



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE

Studi sul comportamento a lungo termine di sistemi FRCM.

**Analisi sperimentale di sistemi PBO-FRCM con substrato
in calcestruzzo soggetti a invecchiamento accelerato.**

DOTTORANDA:

Mariachiara Petrolini

TOUTOR:

Raffaele Nudo

Marco Tanganelli

XXXVIII CICLO- 2022/2026

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE

Dottorato in Architettura, Progetto Conoscenza e Salvaguardia del Patrimonio Culturale.

Curricula Strutture e Restauro del Patrimonio Culturale

CEAR-07/A

Autrice: Mariachiara Petrolini

Indice

1	Introduzione.....	1
2	La Durabilità dei Sistemi di Rinforzo FRCM (Stato dell'Arte).....	2
2.1	Invecchiamento accelerato.....	2
2.1.1	Tipologie di invecchiamento e normative.....	3
2.1.2	Alte temperature.....	8
2.1.3	Ambiente alcalino.....	14
2.1.4	Ambiente salino.....	20
2.1.5	Cicli gelo-disgelo.....	29
3	Il problema degli interventi su edifici esistenti in cemento armato.....	34
3.1	Caso studio edificio “A” Sorgane.....	46
3.2	Compatibilità tra rinforzo strutturale e linguaggio architettonico negli edifici in cemento armato storici.....	49
4	Sperimentazione.....	51
4.1	Materiali impiegati nella sperimentazione.....	52
4.1.1	La miscela del calcestruzzo.....	52
4.1.2	La fibra.....	52
4.1.3	La matrice.....	53
4.2	Tipologie e confezionamento dei provini.....	54
4.2.1	Coupon.....	54
4.2.2	Suddivisione dei coupon per tipologie di invecchiamento.....	55
4.2.3	Cubetti.....	56
4.2.4	Suddivisione dei cubetti per tipologie di invecchiamento.....	60
4.3	Invecchiamento accelerato.....	61
4.3.1	Ambiente salino.....	62
4.3.2	Cicli caldo-umido.....	63
4.4	Test set-up.....	66
4.4.1	Test di trazione (clevis grip).....	66
4.4.2	Pull_off test.....	69
4.4.3	Test di compressione e determinazione del modulo elastico.....	70
5	Analisi e discussione dei risultati.....	75

5.1	Test di trazione (clevis grip).....	75
5.1.1	Risultati NT.....	75
5.2	Risultati Ambiente Salino.....	80
5.2.1	Risultati S1 ed S3.....	81
5.2.2	Risultati SolL1000 e SolL3000.....	89
5.2.3	Risultati SolS1000 e SolS3000.....	98
5.2.4	Confronto tra i risultati delle varie tipologie di invecchiamento (ambiente salino) 107	
5.3	Risultati cicli Caldo-Umido.....	111
5.3.1	Risultati CU.....	111
5.3.2	Risultati CU50.....	117
5.3.3	Risultati provini WDL.....	123
5.3.4	Risultati provini WDS.....	131
5.3.5	Confronto tra i risultati delle varie tipologie di invecchiamento (cicli caldo-umido)137	
5.4	Pull-off test.....	140
5.4.1	Risultati provini CFV.....	141
5.5	Risultati cicli Ambiente Salino.....	146
5.5.1	Risultati CS1-CFS1.....	146
5.5.2	Risultati CS3-CFS3.....	152
5.5.3	Confronto risultati CS1/CS3 e CFS1/CFS3.....	159
5.5.4	Risultati SolL1.....	160
5.5.5	Risultati SolL3.....	166
5.5.6	Confronto risultati SolL1 e SolL3.....	172
5.5.7	Risultati SolS1.....	174
5.5.8	Risultati SolS3.....	179
5.5.9	Confronto risultati SolS1 e SolS3.....	185
5.5.10	Confronto tra i risultati delle varie tipologie di invecchiamento (ambiente salino).....	187
5.6	Risultati cicli Caldo-Umido.....	189
5.6.1	Risultati T e T70.....	189
5.6.2	Risultati T50.....	200
5.6.3	Risultati TS1.....	209

5.6.4	Risultati TS2.....	218
5.6.5	Confronto tra i risultati delle varie tipologie di invecchiamento (cicli caldo umido)228	
5.7	Test di compressione e determinazione del modulo elastico.....	232
5.7.1	Risultati provini CFV.....	232
5.8	Risultati Ambiente Salino.....	234
5.8.1	Risultati provini CS1-CFS1-CS3-CFS3.....	234
5.8.2	Risultati provini SolL1000 e SolL3000.....	240
5.8.3	Risultati provini SolS1000 e SolS3000.....	245
5.8.4	Confronto tra i risultati delle varie tipologie di invecchiamento (ambiente salino) 249	
5.9	Risultati Cicli Caldo-Umido.....	252
5.9.1	Risultati provini T e T70.....	252
5.9.2	Risultati provini T50.....	257
5.9.3	Risultati provini TS1.....	262
5.9.4	Risultati provini TS2.....	267
5.9.5	Confronto tra i risultati delle varie tipologie di invecchiamento (cicli caldo umido)272	
6	Conclusioni.....	275
6.1	Coupon PBO_FRCM.....	275
6.2	Cubetti con PBO-FRCM.....	277
6.3	Carote ricavate dai provini.....	279
6.4	Risultati sperimentali e applicazioni su edifici esistenti - l'edificio "A" di Sorgane".....	280
6.5	Prospettive e sviluppi futuri della ricerca.....	281
7	Simboli.....	283
8	Indice figure.....	285
9	Indice tabelle.....	290
	Bibliografia.....	292

1 Introduzione

Negli ultimi decenni, i sistemi di rinforzo a matrice inorganica (FRCM – Fabric Reinforced Cementitious Matrix) hanno suscitato un crescente interesse nel campo del consolidamento strutturale, in particolare per il rinforzo e il miglioramento di strutture esistenti in calcestruzzo e muratura. Grazie alla combinazione di tessuti in fibra ad alte prestazioni e matrici a base cementizia o a calce, tali sistemi offrono vantaggi significativi rispetto ai tradizionali compositi a matrice polimerica (FRP), tra cui una migliore compatibilità con i substrati, una maggiore resistenza alle alte temperature e una migliore permeabilità al vapore. Tuttavia, nonostante la loro crescente diffusione e applicazione, molti aspetti legati al comportamento meccanico e, soprattutto, alla loro durabilità risultano ancora parzialmente esplorati. In particolare, l'interazione tra fibra, matrice e substrato e la sua evoluzione nel tempo in presenza di ambienti aggressivi rappresentano un tema di grande rilevanza scientifica e tecnica. In questo contesto, la presente tesi si propone di approfondire gli effetti di differenti condizioni di invecchiamento accelerato quali, immersione in soluzioni saline e cicli caldo-umido, sul comportamento meccanico di sistemi PBO-FRCM e su sistemi PBO-FRCM applicati su substrati in calcestruzzo. In particolare, per garantire una maggiore coerenza con le problematiche reali della conservazione dell'edilizia storicizzata in calcestruzzo armato, il supporto utilizzato nelle prove sperimentali è stato realizzato impiegando una miscela ispirata a quella originariamente utilizzata per la costruzione dell'Edificio "A" di Savioli, situato nel quartiere di Sorgane di Firenze. Tale scelta consente di collocare i risultati ottenuti in un contesto applicativo realistico, in cui le caratteristiche meccaniche e microstrutturali del substrato differiscono sensibilmente da quelle dei calcestruzzi moderni. Attraverso prove a trazione su coupon, test di pull-off su cubetti in calcestruzzo, con applicato il composito, e la caratterizzazione meccanica del calcestruzzo mediante prove su carote, il lavoro mira a comprendere il comportamento reale di tali sistemi di rinforzo, mettendo in evidenza come la durabilità del sistema sia governata prevalentemente dall'evoluzione delle proprietà interfacciali piuttosto che da un degrado diretto della fibra.

L'obiettivo finale è fornire un contributo alla comprensione dei meccanismi di degrado e alla valutazione dell'affidabilità a lungo termine di tali sistemi di rinforzo, con particolare attenzione al ruolo dell'interfaccia e alle implicazioni per la progettazione e la durabilità delle applicazioni reali.

2 La Durabilità dei Sistemi di Rinforzo FRCM (Stato dell'Arte)

I sistemi di rinforzo FRCM (Fiber-Reinforced Cementitious Matrix) hanno avuto una grande diffusione nel corso degli ultimi anni. Tra i vari acronimi utilizzati, oltre ad FRCM, troviamo: TRM (Textile-Reinforced Mortar), MBC (Mineral-Based Composite) e infine TRC (Textile-reinforced Concrete), l'acronimo FRCM risulta, però, quello più comunemente utilizzato. Viene usato come elemento di rinforzo sia su muratura che su cemento armato migliorando le prestazioni meccaniche dell'elemento su cui è applicato. Altri vantaggi derivati da questo tipo di rinforzi sono: la buona compatibilità chimico-fisica con i materiali a cui viene applicato; una discreta permeabilità al vapore e la facilità di applicazione. Questo sistema è composto da una matrice e da una rete di fibre. La matrice può essere sia a base cementizia, a volte fibrorinforzata, sia di calce idraulica che di geopolimeri. Questa è studiata appositamente per essere associata ad una specifica rete di fibre, garantendo quindi una perfetta aderenza tra i due elementi sia dal punto di vista chimico che meccanico, dato che la malta penetra attraverso gli interstizi della rete di fibre. La rete di fibre può invece essere di arammide; basalto; carbonio; poliparafenilbenzobisossolo (PBO) vetro e acciaio (SRG). I filamenti tessili sono organizzati in reti, che variano per spaziatura e direzione, come anche gli stessi filamenti, che possono variare per forma e dimensione, al fine di modificare il tipo di meccanismo di trasferimento delle sollecitazioni tra fibra e matrice e variare, quindi, il comportamento del composito. I filati tessili possono anche essere rivestiti con resine per incrementare il legame con la matrice, facilitarne l'installazione e proteggere i filamenti di fibre.

In letteratura, sono presenti numerosi studi sul comportamento meccanico di questi materiali, ma ricerche sulla loro durabilità sono scarse. I compositi essendo applicati per lo più all'esterno delle strutture possono essere esposti a varie condizioni ambientali, che possono modificare le loro prestazioni.

2.1 Invecchiamento accelerato

Se si vuole studiare il comportamento a lungo termine di questi sistemi, il modo migliore sarebbe quello di esporli alle condizioni ambientali reali. Questa procedura, però, richiederebbe

numerosi anni di studio, ulteriormente complicati dal fatto che le condizioni atmosferiche cambiano in funzione del luogo ed anche l'esposizione può variare, rendono questo tipo di studio poco standardizzabile. Pertanto, si sono sviluppate prove di laboratorio basate su invecchiamenti accelerati, adottati per simulare le condizioni ambientali reali al fine di cercare di prevedere e analizzare il comportamento a lungo termine di questi materiali.

In questo capitolo vengono mostrati e discussi i tipi di invecchiamento presenti in normativa e letteratura, focalizzando prevalentemente l'attenzione sulle tipologie indagate durante la campagna sperimentale.

2.1.1 Tipologie di invecchiamento e normative

A livello normativo, per quanto riguarda test sulla durabilità dei compositi, di seguito si annoverano due delle linee guida principali: quelle americane, *“Acceptance criteria for masonry and concrete strengthening using fiber-reinforced cementitious matrix (frcm) composite systems”* (AC 434, 2018); e quelle italiane, *“Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCM) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti”* (CSLLPP, 2019).

L'AC 434, 2018 stabilisce linee guida per l'analisi delle prestazioni strutturali e dei requisiti di sicurezza dei sistemi FRCM e SRG, incluse le fasi di caratterizzazione dei materiali, specificando requisiti su tessuti di rinforzo, matrici e rinforzo in acciaio; le proprietà meccaniche del sistema composito, come capacità assiale, a flessione e a taglio; i metodi di prova e collaudo, fissando prove tensile, shear e flexural per valutare la resistenza e il comportamento dei sistemi. Elenca anche valutazioni in condizioni ambientali e di esercizio, includendo esposizioni a umidità, salinità o alte temperature per testare la durabilità; ed anche criteri di progettazione strutturale, fornendo un quadro di riferimento per la verifica della capacità portante e della sicurezza dei rinforzi applicati. L'AC 434 fornisce un metodo di riferimento uniforme per la classificazione e l'accettazione dei materiali e dei sistemi di rinforzo compositi da parte degli organismi di controllo e del mercato, facilitando la conformità ai codici edilizi americani quando si usano materiali innovativi non contemplati nei documenti ACI standard. Pur non essendo una norma di progettazione, l'AC 434 completa le guide tecniche come l'ACI 549.4R-13, integrando criteri oggettivi di prova e di accettazione che supportano

progettisti, produttori e organismi di certificazione nella valutazione dei sistemi FRCM e SRG. L' AC434,2018 pertanto, rappresenta uno dei principali riferimenti normativi statunitensi per la qualificazione, prova e performance dei sistemi di rinforzo compositi a matrice cementizia applicati al miglioramento di strutture esistenti in muratura e calcestruzzo, con un forte orientamento alla sicurezza, alla durabilità e alla ripetibilità delle prestazioni.

In dettaglio, vengono elencate le prove di invecchiamento riportate in Tab. 2-1 ed in Tab. 2-2 con indicata la percentuale di proprietà di trazione e di taglio che i campioni devono mantenere. In questo caso sono richiesti almeno cinque campioni per configurazione.

ENVIRONMENTAL DURABILITY TEST	RELEVANT SPECIFICATION	TEST CONDITION	TEST DURATION	PERCENT RETENTION	
				Hours	
				1,000	3,000
Water resistance	ASTM D 2247 ASTM E 104	100%, 100 ± 2°F	1,000 and 3,000 hours	85	80
Saltwater resistance	ASTM D 1141 ASTM C 581	Immersion at 73 ± 2°F			
Alkali resistance		Immersion in solution with pH = 9.5 or higher and 73 ± 3°F			

Tabella La Durabilità dei Sistemi di Rinforzo FRCM (Stato dell'Arte)-1: Prove di invecchiamento artificiale AC 434, 2018.

GRID	CONDITIONING	TEST TYPE	HOURS	NUMBER OF REPLICATES	AC 434 SECTIONS		
Continuous		Dry shrinkage		5	4.2.1		
		Void content		5	4.2.2		
total				10			
Continuous	Ambient	Direct tension		5	4.2.3	4.4	
	Freeze/thaw			5			
	Ambient	Inter. shear		5	4.2.4		
	Freeze/thaw			5			
total				20			
Continuous	Ambient	Direct tension	1,000	5	4.2.3	4.5	
	Water			5			
	Saltwater			5			
	Alkali			5			
	Ambient		3,000	5			
	Water			5			
	Saltwater			5			
	Alkali			5			
	Ambient	Inter. shear	1,000	5	4.2.4		
	Water			5			
	Saltwater			5			
	Alkali			5			
	Ambient		3,000	5			
	Water			5			
	Saltwater			5			
	Alkali			5			
total				80			
Continuous	Ambient	Direct tension		5	4.2.3	4.6	
	Fuel			5			
total				10			
Lap	Ambient	Direct tension	1,000	5	4.2.3	4.5	
	Water			5			
	Saltwater			5			
	Alkali			5			
	Ambient		3,000	5			4.7
	Water			5			
	Saltwater			5			
	Alkali			5			
	total				40		
Continuous	Ambient	bond	1,000	5	4.8		
	Water			5			
	Saltwater			5			
	Alkali			5			
	Ambient		3,000	5			
	Water			5			
	Saltwater			5			
	Alkali			5			
	total				40		

¹ See Section 4.0 of this criteria for details.

Tabella La Durabilità dei Sistemi di Rinforzo FRCM (Stato dell'Arte)-2: Tipologia di invecchiamento, tipo di prove AC 434,2018.

Al paragrafo 4.4, viene descritta la procedura per il condizionamento di cicli gelo-disgelo. In particolare, la normativa prevede l'utilizzo di cinque provini mantenuti e testati a temperatura ambiente, i cui risultati vengono assunti come riferimento per la valutazione delle prestazioni dei campioni sottoposti a condizionamento. Dieci campioni devono essere condizionati per una settimana in una camera di umidità [100% di umidità, 100°F (37,7°C)]; finita la quale dovranno essere sottoposti a venti cicli di gelo e disgelo. Ogni ciclo consiste in un minimo di quattro ore a 0°F (-18°C), seguite da 12 ore in una camera di umidità [100% di umidità, 100°F (37,7°C)]. Terminati i cicli, i campioni vengono esaminati visivamente e testati e dovrebbero mantenere almeno l'85% delle proprietà di trazione e taglio dei campioni di controllo. Nel paragrafo 4.6 si fa riferimento alla resistenza al carburante, secondo la quale almeno 5 campioni devono essere esposti al gasolio per un minimo di quattro ore e poi testati. Anche in questo caso i provini devono mantenere almeno l'85% delle proprietà di trazione dei campioni di controllo. Infine, nel paragrafo 4.9 si fa riferimento alla resistenza al fuoco, rimandando a quanto riportato in normativa IBC 703.

Nelle Linee Guida CSLLPP, 2019, l'invecchiamento accelerato è uno strumento fondamentale per verificare la durabilità del sistema composito e la stabilità delle prestazioni meccaniche nel tempo, prima che il prodotto possa essere qualificato per l'uso strutturale. L'idea di fondo è che i sistemi FRCM rappresentano materiali compositi eterogenei e quindi potenzialmente sensibili a diversi fattori ambientali quali: umidità e cicli bagnato-asciutto, soluzioni alcaline (tipiche del calcestruzzo), ambienti salini e variazioni termiche. Per questo motivo le Linee Guida impongono che le prestazioni meccaniche dichiarate (in particolare la resistenza a trazione del composito e la capacità di adesione) siano verificate sia allo stato iniziale sia dopo esposizione a condizioni ambientali accelerate. I sistemi FRCM devono essere sottoposti a condizionamenti ambientali artificiali, che simulano nel breve periodo gli effetti di anni di esposizione reale. In particolare, sono previsti:

- Immersione in acqua
- Immersione in soluzione alcalina
- Esposizione ad ambiente umido

- Esposizione termica (cicli gelo-disgelo).

Questi protocolli mirano a valutare la stabilità chimica delle fibre, la resistenza della matrice, ma soprattutto la durabilità dell'interfaccia fibra-matrice, che è il vero anello debole del sistema. Le Linee Guida richiedono che la resistenza residua dopo invecchiamento non scenda sotto una percentuale minima rispetto a quella iniziale (valore di riferimento dichiarato dal produttore). In questo modo, il prodotto non viene qualificato solo per le prestazioni “a nuovo”, ma per la sua affidabilità nel tempo. Dal punto di vista scientifico, questo approccio riconosce che la durabilità dei sistemi FRCM non dipende solo dalla fibra o dalla matrice, ma dalla stabilità dell'interfaccia in condizioni ambientali aggressive. L'invecchiamento accelerato diventa quindi uno strumento normativo per tradurre la ricerca sperimentale sulla durabilità in un requisito di sicurezza strutturale, evitando l'impiego di materiali che mostrano buone prestazioni iniziali ma decadono rapidamente in ambiente reale.

In dettaglio, al paragrafo 3.4 “Prove per l'accertamento della durabilità ambientale”, vengono elencati differenti tipi di condizionamento. Quattro campioni devono essere utilizzati come riferimento e quindi devono essere testati senza condizionamento. Questo tipo di prove prevede: al paragrafo 3.4.1 prove cicliche gelo-disgelo, secondo le quali i campioni preventivamente devono essere condizionati in una camera umida per una settimana, ad una umidità relativa non inferiore al 90% e ad una temperatura di 38°C. Successivamente possono essere effettuati i cicli; ciascuno dei quali consiste di almeno 4 ore a -18 °C, seguite da 12 ore in una camera umida (umidità relativa non inferiore al 90%; temperatura di 38 °C). I cicli non devono essere inferiori a venti. Terminato il condizionamento i provini vengono controllati visivamente e testati. Anche in questo caso il valore medio della tensione ultima non dovrebbe risultare più basso del 15% rispetto al corrispondente valore medio calcolato sui campioni non condizionati. Al paragrafo 3.4.2 si fa riferimento a “Prove di invecchiamento artificiale”, nel quale vengono analizzati ambienti umido, alcalino e salino (Tab. 2-3). I campioni sono sottoposti al processo di invecchiamento in questo tipo di ambienti per 1000 e 3000 ore. I campioni vengono poi controllati visivamente e testati.

<i>Tipo di prova</i>	<i>Norma di riferimento</i>	<i>Condizioni di prova</i>	<i>Durata della prova (ore)</i>	<i>Percentuale conservata (%)</i>
Resistenza all'umidità	ASTM D 2247-11 ASTM E 104-02	umidità relativa: non inferiore al 90% temperatura: 38 ± 2 °C	1000 e 3000	85 (1000ore) 80 (3000 ore)
Resistenza agli ambienti salini	ASTM D 1141-98 ASTM C 581-03	immersione a 23 ± 2 °C		
Resistenza agli ambienti alcalini	ASTMD7705/D7705M	immersione in soluzione con pH= 12,5; temperatura: 23 ± 2 °C		

Tabella La Durabilità dei Sistemi di Rinforzo FRCM (Stato dell'Arte)-3: Prove di invecchiamento artificiale CSLPP, 2019.

La prova di invecchiamento artificiale si ritiene superata se non viene rilevata alcuna alterazione superficiale a carico dei provini condizionati ed inoltre se il valore medio della tensione ultima di questi ultimi non risulta più basso del 15% del corrispondente valore medio calcolato sui campioni non condizionati, nel caso di invecchiamento di 1000 ore, e del 20% nel caso di invecchiamento di 3000 ore. Al paragrafo 3.4.3 vengono indicate le “Prove di comportamento alle sollecitazioni termiche”. Secondo le quali, conoscendo l’intervallo di temperatura nel quale il fabbricante garantisce le prestazioni del prodotto, vengono effettuati test a trazione su provini sottoposti alla temperatura superiore dell’intervallo indicato, mantenendola per un periodo di almeno 6 ore.

In letteratura sono presenti altri tipi di invecchiamento accelerato che non sono riportati in normativa e che cercano di simulare sia condizioni ambientali estreme che più comuni. La Fig. 2-1 rappresenta la mappa delle ricerche sulla durabilità dei compositi sotto forma di parole chiave. Come si può notare negli ultimi anni la ricerca ha iniziato ad indagare fattori ambientali quali temperatura, penetrazioni di sali e di cloruri. Gli studi hanno mirato prevalentemente a studiare il legame che intercorre tra matrice e tessuto piuttosto che tra composito e substrato ed analizzato più le fibre a matrice polimerica rispetto a tutte le altre.

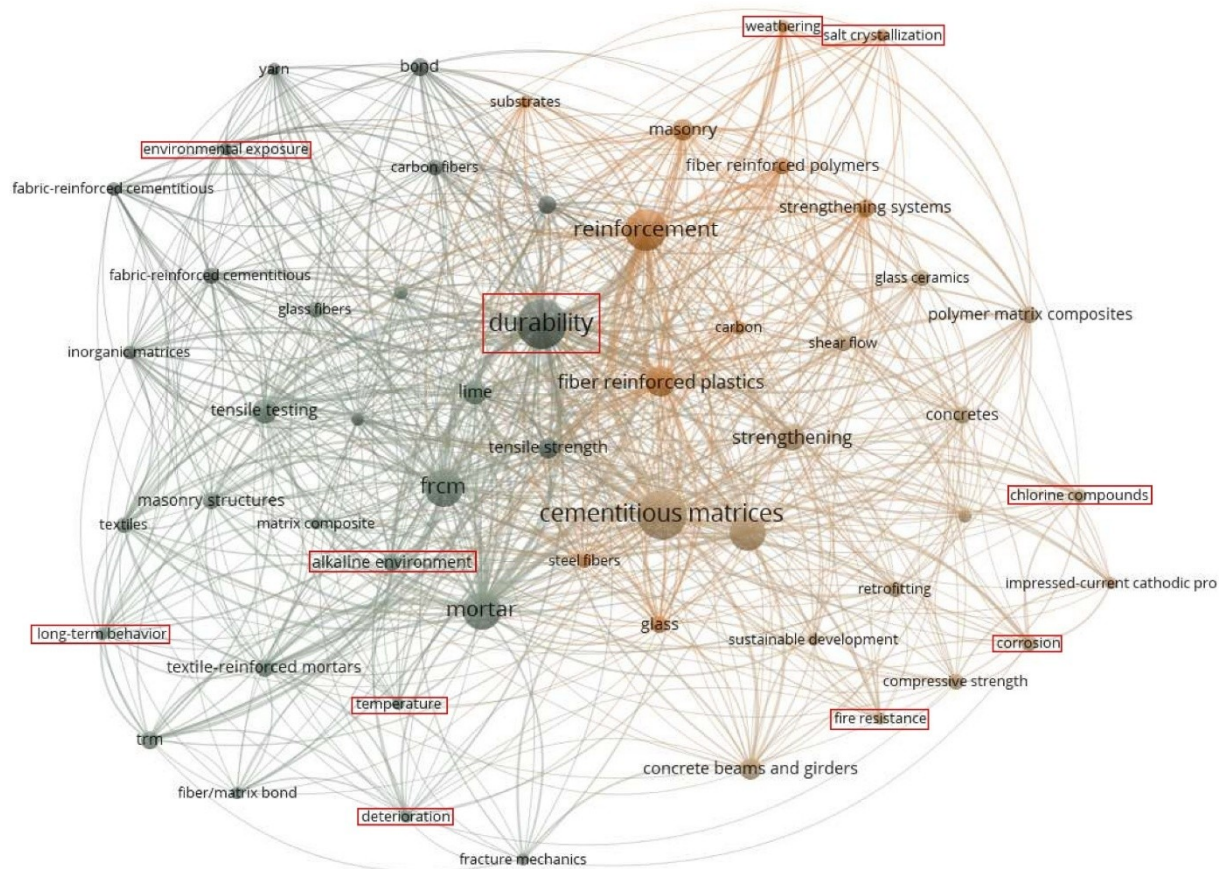


Figura La Durabilità dei Sistemi di Rinforzo FRCM (Stato dell'Arte)-1: Mappa delle parole chiave generata utilizzando VOS-viewer, che fornisce una rappresentazione visiva dei principali temi di ricerca e delle loro interconnessioni su invecchiamento accelerato di sistemi FRCM.

Di seguito vengono riportati e discussi alcuni di questi studi, suddivisi per macro-tipologie di invecchiamento accelerato.

2.1.2 Alte temperature

Lo studio dell'effetto delle alte temperature sui sistemi FRCM rappresenta uno dei filoni più consolidati della letteratura scientifica, nonché uno dei primi affrontati nell'ambito della durabilità dei compositi. In assenza di linee guida e normative specifiche, i ricercatori hanno adottato approcci sperimentali differenti, sia in termini di protocollo termico sia di configurazione dei provini. In particolare, alcuni ricercatori analizzano l'effetto di temperature che simulano l'incendio (100°C fino a 800°C); altri analizzano temperature che simulano un possibile irraggiamento solare (fino a 80°C).

