-Tec.-FS11.pdf>;
- Scheda Tecnica GeP Intech, 2019, Malta Tixotropica rapida RAPID CRETE, <https://www.gpintech.com/wp-content/uploads/2019/03/Malta-tixo.-rapida-RAPID-CRETE-Sch.-Tec.-FS34.pdf>;
- Scheda Tecnica GeP Intech, 2021, Malta Bicomponente CONCRETE ROCK V2, <https://www.gpintech.com/wp-content/uploads/2021/07/Malta-bicomp.-CONCRETE-ROCK-V2-Sch.-Tec.-FS32.pdf>;
- Norma, 20 Dicembre 2019, UNI EN 1015-11:2019, Metodi di prova per malte per opere murarie. Parte 11: determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita;
- Tomasz Trapko, The effect of high temperature on the performance of CFRP and FRCM confined concrete elements, 2013, Institute of Building Engineering

Wroclaw University of Technology, 11 Grunwaldzki Sq. 50-377 Wroclaw, Poland;

- Tomasz Trapko, Stress Strain Model for FRCM confined concrete elements, 2012, Institute of Building Engineering Wroclaw University of Technology, 11 Grunwaldzki Sq. 50-377 Wroclaw, Poland;
- Tomasz Trapko, Fiber Reinforced Cementitious Matrix confined concrete elements, 2012, Institute of Building Engineering Wroclaw University of Technology, 11 Grunwaldzki Sq. 50-377 Wroclaw, Poland ;
- Jacopo Donnini, Francisco De Caso y Basalo, Valeria Corinaldesi, Giovanni Lancioni, Antonio Nanni, Fabric reinforced cementitious matrix behavior at high temperature: Experimental and numerical results, 2016, Università Politecnica delle Marche- Engineering Faculty- Ancona- Italy, University of Miami- Dept. of Civil. Arch. Environ. Engineering- Miami- USA;
- Julien Michels, Daia Zwiky, Josef Scherer, Yonus EMre Harmanci, Masoud Motavalli, Structural strengthening of concrete with Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) at ambient and elevated temperature, 2014, Structural Engineering Research Laboratory, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology (Empa), Dübendorf, Switzerland, Institute of Construction and Environmental Technology, College of Engineering and Architecture of Fribourg (CH), University of Applied Sciences of Western Switzerland, Delémont, Switzerland, S&P Clever Reinforcement AG, Seewen, Switzerland, Institute of Structural Engineering, Swiss Federal Institute of Technology (ETHZ), Zurich, Switzerland, School of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran;
- Flora Faleschini, Klajdi Toska, FRCM- Confined concrete: Monotonic vs. Cycling axial loading, 2021, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Padua, Via Marzolo 9, 35131 Padova, Italy- Dept. of Industrial Engineering, University of Padua, Via Gradenigo 6, 35131 Padova, Italy;
- Flora Faleschini, Mariano Angelo Zanini, Lorenzo Hofer, Carlo Pellegrino, Experimental behavior of reinforced concrete columns confined with carbon FRCM composites, 2020, Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Padua, Via Marzolo 9, 35131 Padova, Italy- Dept. of Industrial Engineering, University of Padua, Via Gradenigo 6, 35131 Padova, Italy;

- Luciano Ombres, Analysis of the bond between Fabric Reinforced Cementitious Mortar (FRCM) strengthening systems and concrete, 2014, Department of Civil Engineering, University of Calabria, 87036 Arcavacata di Rende, Cosenza, Italy.