Le principali modalità di condizionamento termico possono essere classificate in tre categorie (Fig. 2-2): i) Condizionamento isoterma durante il test; in cui i provini vengono portati alla temperatura desiderata mantenuta per un determinato intervallo di tempo e poi testati mantenendo la temperatura. ii) Condizionamento isoterma seguito da raffreddamento, in cui i campioni vengono riscaldati fino a una temperatura target, mantenuti per un certo periodo e poi lasciati raffreddare a temperatura ambiente prima della prova. Infine, iii) Condizionamento sotto carico, in cui il provino viene sottoposto a carico meccanico costante e successivamente riscaldato fino a rottura.

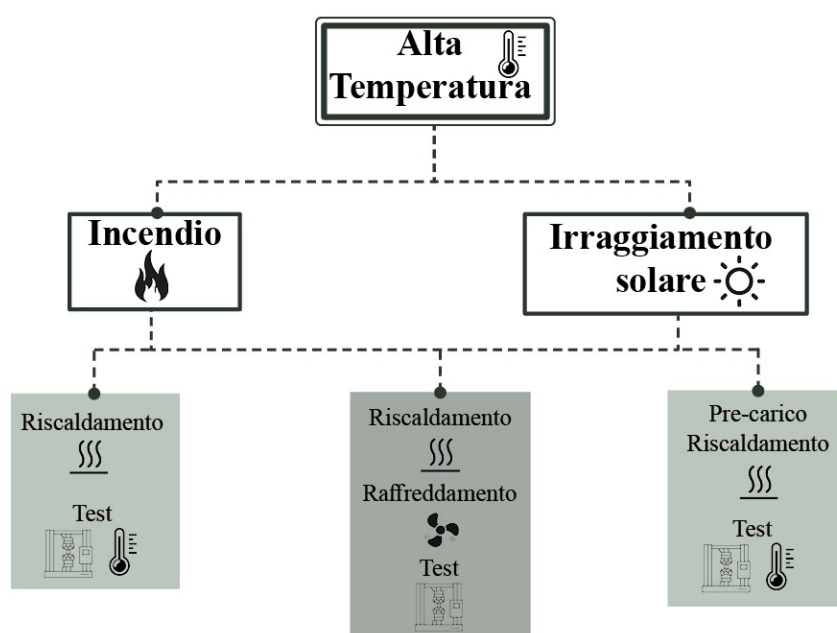


Figura La Durabilità dei Sistemi di Rinforzo FRCC (Stato dell'Arte)-2: Tipologie invecchiamento accelerato ad alte temperature in letteratura.

I materiali analizzati includono diverse tipologie di fibre (principalmente PBO, carbonio e vetro) e matrici inorganiche (malte cementizie o idrauliche), con test condotti sia su coupon che su campioni con substrati in muratura o calcestruzzo. In alcuni studi, le fibre sono inoltre trattate con resine polimeriche al fine di migliorare le prestazioni meccaniche del rinforzo: l'impregnazione favorisce infatti una più efficace distribuzione degli sforzi tra i filamenti, riducendo fenomeni di slittamento interno e rendendo il comportamento del fascio fibroso più omogeneo. Le configurazioni di prova più ricorrenti sono la trazione diretta, il single shear test e il test di compressione su elementi confinati. Di seguito vengono analizzate e discusse alcune di queste ricerche.

Tra i primi studi di questo tipo troviamo Trapko (2013) e Al-Salloum et al. (2016). Trapko studia il comportamento di cilindri in calcestruzzo rivestiti con FRP (fibre in carbonio) e con PBO-FRCM. I provini sono stati condizionati alle temperature di 40-60 e 80°C per 24 ore e subito dopo testati a compressione. Da questa sperimentazione è emerso che i cilindri rinforzati con PBO-FRCM hanno subito una riduzione della resistenza a compressione del 5-10% rispetto ai non condizionati. Notando che le fibre, soggette ad alte temperature, tendono a contrarsi esercitando una pressione aggiunta sul calcestruzzo che, sempre per le alte temperature, tende a dilatarsi, rafforzando l'interazione del sistema. Anche Al-Salloum et al., (2016) studiano il comportamento di cilindri in calcestruzzo confinati con FRCM ma, in questo caso, la fibra analizzata è di carbonio. Le temperature studiate variano dai 100 fino agli 800°C, ed i test sono eseguiti a temperatura ambiente. Da questo studio emerge che i provini con rinforzo in FRCM non presentano danneggiamenti importanti fino ai 300°C.

La maggior parte degli studi afferisce alla prima tipologia che analizza il comportamento dei sistemi FRCM in condizioni di temperatura elevata mediante test eseguiti direttamente a caldo, mantenendo i campioni alla temperatura target durante la prova. Iorfida et al. (2019) hanno testato sistemi FRCM in fibra di carbonio e basalto applicati su substrato in muratura, esposti fino a 500 °C. Le prove hanno mostrato una riduzione progressiva della resistenza, con perdite fino al 74% per il basalto e 61% per il carbonio. Le modalità di rottura risultano influenzate dalla temperatura, in particolare per il basalto. In Cerniauskas et al. (2020), cilindri in calcestruzzo rinforzati con FRCM in fibra di carbonio sono stati testati fino a 400 °C. I risultati mostrano una perdita contenuta di resistenza fino a 200 °C e un incremento oltre tale soglia, attribuito a un effetto di precompressione termica. Ferretti et al. (2022), su provini FRCM con fibra di basalto e malta idraulica, evidenziano una riduzione della resistenza già a temperature modeste (67% a 80 °C) e un cambiamento nelle modalità di rottura, con scorrimento interno alla matrice. Yang e Krevaikas (2024) hanno confrontato fibre in carbonio, vetro e basalto in coupon FRCM fino a 800 °C. Il carbonio e vetro hanno mantenuto circa la metà della resistenza dopo i 400°C, mentre il basalto ha mostrato un degrado significativo già a 200 °C, arrivando alla temperatura di 600 °C con perdite, rispettivamente del 60% per il vetro, del 70,75% per il carbonio e del 78,2% per il basalto. Infine, Canestri et al. (2025) hanno valutato fibre vetro-arammide e solo vetro fino a 110 °C nel caso di coupon e fino a 140°C nel caso di applicazione su muratura. Nei test sui coupon hanno riscontrando perdite di resistenza a trazione fino al -44% per vetro-arammide e del -63% per solo vetro; evidenziando l'effetto diretto della temperatura sul tessuto e riflettendo gli effetti combinati della degradazione della matrice e del deterioramento termico del tessuto.

Nei test su provini con substrato in muratura, i single shear test hanno evidenziato una perdita di -75% a 140°C, nel caso di composito con vetro-arammide, e del -54% a 110°C nel caso di composito in solo vetro.

Il secondo tipo, simula l'esposizione temporanea a condizioni termiche elevate, seguita da un ritorno a temperatura ambiente prima di eseguire i test. In Ombres et al. (2022a), coupon e prismi in calcestruzzo rinforzati con PBO-FRCM sono stati esposti a temperature fino a 300 °C e poi raffreddati. I coupon hanno mantenuto la modalità di rottura per scorrimento, mentre i prismi hanno mostrato rotture fragili a temperature più elevate, con una perdita di resistenza fino al 40%. Estevan et al. (2023) hanno studiato il legame tra FRCM (carbonio e vetro) e substrato in muratura, evidenziando che l'aumento della temperatura altera la modalità di rottura e riduce l'efficacia del sistema, specialmente oltre i 200 °C. A 400 °C la rottura avviene sistematicamente per distacco della matrice, con perdite del legame fino all'83%. per composito con fibre in carbonio e del -29% per vetro; questo miglioramento si verifica poiché le fibre sono state rivestite in polimero; perciò, il legame tra le fibre e la matrice di malta aumenta quando il rivestimento viene ammorbidito dall'effetto del calore (nella rete in fibra di carbonio secca utilizzata in questo lavoro questo effetto non è stato infatti riscontrato). Mazzuca et al. (2023) hanno osservato che, nei coupon con PBO-FRCM, la resistenza residua subisce una perdita contenuta fino a 100 °C, ma decresce drasticamente oltre i 200 °C. Nei prismi confinati, la resistenza è mantenuta fino a 200 °C, ma subisce una riduzione del 60% a 300 °C. Altri studi (es. Bertolli et al. 2023, Ombres et al. 2017) confermano l'importanza del numero di strati di tessuto e dell'uso di resine epossidiche, mostrando che l'incremento della temperatura tende a ridurre la duttilità e la capacità di adesione, e la resina apporta vantaggi in termini di maggiore resistenza a trazione e capacità di adesione. La temperatura ha influenzato soprattutto la rigidità post-fessurata e la modalità di rottura. Donnini et al. (2017), testando coupon con fibra di carbonio secca e impregnata con resina epossidica, hanno osservato una maggiore stabilità termica per i tessuti secchi, mentre la resina si è dimostrata più efficace solo a temperatura ambiente. Ci sono anche ricerche che studiano il comportamento per cicli di riscaldamento-raffreddamento, come Ombres et al., (2022b), in cui coupon PBO-FRCM e provini cilindrici in calcestruzzo confinati vengono sottoposti a cicli nei quali i provini vengono portati a temperature di 100-200°C per 6 ore e successivamente raffreddati a temperatura ambiente per 18 ore, questa procedura viene ripetuta per 5 volte. Le prove mostrano che, per i coupon, si ha una perdita notevole della resistenza, 48% a 100°C e 62% a 200°C. I cilindri non confinati hanno subito una perdita di

resistenza assiale del 2,2% a 100°C e del 14,3% a 200°C. I cilindri confinati hanno subito una perdita trascurabile a 100°C e, invece, del 67% a 200°C.

Il terzo tipo, mira a simulare condizioni più estreme, dove il composito è sottoposto contemporaneamente a sforzo meccanico e incremento termico. È un approccio più recente e meno diffuso, ma di grande rilevanza. Come visto in Raoof e Bournas (2017) e Tran et al. (2019), l'applicazione di precarichi influenzava negativamente la temperatura critica di rottura: all'aumentare del precarico, diminuiva la temperatura massima sopportabile dai provini. In particolare, i test di Tlaji et al. (2020) hanno mostrato che la combinazione precarico più temperatura induce effetti più marcati rispetto al solo riscaldamento. La malta refrattaria si è dimostrata più efficace nel contenere le perdite meccaniche, confermando che la scelta della matrice è cruciale per la stabilità in condizioni estreme.

Nel loro insieme, i risultati sperimentali indicano che il comportamento dei sistemi FRCM ad alta temperatura è fortemente non lineare, con una soglia critica ricorrente intorno ai 200 °C. Al di sotto di tale valore, diversi studi mostrano perdite di resistenza contenute e, in alcuni casi, effetti apparentemente benefici dovuti alla precompressione termica del confinamento (Cerniauskas et al., 2020). Focalizzando l'attenzione sulle fibre PBO, poiché oggetto di studio della seguente tesi, i dati disponibili mostrano un comportamento intermedio tra carbonio e basalto. Nei coupon PBO-FRCM analizzati da Mazzuca et al. (2023), la resistenza residua rimane quasi invariata fino a 100 °C, ma si riduce drasticamente oltre i 200 °C, raggiungendo una perdita di circa 60% a 300 °C. Analogamente, nei test ciclici di Ombres et al. (2022b), cinque cicli tra 100 e 200 °C hanno prodotto nei coupon PBO-FRCM perdite del 48% a 100 °C e del 62% a 200 °C, indicando una marcata sensibilità alla ciclicità termica. Nei cilindri confinati con PBO-FRCM, la perdita è trascurabile a 100 °C, ma raggiunge il 67% a 200 °C, suggerendo che, oltre una certa soglia, il degrado dell'interfaccia domina anche in presenza di confinamento. Il confronto con le altre fibre conferma questo quadro. A 500 °C, Iorfida et al. (2019) riportano perdite del 74% per il basalto e del 61% per il carbonio, mentre Yang e Krevaiikas (2024) mostrano che fino a 400 °C carbonio e vetro mantengono circa metà della loro resistenza, mentre il basalto degrada già a 200 °C. In questo contesto, il PBO si colloca tra il vetro e il basalto: più stabile del basalto, ma con un degrado più rapido rispetto al carbonio oltre i 200–250 °C. Nel complesso, i dati indicano che il PBO-FRCM mantiene buone prestazioni fino a circa 100–150 °C, ma mostra una forte caduta di capacità oltre i 200 °C, soprattutto in condizioni cicliche o post-raffreddamento. Questo comportamento, governato principalmente

dal degrado dell'interfaccia fibra-matrice, rende il PBO meno robusto del carbonio in scenari termici severi, ma comunque più affidabile del basalto.

Studio	Fibra	Matrice	Substrato	Protocollo termico	Range di Temperatura (°C)	Tipo di Test	Perdita/Incremento resistenza (Max)
Trapko (2013)	Carbonio, PBO	Cementizia	Calcestruzzo	Test a caldo	40-80°C	Compressive Test	C: -10 ogni 20°C di aumento; PBO: diminuzione del 5-10 ogni 20°C di aumento.
Al-Salloum et al (2016)	Carbonio	Cementizia	Calcestruzzo	Riscaldamento/ Raffreddamento	100-500 °C	Compressive Test	
Iorfida et al. (2019)	Carbonio/ Basalto	Cementizia	Muratura	Test a caldo	100-500°C	Single lap Shear test	-61% (C) -74% (B)
Cerniauskas et al. (2020)	Carbonio	Cementizia	Calcestruzzo	Test a caldo	20-400°C	Compressive Test	+7%
Ferretti et al. (2022)	Basalto	Idraulica	Muratura	Test a caldo	32-80°C	Single lap Shear test	-67%
Yang & Krevaiakas (2024)	Vetro/Carbonio /Basalto	Cementizia	-	Test a caldo	200-800°C	Direct Tensile Test	-60% (V) -70,75%(C) -78,2%(B)
Canestri et al. (2025)	Vetro Arammide /Vetro	Idraulica	Muratura	Test a caldo	23-140°C	Direct Tensile Test, Single lap Shear test	Con substrato: -75% (A+V); -54% (V) Coupon: -44(A+V); -63% (V)
Ombres et al (2022a)	PBO	Cementizia	Calcestruzzo	Riscaldamento/ Raffreddamento	100-300°C	Direct Tensile Test, Single lap Shear test	Coupon: -40%, Con substrato: -40%.
Estevan et al. (2023)	Vetro/Carbonio	Idraulica	Muratura	Riscaldamento/ Raffreddamento	20-400°C	Single lap Shear test	-29% (V) -83% (C)
Mazzuca et al. (2023)	PBO	Cementizia	Calcestruzzo	Riscaldamento/ Raffreddamento	20-300°C	Single lap Shear test	-60%
Bertolli et al. (2023)	Carbonio Carbonio resina	Cementizia	Muratura.	Riscaldamento/ Raffreddamento	300°C	Direct Tensile Test, Single	Tessuto: C: 81; C+r: 76. Prismi: C: 53,

						lap Shear test	C+r: 31.
Ombres et al. (2017)	PBO	Cementizia	Calcestruzzo	Riscaldamento/ Raffreddamento Cicli	50-250°C	Compressive Test	-18%.
Donnini et al., (2017)	Carbonio Carbonio resina	Cementizia	Muratura	Riscaldamento/ Raffreddamento	80-120°C	Direct Tensile Test, Double lap Shear test	Coupon: C: -11. C+r: -70. Con substrato: C: +6. C+r: -62.
Ombres et al. (2022b)	PBO	Cementizia	Calcestruzzo	Cicli	100-200°C	Compressive Test e Direct tensile test	Con substrato: -67% Coupon: -62%
Raoof and Bournas (2017)	PBO	Cementizia	Calcestruzzo	Precarico+T	50-400°C	Single lap Shear test	T costante: -15%. Tipo 2: caricati del 25-50-75% e poi scaldati fino a rottura: 319.5, 310.4, 77.3°C.
Tran et al. (2019)	Carbonio	Refrattaria	-	Precarico+T	75-700°C	Direct tensile test	T costante: -41%. Tipo 2 caricati del 25-50-71% e poi scaldati fino a rottura: 830, 678, 472°C.
Tlaiji et al. (2020)	Vetro	Cementizia, Refrattaria	-	Precarico+T	75-600°C	Direct tensile test	T costante: -85% (cementizia), -69% (refrattaria). Tipo 2 caricati del 30-50% e poi scaldati fino a rottura.: 670-180°C

Tabella La Durabilità dei Sistemi di Rinforzo FRCM (Stato dell'Arte)-4: Effetto della temperatura sulle proprietà meccaniche del FRCM in letteratura.

2.1.3 Ambiente alcalino

L'ambiente alcalino rappresenta una condizione di esercizio endemica per i sistemi FRCM, in quanto le matrici di malta che li costituiscono presentano valori di pH compresi tra 12 e 13, a seconda della tipologia (cementizia o a base di calce). La fibra, quindi, rimane permanentemente immersa in un ambiente ad alta alcalinità. Nel caso di sistemi realizzati con matrici a base di calce, gli effetti dell'esposizione artificiale potrebbero risultare peggiorativi

rispetto a quelli osservati in presenza di matrici cementizie, poiché il pH delle matrici a base di calce è generalmente più elevato e l'ambiente risulta quindi più aggressivo. In tale contesto, il comportamento a lungo termine è governato in larga parte dai processi all'interfaccia fibra-matrice. La letteratura segnala in particolare la vulnerabilità di fibre di vetro e basalto rispetto a carbonio, PBO e acciaio. Le fibre di vetro e basalto sono più vulnerabili perché la presenza di ioni idrossido (OH^-) nella matrice corrode le fibre; infatti, queste sono composte da silice (SiO_2) e altri ossidi metallici che, in ambiente alcalino, vengono idrolizzati e dissolti, impoverendo la composizione chimica e strutturale della fibra. Nel tempo, per lenire tale effetto, si è cercato di proteggere il tessuto rivestendolo o pre-impregnandolo. Gli effetti dannosi degli ambienti ad alta alcalinità sul legame interfacciale sono attribuiti, in prevalenza, all'alto contenuto di portlandite cristallizzata (malta cementizia) nella matrice, la quale compromette il legame della matrice con le fibre, inoltre cristalli fragili di portlandite tendono a frantumarsi e a posizionarsi in modo sfavorevole, anche con un piccolo spostamento dei filamenti del tessuto, portando alla formazione di fratture sui filamenti e generando una pressione laterale, che alla fine indebolisce il legame. Nel complesso, diversi fattori influenzano la penetrazione degli ioni alcalini nelle fibre, tra cui la composizione della matrice, il tempo di esposizione, i materiali di rivestimento delle fibre e la temperatura di immersione. Recentemente, l'interesse si è rivolto allo sviluppo di matrici inorganiche alternative, come le malte attivate con alcali (Alkali-Activated Materials) nelle quali vengono utilizzati scarti industriali, come ceneri volanti o scorie d'altoforno, invece del tradizionale cemento Portland. Uno dei fattori chiave che influenzano le proprietà delle AAM è il tipo e la concentrazione dell'attivatore utilizzato. Gli attivatori comuni includono idrossido di sodio, idrossido di potassio e silicato di sodio. I vantaggi nell'uso degli AAM sono legati alla loro elevata resistenza meccanica (simile o superiore alle malte convenzionali), alla buona adesione ai substrati di calcestruzzo, alla migliore resistenza alle alte temperature e alla maggiore durabilità in differenti condizioni ambientali.

Nel complesso, la severità del degrado dipende da pH, composizione ionica, temperatura e durata di esposizione, oltre che da dimensione/rivestimento delle fibre e microstruttura della matrice. Inoltre, le condizioni ambientali possono influenzare anche il comportamento di adesione del composito al substrato che sia di cemento o muratura.

Di seguito vengono presentate le due linee principali di ricerca proposte in letteratura; studi di invecchiamento accelerato in soluzioni alcaline e sviluppo di materiali con attivatori di alcalinità (AAM). Per quanto riguarda il primo gruppo, la letteratura, come precedentemente accennato, mette in evidenza una chiara vulnerabilità di alcune tipologie di fibre, in particolare

quelle vetrose e basaltiche. Micelli et al. (2019), Portal et al. (2016) e Paul et al. (2023) hanno mostrato che le fibre di vetro subiscono una marcata riduzione delle proprietà meccaniche già dopo brevi periodi di immersione. Test sulla resistenza alla trazione dei tessuti in vetro in varie condizioni di esposizione mostra come alcalinità più elevate comportano un degrado più grave delle proprietà meccaniche, rispetto ad ambienti con pH più bassi. Dopo 30 giorni di esposizione ad un ambiente altamente alcalino (pH 14), le fibre di vetro subiscono una perdita di resistenza massima compresa tra il 28 e il 55 %. Le fibre di vetro AR (Alkali Resistant) che contengono ossido di zirconio, studiate sempre da Micelli et al. (2019), grazie alla presenza di zirconia, risultano più stabili e meno soggette a degrado. Il vetro AR standard contiene il 16-20% in massa di biossido di zirconio e offre quindi una resistenza migliorata in ambienti alcalini rispetto alle fibre di vetro standard. La ragione della maggiore resistenza alcalina è la formazione di un sottile strato idratato, ricco di zirconio, sulle superfici dei filamenti, questo si forma dopo l'inizio dell'attacco alcalino sulla rete di vetro e rallenta la diffusione degli ioni OH nelle fibre. Anche le fibre di basalto, come studiato da Portal et al. (2016), mostrano un comportamento analogo alle fibre di vetro standard, dimostrandosi addirittura più vulnerabili, soprattutto quando l'esposizione avviene a temperature elevate. Questi risultati, nel loro insieme, evidenziano come la resistenza dei compositi con tessuti di vetro e basalto dipenda fortemente dalla composizione della fibra e dai parametri di condizionamento, sottolineando la necessità di protocolli standardizzati per valutare correttamente la loro durabilità. La questione della vulnerabilità delle fibre in basalto è stata analizzata anche da Fares et al. (2025), che hanno valutato la durabilità a lungo termine di FRCM realizzati con questa fibra, mostrando una progressiva riduzione di resistenza e duttilità in ambienti alcalini. I campioni sono stati immersi in una soluzione alcalina per diverse durate, da 1000 fino a 9000 ore, e per due temperature: 23 °C e 40 °C. Dall'esame dei campioni di singolo tessuto, è stata osservata una sostanziale riduzione della resistenza a trazione, con una notevole diminuzione dell'87% dopo 9000 ore e, per i coupon una diminuzione fino al 64% sempre dopo 9000 ore a 40 °C. La temperatura, sia per campioni di solo tessuto che per coupon ha accelerato i processi di corrosione chimica, con campioni invecchiati a 40 °C che hanno mostrato una diminuzione della resistenza di circa una volta e mezza rispetto ai campioni invecchiati a 23 °C. Azimi et al. (2025), hanno studiato due differenti sistemi FRCM composti da fibre di vetro e di basalto, sottoposti a esposizione alcalina, rilevando riduzioni delle proprietà meccaniche variabili a seconda del tipo di fibra utilizzata. Entrambi i lavori confermano l'elevata sensibilità del basalto e del vetro, sottolineando come la durabilità dei compositi non sia determinata esclusivamente dalla fibra, ma anche dall'interazione con la matrice e dal tipo di legame che si instaura all'interfaccia. Un

contributo particolarmente significativo è quello di Butler et al. (2009, 2010), che hanno posto l'attenzione sul ruolo della matrice. I loro studi dimostrano che l'impiego di matrici a base di cemento Portland favorisce la formazione di prodotti fragili come la portlandite all'interfaccia, con conseguente perdita di duttilità e resistenza, mentre l'utilizzo di additivi pozzolanici permette di ridurre il pH della soluzione porosa e di formare fasi C-S-H stabili, con effetti positivi sulla conservazione delle prestazioni meccaniche. Tali osservazioni suggeriscono che la progettazione della matrice non sia un aspetto secondario, ma un elemento chiave per la durabilità dei sistemi FRCM. Un approccio differente è stato seguito da Donnini et al. (2020), che hanno confrontato il comportamento di fibre di vetro AR pre-impregnate e coupon, sempre con fibre di vetro e matrice cementizia, immersi in soluzione alcalina a diverse temperature. I risultati hanno evidenziato come i provini di solo tessuto siano soggetti a rapida degradazione, mentre i coupon mostrano una maggiore resistenza, grazie all'effetto protettivo della matrice. Tuttavia, la presenza di impregnazioni incomplete nei tessuti può favorire la penetrazione della soluzione alcalina, accelerando il processo di danneggiamento. Questo studio mette quindi in luce l'importanza della qualità dell'impregnazione, spesso trascurata, ma cruciale per la durabilità complessiva del materiale. La rilevanza delle interazioni fibra-matrice e l'importanza della pre-impregnazione dei tessuti è stata ulteriormente approfondita da Bompadre & Donnini (2022), che hanno studiato l'effetto di diversi trattamenti superficiali applicati a fibre di carbonio immersi in matrici cementizie. In particolare, viene studiata la fibra con pre-impregnazione di resina epossidica, con rivestimento in nano-silice e, ultimo, la fibra soggetta a processo di ossidazione. I risultati hanno evidenziato che la pre-impregnazione, soprattutto con resine epossidiche, migliora il legame all'interfaccia e riduce la penetrazione delle soluzioni alcaline, con benefici diretti sulla durabilità e sulla resistenza a lungo termine. Infatti, la resina epossidica ha aumentato la resistenza a trazione del filo del 34% e il carico di pull-out del 138%, seguita dalla nano-silice (+9%; +40%). In generale, tutti i trattamenti superficiali hanno dimostrato di rimanere efficaci anche dopo l'esposizione all'ambiente alcalino, con una riduzione massima della resistenza a trazione del filo di circa il 13%. Se si considerano fibre più resistenti alla degradazione chimica, i risultati sono decisamente migliori. Arboleda et al. (2014) e Calabrese et al. (2022) hanno infatti dimostrato che i sistemi FRCM con fibre in PBO e carbonio mantengono gran parte delle proprietà meccaniche anche dopo lunghi periodi di immersione in soluzioni alcaline, con riduzioni inferiori al 15% della resistenza iniziale. Un'elevata stabilità è stata osservata anche per i compositi SSRG, composti da tessuti in acciaio inossidabile e malte a base di calce, come confermato da diversi studi e ulteriormente approfondito da Fares et al. (2022), che hanno valutato la resistenza di tali sistemi non solo in

ambiente alcalino, ma anche in soluzioni saline, evidenziando la buona stabilità dell'acciaio inox in condizioni particolarmente aggressive.

Il secondo gruppo, la parte di letteratura che studia matrici attivate alcalinamente (AAM), rappresenta una parte rilevante della ricerca. L'obiettivo è quello di ridurre l'impatto ambientale e, al tempo stesso, migliorare la resistenza dei compositi soggetti a condizioni aggressive. Donnini et al. (2024) hanno confrontato quattro formulazioni di AAM a base di ceneri volanti e metacaolino con malte commerciali calce-cemento, analizzando il comportamento di sistemi TRAAM (sistemi FRCM con matrici AAM) in termini di lavorabilità, resistenza meccanica e adesione al supporto. I risultati hanno evidenziato una lavorabilità paragonabile, se non superiore, a quella delle malte tradizionali, e proprietà meccaniche sostanzialmente comparabili. Ancora più rilevante è il comportamento all'interfaccia: nei provini con AAM, le rotture si sono verificate principalmente nel substrato in laterizio, e non nel legame fibra-matrice, suggerendo un'ottima capacità di adesione. Questi risultati indicano che le matrici attivate alcalinamente possano costituire una valida alternativa per migliorare la sostenibilità senza penalizzare la prestazione strutturale. Parallelamente, la ricerca ha guardato anche al potenziale dei materiali geopolimerici. A. E. Alexander e A. P. Shashikala (2023) hanno analizzato il comportamento meccanico e di durabilità di travi in calcestruzzo rinforzato con FRCM con matrici geopolimeriche, evidenziando un'elevata resistenza in ambienti aggressivi. Questi risultati confermano che i geopolimeri, se opportunamente formulati, possono offrire non solo vantaggi ambientali, ma anche prestazioni competitive, aprendo prospettive concrete per l'impiego su larga scala nei sistemi di rinforzo strutturale. Nel complesso, gli studi sugli AAM e sui geopolimeri mostrano come l'innovazione nelle matrici non rappresenti soltanto una strategia di sostenibilità, ma anche una via per incrementare la durabilità dei sistemi FRCM in condizioni chimicamente aggressive. Tuttavia, resta imprescindibile approfondire la ricerca con test a lungo termine e protocolli specifici, al fine di comprendere pienamente i meccanismi di degrado e di consolidare l'affidabilità di queste soluzioni innovative.

Nel complesso (Tab. 2-5), la letteratura analizzata evidenzia in modo univoco che l'ambiente alcalino rappresenta uno dei fattori più critici per la durabilità dei sistemi FRCM. I dati sperimentali mostrano come la degradazione non sia governata esclusivamente dalla resistenza intrinseca delle fibre, ma derivi dall'interazione complessa tra fibra, matrice e interfaccia, fortemente influenzata dal pH, dalla composizione ionica della soluzione porosa e dalla microstruttura della matrice. Le fibre vetrose e basaltiche risultano sistematicamente le più vulnerabili, con perdite di resistenza che possono superare l'80-90% in condizioni di

esposizione prolungata e temperature moderate, mentre fibre come PBO, carbonio e acciaio inossidabile mostrano una stabilità significativamente superiore, con riduzioni spesso contenute entro il 5-16%.

Un elemento chiave che emerge è il ruolo determinante della matrice: malte a base di cemento Portland favoriscono la formazione di fasi fragili (portlandite) e un ambiente chimicamente aggressivo, mentre l'impiego di additivi pozzolanici o matrici alternative consente di ridurre il pH e di migliorare la stabilità dell'interfaccia. In questo quadro, i risultati più recenti sui sistemi TRAAM e sui compositi a matrice geopolimerica indicano una direzione di ricerca promettente, in cui la progettazione della matrice diventa uno strumento attivo di controllo della durabilità, e non solo un elemento di trasferimento degli sforzi.

Tuttavia, la grande dispersione dei protocolli di invecchiamento accelerato (pH, temperatura, durata, tipologia di soluzione) e delle configurazioni di prova rende ancora difficile un confronto quantitativo diretto tra studi diversi. Ciò sottolinea la necessità di sviluppare procedure di prova standardizzate che consentano di correlare in modo affidabile i risultati di laboratorio alle reali condizioni di esercizio dei sistemi FRCM. In assenza di tali riferimenti, il rischio è quello di sottostimare il degrado a lungo termine dei compositi più vulnerabili o, viceversa, di non valorizzare appieno il potenziale delle soluzioni più durabili, come i sistemi a base di PBO, carbonio e matrici attivate alcalinamente.

Studio	Fibra	Matrice	Substrato	Protocollo invecchiamento	Tipo di test	Perdita/Incremento resistenza (Max)
Micelli et al. (2019)	Vetro, Vetro	-	-	Immersione 168.4320h a 20-40-45°C	Direct tensile test	-86% (V-B)
	AR,					-20% (AR)
	Basalto, Carbonio, Acciaio					- (C-A)
Portal et al. (2016)	Vetro AR, Basalto	-	-	Immersione 10-30 giorni a 20-60°C	Direct tensile test	-28% -55%
Paul et al. (2023)	Vetro Vetro AR	Cementizia	-	Immersione 7-160 giorni, 50°C	Direct tensile test	-16% -2%
Fares et al. (2025)	Basalto	Idraulica	-	Immersione da 1000 a 9000h a	Direct tensile test	Solo tessuto: -87%

T di 23 o40°C					Coupon: -64%	
Azimi et al. (2025)	Vetro	Idraulica	-	Immersione 1000-3000- 5000h	Direct tensile test	+4%(V)
	Basalto					-37%(B)
Butler et al. (2009)	Vetro AR	Cementizia 4 tipi	-	28-106 giorni ad umidità 99%, 40°C	Direct tensile test	-30%
						-39%
						-16%
Butler et al. (2010)	Vetro AR	Cementizia	-	28-360 giorni ad umidità 99%, 40°C	Direct tensile test	-25%
Donnini et al. (2020)	Vetro AR	Cementizia	-	Immersione 1000h 40°C	Direct tensile test	+1%
Bompadre & Donnini (2022)	Carbonio	Cementizia	-	Immersione 1000 h 40°C	Direct tensile test	+138%
Arboleda et al. (2014)	Carbonio	Cementizia	-	Immersione 1000-3000 h	Direct tensile test	-20%
Calabrese et al. (2022)	PBO	Cementizia	-	Immersione 1000-3000 h	Direct tensile test	-4%
Fares et al. (2022)	Acciaio	Cementizia	-	Immersione 1000-3000h	Direct tensile test	Solo tessuto: -20% Coupon: -15%
Donnini et al. (2024)	Vetro Ar Basalto	AAM (ceneri volanti, metacaolino)	Muratura	-	Single lap Shear test	Analizzati 4 tipi di malta differente test su coupon e provini con substrato. Migliori prestazioni rispetto malte tradizionali
A.E.Alexander, A.P.Shashikala (2023)	Carbonio	Cementizia	Calcestruzz o	Immersione 1 anno	Single lap Shear test	-10%

Tabella La Durabilità dei Sistemi di Rinforzo FRCM (Stato dell'Arte)-5: Effetto dell'invecchiamento alcalino sulle proprietà meccaniche del FRCM in letteratura.

2.1.4 Ambiente salino

Gli attacchi di ioni cloruro e di solfati sono tra i fattori ambientali più comuni che influiscono negativamente sulle proprietà meccaniche e sulla durabilità non solo dei sistemi FRCM, ma, più

in generale, degli edifici sia in muratura che in cemento armato. L'effettiva esistenza di una grande quantità di ioni cloruro e solfato nell'acqua di mare, nelle falde acquifere, nei laghi salati e nel suolo è stata quindi riconosciuta come una minaccia significativa per la durabilità delle strutture in calcestruzzo e muratura. Nello specifico, le strutture poste in zone di fluttuazione delle falde freatiche, onde marine, zone di marea e zone costiere sono soggette all'attacco dei cicli di essiccazione-bagnatura dei solfati e dei cloruri, che possono accelerare il processo di deterioramento. Ma anche la presenza di ioni cloruro e solfati nei terreni, nell'acqua piovana e nei materiali per l'edilizia stessi, col tempo, possono danneggiare e compromettere il corretto comportamento delle strutture. In particolare, per quanto riguarda il calcestruzzo, questo è sempre accompagnato dalla formazione di lesioni durante il periodo di costruzione, manutenzione e servizio, tali lesioni accelereranno l'ingresso di ioni corrosivi e il deterioramento delle proprietà del materiale. L'attacco dei cloruri, nel cemento armato è particolarmente grave negli ambienti marini e costieri, poiché provoca la corrosione, accelerando la perdita di resistenza e rigidità. Nella muratura è tra le cause più comuni di degrado; il danno da sale coinvolge meccanismi complessi, che dipendono principalmente dalla microstruttura dei materiali, dalla natura del sale o della miscela di sali e dalle condizioni ambientali (velocità di evaporazione, ecc.). In particolare, soprattutto per le strutture in muratura, acqua e sali penetrano dal terreno tramite l'umidità di risalita, l'acqua poi evaporando all'interno del muro può provocare la precipitazione di cristalli sotto la superficie (subfiorescenza). I sali che si accumulano nei pori del mattone e della malta determinano una pressione nei pori che modifica il campo di stress esistente, causando possibili fenomeni di frattura. Quando i compositi FRCM vengono applicati alla muratura, data la natura porosa delle matrici composite, l'attacco salino potrebbe danneggiare il substrato e il composito, il che a sua volta potrebbe influenzare le proprietà meccaniche del composito e causare la perdita di adesione dal substrato. Considerando la porosità della muratura e dei materiali in calcestruzzo a grana fine, quando i compositi FRCM vi vengono applicati, la presenza di sale può causare danni e deterioramento, soprattutto della muratura, e dei materiali della matrice, influenzando così le proprietà meccaniche dei compositi FRCM e riducendo le prestazioni di adesione all'interfaccia tra FRCM e substrato. Nei sistemi FRCM, la natura porosa delle matrici inorganiche amplifica la vulnerabilità a tali processi, rendendo cruciale lo studio della durabilità in queste condizioni. Di seguito vengono presentate le due linee principali di ricerca proposte in letteratura; immersione prolungata in soluzione e cicli di bagnato-secco o caldo-umido.

Nel primo gruppo ci sono molti studi che analizzano il comportamento di sistemi FRCM sottoposti ad immersioni prolungate (solitamente 1000\3000 ore come da normativa) in soluzioni saline. Uno dei primi contributi è quello di Arboleda et al. (2014), che hanno investigato la durabilità dei FRCM in diversi ambienti aggressivi, inclusi quelli salini. In questo studio hanno dimostrato che la sollecitazione ultima σ_u dei provini FRCM in PBO sottoposti a prove di trazione con attacco a forcilla non si è ridotta dopo 1000 e 3000 ore di esposizione ad ambienti salini. Al contrario hanno portato a un aumento sostanziale della resistenza a trazione del composito, attribuito alla suddetta idratazione e polimerizzazione della matrice, che ha migliorato il legame tra la fibra e la matrice. Si ricorda che la configurazione per la prova di trazione con presa a forcilla è particolarmente interessante per lo studio del comportamento a lungo termine dei compositi a matrice inorganica. Donnini (2019) ha studiato sistemi FRCM a base di fibre di vetro AR immersi in soluzione salina a 60 °C, osservando una marcata riduzione della resistenza dei filati e un degrado localizzato all'interfaccia fibra-matrice, mentre le proprietà della matrice non risultavano significativamente compromesse. Fares et al. (2025) hanno valutato compositi FRCM rinforzati con acciaio in ambienti salini e alcalini, rilevando una buona resistenza iniziale ma, un progressivo indebolimento della matrice e del legame fibra-matrice con l'aumentare del tempo di esposizione. Alatawna et al. (2022) hanno studiato la durabilità di sistemi TRM esposti a soluzioni saline, osservando come, nonostante una buona resistenza iniziale, la capacità meccanica tenda a diminuire nel tempo a causa dell'indebolimento progressivo del legame fibra-matrice. Lo studio ha sottolineato come la scelta della matrice e della fibra possa influenzare significativamente il grado di vulnerabilità del degrado salino. Calabrese et al. (2022) hanno approfondito il comportamento a lungo termine di sistemi PBO-FRCM confrontandoli con altri compositi a matrice inorganica. I risultati hanno mostrato che, pur garantendo prestazioni superiori in condizioni iniziali, anche i PBO-FRCM sono soggetti a degrado progressivo in ambienti salini, sebbene con un ritmo più lento rispetto ad altre fibre. Bompadre & Donnini (2022) hanno studiato l'influenza dei trattamenti superficiali dei filati di carbonio inseriti in matrici cementizie, sottoposti ad immersione in ambiente salino. È emerso che modifiche adeguate della superficie del filato migliorano l'adesione fibra-matrice e riducono l'impatto negativo dei sali, garantendo una maggiore stabilità delle prestazioni meccaniche nel tempo. Donnini et al. (2020) hanno analizzato il comportamento a trazione di un sistema FRCM con fibra di vetro dopo esposizione prolungata a differenti condizioni ambientali, tra cui immersione in soluzione salina per 1000 ore. I risultati hanno evidenziato una riduzione significativa della resistenza ultima e della rigidezza del composito, attribuita alla degradazione del rivestimento protettivo delle fibre e alla

penetrazione dei cloruri attraverso la matrice. L'analisi microstrutturale ha confermato la comparsa di microfessurazioni e fenomeni di dissoluzione superficiale dei filati, con conseguente indebolimento dell'adesione fibra-matrice.

Nel secondo gruppo si annoverano gli studi su cicli, in prevalenza caldo-umido, che studiano il comportamento di sistemi FRCM con substrato sia in muratura che in cemento armato e calcestruzzo; di seguito ne vengono presentati alcuni. Un focus particolare è stato dato a Franzoni et al (2017-2018-2019), S. Yin et al (2022) e Wang et al (2023), poiché tali ricerche hanno fornito la base per alcuni tipi di condizionamento analizzati in questo studio. Tra i primi che hanno studiato questo tipo di condizionamento troviamo S. Yin et al. (2016), i quali hanno analizzato colonne in calcestruzzo armato rinforzate con FRCM, composti di fibre di carbonio e vetro pre-impregnate con resina epossidica, esposte a cicli di immersione in cloruri seguiti da asciugatura. È emersa una riduzione significativa della capacità portante e della rigidità assiale, dovuta sia alla corrosione dei cloruri sia al progressivo degrado del legame fibra-matrice, particolarmente vulnerabile sotto carichi ripetuti. S. Yin et al. (2020) hanno approfondito gli studi di colonne in calcestruzzo rinforzate con FRCM con fibre di vetro e carbonio in ambienti ricchi di cloruri, evidenziando come l'aumento della concentrazione salina e l'applicazione di carichi sostenuti accelerino la penetrazione degli ioni e peggiorino le prestazioni flessionali. Li et al. (2021) hanno indagato il comportamento di colonne in calcestruzzo rinforzate con fibre, in carbonio e vetro, soggette a compressione eccentrica e contemporaneamente esposte a soluzioni contenenti cloruri. Lo studio ha mostrato che la combinazione di corrosione salina e carico accelera la degradazione strutturale, riducendo progressivamente la capacità portante e la duttilità residua delle colonne rinforzate. Sheng et al. (2021) hanno analizzato il comportamento di travi in calcestruzzo armato rinforzate, sempre con fibre di vetro e carbonio, soggette a corrosione salina combinata con cicli di gelo-disgelo. I risultati hanno mostrato una riduzione marcata della resistenza a flessione e della capacità di deformazione, con la formazione di microfessure più diffuse nei campioni esposti, a conferma dell'effetto sinergico tra penetrazione dei cloruri e stress termici. Alatawna et al. (2022) hanno studiato la durabilità di sistemi FRCM con matrice in gesso e fibre in carbonio, esposti a soluzioni saline, osservando come, nonostante una buona resistenza iniziale, la capacità meccanica tenda a diminuire nel tempo a causa dell'indebolimento progressivo del legame fibra-matrice. Lo studio ha sottolineato come la scelta della matrice e della fibra possa influenzare significativamente il grado di vulnerabilità al degrado salino. La ricerca di Wang et al. (2023) offre un contributo significativo alla comprensione del comportamento

dell'interfaccia nei sistemi FRCM soggetti ad ambienti salini, affrontando il problema del legame composito-calcestruzzo. Lo studio amplia questa prospettiva, concentrandosi sull'interfaccia tra textile-reinforced engineered cementitious composite (TR-ECC) e calcestruzzo confezionato con acqua di mare e sabbia marina (SWSSC), sottoposta a cicli di asciugatura e immersione. Tale configurazione sperimentale ha permesso di analizzare un caso realistico di struttura esposta ad aerosol marino, in cui le condizioni saline si combinano a variazioni igrometriche e termiche. Il programma sperimentale ha previsto cicli di immersione e asciugatura in soluzione di NaCl al 6,5%, condotti per un totale di 270 cicli, ciascuno della durata di 12 ore di immersione seguite da 12 ore di asciugatura a 40 °C. I risultati hanno mostrato che il legame interfaccia-substrato subisce un degrado graduale ma significativo con l'aumentare del numero di cicli: la resistenza a taglio diminuisce fino al 25-30%, con un'evidente perdita di adesione e un incremento dello scorrimento residuo fino al 40% rispetto ai campioni di controllo. L'osservazione microscopica ha rivelato la presenza di microvuoti e fessure intergranulari nella matrice, dovuti alla cristallizzazione dei sali e alla conseguente espansione locale responsabili della riduzione di adesione. Tuttavia, la matrice ECC, grazie alla sua maggiore densità e duttilità, ha mostrato una stabilità superiore rispetto alle malte cementizie convenzionali, confermandosi una soluzione promettente per l'impiego in ambienti marini. La microstruttura compatta e ricca di leganti secondari (C-S-H e CASH) dell'ECC riduce la diffusione ionica e migliora la resistenza a cicli igroscopici ripetuti, rendendo questo materiale particolarmente idoneo per applicazioni in ambiente marino. In parallelo, hanno suggerito che la durabilità dell'interfaccia può essere ulteriormente migliorata attraverso l'utilizzo di sigillanti o trattamenti superficiali capaci di ostacolare la penetrazione dei cloruri. Le conclusioni di Wang et al. trovano riscontro anche in studi precedenti su calcestruzzi rinforzati con FRCM, dove la densità e la microstruttura della matrice si sono rivelate fattori determinanti per la durabilità dell'interfaccia. L'uso di malte ad alte prestazioni o di matrici a base geopolimerica può infatti ridurre la diffusione dei cloruri e contenere i danni da cristallizzazione. In sintesi, le ricerche su calcestruzzo e ambiente salino concordano nel ritenere che la durabilità del legame composito-substrato dipenda fortemente non solo dal tipo di fibra, ma anche dalla composizione e dalla compattazione della matrice, oltre che dalla compatibilità chimica con il supporto cementizio. Un contributo rappresentativo per comprendere il degrado del legame FRCM-muratura in ambiente salino è dato dalle ricerche di E. Franzoni e S. Yin. Entrambi gli autori hanno posto al centro dei loro studi l'effetto della cristallizzazione dei sali nella zona di contatto, che costituisce il punto più vulnerabile del sistema. Negli studi del gruppo di ricerca coordinato da E. Franzoni (Franzoni et al 2017-2018-

2019) si pone l'attenzione sulla comprensione dei meccanismi di degrado dei sistemi FRCM applicati alla muratura in condizioni di esposizione salina, studiando, in particolare compositi con fibre di vetro. A partire dai primi studi, l'attenzione si è focalizzata sulla relazione tra composizione della matrice, comportamento dell'interfaccia e fenomeni di cristallizzazione dei sali, con l'obiettivo di riprodurre in laboratorio i processi di deterioramento che avvengono negli edifici storici soggetti a risalita capillare o aerosol marino. Gli studi di Franzoni et al. (2017, 2018, 2019) hanno introdotto un protocollo di invecchiamento accelerato in cicli di risalita capillare e cristallizzazione. Nei test, le murature rinforzate con FRCM sono state esposte a soluzioni contenenti solfato di sodio (Na_2SO_4) e cloruro di sodio (NaCl), con concentrazioni variabili tra il 2 e l'8% in peso, in cicli alternati di bagnatura e asciugatura a temperatura controllata (60 °C); per un numero compreso tra 4 e 6 cicli. Nel lavoro del 2017 e 2018, Franzoni e collaboratori hanno proposto un metodo di invecchiamento accelerato basato su cicli alternati di risalita capillare e cristallizzazione salina. Tale protocollo simulava in modo realistico la penetrazione e la successiva precipitazione dei sali solubili nella zona di contatto tra muratura e composito. I risultati hanno mostrato fenomeni di deterioramento legati all'attacco salino (come sfaldamento e deterioramento della matrice) e polverizzazione superficiale della matrice, inoltre il composito non ha ostacolato la migrazione della soluzione salina nel substrato, la porosità della matrice, infatti, facilita la migrazione dei Sali (Fig. 2-3)

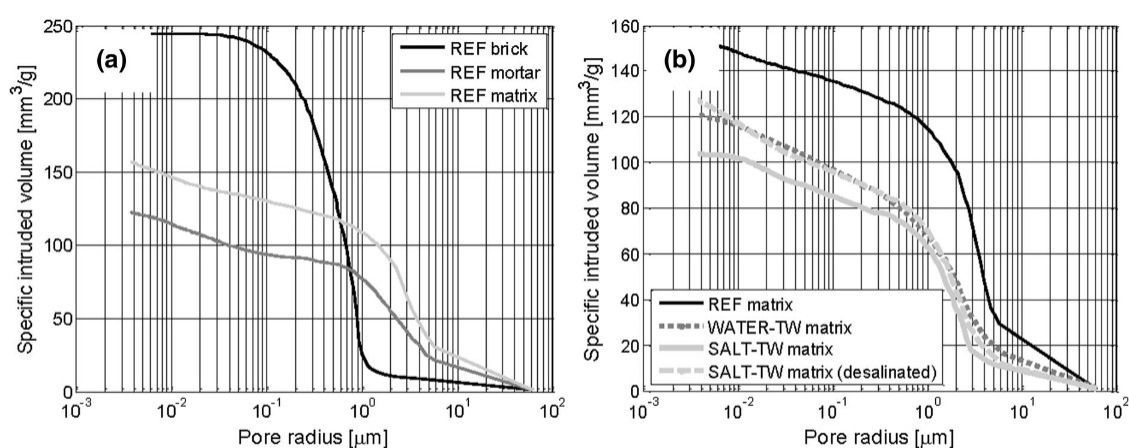


Fig. 8 Pore size distribution of: **a** samples of brick, mortar, and matrix extracted from a representative REF specimen and of **b** samples of matrix extracted from representative REF, WATER-TW, SALT-TW and SALT-TW specimens after salt removal

Figura La Durabilità dei Sistemi di Rinforzo FRCM (Stato dell'Arte)-3: Grafico distribuzione dei pori, Franzoni et al. (2017).

Successivamente, nel lavoro del 2019, gli autori hanno approfondito il ruolo della matrice nella resistenza alla cristallizzazione salina e nel comportamento del legame composito-muratura. Attraverso una combinazione di prove meccaniche e analisi microstrutturali, è stato dimostrato che la formulazione della malta influisce in modo determinante sia sulla diffusione dei sali sia sulla stabilità del legame (Fig. 2-4). Malte a maggiore densità e minore porosità hanno mostrato una migliore capacità di limitare la penetrazione ionica e di preservare l'integrità del contatto fibra-matrice, riducendo la formazione di efflorescenze e microfessure.

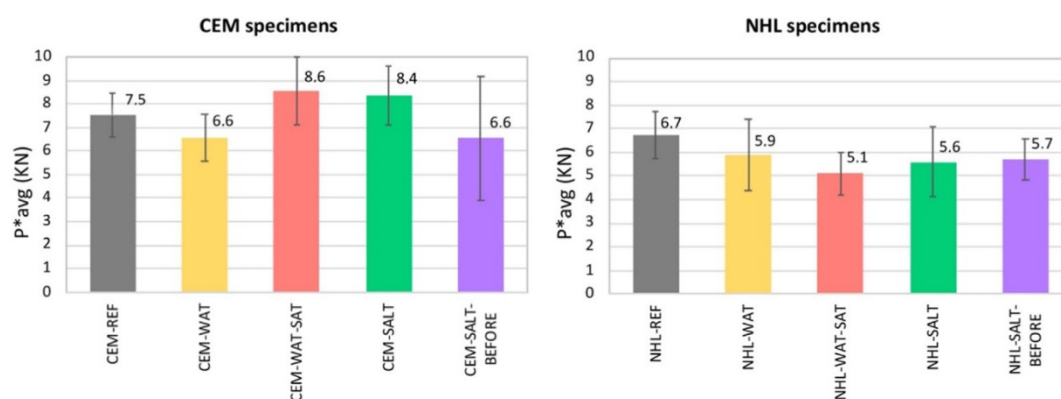


Fig. 6. Results of the direct shear tests in term of average peak load, P^*_{avg} , for each group: a) CEM specimens; b) NHL specimens. Data for NHL specimens are taken from [16].

Figura La Durabilità dei Sistemi di Rinforzo FRCM (Stato dell'Arte)-4: Risultati Shear tests provini con malte differenti, Franzoni et al. (2019).

Il lavoro ha inoltre sottolineato l'importanza di armonizzare la compatibilità igroscopica tra il composito e il supporto murario, al fine di evitare differenze di assorbimento che possono amplificare le sollecitazioni interne. Nel complesso, gli studi di Franzoni et al. hanno introdotto una visione microstrutturale del degrado, andando oltre la semplice valutazione delle prestazioni meccaniche per analizzare i processi fisico-chimici alla base della perdita di adesione. I risultati hanno evidenziato come la scelta della matrice rappresenti un parametro chiave: una formulazione adeguata può agire da barriera parziale alla penetrazione dei sali e mitigare la disgregazione del legame interfaccia. Proseguendo su questa linea, Yin et al. (2022) hanno studiato la prestazione di adesione tra FRCM e muratura sottoposta a erosione salina prolungata. In questo caso le fibre studiate sono in vetro e carbonio. I campioni sono stati immersi in soluzioni saline contenenti differenti percentuali (da 1 a 4%) di NaCl e (da 2 a 8%) di NaSO₄, per 6, 12 e 24 cicli. Successivamente, sono state eseguite prove di distacco diretto e analisi microstrutturali. Dopo 24 cicli, la resistenza di adesione si è ridotta di circa 35% rispetto

ai campioni di riferimento, con una parallela diminuzione della rigidezza e un aumento dello scorrimento (Fig. 2-5).

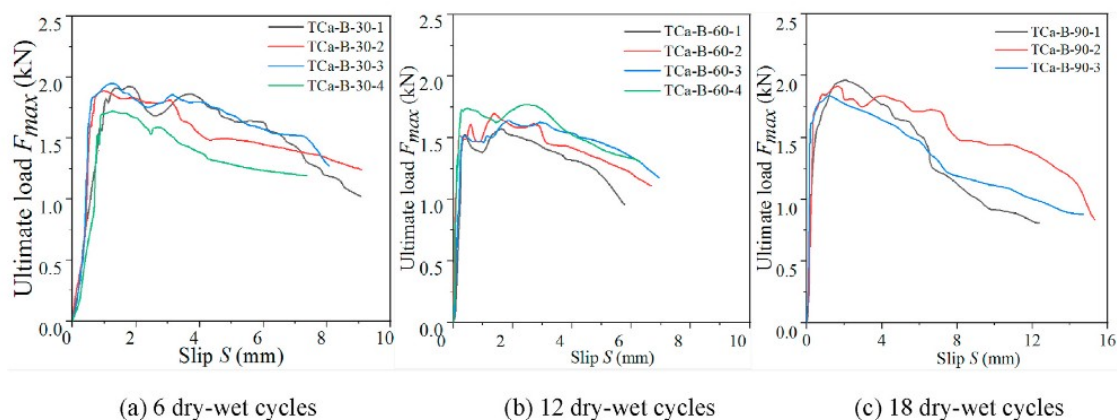


Fig. 9. Load-slip curves of FRCM and masonry specimens under different dry-wet cycles.

Figura La Durabilità dei Sistemi di Rinforzo FRCM (Stato dell'Arte)-5: Resistenza di adesione di provini soggetti a differenti cicli di caldo-umido, Yin et al. (2022).

Le analisi microscopiche hanno evidenziato una forte presenza di cloruri nella matrice e perdita di coesione nel contatto fibra-matrice. Yin e colleghi hanno sottolineato che l'azione combinata di attacco chimico e cristallizzazione dei sali rappresenta la principale causa del degrado, suggerendo l'impiego di malte con additivi impermeabilizzanti o pozzolanici per limitare la diffusione ionica. Questi studi su muratura concordano nel rilevare che la durabilità del legame dipende fortemente dalla microstruttura della matrice e dalla permeabilità ai cloruri, indicando che anche piccole variazioni di composizione o porosità possono modificare sensibilmente la risposta a lungo termine. Emerge come entrambi gli studi mettano in evidenza che la degradazione dell'interfaccia rappresenti il principale punto critico dei sistemi FRCM in ambiente salino.

Nel complesso (Tab. 2-6), la letteratura sull'esposizione in ambiente salino mostra che i sistemi FRCM sono governati da meccanismi di degrado prevalentemente interfacciali, più che da un danneggiamento diretto delle fibre. Questo aspetto è particolarmente rilevante per i sistemi in PBO, che, pur essendo chimicamente molto stabili nei confronti dei cloruri, possono comunque subire una marcata perdita di efficacia strutturale quando il legame con la matrice o con il substrato viene compromesso. Gli studi di Franzoni et al. (2017, 2018 e 2019) hanno chiaramente dimostrato che, in presenza di cicli di risalita capillare e cristallizzazione salina, il

carico di distacco degli FRCM applicati su muratura può ridursi fino al 20-30%, a causa della perdita di coesione della matrice e dell'accumulo di cristalli di sale nei pori. Anche quando la fibra non mostra degrado chimico diretto, la matrice diventa progressivamente più fragile e permeabile, favorendo il distacco interfacciale. In modo coerente, Yin et al. (2022) hanno osservato che, dopo esposizione a soluzioni saline, la resistenza di adesione FRCM-muratura può diminuire di circa 30-40%, con una transizione sistematica verso rotture per decoesione all'interfaccia matrice-substrato. Questo meccanismo è particolarmente penalizzante per sistemi in PBO, che normalmente sviluppano elevate tensioni di ancoraggio: quando l'interfaccia si degrada, l'elevata capacità resistente della fibra non può più essere sfruttata. Analogamente, Wang et al. (2023), studiando compositi tessili applicati su calcestruzzo esposto ad acqua marina e cicli bagnato-asciutto, hanno misurato riduzioni dell'aderenza dell'ordine del 25-30%, mostrando che anche su substrati in calcestruzzo il degrado è dominato dall'infiltrazione di cloruri nella matrice piuttosto che da un danneggiamento del rinforzo. Nel loro insieme, questi risultati indicano che i sistemi FRCM in PBO, sebbene superiori rispetto a vetro e basalto in termini di stabilità chimica della fibra, rimangono vulnerabili in ambiente salino a causa del degrado della matrice e dell'interfaccia. In condizioni di esposizione prolungata o ciclica, la perdita di prestazioni può raggiungere valori dell'ordine del 15-30%, rendendo evidente che la durabilità del sistema non è controllata dalla fibra in sé, ma dalla capacità della matrice di limitare la diffusione dei cloruri e la cristallizzazione dei sali. Di conseguenza, per applicazioni in ambiente marino o salino, l'adozione di fibre in PBO rappresenta una scelta vantaggiosa ma non sufficiente: è imprescindibile una progettazione mirata della matrice, con bassa permeabilità e additivi pozzolanici o impermeabilizzanti, per preservare nel tempo l'efficacia del rinforzo e consentire alla fibra di esprimere appieno le sue elevate prestazioni meccaniche.

Studio	Fibra	Matrice	Substrato	Protocollo invecchiamento	Tipo di test	Perdita/Incremento resistenza (Max)
Arboleda et al. (2014)	Carbonio	Cementizia	Calcestruzzo	Immersione 1000-3000 h	Direct tensile test, Pull-off	-20%; -15%;
	PBO					-20%; -15%
Donnini (2019)	Vetro AR	Idraulica	Muratura	Immersione 1000h o 10 cicli immersione/forno 60°C	Single lap Shear test	-29% -20%
Fares et al. (2025)	Acciaio	Idraulica	-	Immersione 1000-	Direct tensile test	-22,6%

		Cementizia		3000 h		
Alatawna et al. (2022)	Carbonio	Cementizia	-	Immersione 21 giorni, 21 cicli immersione + asciugatura 40°C	Direct tensile test	-20% -54%
Calabrese et al. (2022)	PBO	Cementizia	-	Immersione 1000 e 3000 h	Direct tensile test	-27%
Bompadre & Donnini (2022)	Carbonio	Cementizia	-	Immersione 1000 h 40°C	Direct tensile test	+2,5%
Donnini et al. (2020)	Vetro AR	Cementizia	-	Immersione 1000h 40°C	Direct tensile test	+5,5%
Franzoni et al (2017)	Acciaio	Idraulica	Muratura	Cicli immersione/forno 60°C	Single lap Shear test	-30%
Franzoni et al (2018)	Acciaio	Idraulica	Muratura	6 Cicli immersione/forno 60°C	Single lap Shear test	-22%
Franzoni et al (2019)	Acciaio	Idraulica Cementizia	Muratura	6 Cicli immersione/forno 60°C	Single lap Shear test	-22% +14%
S. Yin et al (2022)	Vetro+Carbonio	Cementizia	Muratura	6-24 cicli immersione/forno	Single lap Shear test	-35%
Wang et al (2023)	Vetro+Carbonio	Cementizia con acqua marina	Calcestruzzo	270 cicli immersione/forno 40°	Single lap Shear test	-30%
S. Yin et al. (2016),	Vetro+Carbonio	Cementizia	Calcestruzzo	60-90 cicli immersione/forno 40°	Single lap Shear test	-20%
S. Yin et al. (2020)	Vetro+Carbonio	Cementizia	Calcestruzzo	150 cicli immersione/forno 60°C	Pull-out	-10%
Li et al. (2021)	Vetro+Carbonio	Cementizia	Calcestruzzo	300 cicli immersione/forno 20°	Eccentric compression	-23%
Sheng et al. (2021)	Vetro+carbonio	Cementizia	Calcestruzzo	125 cicli immersione caldo(5°C)/freddo(-18°C)	Flexural	-40%

Tabella La Durabilità dei Sistemi di Rinforzo FRCM (Stato dell'Arte)-6: Effetto dell'invecchiamento salino sulle proprietà meccaniche del FRCM in letteratura.

2.1.5 Cicli gelo-disgelo

Il degrado indotto dai cicli di gelo e disgelo (freeze–thaw, FT) rappresenta il classico fenomeno di deterioramento per edifici, sia in muratura che in cemento armato, esposti a climi freddi o a forti escursioni termiche. Nei sistemi FRCM, la natura inorganica della matrice e la porosità intrinseca rendono tali materiali particolarmente sensibili a questo tipo di condizionamento ambientale. Durante questi cicli, l'acqua presente nei pori congela e si espande, generando pressioni interne che causano microfessure, perdita di coesione nella matrice e distacco all'interfaccia con la fibra o con il substrato. Tuttavia, diversi studi hanno dimostrato che, entro determinati limiti di esposizione, i compositi possono mantenere buone prestazioni meccaniche grazie alla compatibilità termica e igroscopica tra matrice e rinforzo. In generale, le ricerche presenti in letteratura concordano nel considerare che i principali parametri che influenzano la resistenza ai cicli FT siano: il livello di saturazione, la porosità della matrice, il coefficiente di dilatazione e il numero e l'intensità dei cicli applicati. Come si vedrà ogni studio utilizza un differente set up di condizionamento (differenti temperature, differenti numeri di cicli ecc.) questo rende gli studi poco confrontabili; si necessita, quindi, di protocolli di invecchiamento più standardizzati, carenti soprattutto per questo tipo di condizionamento. Di seguito vengo riportate alcune ricerche significative sull'argomento. Arboleda et al. (2014), hanno analizzato l'effetto combinato di diversi condizionamenti (gelo-disgelo, umidità e temperatura) su compositi con fibre di vetro e carbonio. I campioni sono stati sottoposti a 300 cicli FT ($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ / $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$) e successivamente testati a trazione. I risultati hanno mostrato che la resistenza a trazione e la rigidità globale subiscono una riduzione moderata, rispettivamente del 10-15%, senza alterazioni significative del meccanismo di fessurazione. Tuttavia, le prove di adesione hanno evidenziato una diminuzione più marcata della forza all'interfaccia (fino al 30%), attribuita alla microfessurazione della matrice e all'intrusione dell'acqua nei pori. Lo studio di Colombo et al. (2015) presenta una ricerca sul comportamento meccanico a trazione dei compositi TRC soggetti a cicli di gelo-disgelo in condizioni sia integre sia fessurate. Gli autori hanno sottoposto i provini a 500 cicli FT (tra $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$), in accordo con la norma UNI EN 12390-9, analizzando l'evoluzione della curva sforzo-deformazione e del danneggiamento all'interfaccia. I risultati mostrano che il comportamento in trazione rimane sostanzialmente invariato per i campioni non fessurati, con riduzioni della resistenza intorno al 20%, mentre nei provini già fessurati si osserva un degrado più marcato del legame fibra-matrice, con perdita di

rigidezza e riduzione della deformazione ultima. L'analisi microstrutturale ha evidenziato che il danno si concentra nella zona di contatto tra fibra e malta, dove il gelo provoca un progressivo distacco superficiale della fibra. Nobili e Signorini (2017) hanno esaminato l'influenza del tempo di maturazione e delle condizioni ambientali sul comportamento meccanico di fibre di carbonio impregnate e matrice cementizia. Lo studio ha incluso cicli di gelo-disgelo e condizionamenti termo-igrometrici, valutando la risposta a trazione e la durabilità del legame fibra-matrice. I risultati mostrano che, dopo esposizione a 20 cicli FT ($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ / $+37\text{ }^{\circ}\text{C}$), la resistenza a trazione si riduce di circa 8-12%. Le analisi microscopiche hanno mostrato microfessure diffuse e distacchi puntuali del film di impregnazione superficiale delle fibre, responsabili della riduzione di adesione. De Munck et al. (2018) hanno studiato l'effetto di 100 cicli FT ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ / $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$) su compositi con fibre di vetro AR. I risultati mostrano una riduzione del 19% della resistenza alla prima fessurazione e del 16% della resistenza ultima, ma senza modifiche significative nella distribuzione delle fessure. Lo studio mostra che i cicli di gelo-disgelo producono effetti moderati, limitandosi a una leggera perdita di adesione fibra-matrice. La matrice a base cementizia mostra una buona stabilità, confermando l'efficacia del sistema FRCM. Dalalbashi et al (2021) hanno analizzato murature rinforzate con FRCM a base di calce idraulica e tessuto in fibra di vetro AR, sottoposte fino a 360 cicli FT con temperature varianti tra $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e umidità del 90%. I risultati mostrano che, nonostante il degrado progressivo dell'interfaccia, la resistenza meccanica complessiva della muratura rinforzata non subisce cali significativi fino a 180 cicli, mentre a 360 cicli si registra una perdita di circa 25% del carico massimo e del 50% dell'energia di distacco. Proseguendo l'indagine precedente, Dalalbashi et al. (2022) hanno esaminato il comportamento fibra-matrice di compositi con fibre di vetro e acciaio, esposti a 360 cicli FT (da $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Le prove di pull-out mostrano un aumento iniziale della resistenza fino a 180 cicli (dovuto alla continua idratazione della calce), seguito da un deterioramento fino al 40-50% a 360 cicli. Mostrando che il danno cumulativo si concentra principalmente all'interfaccia fibra-matrice e dipende dalla composizione della fibra. Le fibre metalliche risultano più vulnerabili rispetto a quelle in vetro per la loro maggiore conducibilità termica e potenziale corrosione. Bompadre e Donnini (2022) ha analizzato l'effetto di diversi trattamenti superficiali delle fibre di carbonio sull'adesione e sulla durabilità in malte cementizie esposte a cicli di gelo-disgelo e ambienti umidi. I provini sono stati sottoposti a 40 cicli FT ($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ / $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$) e successivamente testati a trazione diretta e pull-out. I risultati hanno evidenziato che i trattamenti superficiali basati su resine epossidiche e coating silanici migliorano l'adesione iniziale, ma possono subire un deterioramento progressivo a causa della differente risposta termica tra rivestimento e matrice. Al contrario, le fibre con trattamenti

minerali (a base di silice o allumina) hanno mostrato la migliore stabilità meccanica e chimica, con variazioni di resistenza inferiori al 10% dopo l'invecchiamento.

Nel complesso (Tab. 2-7), la letteratura sui cicli di gelo–disgelo mostra che i sistemi FRCM sono generalmente meno vulnerabili al danno chimico rispetto agli ambienti alcalini o salini, ma risultano sensibili ai meccanismi di degrado fisico legati alla saturazione d'acqua e alla microfessurazione della matrice. I dati disponibili indicano che, entro 100-300 cicli FT, le riduzioni di resistenza a trazione dei compositi sono in genere contenute entro il 10-20% (Arboleda et al., 2014; Colombo et al., 2015; De Munck et al., 2018), mentre le perdite più marcate riguardano il legame interfacciale, che può ridursi fino al 30-50% nei casi di esposizioni prolungate o in presenza di fessurazione preesistente (Dalalbashi et al., 2021, 2022). Sebbene gli studi disponibili riguardino prevalentemente fibre di vetro, acciaio e carbonio, questi risultati sono altamente rilevanti anche per i sistemi in PBO. Infatti, il PBO è una fibra chimicamente stabile e non igroscopica, e quindi intrinsecamente meno vulnerabile ai meccanismi di degrado diretto legati al gelo. Tuttavia, come evidenziato dagli studi su altri tessuti ad alte prestazioni, il comportamento del sistema sotto cicli FT è dominato non dalla fibra, ma dalla matrice e dall'interfaccia fibra-matrice, che subiscono microfessurazione e perdita di adesione per effetto dell'espansione dell'acqua congelata. In questo senso, i risultati di Colombo et al. (2015) e Arboleda et al. (2014), che mostrano perdite limitate di resistenza globale ma un degrado significativo dell'aderenza, indicano che anche nei sistemi in PBO ci si deve attendere una progressiva riduzione della capacità di trasferimento degli sforzi, pur in presenza di fibre che rimangono meccanicamente integre. Questo è particolarmente critico per il PBO, che sviluppa elevate tensioni di ancoraggio: un degrado anche moderato dell'interfaccia può impedire al tessuto di mobilitare la propria elevata resistenza. Gli studi sui trattamenti superficiali (Bompadre & Donnini, 2022) rafforzano questa interpretazione, mostrando che i rivestimenti organici possono deteriorarsi sotto cicli FT per incompatibilità termo-igrometriche, mentre i trattamenti minerali garantiscono una migliore stabilità. Ciò suggerisce che, per sistemi in PBO-FRCM destinati a climi freddi o soggetti a cicli gelo-disgelo, la progettazione dell'interfaccia (scelta della matrice, porosità, trattamento del tessuto) è un fattore decisivo quanto, se non più, della scelta della fibra. In sintesi, la letteratura indica che i sistemi in PBO dovrebbero presentare una buona resistenza intrinseca al gelo-disgelo, ma la loro affidabilità a lungo termine dipende dalla capacità della matrice di limitare la saturazione e la microfessurazione. In condizioni di esposizione prolungata (oltre 200-300 cicli FT), la perdita di adesione può raggiungere valori dell'ordine del 30-50%, rendendo necessario l'uso di matrici

a bassa permeabilità e interfacce ottimizzate per preservare le elevate prestazioni meccaniche tipiche dei rinforzi in PBO.

Studio	Fibra	Matrice	Substrato	Protocollo invecchiamento	Tipo di test	Perdita/Incremento resistenza (Max)
Arboleda et al. (2014)	Vetro	Cementizia	-	300 cicli	Direct tensile test	-10%
	Carbonio			-18°C/+25°C		-15%
Colombo et al. (2015)	Vetro AR	Cementizia	-	25-500 cicli -18°C/4°C	Direct tensile test	-20%
Nobili e Signorini (2017)	Carbonio	Cementizia	-	20 cicli 37°C/-18°C	Direct tensile test	-12%
De Munck et al. (2018)	Vetro AR	Cemntizia	-	100 cicli 20°C/-20°C	Direct tensile test	-16%
Dalalbashi et al (2021)	Acciaio	Idraulica	-	60-360 cicli 30°C/-10°C	Direct tensile test	-25%
Dalalbashi et al. (2022)	Vetro AR	Idraulica	Muratura	60-360 cicli 30°C/-10°C	Single lap Shear test	-45%
Bompadre e Donnini (2022)	Carbonio	Cementizia	-	40 cicli -18 °C / +40 °C	Pull-out test	-27%

Tabella La Durabilità dei Sistemi di Rinforzo FRCM (Stato dell'Arte)-7: Effetto dei cicli gelo/disgelo sulle proprietà meccaniche del FRCM in letteratura.

3 Il problema degli interventi su edifici esistenti in cemento armato

Gli edifici in cemento armato, realizzati prevalentemente tra l'inizio del XX secolo e gli anni Settanta, rappresentano una componente rilevante e diffusa del patrimonio costruito europeo. Essi testimoniano una fase cruciale dell'evoluzione tecnologica e architettonica, caratterizzata dall'introduzione del calcestruzzo armato come materiale strutturale dominante e dalla sperimentazione di nuove forme, tipologie e soluzioni costruttive. Nonostante il loro indubbio valore storico e culturale, tali edifici sono stati a lungo esclusi dai processi di tutela e conservazione, soprattutto se confrontati con il patrimonio in muratura o con i beni monumentali tradizionali. Questa marginalizzazione è riconducibile a molteplici fattori. Da un lato, il calcestruzzo armato è stato storicamente percepito come un materiale "moderno", industriale e intrinsecamente durevole, portando a sottovalutare la sua vulnerabilità ai fenomeni di degrado nel lungo periodo. Dall'altro, molti edifici in cemento armato del XX secolo sono associati a funzioni ordinarie-edilizia residenziale, industriale o infrastrutturale e a contesti urbani privi di riconoscimento monumentale, rendendo più difficile l'attribuzione di un valore culturale condiviso. Tale atteggiamento ha contribuito a ritardare lo sviluppo di approcci metodologici specifici per la loro conservazione (A. Canziani, W. Quist, 2015; ICOMOS, 2017). Negli ultimi decenni, tuttavia, l'architettura moderna ha progressivamente acquisito una crescente rilevanza nel dibattito scientifico e culturale internazionale. L'influenza del Modernismo nella pratica architettonica contemporanea e il riconoscimento del valore testimoniale delle opere del XX secolo, hanno favorito una revisione critica delle strategie di conservazione, superando la tradizionale contrapposizione tra tutela del patrimonio storico e intervento sull'edilizia "moderna". In questo contesto, la conservazione non è più intesa come una mera azione di protezione passiva, ma come un processo progettuale complesso, che richiede l'integrazione di competenze architettoniche, strutturali e materiali.

Gli edifici storici in cemento armato comprendono una vasta gamma di tipologie edilizie, tra cui edifici religiosi, musei, complessi industriali e residenziali, ciascuno caratterizzato da specifiche soluzioni costruttive e differenti livelli di sperimentazione tecnologica. Sebbene per lungo tempo tali strutture siano state considerate prive di valore storico, studi recenti hanno evidenziato il loro ruolo come risorsa culturale, sociale ed economica, sottolineando la necessità di strategie di conservazione dedicate (Figenschau, 2019). Le loro enormi dimensioni e il loro massiccio involucro, insieme alla loro vicinanza ai centri urbani di tutta Europa, le rendono

punti di riferimento architettonici unici (G. Boccacci et al, 2023). Se ne deduce che la maggior parte del patrimonio edilizio ha iniziato ad invecchiare; negli ultimi decenni è sorta quindi l'esigenza di comprendere come ed in che modo intervenire su questo edificato esistente, quasi interamente composto da strutture in cemento armato. In più, sorge l'urgenza di comprendere come intervenire e come prevenire il degrado di edifici di pregio storico-culturale. A tal proposito sono nate, negli ultimi decenni organizzazioni con lo scopo di salvare e conservare opere del patrimonio architettonico moderno; tra le più note troviamo Docomomo International, il Comitato Scientifico Internazionale sul Patrimonio del XX secolo dell'ICOMOS ed altri. Il primo è nato nel 1988 ed è composto da un insieme di accademici e professionisti riunendo architetti, critici contemporanei, storici e conservatori. Il secondo ha iniziato la sua attività negli anni duemila lanciando Heritage Alerts, un programma di difesa dei luoghi minacciati e significativi del XX secolo, e adottando il Documento di Madrid: "Approaches for the Conservation of Twentieth-Century Architectural Heritage" (2011); inoltre ha stilato degli standard metodologici sull'approccio alla conservazione (Madrid-New Delhi Document 2017, The Cádiz Document 2022). Il tema della conservazione del patrimonio culturale moderno ha spinto, nel 2012, il Getty-Conservation Institute a attivare la Conserving Modern Architecture Initiative, con lo scopo di far conoscere e proteggere questo enorme patrimonio edilizio, creando anche finanziamenti concreti per la conservazione di alcune di queste costruzioni.

Dal punto di vista tecnico e conservativo, gli edifici storici in cemento armato presentano criticità specifiche, strettamente legate alle tecniche costruttive dell'epoca, alla qualità spesso eterogenea dei materiali impiegati e all'assenza di criteri progettuali orientati alla durabilità. Il calcestruzzo utilizzato nelle prime fasi di diffusione del materiale era caratterizzato da composizioni variabili, bassi controlli di qualità e ridotti spessori di copriferro, fattori che incidono significativamente sul comportamento a lungo termine delle strutture (Bertolini et al., 2008). I principali meccanismi di degrado includono la carbonatazione del calcestruzzo, la corrosione delle armature, l'attacco da sali e i cicli di gelo-disgelo, che spesso agiscono in modo sinergico, accelerando la perdita di prestazioni meccaniche e funzionali. Studi sperimentali e casi di monitoraggio hanno evidenziato come tali fenomeni possano manifestarsi anche in edifici relativamente giovani, smentendo l'idea di una durabilità intrinseca del calcestruzzo armato storicizzato (Bertolini et al. 2008; Boccacci et al. 2023).

La diversità e la varietà dell'evoluzione e degli usi del calcestruzzo in Europa divennero parte del suo fascino scientifico e del suo patrimonio. Sfortunatamente, questa variazione di solito si

traduce in diverse forme e velocità di degrado del calcestruzzo. A seconda dell'area e dell'età, il calcestruzzo storicizzato può variare in termini di composizione, struttura e costruzione (H. Heinemann, 2008). Di conseguenza, edifici di età simile in diversi paesi potrebbero non degradarsi allo stesso modo o allo stesso ritmo. Negli ultimi anni, ci sono stati diversi tentativi di effettuare uno screening dello stato di conservazione degli edifici in calcestruzzo. I tipi di danno più frequenti, riscontrati in queste ricerche, erano crosta nera, crescita biologica, erosione e corrosione indotta da carbonatazione. Per far alcuni esempi si può citare un progetto europeo recente, Innova Concrete, che ha condotto uno screening nel 2020. Con il supporto delle associazioni DOCOMOMO Iberico e ICOMOS, sono stati valutati 100 edifici del patrimonio culturale, individuati come significativi, in calcestruzzo in Europa. Lo screening ha raccolto informazioni di base su ciascun edificio e ha fornito una stima dello stato di conservazione da "scadente" a "buono". Si tratta di una stima soggettiva, poiché diversi paesi e professionisti possono avere idee diverse su cosa sia buono o cattivo, soprattutto per il calcestruzzo storicizzato. Un altro progetto di ricerca europeo importante è il JPI CONSECH20, in cui sono stati analizzati 48 edifici storici in calcestruzzo in quattro diversi paesi. I Paesi Bassi, Cipro, Italia-Genova e Repubblica Ceca presentano caratteristiche geografiche, climatiche, culturali, politiche ed economiche divergenti. Per valutare oggettivamente lo stato di conservazione degli edifici, è stato elaborato un metodo sperimentale. Sono stati condotti rilievi visivi con modelli e terminologia predefiniti per raccogliere informazioni sull'edificio e quantificare la tipologia, l'entità e la gravità del danno. Queste sono solo alcune ricerche che si sono attivate al fine di quantificare e monitorare il patrimonio costruito in cemento armato a significare l'importanza che la sua conservazione sta iniziando ad avere negli ultimi anni.

In dettaglio per quanto riguarda il degrado di tali strutture i rischi complessi e diversificati di degrado indotti dal clima minacciano costantemente la durabilità, l'aspetto visivo e l'integrità strutturale del calcestruzzo e delle sue armature metalliche, con una grande variabilità tra i paesi. Il calcestruzzo storicizzato è soggetto a deterioramento dovuto a variazioni ricorrenti di temperatura e umidità relativa, esposizione a precipitazioni dirette, deflusso di umidità, attacco di agenti ambientali, come acidi e sali (S. Li et al., 2022). Questi agenti ambientali possono favorire e accelerare processi di degrado come l'attacco di sali clorurati, cicli di gelo-disgelo, carbonatazione, reazione alcali-silice e solfatazione. Questi sono causa di diverse tipologie di danno tra cui: sfaldamento e delaminazione (spesso dovuti a formazioni di efflorescenze saline), singole lesioni, corrosione degli strati di armatura e ruggine, disintegrazione della matrice cementizia e crescita biologica (Pardo Redondo et al., 2021).

La figura 3-1 tratta da G. Boccacci et al. (2023) mostra l'evoluzione temporale degli studi condotti sui meccanismi indotti dal clima che influenzano gli edifici in cemento armato. Si può notare che l'interesse su questo argomento tende ad aumentare solo negli ultimi anni, sebbene il numero di lavori di ricerca non sia ancora elevato. G. Boccacci et al. (2023) ha analizzato l'affiliazione dei primi autori degli articoli, si è riscontrato che il 47% dei lavori di ricerca è stato condotto nel continente asiatico, il 22% in Europa, il 18% in Nord America, seguito da Africa, Sud America e Oceania. Infatti, i gruppi di ricerca cinesi hanno registrato il maggior numero di pubblicazioni sull'argomento, seguiti da Francia e Canada.

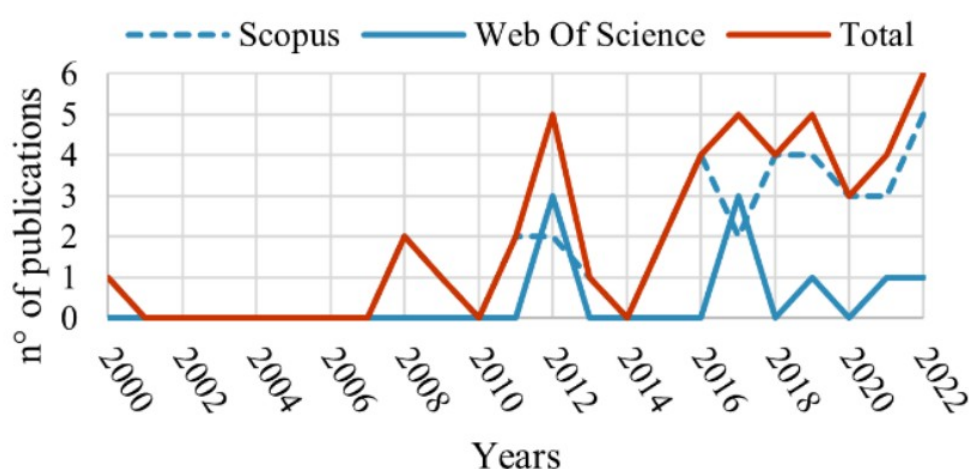


Figura Il problema degli interventi su edifici esistenti in cemento armato-6: Distribuzione delle ricerche per anno di pubblicazione (G. Boccacci et al. 2023).

Il tipo di degrado più indagato, visibile in figura 3-2, secondo questa ricerca (dal punto di vista dei processi di degrado indotti dal clima) è stato quello di degrado chimico (36% dei casi), seguito da quello meccanico (32%). È chiaramente visibile come sia il degrado chimico che quello meccanico siano stati segnalati come principalmente innescati da processi di alterazione dei sali (rispettivamente 85% e 29%). Infatti, sali solubili come cloruro, carbonato, solfato e fosfato provenienti dalle falde acquifere, dal terreno umido o dal mare possono essere trasportati in soluzione attraverso i pori e i capillari del calcestruzzo; l'evaporazione dell'umidità provoca la cristallizzazione dei sali ed esercita una pressione sul calcestruzzo. Immediatamente dopo l'esposizione ai sali e i cicli di gelo-disgelo, i due meccanismi indotti dal clima maggiormente responsabili del danno meccanico nel cemento armato sono stati l'effetto termico e la reazione alcalino-silicea (entrambi nel 19% dei casi).

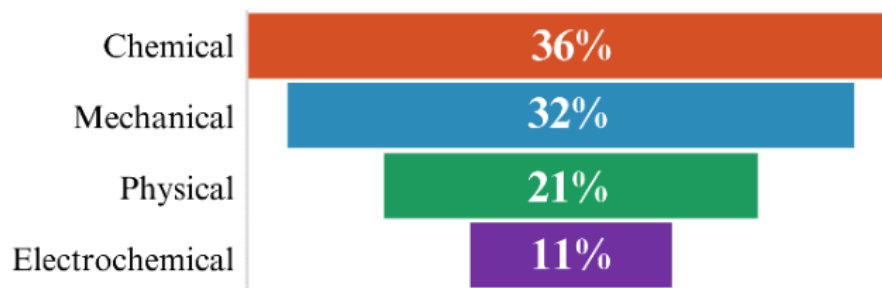


Figura Il problema degli interventi su edifici esistenti in cemento armato-7: Percentuale del tipo di analisi (chimica, fisica, meccanica o elettrochimica) effettuata in letteratura con approccio sperimentale (G. Boccacci et al. 2023).

In G.P. Redondo et al. (2021) vengono definiti come danni più ricorrenti, a conferma di quanto sopra detto: sfaldamento e delaminazione (16,42%), singole crepe (11%), corrosione degli strati di rinforzo-ruggine (8%), disintegrazione della matrice cementizia (6%) e danni correlati alla crescita biologica (scolorimento e macchie di umidità, 3,85% ciascuno). I danni raggruppati più ricorrenti sono stati la corrosione delle armature, la disintegrazione e la formazione di lesioni. Per quanto riguarda le ipotetiche cause di danno (fig. 3-3), le più ricorrenti sono state la corrosione indotta dalla carbonatazione (29%), la crescita biologica (24%) e la condensa superficiale (12%). Se simili, i processi di danno sono stati raggruppati in quattro categorie con i seguenti risultati: correlati all'umidità (35%), danni strutturali (13%), correlati all'ambiente (17%) e corrosione (35%). I risultati più rilevanti sono stati che le lesioni erano prevalentemente correlate alla corrosione e al danno strutturale, mentre la disgregazione era principalmente legata alla corrosione, all'umidità e ai processi ambientali.

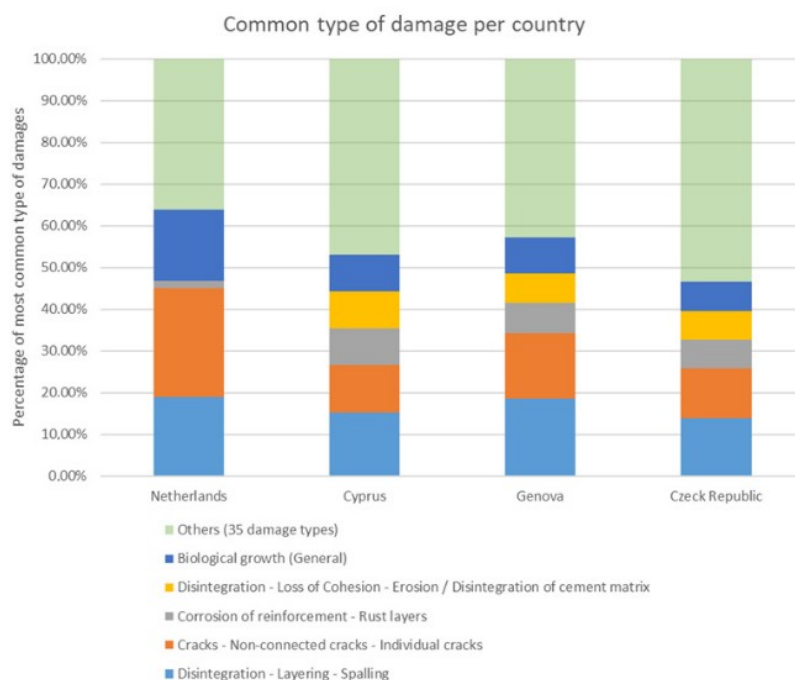


Figura Il problema degli interventi su edifici esistenti in cemento armato-8: Tipologia di danneggiamento per ogni territorio studiato in G.P. Redondo et al. (2021).

In generale si può dedurre che molti dei tipi di danno riscontrati, come corrosione, sfaldamento, crepe e crescita biologica, hanno un denominatore comune: l'umidità. La crescita biologica prospera in ambienti umidi su superfici in calcestruzzo (G. Escadeillas et al., 2009). Le lesioni sono principalmente legate alla corrosione dell'armatura, che non può verificarsi senza la presenza di umidità nel calcestruzzo: infatti, maggiore è il contenuto di umidità nel calcestruzzo, maggiore è il tasso di corrosione. Inoltre, la ridotta compattezza del calcestruzzo storico e il carattere più grossolano del materiale, dovuti ai metodi di compattazione più scadenti rispetto al calcestruzzo contemporaneo, possono accelerare il tasso di carbonatazione (I. Monteiro et al., 2012).

Una corretta manutenzione e l'uso continuativo dell'edificio sono direttamente collegati a un migliore stato di conservazione. Studi recenti evidenziano inoltre, come i cambiamenti climatici e l'aumento della frequenza di condizioni ambientali estreme rappresentino un ulteriore fattore di rischio per la conservazione degli edifici storici in calcestruzzo armato, in particolare per quelli esposti ad ambienti marini o industriali (G. Boccacci et al., 2023; P. Redondo et al., 2021). In tali contesti, l'azione di cloruri e solfati, unita alle variazioni termo-igrometriche, favorisce processi di cristallizzazione salina e microfessurazione interna, difficilmente rilevabili nelle fasi iniziali ma potenzialmente critici nel lungo periodo (L. Bertolini et al., 2008). I cambiamenti

globali in termini di concentrazione di anidride carbonica, temperatura e umidità associati al cambiamento climatico in corso potrebbero potenzialmente portare all'intensificazione (e all'accelerazione) dei processi di degrado dei materiali da costruzione, compromettendone la durabilità e la vita utile. È necessario aumentare l'interesse della comunità scientifica nell'integrazione di misure di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici nel campo della conservazione. Uno studio che si è concentrato sulla valutazione dei costi e dei benefici di un tipo di misura di adattamento climatico per edifici in cemento armato esistenti soggetti all'ingresso di cloruri e ai cambiamenti climatici è stato quello di E. Bastidas-Arteaga, M. G. Stewart (2015). Bisogna inoltre ricordare che una corretta manutenzione e l'uso continuativo dell'edificio sono direttamente collegati a un migliore stato di conservazione. La diffusione e l'attuazione di strategie di conservazione e manutenzione del calcestruzzo storico devono essere ulteriormente implementate dai proprietari e dagli attori coinvolti nel campo della conservazione.

Dal punto di vista strutturale, gli edifici storici in cemento armato risultano inoltre particolarmente vulnerabili all'azione sismica. La maggior parte di tali strutture è stata progettata in assenza di normative antisismiche, con dettagli costruttivi inadeguati e limitata capacità dissipativa. Il degrado dei materiali contribuisce ulteriormente a ridurre la sicurezza strutturale, alterando il comportamento globale dell'edificio e rendendo necessaria una valutazione integrata che consideri congiuntamente lo stato di conservazione e la risposta sismica (M. T. De Risi et al., 2023). Le strutture in calcestruzzo armato costruite prima del riconoscimento della sismicità del sito e dell'imposizione di normative sismiche per il progetto sono una importante componente del patrimonio edilizio italiano. Attualmente in Italia si stima che il 60% degli edifici esistenti siano stati costruiti in zone all'epoca classificate come non sismiche (M. T. De Risi et al., 2023). Inoltre, gran parte di tali edifici costruiti in calcestruzzo armato risalgono per lo più al trentennio post-bellico e hanno quindi raggiunto e superato la loro vita utile convenzionale di servizio; ciò potrebbe comportare l'insorgere di problemi di degrado e decadimento anche delle proprietà meccaniche degli elementi strutturali. Tra questi edifici si collocano anche numerosi casi di costruzioni che, per le loro caratteristiche architettoniche e storiche, sono considerate di interesse quali beni culturali e, come tali, presentano particolarità sia per la valutazione della vulnerabilità sismica sia, soprattutto, per l'individuazione di eventuali interventi di miglioramento sismico. Gli edifici in calcestruzzo armato non duttile costituiscono in tutto il mondo una significativa fonte di rischio sismico, a causa della loro vulnerabilità e della loro numerosità. La crisi di tali strutture può determinarne il collasso

globale con gravi danni economici e possibile perdita di vite umane. La limitata capacità di identificare situazioni critiche che possono portare al collasso le diverse tipologie di questi edifici e gli alti costi degli interventi di adeguamento insieme alle incertezze legate alla loro efficacia definiscono ulteriormente la gravità del problema. Molti progetti di ricerca a livello internazionale sono attualmente rivolti a questo tema, per il quale si riconosce la necessità di definire procedure aggiornate che permettano di stimare la vulnerabilità di tali edifici facendo riferimento a vari livelli di accuratezza e per diversi tipi di applicazione. Questi spaziano da strumenti che non richiedono analisi numeriche, quali semplici indicatori di collasso per il riconoscimento di situazioni critiche, fino allo sviluppo di indicatori più raffinati basati sulla definizione di procedure di analisi non-lineare (M. A. Parisi et al., 2013).

In M. A. Parisi et al (2013), è riportato un quadro sintetico (fig. 3-4) su base nazionale, della distribuzione riferita all'anno di costruzione, delle abitazioni in c.a. localizzate in zone dichiarate sismiche nel 2003, progettate e costruite con o senza riferimenti normativi antisismici. È significativo ed interessante osservare che, in zone classificate sismiche al 2003, quasi il 60% delle abitazioni (circa tre milioni) sono costruite senza riferimento a criteri antisismici imposti da una normativa. Inoltre, occorre considerare che le normative sismiche precedenti impostavano il problema della sicurezza in termini diversi e con obiettivi meno espliciti rispetto alla situazione attuale, che vede un chiaro riferimento agli stati limite di danno e di collasso e una esplicita trattazione del comportamento post-elastico. Ne consegue in termini generali un più basso livello di protezione. Quindi il problema della sicurezza degli edifici in c.a. alle azioni sismiche è probabilmente molto più esteso di quanto scaturisca dall'analisi dei dati ISTAT, e potrebbe riguardare anche gli edifici in c.a. progettati e realizzati con normative sismiche ormai obsolete e gli edifici in c.a. progettati a soli carichi verticali in zone non ancora ufficialmente riconosciute come sismiche.

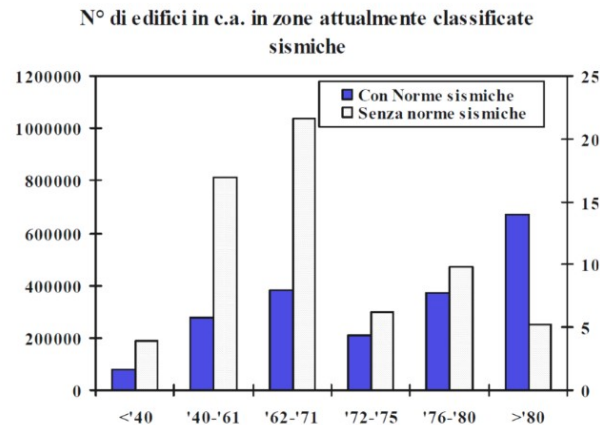


Figura Il problema degli interventi su edifici esistenti in cemento armato-9: Distribuzione degli edifici in c.a. ora in zona sismica, con riferimento ai requisiti normativi all'epoca di costruzione, (M. A. Parisi et al, 2013).

Un aspetto finora poco esplorato a riguardo delle costruzioni in c.a. pre-norma sismica riguarda il fatto che tra di esse vi sono edifici che, per la loro rilevanza storica o architettonica, sono considerati appartenenti all'ambito dei beni culturali. Per molti di essi, eventuali interventi dovranno essere eseguiti nell'ottica della conservazione e del miglioramento in campo sismico, secondo modalità più difficilmente individuabili, rispetto al caso di altre tipologie per le quali si è raccolta maggiore esperienza. Risulta quindi particolarmente importante poter disporre di studi su edifici di questa categoria sui quali poter definire criteri e procedure adeguati. Questo aspetto riguarda in particolare anche la valutazione della possibile risposta sismica.

Gli edifici in cemento armato, sia progettati prima sia dopo l'introduzione delle normative sismiche, presentano in genere meccanismi di collasso significativamente differenti rispetto a quelli delle strutture di nuova progettazione. Tali peculiarità devono essere adeguatamente considerate per una valutazione affidabile delle prestazioni sismiche e per una corretta mitigazione del rischio. Questo aspetto risulta particolarmente rilevante per gli edifici in cemento armato realizzati in Italia prima degli anni Settanta, periodo in cui la progettazione strutturale veniva generalmente condotta considerando esclusivamente i carichi gravitazionali.

A seguito di eventi sismici recenti, quali il terremoto dell'Aquila del 2009 e la sequenza sismica del Centro Italia del 2016, questi edifici hanno frequentemente manifestato modalità di collasso fragili, caratterizzate da crisi a taglio di travi e pilastri e da rotture nei nodi trave-pilastro. Le conseguenze economiche e sociali di tali vulnerabilità sono rilevanti: negli ultimi cinquant'anni, il governo italiano ha sostenuto un costo medio annuo di circa quattro miliardi di

euro (valore attualizzato al 2019) in termini di costi diretti e indiretti associati agli eventi sismici (M. Dolce et al., 2021). In questo contesto, l'implementazione di un piano di interventi di rafforzamento sismico su larga scala per il patrimonio residenziale esistente può risultare estremamente efficace nel ridurre sia le perdite economiche sia il numero di vittime attese in futuri eventi sismici. Tuttavia, il rapporto costo-efficacia di tali interventi deve essere attentamente valutato. Per affrontare questa sfida, le strategie di adeguamento sismico dovrebbero essere selezionate in modo da soddisfare le prescrizioni delle normative vigenti, prevenire il collasso strutturale e, al contempo, garantire una significativa riduzione delle perdite sismiche annuali attese, come evidenziato negli studi di R. Gentile et al. (2022) e D. Cardone et al. (2019).

La letteratura scientifica propone numerose strategie di retrofit, spesso confrontate tra loro in studi comparativi, che includono l'aggiunta di pareti di taglio in calcestruzzo, l'impiego di controventi o rinforzi in acciaio, il confinamento di pilastri mediante camicie in acciaio o calcestruzzo, nonché l'utilizzo di materiali compositi come FRP o FRCM per incrementare la resistenza e/o la capacità deformativa degli elementi strutturali (P. D. Gkournelos et al. 2021; C. C. Harrington et al. 2020). In questo ambito, A. B. Liel e G. G. Dierlein (2013) hanno condotto un'analisi costi-benefici per valutare l'efficacia di diverse strategie di retrofit nel ridurre il rischio sismico, in termini di danni e vittime, per edifici pre-codice in California. I risultati di tale studio hanno evidenziato come la salvaguardia della vita umana rappresenti il fattore dominante nella valutazione dei costi, supportando l'adozione di interventi di retrofit limitati ma mirati principalmente alla prevenzione del collasso. Parallelamente, studi più recenti hanno posto l'attenzione sull'integrazione tra interventi di adeguamento sismico e strategie di efficientamento energetico (M. Caruso et al. 2021; D. Pohoryles et al. 2022), nonché sulla riduzione dei tempi di inattività degli edifici a seguito degli interventi. Tuttavia, una revisione critica della letteratura evidenzia come molti studi sulla selezione e sull'efficacia delle strategie di retrofit per edifici in cemento armato propongano metodologie applicate a un numero limitato di casi studio o contesti geografici specifici. In molti casi, le analisi fanno riferimento a configurazioni *as-built*, includendo anche il contributo dei tamponamenti in muratura, ma si basano su modelli archetipici bidimensionali o su sistemi equivalenti a un grado di libertà. Il costo dell'intervento di retrofit viene raramente considerato in modo approfondito e risulta spesso stimato in maniera semplificata o sulla base di dati empirici disponibili, come osservato anche da A. B. Liel e G. G. Dierlein (2013), soprattutto quando l'analisi riguarda un'ampia popolazione di edifici. Alla luce della letteratura analizzata, emerge come il patrimonio edilizio

storico in cemento armato rappresenti una categoria di costruzioni caratterizzata da una complessità intrinseca, in cui problematiche di natura materiale, strutturale e culturale risultano fortemente interconnesse. Nonostante il crescente interesse della comunità scientifica, tali edifici continuano a essere sottorappresentati nei processi di tutela e negli studi sistematici, soprattutto se confrontati con il patrimonio storico tradizionale in muratura.

In conclusione, possiamo affermare che, i principali meccanismi di degrado, legati all'azione combinata di fattori ambientali, climatici e all'invecchiamento dei materiali, compromettono progressivamente le prestazioni meccaniche delle strutture e contribuiscono ad accentuarne la vulnerabilità sismica. In particolare, il degrado del calcestruzzo e delle armature influisce in modo significativo sulla capacità dissipativa e sui meccanismi di collasso, rendendo necessario un approccio di valutazione che integri la conservazione dei materiali con l'analisi della sicurezza strutturale. La letteratura evidenzia inoltre come le strategie di intervento e di retrofit sismico proposte siano spesso sviluppate su casi studio limitati e raramente tengano conto in maniera sistematica degli aspetti legati alla durabilità a lungo termine e alla compatibilità con il valore storico del manufatto. Il costo degli interventi e il loro impatto sul ciclo di vita hanno iniziato a rivestire, negli ultimi anni, un ruolo centrale nella definizione di politiche di mitigazione del rischio su larga scala. Nel quadro complessivo delineato in questo capitolo emerge con chiarezza come gli edifici storici in cemento armato non possano più essere interpretati esclusivamente come strutture tecniche da adeguare o sostituire, ma debbano essere riconosciuti come veri e propri beni culturali, portatori di valori storici, architettonici e materici specifici del Novecento. Il calcestruzzo armato non è infatti un semplice supporto strutturale neutro, ma costituisce parte integrante del linguaggio architettonico dell'edificio: la texture delle superfici, le geometrie delle sezioni, le modalità costruttive e persino le imperfezioni dovute alle tecnologie dell'epoca concorrono a definire l'identità del manufatto.

In questo contesto, il degrado dei materiali: carbonatazione, corrosione delle armature, attacco dei sali, gelo-disgelo e fenomeni legati all'umidità; non rappresenta soltanto una perdita di prestazione meccanica, ma anche una progressiva alterazione dell'espressività materica e della leggibilità storica dell'opera. Il distacco del copriferro, le macchie di ruggine, le efflorescenze saline e la disgregazione superficiale modificano non solo il comportamento strutturale, ma anche l'immagine e il significato culturale dell'edificio. La conservazione del cemento armato storico deve quindi essere intesa come una pratica che integra indissolubilmente sicurezza strutturale, durabilità e tutela dell'autenticità materiale.

Le analisi riportate in letteratura mostrano come il degrado e la vulnerabilità sismica siano fortemente interconnessi: la perdita di sezione delle armature, la riduzione dell'aderenza acciaio-calcestruzzo e la microfessurazione della matrice; compromettono la capacità dissipativa e favoriscono meccanismi di collasso fragili, tipici delle strutture ante norma sismica. Tuttavia, gli interventi di miglioramento o adeguamento sismico, se concepiti esclusivamente in termini di incremento di resistenza o rigidità, rischiano di risultare incompatibili con i valori di conservazione, introducendo materiali, geometrie o dettagli costruttivi estranei al linguaggio originario dell'edificio. Ne consegue la necessità di un cambio di paradigma: per il patrimonio storico in cemento armato, la progettazione degli interventi non può essere guidata solo da criteri di sicurezza o di costo/efficacia, ma deve fondarsi su un approccio critico e multidisciplinare, capace di valutare gli effetti delle soluzioni di retrofit anche sulla conservazione del materiale originale, sulla reversibilità, sulla compatibilità chimico-fisica e sulla percezione architettonica dell'opera. In questo senso, il concetto di durabilità assume un ruolo chiave non solo come estensione della vita utile strutturale, ma come strumento di tutela della memoria materiale del costruito. Alla luce delle problematiche illustrate come il degrado ambientale, il cambiamento climatico, la vulnerabilità sismica e carenza di protocolli specifici per il patrimonio moderno; risulta evidente come gli edifici storici in cemento armato rappresentino oggi uno dei fronti più complessi e urgenti della conservazione architettonica. Essi richiedono soluzioni di intervento capaci di coniugare efficacia strutturale, sostenibilità a lungo termine e rispetto del carattere originario dell'opera. In questa prospettiva, l'adozione di tecnologie di rinforzo compatibili, poco invasive e durabili, come i sistemi a matrice inorganica, si inserisce in modo coerente nel quadro più ampio della conservazione del patrimonio del Novecento, costituendo un possibile ponte tra le esigenze della sicurezza e quelle della tutela del linguaggio architettonico e materico del cemento armato storico.

3.1 Caso studio edificio “A” Sorgane

Al fine di comprendere il comportamento reale di un calcestruzzo storicizzato, si è ritenuto opportuno analizzare un edificio con una vita utile superiore ai 50 anni e per il quale fosse disponibile una conoscenza approfondita sotto il profilo storico-costruttivo e materico. La scelta è ricaduta sull’edificio “A. Savioli” (Fig. 3-5), oggetto di un recente e dettagliato studio condotto da Castellini M. (2024), che ha incluso un’analisi storico-costruttiva, una valutazione del degrado e un’approfondita caratterizzazione delle composizioni materiche.



Figura Il problema degli interventi su edifici esistenti in cemento armato-10: Vista esterna edificio “A. Savioli”, Sorgane, (<https://censimentoarchitetturecontemporanee.cultura.gov.it>).

L’edificio “A. Savioli” è situato nel quartiere di Sorgane, a Firenze, e rappresenta uno degli esempi più significativi dell’architettura residenziale moderna dell’area. Il progetto, realizzato nel 1963, è attribuito a Leonardo Savioli in collaborazione con gli ingegneri Melucci e Dezzi Bardeschi e con gli architetti Gori, Giorgini e Santi. Dal punto di vista geometrico, il fabbricato si sviluppa prevalentemente in direzione longitudinale, con una lunghezza complessiva di circa 180 m e una larghezza di circa 11 m. La struttura è articolata in tre unità principali, collegate tra loro mediante giunti strutturali con raddoppio del telaio.

Lo sviluppo in elevazione raggiunge un massimo di cinque piani fuori terra; il piano terra è concepito come uno spazio a pianta libera, delimitato esclusivamente dalla presenza di pilotis perimetrali, secondo i principi compositivi tipici dell'architettura moderna. La morfologia e la matericità del fabbricato riflettono in modo emblematico la concezione stilistica di Savioli, chiaramente riconoscibile nell'impiego del calcestruzzo a vista e nella presenza di pilastri rettangolari rastremati, elementi caratterizzanti sia dal punto di vista strutturale sia architettonico.

Come evidenziato nello studio di Castellini M. (2024), l'edificio presenta numerosi e diffusi segni di deterioramento, riconducibili principalmente all'azione dell'umidità, a infiltrazioni localizzate e alla presenza di percorsi preferenziali di deflusso delle acque meteoriche. In corrispondenza degli elementi strutturali a sbalzo sono state individuate armature scoperte, mentre in diverse porzioni dell'involucro si osservano fenomeni di fessurazione e distacco del copriferro, in alcuni casi anche successivi a precedenti interventi conservativi (Fig.3-6). Tali evidenze rendono l'edificio un caso studio particolarmente rappresentativo per l'analisi del comportamento e del degrado del calcestruzzo armato storico.



Figura Il problema degli interventi su edifici esistenti in cemento armato-11: Dettaglio segni di degrado su alcuni pilastri (Castellini M. 2024).

Lo studio di Castellini (2024) ha messo a confronto il comportamento di questo edificio con quello della stessa miscela riprodotta in laboratorio e sottoposta a invecchiamento accelerato. L'adozione di una miscela fedele all'originale ha permesso di ottenere una buona coerenza tra le proprietà meccaniche e fisico-chimiche misurate in situ e quelle rilevate nei provini, sia allo stato iniziale sia dopo l'esposizione ai principali meccanismi di degrado compatibili con le classi ambientali dell'edificio, in particolare carbonatazione e gelo-disgelo. Il confronto ha dimostrato che l'invecchiamento accelerato può riprodurre in modo significativo il degrado naturale osservato nell'edificio reale, fornendo una base sperimentale solida per la calibrazione dei modelli di durabilità. Tuttavia, la ricerca evidenzia anche che una correlazione diretta e universalmente valida tra tempi di esposizione accelerata e naturale non è ancora possibile, a causa di importanti limiti metodologici. In particolare, le principali criticità dei test accelerati riguardano:

- la differente modalità di applicazione delle azioni ambientali (unidirezionale o omnidirezionale rispetto alle condizioni reali, spesso combinate);
- la difficoltà di simulare correttamente l'azione simultanea di più meccanismi di degrado (ad esempio gelo-disgelo e carbonatazione);
- l'alterazione della cinetica dei processi dovuta all'accelerazione, come nel caso dei gradienti termici nei cicli di gelo-disgelo, che risultano molto più severi rispetto a quelli naturali;
- le incertezze sugli effetti dell'accelerazione sulla microstruttura del calcestruzzo, in particolare per fenomeni come la carbonatazione ad alte concentrazioni di CO_2 ;
- la forte dipendenza dei risultati dalla composizione della miscela di calcestruzzo (tipo di cemento, rapporto acqua/cemento, addizioni, inerti).

Nel complesso, lo studio dimostra che l'invecchiamento accelerato, se correttamente progettato e validato su casi reali, rappresenta uno strumento potente per comprendere e prevedere il degrado delle strutture in c.a. storiche. Allo stesso tempo, mette in evidenza la necessità di ampliare i database sperimentali e di sviluppare protocolli più rappresentativi delle condizioni reali, affinché tali modelli possano diventare strumenti affidabili per la conservazione e la gestione del patrimonio costruito in cemento armato.

3.2 Compatibilità tra rinforzo strutturale e linguaggio architettonico negli edifici in cemento armato storici

Le evidenze sperimentali sulla durabilità del calcestruzzo e dei materiali di rinforzo hanno una ricaduta diretta sulle prestazioni strutturali degli edifici in c.a. storici. Il degrado ambientale, in particolare: carbonatazione, cicli di gelo-disgelo e aggressione di agenti aggressivi; non agisce solo riducendo la resistenza meccanica del materiale, ma altera in modo sostanziale la qualità dello strato corticale, l'aderenza acciaio-calcestruzzo e la capacità di trasferimento degli sforzi. Ne consegue che la sicurezza strutturale degli edifici storicizzati in c.a. è spesso governata non tanto dalla resistenza "di massa" del materiale, quanto dallo stato di conservazione delle superfici, delle interfacce e delle zone di copriferro, ovvero delle parti più esposte all'ambiente e più rilevanti per l'innescare dei meccanismi di collasso. In questo quadro, le strategie di intervento non possono essere considerate unicamente in termini di incremento di capacità resistente, ma devono essere valutate anche rispetto alla loro compatibilità con un substrato invecchiato e con i meccanismi di degrado in atto. Interventi tradizionali di tipo invasivo, come l'incamiciatura in c.a., l'aggiunta di setti o l'ispessimento massivo degli elementi, seppur efficaci dal punto di vista strutturale, risultano spesso incompatibili con il carattere architettonico degli edifici del secondo Novecento, poiché ne alterano le proporzioni, la leggibilità strutturale e l'espressività del calcestruzzo a vista. I sistemi di rinforzo a matrice inorganica (FRCM), e in particolare quelli con fibre ad alte prestazioni come il PBO, rappresentano in questo contesto una delle soluzioni più promettenti per il patrimonio storico in cemento armato. Essi consentono infatti di incrementare la capacità resistente e la duttilità degli elementi strutturali con spessori ridotti, limitato impatto geometrico e buona compatibilità fisico-chimica con i supporti minerali, preservando la percezione dell'architettura e la leggibilità del sistema strutturale originale. Tuttavia, come emerso dalla revisione della letteratura, le prestazioni a lungo termine dei sistemi FRCM dipendono in modo critico dalla qualità del calcestruzzo esistente, dallo stato dello strato corticale e dalla stabilità dell'interfaccia fibra-matrice-substrato in presenza di azioni ambientali.

In conclusione, da un lato si ha la necessità di garantire adeguati livelli di sicurezza e durabilità, dall'altro la volontà di conservare il linguaggio architettonico dell'epoca, fondato sull'uso espressivo del calcestruzzo armato come materiale a vista, sulla leggibilità del sistema portante e sulla relazione tra struttura e forma. In questo senso, i sistemi FRCM si collocano in una posizione strategica, poiché offrono un compromesso avanzato tra efficacia strutturale e

compatibilità conservativa, a condizione che la loro progettazione sia basata su una conoscenza approfondita dello stato di degrado del calcestruzzo su cui vengono applicati.

4 Sperimentazione

La campagna sperimentale condotta nell'ambito di questa ricerca ha avuto l'obiettivo di valutare la durabilità meccanica dei sistemi FRCM in condizioni di invecchiamento accelerato, con riferimento a possibili scenari di degrado in ambiente mediterraneo. In particolare, l'attenzione è stata rivolta sia al comportamento intrinseco del composito sia alla risposta del sistema applicato su supporto, al fine di cogliere gli effetti del condizionamento ambientale sui diversi meccanismi resistenti.

Sono stati realizzati e testati due tipi principali di provini: coupon (strati di malta cementizia e fibra PBO), utilizzati per la caratterizzazione delle proprietà meccaniche del composito, e cubetti in calcestruzzo, su cui è stato applicato lo stesso sistema PBO-FRCM, al fine di valutare il comportamento del sistema in presenza di supporto. I provini sono stati sottoposti a differenti tipologie di invecchiamento accelerato, suddivise in due macrocategorie: immersione in ambienti salini (soluzioni secondo ASTM D1141-98 e da letteratura) e cicli caldo-umido (essiccazione più immersione).

Al termine dei cicli di condizionamento, i campioni sono stati sottoposti a diverse prove meccaniche:

- trazione diretta sui coupon;
- prova pull-off sui cubetti;
- prove di compressione e determinazione del modulo elastico sui cilindri ottenuti da carotaggio dei cubetti.

Sebbene l'efficacia dei sistemi FRCM sia fortemente legata alle proprietà di aderenza al supporto, in questa fase della ricerca si è scelto di adottare prove alternative al tradizionale single-lap shear test, privilegiando configurazioni sperimentali più semplici e riproducibili e maggiormente compatibili con le attrezzature disponibili. In particolare, la prova pull-off è stata utilizzata come indicatore della qualità del legame composito-supporto, pur nella consapevolezza delle sue limitazioni rispetto a prove di taglio diretto.

Le sezioni seguenti descrivono nel dettaglio i materiali, le modalità di preparazione dei provini, le condizioni di invecchiamento applicate e l'intero set-up sperimentale adottato.

4.1 Materiali impiegati nella sperimentazione

Di seguito vengono riportate le proprietà fisiche e meccaniche dei materiali utilizzati per questa sperimentazione.

4.1.1 La miscela del calcestruzzo

Al fine di simulare l'effettivo comportamento di un calcestruzzo esistente, il substrato è stato realizzato con una miscela che rispecchia, quanto più fedelmente possibile, quella utilizzata per la costruzione dell'edificio "A" di Sorgane. Per la realizzazione della miscela si è fatto affidamento su studi precedenti (Castellini M., 2024), dai quali, dopo un'attenta analisi delle fonti (elenco prezzi, certificato di collaudo ecc.), e dopo attente indagini mineralogico-petrografiche di alcuni campioni di calcestruzzo prelevati in opera, è stato possibile ricreare la formulazione della miscela utilizzata per la realizzazione di questo edificio. Scendendo in dettaglio (Tab. 4-1), tale miscela è composta da:

- Sabbia fine di cava (0-3 mm)
- Aggregato composto da Ghiaia (diametro medio 20 mm) e Pietrisco calcareo o siliceo (diametro 0-12 mm)
- Cemento classe 425
- Acqua, con rapporto acqua/cemento non superiore a 0,50.

a/c	Cemento (Kg/m ³)	Sabbia (Kg/m ³)	Aggregat o (Kg/m ³)	Acqua (Kg/m ³)
0,50	300	1160	1894	150

Tabella Sperimentazione-8: Composizione della miscela (Castellini M., 2024).

4.1.2 La fibra

La fibra usata è in PBO (poli-parafenilenben-zobisoxazolo). Il sistema scelto è il PBO-MESH 70/18 della ditta RureGold-Laterlite. La fibra (Fig. 4-1) è caratterizzata da un sistema bidirezionale non bilanciato, avente peso di 70 g/m² nella direzione dell'ordito e 18 g/m² nella

direzione della trama, spessore equivalente di 0,045 mm in ordito e 0,012 mm in trama. Presenta una densità di 1,56 g/cm³, resistenza ultima a trazione pari a 1532 MPa, modulo elastico del tessuto secco di 241 GPa ed una deformazione ultima a trazione pari a 1,63% (Tab. 4-2).



Figura Sperimentazione-12: Dettaglio rete in PBO.

Densità (g/cm ³)	Spessore equivalente (tf, mm)	Resistenza ultima a trazione (ffu, MPa)	Deformazione ultima (εfu, %)	Modulo elastico (Ef, GPa)
1,56	0,045	1532	1,63	241

Tabella Sperimentazione-9: Proprietà meccaniche, fornite dal produttore, della fibra in PBO.

4.1.3 La matrice

La matrice (Fig. 4-2) utilizzata è la Mx_PBO Calcestruzzo della ditta RureGold-Laterlite; è inorganica, a base cementizia e fibrata, specifica per supporti in calcestruzzo. Ha resistenza a compressione ≥ 40 MPa, una resistenza a flessione ≥ 4 MPa e modulo elastico ≥ 15 GPa.



Figura Sperimentazione-13: Dettaglio malta.

4.2 Tipologie e confezionamento dei provini

Di seguito vengono descritti i differenti tipi di provini studiati, coupon e cubetti in calcestruzzo, riportandone geometria, preparazione e suddivisione in funzione del tipo di invecchiamento accelerato subito.

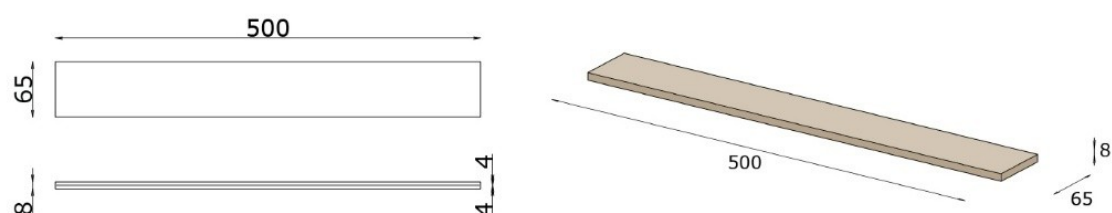
4.2.1 Coupon

In totale sono stati realizzati 104 coupon, composti da un solo strato di tessuto in PBO immerso tra due strati di malta cementizia aventi entrambi spessore di 4 mm. Questi provini sono stati realizzati tramite casseforme con struttura lignea e base in pellicola. Il confezionamento avviene nel seguente modo: viene inserito un primo strato di malta all'interno delle casseforme, sopra di esso viene posizionato accuratamente il tessuto, in modo da garantire il corretto allineamento. Infine, viene collocato il secondo strato di malta (Fig. 4-3). Terminata questa procedura i campioni vengono nebulizzati con acqua e coperti con uno strato di pellicola al fine di impedire una rapida evaporazione della parte a contatto con l'aria del provino, ed avere una maturazione più omogenea. I provini così confezionati rimangono a maturare per circa 4-5 giorni in ambiente controllato, finiti i quali vengono rimossi dalle casseforme e vengono lasciati maturare per altri 24 giorni in ambiente controllato, posizionando sopra di essi dei pesi per prevenire un'eventuale incurvatura.



Figura Sperimentazione-14: Realizzazione coupon

I provini coupon hanno dimensioni pari a $8 \times 65 \times 500$ mm (Fig. 4-4). La rete di rinforzo è caratterizzata da un'orditura costituita da 7 filamenti nella direzione dell'ordito e 28 filamenti nella direzione della trama. Questi sono stati preparati in nove fasi vedi Tab. 4-3.



Figura

ra Sperimentazione-15: Dimensioni dei coupon (mm).

FASI	N° PROVINI	DATA
1	10	12/09/2023
2	9	23/09/2023
3	8	03/10/2023
4	8	23/10/2023
5	15	21/03/2024
6	15	04/04/2024
7	15	08/05/2024
8	12	20/09/2024
9	12	27/09/2024

Tabella Sperimentazione-10: Fasi di preparazione dei coupon.

4.2.2 Suddivisione dei coupon per tipologie di invecchiamento

Terminato il periodo di maturazione, i coupon sono stati suddivisi in gruppi in funzione del differente tipo di invecchiamento accelerato subito. I campioni sono stati quindi nominati in base a questo raggruppamento, la tabella 4-4 mostra il numero ed il nome per ogni tipologia.

ID	N° PROVINI	INVECCHIAMENTO	N° CICLI
NT_n	8	Non trattati	-
S1_n	6	1000 h (ASTM D1141-98))	-
S3_n	6	3000 h (ASTM D1141-98)	-
SolL1000_n	6	1000 h (H ₂ O+Na ₂ SO ₄ (2%) +NaCl (4%))	-
SolL3000_n	6	3000 h (H ₂ O+Na ₂ SO ₄ (2%) +NaCl (4%))	-
SolS1000_n	6	1000 h (H ₂ O+Na ₂ SO ₄ (4%) +NaCl (8%))	-
SolS3000_n	6	3000 h (H ₂ O+Na ₂ SO ₄ (4%) +NaCl (8%))	-
CU_n	15	Forno 70°C	10; 20;
		Soluzione H ₂ O	30; 40; 50
CU50_n	15	Forno 50°C	10; 20;
		Soluzione H ₂ O	30; 40; 50
WDL_n	15	Forno 50°C	10; 20;
		Soluzione H ₂ O +Na ₂ SO ₄ (2%) +NaCl (4%)	30; 40; 50
WDS_n	15	Forno 50°C	10; 20;
		Soluzione H ₂ O+Na ₂ SO ₄ (4%) +NaCl (8%)	30; 40; 50

Tabella Sperimentazione- 11: ID provini.

4.2.3 Cubetti

In accordo con la UNI EN 12390-1:2021 sono stati realizzati 138 cubetti ma, per la campagna sperimentale, ne sono stati usati 114, di dimensioni 150x150x150 mm. Realizzati con casseforme in polistirolo conformi agli standard (Fig. 4-5). In merito al procedimento di confezionamento dei provini, si è fatto riferimento a quanto riportato in normativa UNI EN 12390-2:2019, con la specifica che la compattazione è stata eseguita con metodo manuale.





Figura Sperimentazione-16: Realizzazione cubetti.

I cubetti poi vengono lasciati maturare per 28 giorni a temperatura e ambiente controllati, seguendo quanto prescritto dalla UNI EN 12390-2, terminata la maturazione sono stati scasserati. I provini sono stati realizzati in 4 fasi differenti, vedi Tab. 4-5.

FASI	N° PROVINI	DATA
1	23	14/03/2023
2	24	30/03/2023
3	45	25/05/2024
4	46	28/05/2024

Tabella Sperimentazione-12: Fasi di preparazione dei provini.

Prima di suddividere e siglare i campioni, a seconda del tipo di condizionamento che dovevano subire, sono state fatte, su tutti e 138 i cubetti prove ultrasoniche, al fine di fare raggruppamenti di provini il più omogenei possibile. I test ultrasonici sono test di tipo non distruttivo che permettono di valutare l'uniformità e la continuità del materiale indagato e anche di individuare la possibile presenza di fessure o vuoti, nonché di valutare le caratteristiche della miscela. Misurano il tempo necessario a trasmettere un impulso tra una coppia di trasduttori attraverso il materiale indagato; permettono, quindi, di valutare la velocità di propagazione dell'impulso V_{us} (m/s). I test sono stati effettuati in conformità con la UNI EN 12504-4; sono state eseguite due serie di prove per cubetto, sulle coppie di facce contrapposte denominate A-A' e B-B' (precedentemente levigate), per ogni serie sono state fatte tre letture. Lo strumento utilizzato è il Matest C369N, con sonde da 55 kHz. I trasduttori hanno operato per trasmissione diretta,

posizionandoli, cioè, al centro dell'area di prova sulle facce contrapposte del provino, utilizzando, per l'accoppiamento sonda-faccia del provino, un gel apposito per ultrasuoni.

Sono state eseguite due serie di prove tramite i risultati delle quali sono stati selezionati 114 campioni divisi in gruppi omogenei e siglati (Fig. 4-6)

Come si può notare dai grafici, i test hanno dimostrato che i campioni presentano valori tra loro affini, che variano, nel complesso da un massimo di 4146, 05 m/s ad un minimo di 3817, 41 m/s con un valore medio di 3983,36 m/s ed un COV di 1,98%.

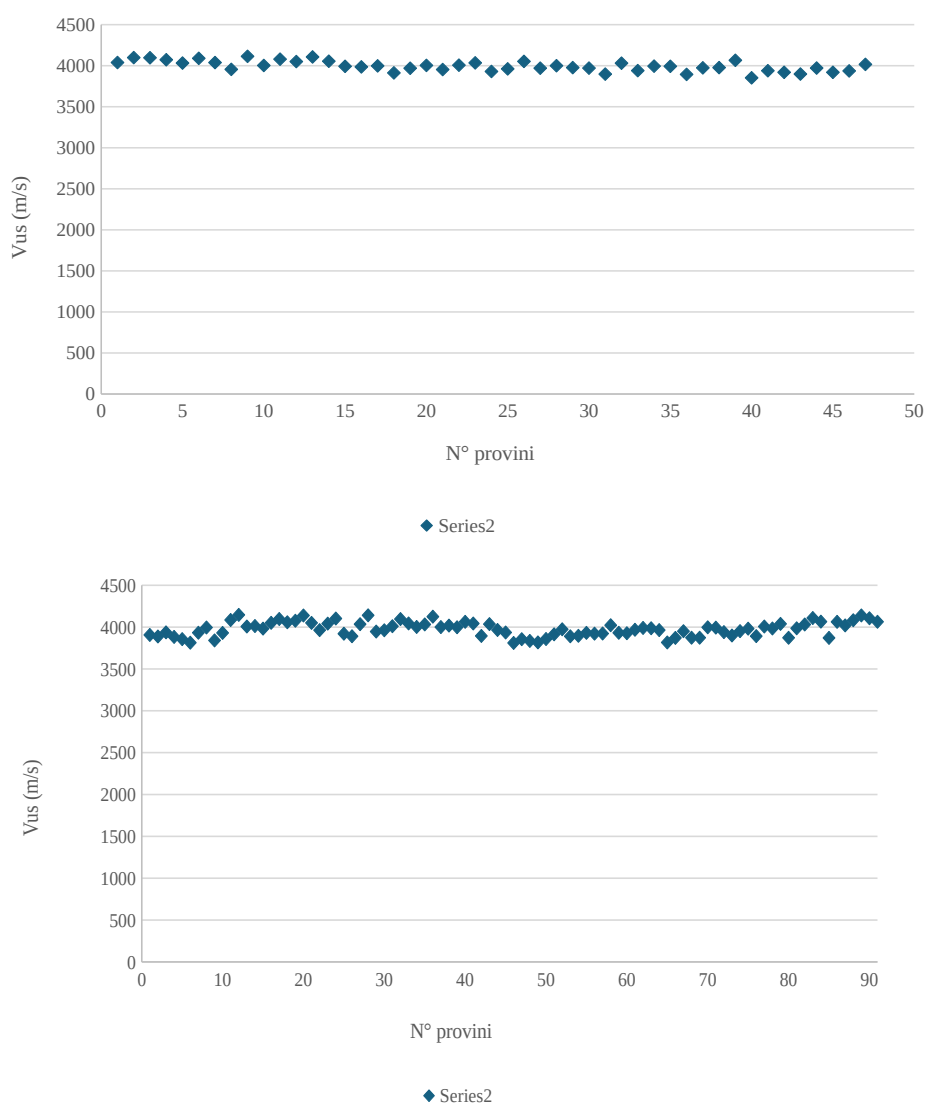


Figura Sperimentazione-17: Prima e Seconda serie test ultrasuoni, la nomenclatura in legenda fa riferimento alla suddivisione in base al tipo di invecchiamento, spiegata in dettaglio nei capitoli seguenti.

Una volta siglati, in funzione del trattamento previsto, due o quattro facce del cubetto vengono rese più ruvide al fine di aumentarne l'aderenza con la malta del composito applicato. Questo

procedimento è stato effettuato mediante spazzola metallica. In seguito, su una o due di queste facce, la rugosità è stata ulteriormente incrementata realizzando incisioni inclinate di 45° rispetto agli spigoli del cubetto, disposte secondo due direzioni tra loro opposte, in modo da ottenere una tessitura incrociata, mediante disco da trapano (Fig. 4-7).

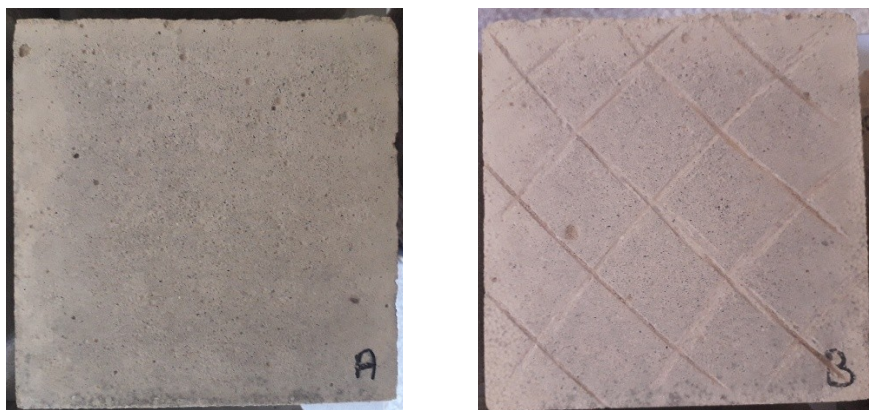


Figura Sperimentazione-18: Esempio del trattamento subito su due facce laterali di ogni cubetto.

Su queste viene poi applicato il composito (Fig. 4-8), caratterizzato dalla stessa composizione dei coupon, quindi costituito da un layer di fibra in PBO e due strati di 4 mm di malta cementizia. Il sistema FRCM è stato realizzato incollando, alle facce dei provini interessate, casseforme lignee quadrate di 134 x 134 mm e spessore di 8 mm (Fig. 4-9). La rete di rinforzo è caratterizzata da un'orditura costituita da 14 filamenti nella direzione dell'ordito e 7 filamenti nella direzione della trama

Una volta posizionato il composito, questo viene nebulizzato con acqua e coperto da uno strato di pellicola al fine di impedire una rapida evaporazione della parte a contatto con l'aria del provino. I provini vengono poi lasciati maturare, in ambiente controllato per 28 giorni. Questa procedura, su alcuni cubetti, è stata fatta prima di applicare l'invecchiamento accelerato, su altri è stata fatta a provino invecchiato ed in alcuni casi è stata fatta sia prima del condizionamento che dopo.



Figura Sperimentazione-19: Applicazione del composito sui cubetti.

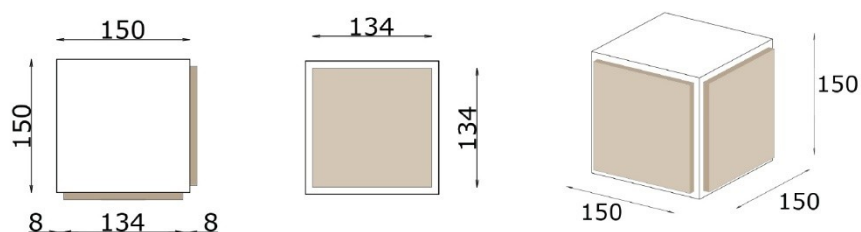


Figura Sperimentazione-20: Dimensioni cubetti (mm).

4.2.4 Suddivisione dei cubetti per tipologie di invecchiamento

A maturazione ultimata, i cubetti sono stati suddivisi in gruppi in funzione del differente tipo di invecchiamento accelerato subito, seguendo la stessa procedura effettuata per i coupon. La tabella 4-6 mostra in dettaglio il numero ed il nome per ogni tipologia.

ID	N° PROVINI	INVECCHIAMENTO	N° CICLI
CFV_n	6	Non trattati	-
CS1_n	6	1000 h (ASTM D1141-98)	-
CFS1_n	6	1000 h (ASTM D1141-98)	-
CS3_n	6	3000 h (ASTM D1141-98)	-
CFS3_n	6	3000 h (ASTM D1141-98)	-

ID	N° PROVINI	INVECCHIAMENTO	N° CICLI
SolL1000_n	6	1000 h (H ₂ O+Na ₂ SO ₄ (2%) +NaCl (4%))	-
SolL3000_n	6	3000 h (H ₂ O+Na ₂ SO ₄ (2%) +NaCl (4%))	-
SolS1000_n	6	1000 h (H ₂ O+Na ₂ SO ₄ (4%) +NaCl (8%))	-
SolS3000_n	6	3000 h (H ₂ O+Na ₂ SO ₄ (4%) +NaCl (8%))	-
T_n*	15	Forno 70°C	10; 20; 30; 40; 50
		Soluzione H ₂ O	
T70_n*	15	Forno 70°C	10; 20; 30; 40; 50
		Soluzione H ₂ O	
T50_n	15	Forno 50°C	10; 20; 30; 40; 50
		Soluzione H ₂ O	
TS1_n	15	Forno 50°C	10; 20; 30; 40; 50
		Soluzione H ₂ O +Na ₂ SO ₄ (2%) +NaCl (4%)	
TS2_n	15	Forno 50°C	10; 20; 30; 40; 50
		Soluzione H ₂ O +Na ₂ SO ₄ (4%) +NaCl (8%)	

*hanno subito lo stesso tipo di invecchiamento, ma ai provini T_n è stato applicato il composito prima dell'invecchiamento, mentre ai T70_n dopo l'invecchiamento.

Tabella Sperimentazione-13: ID provini.

4.3 Invecchiamento accelerato

Volendo simulare i possibili deterioramenti dovuti alle azioni ambientali, sono stati attuati processi di invecchiamento accelerato. In particolare, sono state scelte due tipologie, selezionate tenendo conto del possibile manifestarsi nella realtà di deterioramento e/o indebolimento dovuto ai classici fattori ambientali presenti in contesti urbani e costieri della zona mediterranea, in particolare riferendosi ad edifici in cemento armato. Si è focalizzata l'attenzione sul composito e sui tipi di invecchiamento accelerato presenti in normativa e, più in generale, in letteratura. Saranno spiegati approfonditamente nei paragrafi seguenti, distinguendoli in due macrocategorie; quella caratterizzata dalla sola immersione in soluzione (Ambiente Salino) e quella composta da cicli in cui viene eseguita un'immersione in soluzione e un periodo di essiccazione in forno (Cicli caldo-umido).

4.3.1 Ambiente salino

Il primo tipo di condizionamento scelto è quello presente sia nei criteri di accettazione statunitensi che nelle linee guida italiane riguardanti i sistemi FRCM. Si è scelto quindi di seguire la procedura indicata nella AC 434 (2018) che nelle CSLLPP (2019) focalizzandoci solo su una delle tipologie esposte in questi testi, quella riguardante la resistenza agli ambienti salini. Per avviare tale procedura si è seguito quanto prescritto nelle CSLLP; pertanto, i campioni soggetti a questo tipo di invecchiamento, sono stati immersi per un periodo di 1000 o di 3000 ore in una soluzione che simula l'acqua di mare. Tale soluzione è stata realizzata seguendo quanto prescritto dalla ASTM D1141-98. Data la quantità e la complessità delle sostanze chimiche che entrano in gioco e dato il nostro interesse nel realizzare tale soluzione il più fedelmente possibile, questa è stata realizzata dal dipartimento di chimica dell'università degli studi di Firenze, in particolare dal prof. Massimo Innocenti e dal suo team. Una volta realizzata la soluzione, la procedura consiste nell'immergervi per un periodo ininterrotto di 1000 e di 3000 ore i campioni. Una volta condizionati i provini vengono poi testati; i coupon sono sottoposti a prova di trazione mentre i cubetti prima a prova di pull-off ed in seguito sono state estratte delle carote soggette a prova di determinazione del modulo elastico e prova di compressione. In dettaglio i coupon interessati a questo tipo di invecchiamento sono: S1_n soggetti a 1000 ore, S3_n soggetti a 3000 ore; i cubetti invece sono: CS1_n, soggetti a 1000 ore a cui, su due facce trasversali, è stato applicato il composito dopo l'invecchiamento; CFS1_n soggetti a 1000 ore a cui, su due facce trasversali, è stato applicato il composito prima dell'invecchiamento; CS3_n, soggetti a 3000 ore a cui, su due facce trasversali è stato applicato il composito dopo l'invecchiamento, infine i CFS3_n soggetti a 3000 ore a cui, su due facce trasversali è stato applicato il composito prima dell'invecchiamento.

Seguendo poi quanto riportato in letteratura ed in particolare in (Franzoni et al., 2018; Yin et al., 2022; Wang et al., 2023), è stato effettuato un altro tipo di condizionamento, che comportava ugualmente l'immersione in soluzione per 1000 e 3000 ore ma, cambiando la tipologia di soluzione. In particolare, sono state realizzate due soluzioni seguendo quanto riportato negli articoli sopradetti. La prima soluzione è composta da acqua deionizzata con aggiunta di sodio solfato decaidrato (4%) e cloruro di sodio (8%), il secondo è costituito dagli stessi elementi ma in concentrazioni differenti: sodio solfato decaidrato (2%) e cloruro di sodio (4%). Una volta condizionati i provini vengono poi testati. In dettaglio i coupon interessati a questo tipo di

invecchiamento sono: SolL1000_n soggetti a 1000 ore e SolL3000_n soggetti a 3000 ore nella soluzione con le minori concentrazioni di prodotti chimici; SolS1000_n soggetti a 1000 ore e SolS3000_n soggetti a 3000 ore nella soluzione con le maggiori concentrazioni di prodotti chimici. I cubetti presentano la stessa nomenclatura, avremo pertanto: SolL1000_n soggetti a 1000 ore e SolL3000_n soggetti a 3000 ore immersi nella soluzione con minori quantità di prodotti e SolS1000_n-SolS3000_n nella soluzione con maggiori quantità. A tutti i cubetti, su due facce trasversali laterali, è stato applicato il composito prima dell'invecchiamento ed in seguito sulle altre due facce laterali trasversali dopo l'invecchiamento; in questo caso i test di pull-off sono stati eseguiti anche nella faccia posta alla base, in modo da avere dati eseguiti solo sul substrato in calcestruzzo. Nell'immagine 4-10 viene riportato uno schema riassuntivo dei condizionamenti sopra descritti.

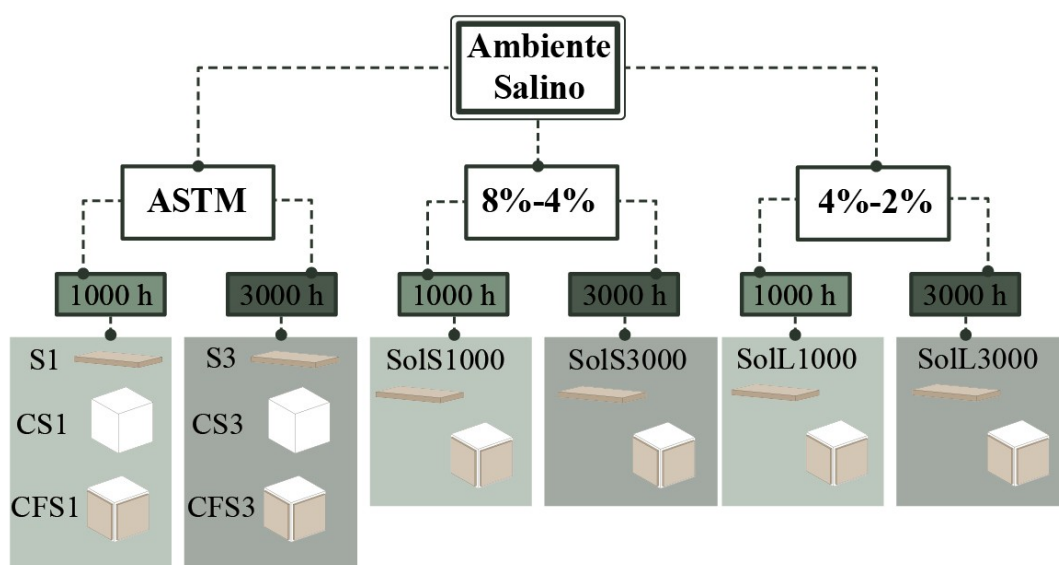


Figura Sperimentazione-21: Tipologie ambiente salino.

4.3.2 Cicli caldo-umido

Il secondo tipo di condizionamento studiato prende spunto dalla norma UNI EN 14066 “Determinazione della resistenza all'invecchiamento accelerato tramite shock termico” che è riferita a test su pietre naturali, secondo cui i provini sono sottoposti a cicli, ciascuno formato da essiccazione a 70 ± 5 °C per 18 ± 1 h, seguita da immediata immersione in acqua a 20 ± 5 °C per 6

$\pm 0,5$ h. Questa normativa è stata presa in esame in quanto, in letteratura, non sono presenti prescrizioni ad oc per compositi, che trattino cicli di caldo umido, rappresentanti però, un condizionamento caratteristico di un possibile sbalzo termico giorno notte estivo tipico del clima mediterraneo e quindi una fonte di studio, a nostro avviso, molto interessante. Pertanto, sono stati realizzati differenti tipi di condizionamento caratterizzati da cicli costituiti da 18 ore di essiccazione in forno e 6 ore di immersione in soluzione. Sono stati eseguiti quattro tipi differenti di invecchiamento nei quali è stata variata la temperatura del forno e la tipologia di soluzione. In dettaglio abbiamo: un tipo costituito da cicli ciascuno composto da 18 ore di forno a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ed immersione in acqua naturale a temperatura di $20 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ per 6 ore. I coupon soggetti a questo tipo sono quelli denominati CU-n, questo gruppo, costituito da 15 campioni è stato suddiviso in 5 gruppi da tre campioni ciascuno, nei quali è stato variato il numero di cicli; rispettivamente avremo il gruppo CU_10_n, sottoposto a 10 cicli; il gruppo CU_20_n sottoposto a 20 cicli; quello CU_30_n a 30 cicli; il CU_40_n a 40 cicli ed infine il CU_50_n a 50 cicli. I cubetti soggetti a questo invecchiamento sono quelli chiamati T_n e i T70_n, entrambi composti da 15 provini suddivisi a loro volta in 5 gruppi con la stessa metodologia attuata per i coupon, avremo quindi i T_10_n ed i T70_10_n sottoposti a 10 cicli, i T_20_n ed i T70_20_n a 20; i T_30_n ed i T70_30_n a 30; i T_40_n ed i T70_40_n a 40 ed i T_50_n ed i T70_50_n a 50. La differenza tra questi due gruppi consiste nel fatto che, nel caso dei T_n, è stato applicato il composito su due facce laterali trasversali prima di subire l'invecchiamento, mentre per i T70_n il composito è stato applicato dopo aver effettuato l'invecchiamento.

Si è realizzato un ulteriore tipo composto da cicli costituiti da 18 ore di forno a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ e da 6 ore di immersione in acqua naturale a $20 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. I coupon che hanno subito questo condizionamento sono denominati CU50_n e, come per il caso precedente questo gruppo, costituito da 15 provini è stato ulteriormente diviso in 5 gruppi da tre coupon ciascuno distinti in funzione del numero di cicli, quindi avremo; i CU50_10_n che hanno subito 10 cicli; i CU50_20_n che ne hanno subiti 20; i CU50_30_n che ne hanno subiti 30; i CU50_40_n 40 cicli ed i CU50_50_n 50. I cubetti che hanno subito questo condizionamento sono quelli classificati come T50_n, anche in questo caso sono 15 suddivisi, in funzione del numero di cicli, in 5 gruppi da tre provini ciascuno, avremo pertanto i T50_10_n; i T50_20_n; i T50_30_n; i T50_40_n ed i T50_50_n, in questo caso ai campioni è stato applicato il composito su due facce laterali trasversali prima dell'invecchiamento e su altre due dopo l'invecchiamento.

Il terzo tipo è costituito da cicli suddivisi in 18 ore di essiccazione in forno a 50°C e da 6 ore di immersione in una soluzione composta da acqua deionizzata, cloruro di sodio all'4% (NaCl) e

sodio solfato decaidrato al 2% (Na_2SO_4) a 20 ± 5 °C. I coupon così condizionati erano i WDL_n, il gruppo era composto da 15 campioni suddivisi in 5 gruppi sempre in funzione del numero di cicli; avremo quindi: WDL_10_n; WDL_20_n; WDL_30_n; WDL_40_n e WDL_50_n. Mentre i cubetti erano i TS1_n, anche in questo caso sono 15 cubetti suddivisi, in funzione del numero di cicli, in 5 gruppi da tre provini ciascuno, avremo pertanto i TS1_10_n; i TS1_20_n; i TS1_30_n; i TS1_40_n ed i TS1_50_n; ai campioni è stato applicato il composito su due facce laterali trasversali prima dell'invecchiamento e su altre due dopo l'invecchiamento.

Infine, l'ultima tipologia era caratterizzata da 18 ore di forno a 50°C e 6 ore di immersione in soluzione composta da acqua deionizzata cloruro di sodio all'8% (NaCl) e sodio solfato decaidrato al 4% (Na_2SO_4) a 20 ± 5 °C. I coupon, in questo caso erano denominati WDS_n, erano 15 campioni divisi i 5 gruppi da tre, divisi in funzione del numero di cicli, quindi: WDS_10_n; WDS_20_n; WDS_30_n; WDS_40_n e WDS_50_n. I cubetti erano i TS2_n suddivisi in TS2_10_n; TS2_20_n; TS2_30_n; TS2_40_n e TS2_50_n; anche in questo caso, è stato applicato il composito su due facce laterali trasversali prima dell'invecchiamento e su altre due dopo l'invecchiamento. Nell'immagine 4-11 viene riportato uno schema riassuntivo dei condizionamenti sopra descritti.

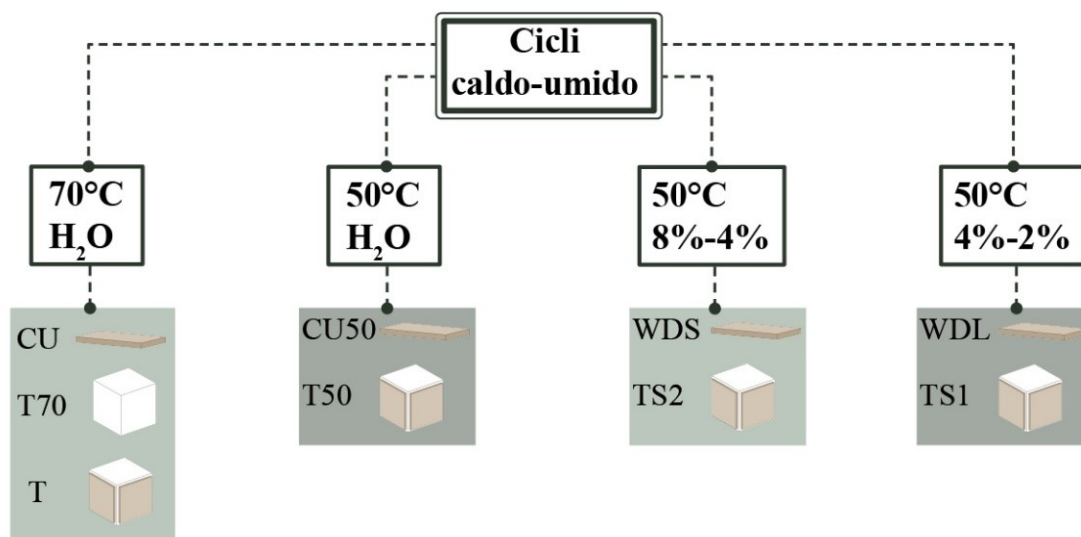


Figura Sperimentazione-22: Tipologie cicli caldo-umido.

4.4 Test set-up

Di seguito sono riportate le differenti tipologie di test effettuate durante tutta la campagna sperimentale. I test di trazione sono riferiti ai coupon, mentre il pull-off e i test di determinazione del modulo elastico e di compressione ai cubetti.

4.4.1 Test di trazione (clevis grip)

Una volta terminato il condizionamento, ad ogni coupon sono state incollate 4 piastre di alluminio di 4 mm di spessore, lunghe 150 mm e larghe 65 mm con un foro di 12 mm posto ad una distanza di 19 mm da uno dei due estremi corti. Le piastre metalliche, di lunghezza complessiva pari a 150 mm, sono state incollate al provino per una lunghezza efficace di 100 mm. Tale lunghezza è stata definita in modo da garantire un adeguato trasferimento degli sforzi tra le piastre e il composito ed evitare fenomeni di distacco o scorrimento nelle zone di ancoraggio.

La scelta è coerente con le indicazioni delle linee guida Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, che richiedono che il sistema di ancoraggio non condizioni la modalità di rottura del provino, e con le configurazioni sperimentali comunemente adottate in letteratura per prove di trazione su sistemi FRCM in configurazione clevis grip nelle quali le lunghezze di ancoraggio sono progettate per garantire la piena mobilitazione della capacità resistente del rinforzo. Per l'incollaggio è stata usata la colla bicomponente Sikadur 31+. In figura 4-12 viene mostrata l'applicazione ed il dimensionamento di queste piastre. Le prove di trazione diretta sono state eseguite con il metodo clevis grip. La macchina di prova utilizzata è la Zwick Roell Z100 con capacità di forza pari a 100 kN. Le prove sono state eseguite in modalità di spostamento controllato adottando la velocità di 0,3 mm/min Caggegi et al. (2017); fino a rottura dei campioni. La macchina fornisce i risultati in termini di curva carico-spostamento, in cui lo spostamento è riferito al movimento delle traverse e include anche la deformabilità del sistema di prova.

Al fine di ottenere una misura locale della deformazione del provino, indipendente dagli spostamenti della macchina, è stato adottato un sistema di misura basato su due trasduttori di spostamento, posizionati in corrispondenza dei lembi superiore e inferiore della lunghezza libera del coupon (Fig. 4-12). I trasduttori misuravano, pertanto, gli spostamenti locali dei due

estremi del tratto utile del provino. L'allungamento del tratto di misura è stato determinato come differenza tra gli spostamenti registrati dai due trasduttori, ottenendo così una misura della deformazione locale del composito non influenzata dalla deformabilità del sistema di prova. Durante le prove è stata inoltre utilizzata una cella di carico ausiliaria da 5000 N per il monitoraggio del carico locale e per l'acquisizione sincronizzata dei dati.

I segnali sono stati acquisiti tramite sistema National Instruments. La deformazione del composito è stata infine calcolata rapportando l'allungamento così ottenuto alla lunghezza di misura iniziale.

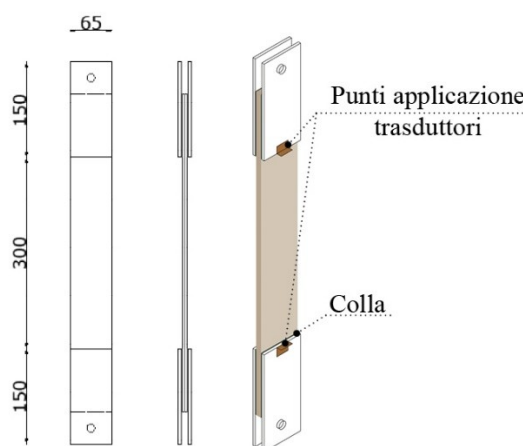


Figura Sperimentazione-23: Misure e applicazione piastrine con punto applicazione trasduttori sui coupon (mm).

Una volta effettuata la prova e ottenuti i risultati in termini di carico-spostamento, da questi, sono stati ricavati i risultati in termini di sforzo-deformazione, valutati, come riportato nelle Linee Guida italiane (CSLLPP, 2019), secondo andamento trilineare idealizzato come riportato in figura 4-13 in cui l'andamento dei rami è considerato con pendenze costanti (E_1 , E_2 ed E_3). Da questo si ottengono tre valori principali di sforzo (σ_I , σ_{II} , σ_{III}) correlati a tre valori di deformazione (ϵ_I , ϵ_{II} , ϵ_{III}), corrispondenti, in ordine, allo stadio di campione non fessurato (σ_I - ϵ_I); a quello in fase di fessurazione (σ_{II} - ϵ_{II}); e l'ultimo a quello fessurato (σ_{III} - ϵ_{III}). Lo sforzo convenzionalmente è dato dal rapporto tra la forza applicata F e l'area trasversale delle fibre A_f , come riportato in AC434. Nella prima fase, non fessurata, il comportamento è governato prevalentemente dalle proprietà meccaniche della matrice. Nella seconda fase, una volta superata la resistenza a trazione della matrice, si sviluppano le prime fessure. In corrispondenza delle sezioni fessurate, il carico è interamente sostenuto dalle fibre, mentre la matrice non

contribuisce più alla resistenza a trazione. Tuttavia, il trasferimento degli sforzi dalla matrice alle fibre avviene attraverso i meccanismi di aderenza lungo le porzioni non fessurate del composito, che consentono la progressiva mobilitazione del rinforzo. Nella fase di fessurazione diffusa (ramo AB), il comportamento del composito è governato dall'interazione tra fibra e matrice: sebbene nelle singole fessure il carico sia sostenuto esclusivamente dalle fibre, la risposta globale dipende dall'efficacia del trasferimento degli sforzi lungo l'interfaccia, che controlla la formazione, la distribuzione e l'apertura delle fessure. Nella fase finale, completamente fessurata, il contributo resistente è fornito principalmente dalle fibre, mentre la risposta globale continua a dipendere dai meccanismi di interazione fibra-matrice che regolano il trasferimento degli sforzi lungo la lunghezza del provino.

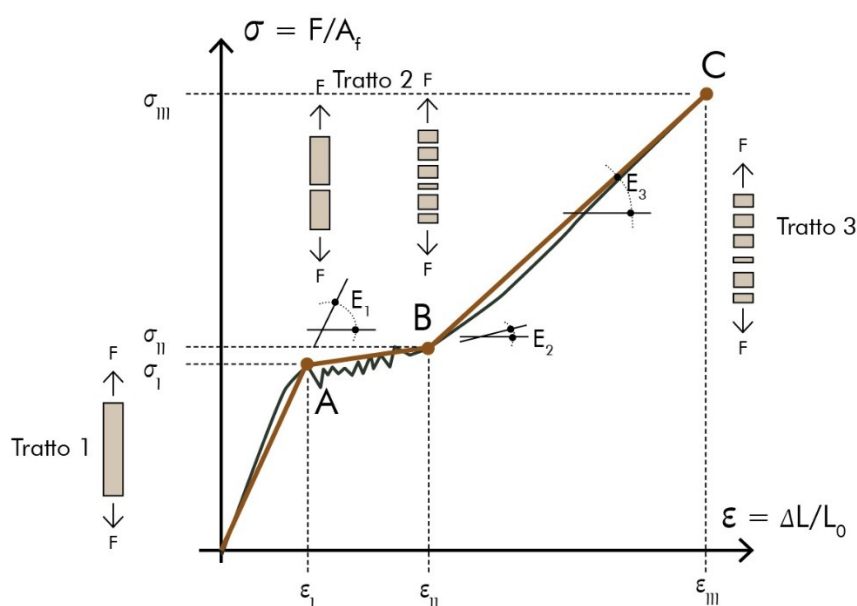


Figura Sperimentazione-24: Tipico grafico sforzo-deformazione di una prova a trazione su un provino in FRCM.

Per quanto riguarda le modalità di rottura, queste tipicamente possono essere di quattro tipi come rappresentato in figura 4-14; abbiamo quindi un primo modo (i), nel quale la rottura avviene in prossimità di uno dei due morsetti, un secondo (ii) in cui la rottura avviene per trazione delle fibre dopo la rottura della matrice; un terzo (iii) per rottura della sola matrice e scorrimento del tessuto; infine (iv) separazione tra matrice e fibra.

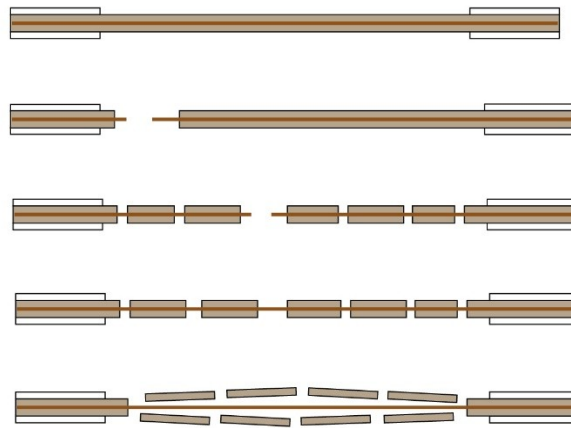


Figura Sperimentazione-25: *Tipi di rottura di un coupon in FRCM.*

4.4.2 Pull_off test

Il Pull-off test permette, tramite un processo semi-distruttivo di valutare la resistenza a trazione dello stato corticale del calcestruzzo e la resistenza di aderenza tra substrato e composito. I cubetti, una volta terminato il periodo di invecchiamento, sono stati incisi circolarmente, sulle quattro facce laterali e, in alcuni casi, anche sulla faccia alla base, in accordo con quanto prescritto dalla normativa ASTM C1583; effettuando quindi, delle incisioni aventi un diametro di 50 mm ed una profondità di 15 mm. Su queste è stato poi incollata una piastra metallica avente diametro equivalente e spessore di 25 mm. L'incollaggio è stato effettuato con una colla epossidica bicomponente ad alta resistenza. Dopo un tempo di maturazione di 24 ore i campioni sono stati testati applicando, tramite perno di tiraggio, un carico mono assiale perpendicolare alla superficie con una velocità di 0,035 MPa/s, usando il misuratore automatico motorizzato di aderenza (Pull-off automatico) Controls 58-C0215/AUTO, anche la velocità è stata scelta seguendo quanto prescritto dall'ASTM C1583. In fig. 4-15 viene mostrata il tipo di incisione effettuata e di piastra utilizzata.

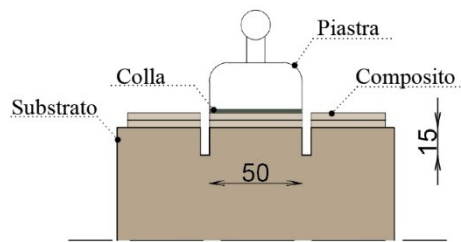


Figura Sperimentazione-26: Misure e applicazione piastra (mm).

La macchina restituisce i valori di resistenza (MPa), carico (KN) e tempo (s); la prova si interrompe una volta avvenuta la rottura. Per quanto riguarda i tipi di rottura (fig. 4-16), riferendoci al caso di substrato con composito, possono essere generalmente di quattro tipologie, descritte in Donnini et al. (2016) ed Ebead and Younis. (2019): (a) delaminazione del substrato in calcestruzzo (F1); (b) distacco dell'interfaccia matrice/substrato (F2); (c) distacco dell'interfaccia fibra/malta (F3); (d) distacco dell'interfaccia colla/composito (F4).

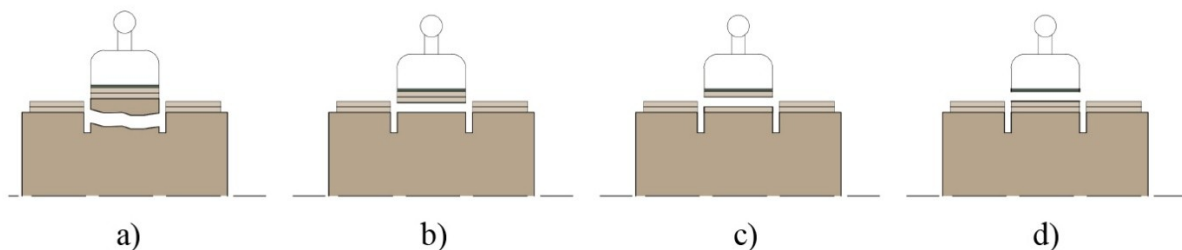


Figura Sperimentazione-27: Tipi di rottura, pull-off.

4.4.3 Test di compressione e determinazione del modulo elastico

Le prove per la determinazione del modulo elastico e per la compressione sono state eseguite su provini cilindrici ottenuti mediante carotaggio di tutti i cubetti, una volta terminate le prove di pull-off.

I provini sono stati estratti nella direzione perpendicolare a quella di getto. I provini cilindrici hanno diametro di 50 mm e sono stati rettificati in modo da rispettare il rapporto diametro lunghezza pari a 1:2. Sebbene la UNI EN 12390-1: 2021, denominata: “Prova sul calcestruzzo

indurito - Parte 1: Forma, dimensioni ed altri requisiti per provini e per casseforme”, prescrive un diametro minimo di 100 mm per i provini cilindrici, quello di 50 mm è stato considerato ammissibile ai fini di questa ricerca, sulla base delle evidenze pubblicate in Cristofaro et al. (2018). Per la prova di determinazione del modulo di elasticità si è fatto affidamento alla norma UNI EN12390-13 denominata “*Prova sul calcestruzzo-Parte 13: Determinazione del modulo di elasticità secante in compressione*”, metodo B. Questa prevede l’applicazione di tre cicli di carico. Prima della prova, sul provino vengono collocati 3 estensimetri a contatto tipo clip disposti assialmente a metà dell’altezza del cilindro, ad una distanza l’uno dall’altro, di 120° considerando il centro della circonferenza di base (fig. 4-19).

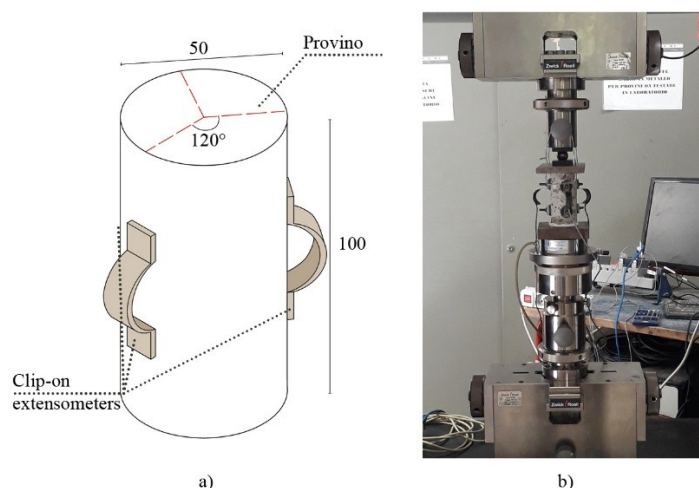


Figura Sperimentazione-28: a) dimensioni provino (mm) e posizionamento estensimetri, b) posizionamento provino nella macchina di prova.

Il provino viene poi collocato nella macchina di prova, nel nostro caso è stata utilizzata la macchina Zwick Roell Z100 con capacità di forza pari a 100 kN. Durante il primo ciclo viene applicato un precarico $\sigma_p (0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_a)$, aumentato fino allo sforzo superiore $\sigma_a (f_c/3)$, mantenuto per non più di 20 sec. Poi il carico viene portato al valore di $\sigma_b (0,10 \leq \sigma_b \leq 0,2 \times f_c)$. Il secondo e terzo ciclo prevedono di aumentare il carico fino σ_a , mantenerlo per non più di 20 sec e poi ritornare al valore di σ_b . (fig.18).

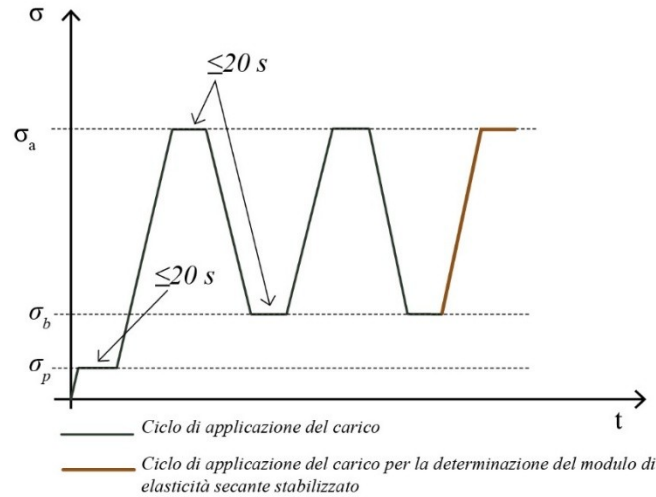


Figura Sperimentazione-29: Ciclo per la determinazione del modulo di elasticità secante stabilizzato (UNI EN 12390-13, Metodo B).

Dopo ogni ciclo viene calcolata la deformazione lungo ciascuna linea di misurazione. Una volta terminata la prova si può calcolare il modulo di elasticità secante stabilizzato con la seguente formula:

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

Dove:

- σ_a^m è lo sforzo misurato corrispondente allo sforzo nominale superiore σ_a ;
- σ_b^m è lo sforzo misurato corrispondente allo sforzo nominale inferiore σ_b ;
- $\epsilon_{a,3}$ è la deformazione media allo sforzo superiore al terzo ciclo di applicazione del carico;
- $\epsilon_{b,2}$ è la deformazione media allo sforzo inferiore al secondo ciclo di applicazione del carico.

La resistenza a compressione f_c di riferimento per queste prove, quando possibile, è stata ottenuta testando tre o sei provini a compressione per tipologia. Purtroppo, nella maggior parte dei casi, dato il numero esiguo di provini, alcune volte solo tre per tipologia, ciò non è stato possibile. In questi casi si è fatto affidamento ai risultati ottenuti da Castellini (2024), con le dovute correzioni.

Una volta terminati i test di determinazione del modulo elastico tutti i provini sono stati testati a compressione (fig. 4-21), in conformità con la norma UNI EN 12390-3, denominata: “*Prove sul calcestruzzo indurito. Parte 3: Resistenza alla compressione dei provini*”. La prova consiste nel caricare i campioni fino a rottura, la macchina di prova è la medesima utilizzata per i test di determinazione del modulo elastico.



Figura Sperimentazione-30: Esempio test di compressione, provino CFS1_01.

La procedura di prova non è stata eseguita a velocità di carico costante (controllo di carico), ma bensì ponendo la velocità di spostamento della traversa costante e uguale a 0.5 mm/min (controllo di spostamento) così da acquisire il tratto decrescente (softening) post-rottura. Una volta terminata la prova si registra il carico massimo e tramite questo si calcola la resistenza a compressione tramite la seguente formula:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Dove:

- f_c è la resistenza a compressione, in MPa
- F è il carico massimo alla rottura, in N
- A_c è l'area della sezione trasversale del provino su cui agisce la forza di compressione.

Prima di effettuare i test di determinazione del modulo elastico e di compressione, le carote sono state analizzate tramite test ultrasonici, confrontando così i risultati con i test effettuati prima di applicare l'invecchiamento accelerato sui cubetti.

5 Analisi e discussione dei risultati

In questo capitolo vengono riportati i risultati di tutti i test eseguiti sia su coupon che su cubetti in calcestruzzo. Per rendere più chiara la lettura di questi risultati, si è deciso di suddividerli in funzione del tipo di prova. In prima istanza, per ogni tipologia vengono elencati i risultati per ogni tipo di provino e, in un secondo momento, questi vengono comparati e analizzate le differenze di comportamento in funzione dei parametri coinvolti.

5.1 Test di trazione (clevis grip)

Di seguito vengono riportati i risultati dei test di trazione eseguiti sui coupon. I risultati sono espressi in termini di carico-deformazione e, in un secondo momento di sforzo-deformazione. Vengono quindi analizzate le variazioni dei risultati tra i vari tipi di provini e quindi tra i vari tipi di invecchiamento accelerato. Le analisi sono divise in 8 gruppi a seconda del condizionamento subito e poi confrontate tra di loro.

5.1.1 Risultati NT

In figura 5-1 sono riportati i grafici forza spostamento delle prove eseguite sugli otto campioni non trattati. È possibile notare l'andamento trilineare dei test e l'omogeneità del risultato. Si può osservare una prima fase governata dalla matrice fino al sopraggiungimento di una prima fessurazione da cui parte la seconda fase, durante la quale si formano diverse lesioni come ben visibile dal grafico, fino al sopraggiungere della terza fase in cui la trazione è quasi completamente assorbita dal tessuto in PBO, per poi concludere la prova con il completo scorrimento di quest'ultimo. Infatti, la modalità di rottura di questo gruppo di provini è avvenuta, per tutti, per scorrimento della fibra.

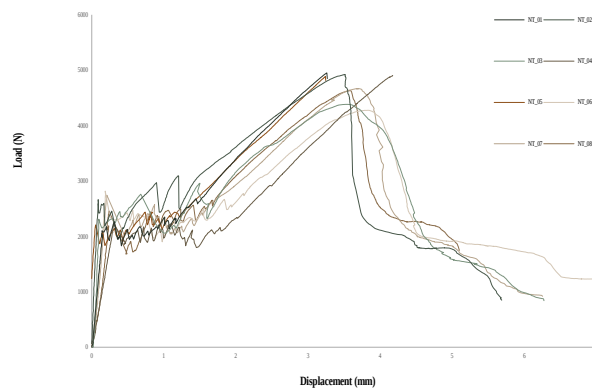


Figura Analisi e discussione dei risultati-31: Curve carico-spostamento provini NT.

In figura 5-2 sono riportate le immagini dei due tipi di rottura presentati da questa serie, in generale durante le prove si è riscontrato il manifestarsi di lesioni della matrice distribuite lungo tutta la lunghezza libera del campione, la rottura vera e propria, con conseguente scorrimento della fibra, è avvenuta, per tutti i casi, a ridosso o della piastra superiore o inferiore.



Figura Analisi e discussione dei risultati-32: Provini NT_02 ed NT_03, nei quali è ben visibile il tipo di rottura intercorso e il manifestarsi di fessure lungo tutta la lunghezza libera.

Di seguito (figura 5-3) sono riportati i grafici di tutti e otto i campioni in termini di sforzo-deformazione, in particolare, nel secondo grafico, vengono riportati i valori riferiti al modello trilineare semplificato, con in rosso la media.

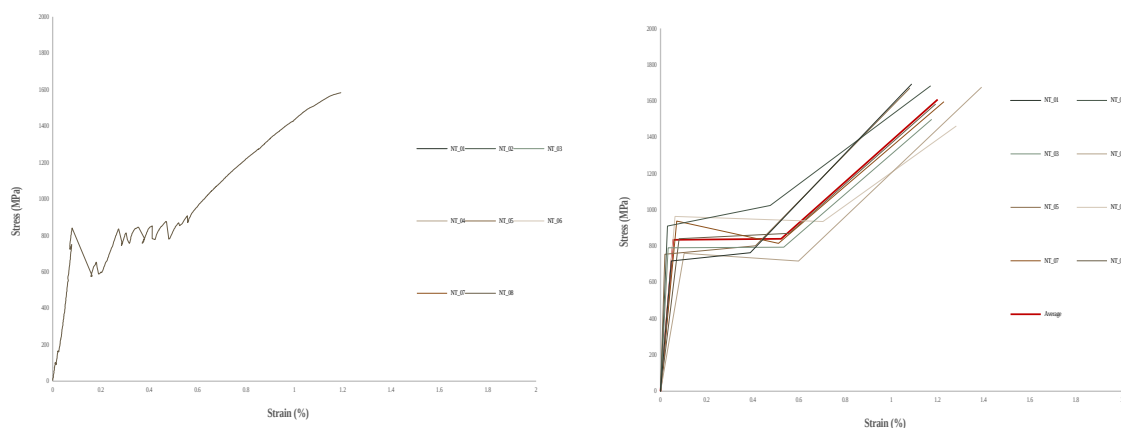


Figura Analisi e discussione dei risultati-33: Curve sforzo-deformazione coupon NT.

Nella tabella 5-1 sono riportati i valori principali di questa serie di prove, i dati sono espressi in termini di sollecitazione (σ_I , σ_{II} , σ_{III}) e di deformazioni a loro correlate (ϵ_I , ϵ_{II} , ϵ_{III}), presi nei punti di picco della prova. Viene riportata anche la differenza, per ciascun provino, tra lo sforzo ultimo e il valore della resistenza ultima a trazione, riferita a prove sul solo tessuto, per vedere come il comportamento della sola fibra in PBO è variato. In tabella 5-2 è riportata la media per ciascun valore ed il coefficiente di variazione (COV) correlato ad ognuno.

ID	NT_01	NT_02	NT_03	NT_04	NT_05	NT_06	NT_07	NT_08
σ_I (MPa)	718	911	791	760	755	964	938	841
σ_{II} (MPa)	763	1024	794	718	802	936	815	871
σ_{III} (MPa)	1692	1684	1499	1676	1671	1462	1596	1583
ϵ_I (%)	0,028	0,018	0,020	0,061	0,011	0,038	0,042	0,048
ϵ_{II} (%)	0,233	0,285	0,320	0,359	0,247	0,422	0,307	0,335
ϵ_{III} (%)	0,652	0,702	0,705	0,835	0,648	0,769	0,737	0,715
E_1 (kN/mm ²)	2552	5018	3968	1237	6668	2556	2223	1741
E_2 (kN/mm ²)	327	359	248	200	325	221	266	260
E_3 (kN/mm ²)	259	240	213	201	258	190	217	221
σ_{III}/f_{It}	0,56	0,56	0,50	0,56	0,55	0,49	0,53	0,53

Tabella Analisi e discussione dei risultati-14: Risultati coupon NT.

	σ_I (MPa)	σ_{II} (MPa)	σ_{III} (MPa)	ϵ_I (%)	ϵ_{II} (%)	ϵ_{III} (%)	E_1 (kN/mm ²)	E_2 (kN/mm ²)	E_3 (kN/mm ²)	σ_{III}/f_{ft}
MEDIA	835	840	1608	0,033	0,314	1,200	3245	276	225	0,53
COV	10%	11%	5%	48%	18%	8%	53%	19%	11%	5%

Tabella Analisi e discussione dei risultati-15: Media e COV coupon NT.

I risultati ottenuti dalle prove a trazione sui coupon PBO-FRCM non trattati sono stati confrontati con quanto riportato in letteratura per sistemi analoghi, al fine di inquadrare il comportamento osservato all'interno del panorama sperimentale esistente. In particolare, il confronto è stato condotto facendo riferimento ai lavori di Caggegi et al. (2017) ed Arboleda et al. (2016). Il lavoro di Caggegi et al. (2017), analizza il comportamento meccanico a trazione di compositi FRCM con fibre in PBO e aramidiche, ponendo particolare attenzione all'influenza della tipologia di fibra e del legame fibra-matrice, confrontando i risultati di test effettuati da diverse università. Le università coinvolte sono: Università di Cracovia (CUT), Politecnico di Milano (POLI_Mi), Università di Lione 1 (Uni_Ly1), Università eCampus (Uni_eC) ed Università Romar (Uni_Ro3). In particolare, il sistema in PBO analizzato è caratterizzato da un tessuto bilanciato bidirezionale, la larghezza del filo del tessuto è di circa 3 mm e la distanza libera tra i fili è di circa 12 mm (nelle direzioni di trama e ordito). Le fibre di PBO hanno una resistenza alla trazione di 5800 MPa e un modulo elastico di 270 GPa. Il tessuto ha una densità di 44 g/m² e uno spessore equivalente di 0,014 mm. La malta cementizia è rinforzata da fibre corte e la sua resistenza alla compressione e la resistenza alla trazione a flessione sono rispettivamente pari a 20 MPa e 3,5 MPa. Tutti i campioni avevano uno spessore di 10 mm e il tessuto era posizionato nel loro piano mediano, mentre diverse larghezze, e lunghezze di riferimento sono state adottate dai laboratori coinvolti nel lavoro di ricerca, a seconda della forma del tessuto e dell'apparato di prova (tab.5-3).

Arboleda et al. (2016) eseguono prove su coupon rinforzati con fibre ad alta resistenza (tra cui PBO e carbonio), utilizzando diverse configurazioni di grip. In particolare, per quanto riguarda le prove su FRCM-PBO, il tessuto utilizzato è non bilanciato, ha uno spessore equivalente nelle direzioni dell'ordito e della trama rispettivamente di 0,046 mm e 0,011 mm. Le fibre hanno una resistenza alla trazione di 3900 MPa e un modulo elastico di 216 GPa. La matrice è una malta cementizia arricchita con fibre corte in una percentuale inferiore al 5%; la sua resistenza alla compressione e la resistenza alla trazione a flessione sono rispettivamente pari a 33,9 MPa e 4,75 MPa. I provini avevano dimensioni pari a 410x50x10mm.

Nella tabella 5-3 vengono confrontati i valori ottenuti dalle prove dei coupon non trattati con i valori degli studi riportati. In particolare, vengono messi in evidenza: il tipo di aggancio (Grip), la lunghezza libera dei provini (L), la resistenza deformazione ultimi (σ_{III} e ϵ_{III}).

Rif.	Grip	L (mm)	σ_{III} (MPa)	ϵ_{III} (%)
CUT	Clevis	590	2572	0,44
POLI_Mi	Clamp	400	3594	0,51
Uni_Ly1	Clevis	510	1817	0,45
Uni_eC	Clamp	600	2962	1,33
Uni_Ro3	Clamp	600	3468	0,27
Arb. 2016	Clamp	410	3316	1,69
Arb. 2016	Clevis	410	1664	1,75
NT	Clevis	500	1608	1,2

Tabella Analisi e discussione dei risultati- 16: Confronto risultati sperimentali dei provini non trattati con risultati di letteratura (Caggegi et al. 2017 ed Arboleda et al. 2016).

I risultati ottenuti nella presente ricerca (NT) mostrano una buona coerenza con i dati di letteratura riferiti a prove condotte con configurazione di presa analoga, in particolare con quelli riportati da Arboleda et al. (2016) per coupon testati con clevis grip. In entrambi i casi, infatti, la configurazione sperimentale risulta comparabile sia in termini di tipologia di grip sia di lunghezza libera del provino ($L \approx 410\text{--}500$ mm), fattori noti per influenzare in modo significativo la distribuzione degli sforzi e il valore della tensione ultima misurata. In particolare, il valore di σ_{III} pari a 1608 MPa ottenuto nei test NT risulta molto vicino a quello riportato da Arboleda et al. (2016) per i coupon PBO-FRCM testati con clevis grip (1664 MPa), evidenziando una differenza inferiore al 5%. Analogamente i valori di deformazione associati alla fase ϵ_{III} risultano dello stesso ordine di grandezza di quelli delle ricerche a confronto, confermando una risposta meccanica comparabile e suggerendo che il comportamento osservato nei provini NT sia rappresentativo e coerente con quanto già documentato in letteratura per sistemi PBO-FRCM testati in analoghe condizioni.

Al contrario, un confronto diretto con i risultati ottenuti mediante clamping grip (POLI_Mi, Uni_eC, Uni_Ro3, Arboleda et al. 2016 clamp) mostra scostamenti marcati, con valori di σ_{III} significativamente più elevati, compresi tra circa 2500 e 3600 MPa. Tale differenza non è

imputabile a una migliore prestazione intrinseca del materiale, bensì è principalmente riconducibile alla diversa configurazione di prova, che nel caso del clamping grip consente un trasferimento degli sforzi più diretto ed efficiente alla fibra, limitando fenomeni di scorrimento, concentrazione delle tensioni e danneggiamento locale in prossimità delle zone di ancoraggio. Nel complesso, il confronto evidenzia come i risultati NT si discostino in modo sistematico dai dati ottenuti con clamping grip, ma risultino allineati con quelli di letteratura ottenuti in condizioni sperimentali analoghe. Ciò conferma che la configurazione di presa rappresenta uno dei principali parametri di influenza nella determinazione della tensione ultima apparente dei coupon PBO-FRCM, e rafforza l'affidabilità dei risultati sperimentali presentati, che si inseriscono in modo coerente nel quadro delle evidenze esistenti

Un ulteriore elemento di confronto riguarda la forma della curva sforzo-deformazione osservata durante le prove di trazione. In letteratura, il comportamento trilineare dei coupon FRCM è maggiormente associato a prove condotte con clamping grip, mentre nei test con clevis grip viene spesso riportato un comportamento prevalentemente bilineare, in cui la transizione dalla fase governata dalla matrice alla fase dominata dalla fibra risulta meno marcata. Nel caso dei provini NT, nonostante l'impiego del clevis grip, è stato osservato un comportamento trilineare ben definito, con una chiara individuazione delle tre fasi tipiche. Tale evidenza risulta particolarmente rilevante, poiché suggerisce che la forma della curva sforzo-deformazione non dipenda esclusivamente dalla configurazione di presa, ma sia fortemente influenzata anche da fattori intrinseci del composito e dalla qualità della prova. In particolare, risultati analoghi sono stati riportati da Arboleda et al. (2016) per sistemi PBO-FRCM caratterizzati da elevata rigidità del rinforzo, nei quali la distinzione tra le diverse fasi di comportamento risulta più netta anche in presenza di clevis grip. In tali condizioni, la fessurazione della matrice avviene in modo progressivo e distribuito, consentendo l'emersione di una fase intermedia ben riconoscibile prima dell'attivazione completa della fibra. Nel caso dei provini NT, il comportamento trilineare osservato può inoltre essere attribuito alla lunghezza libera relativamente elevata del coupon, che favorisce lo sviluppo di una fessurazione multipla più regolare, e alla risoluzione strumentale adottata, che ha permesso di cogliere variazioni di rigidità anche moderate. Questi aspetti contribuiscono a rendere più evidente la fase II, che in altri studi con clevis grip può risultare mascherata o inglobata nella risposta globale.

5.2 Risultati Ambiente Salino

5.2.1 Risultati S1 ed S3

Di seguito sono riportati i risultati per i provini soggetti ad immersione per 1000 e 3000 ore in soluzione come da ASTM D1141-98.

Come si può vedere dalla fig. 5-4 si sono riscontrati notevoli cambiamenti già a livello visivo. sia i provini soggetti a 1000 ore che a 3000 ore, presentano variazioni cromatiche, patina e una diffusa presenza di efflorescenze che aumenta all'aumentare del tempo di immersione. Essendo un composto poroso, la presenza di acqua all'interno di questi pori favorisce fenomeni di cristallizzazione dei sali causando la formazione di efflorescenze sulla superficie esterna.



Figura Analisi e discussione dei risultati-34: a) provino prima e dopo l'invecchiamento (1000 ore),
b) provino prima e dopo l'invecchiamento (3000 ore).

In figura 5-5 sono riportati i grafici forza spostamento delle prove eseguite sui sei campioni soggetti a immersione per 1000 ore (a) e sei campioni soggetti a 3000 ore (b). Anche in questo caso, è possibile notare l'andamento trilineare, anche se meno definito rispetto al caso non trattato. Entrambi i risultati presentano valori abbastanza omogenei tra di loro fatta qualche eccezione (S1_01; S1_06 ed S3_03). I valori di forza, in entrambi i casi raggiungono il massimo consentito dalla cella di carico utilizzata (5000 N) ed in particolare, nel solo caso di S3_01, la prova è stata interrotta per non eccedere di tale valore. La modalità di rottura di questo gruppo di provini è avvenuta, in tutti i casi, per scorrimento della fibra.

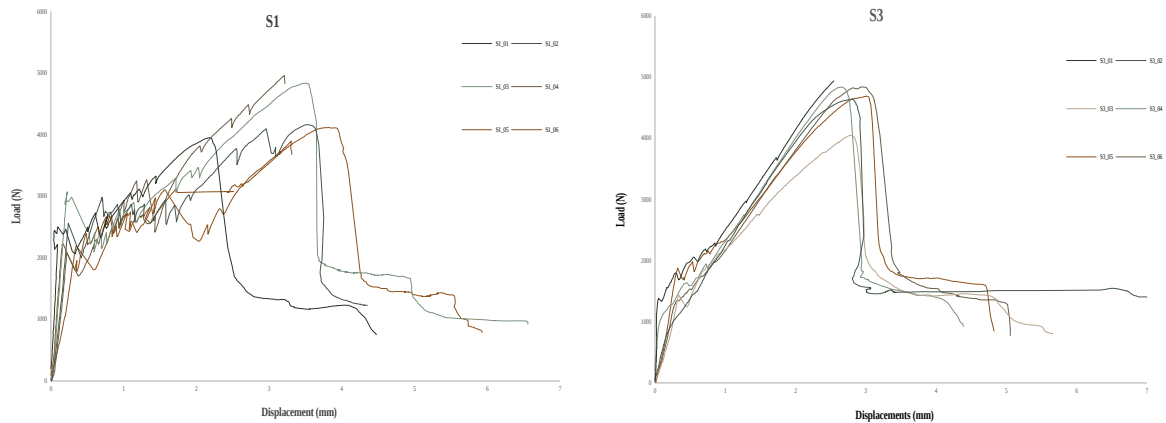


Figura Analisi e discussione dei risultati-35: Curve carico-spostamento provini S1 e S3.

In figura 5-6 sono riportate le immagini dei due tipi di rottura presentati da queste serie, in generale durante le prove si è riscontrato il manifestarsi di lesioni della matrice distribuite lungo tutta la lunghezza libera del campione, la rottura vera e propria con conseguente scorrimento della fibra è avvenuta, per tutti i casi a ridosso o della piastra superiore o inferiore. Durante la prova sul provino S1_02 si è verificato il distacco di una delle piastre inferiori (fig. 5-7) avvenuta dopo che il provino aveva raggiunto il picco massimo di carico.

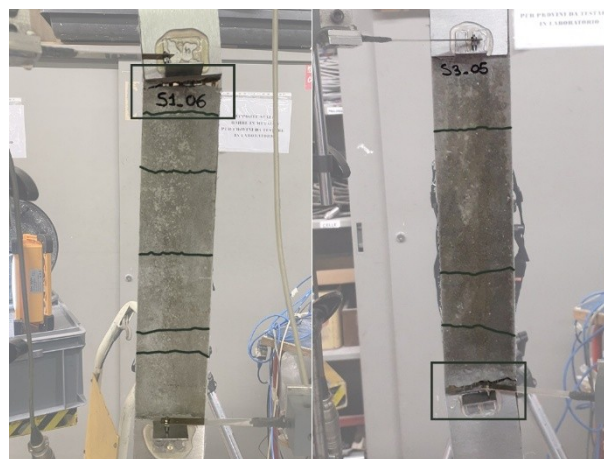


Figura Analisi e discussione dei risultati-36: Provini S1_06 ed S3_05, nei quali è ben visibile il tipo di rottura intercorso e il manifestarsi di fessure lungo tutta la lunghezza libera.



Figura Analisi e discussione dei risultati-37: Provino S1_02 dove è ben visibile il distacco della piastra inferiore.

Di seguito (figura 5-8) sono riportati i grafici di tutti e sei i campioni S1 in termini di sforzo-deformazione, in particolare, nel secondo grafico, vengono riportati i valori riferiti al modello trilineare semplificato, con in rosso la media di questo gruppo.

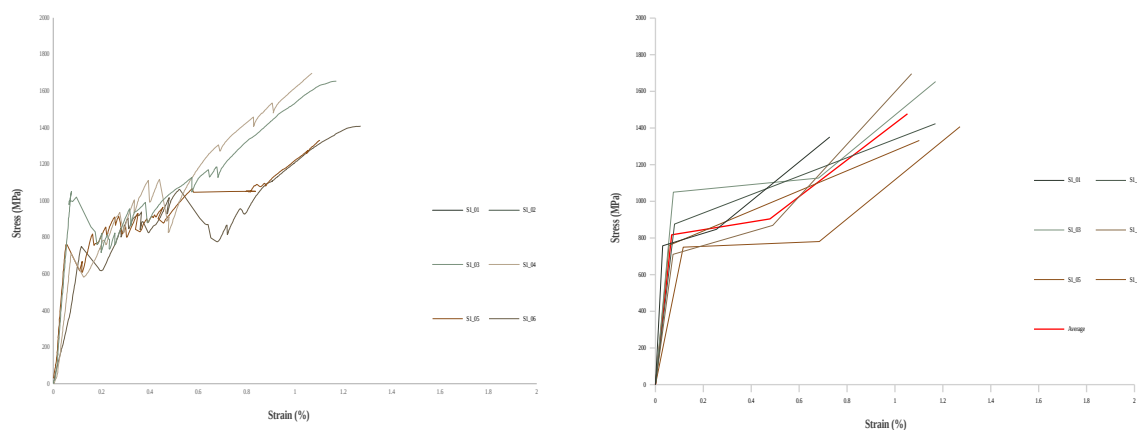


Figura Analisi e discussione dei risultati-38: Curve sforzo-deformazione coupon S1

Nelle tabelle 5-4 sono riportati i risultati di questa serie di prove. I dati sono espressi in termini di sollecitazioni (σ_I , σ_{II} , σ_{III}) e di deformazioni a loro correlate (ϵ_I , ϵ_{II} , ϵ_{III}), presi nei punti di picco della prova. Viene riportata anche la differenza, per ciascun provino, tra lo sforzo ultimo e il valore della resistenza ultima a trazione riferita a prove sul solo tessuto, come nel caso

precedente e nei casi a seguire. Vengono inoltre riportati i valori medi e il CoV per ciascuno parametro di sforzo, spostamento e modulo elastico.

ID	S1_01	S1_02	S1_03	S1_04	S1_05	S1_06	MEDIA	COV
σ_I (MPa)	757	876	1050	711	760	750	817	14%
σ_{II} (MPa)	847	-	1127	869	897	781	904	13%
σ_{III} (MPa)	1351	1424	1654	1696	1332	1407	1477	10%
ϵ_I (%)	0,030	0,080	0,075	0,073	0,080	0,116	0,068	28%
ϵ_{II} (%)	0,255	-	0,681	0,490	0,487	0,684	0,478	32%
ϵ_{III} (%)	0,728	1,169	1,170	1,070	1,125	1,272	1,052	16%
E_1 (kN/mm ²)	2502	1097	1402	967	948	646	1260	47%
E_2 (kN/mm ²)	333	-	165	177	184	114	195	38%
E_3 (kN/mm ²)	186	122	141	159	118	111	139	19%
σ_{III}/f_{ft}	0,45	0,47	0,55	0,56	0,44	0,47	0,49	10%

Tabella Analisi e discussione dei risultati-17: Risultati coupon S1.

I risultati delle prove mostrano un comportamento meccanico complessivamente coerente e caratterizzato da una variabilità contenuta, in particolare per quanto riguarda i parametri di resistenza. La tensione ultima media σ_{III} risulta pari a 1477 MPa, con un coefficiente di variazione del 10%, indicando una buona ripetibilità del comportamento a rottura anche a seguito del condizionamento ambientale. Il rapporto medio σ_{III}/f_{ft} di 0,49, anch'esso caratterizzato da una dispersione limitata (COV = 10%), suggerisce che la capacità resistente residua del composito rimane prossima al 50% della resistenza nominale del tessuto. Analizzando le diverse fasi della risposta meccanica, la tensione media al primo stadio σ_I è pari a 817 MPa (COV = 14%), mentre la tensione di transizione al secondo stadio σ_{II} raggiunge un valore medio di 904 MPa (COV = 13%). Tali valori indicano che il danneggiamento iniziale della matrice e l'attivazione progressiva del rinforzo avvengono in modo relativamente uniforme tra i provini, nonostante l'esposizione alla soluzione salina. Le deformazioni associate mostrano invece una maggiore dispersione: ϵ_I presenta un valore medio di 0,068% con COV pari al 28%, mentre ϵ_{II} e ϵ_{III} raggiungono rispettivamente 0,478% (COV = 32%) e 1,052% (COV = 16%). Questo incremento della variabilità deformativa è indicativo di un degrado prevalentemente localizzato all'interfaccia fibra-matrice, ciò fa supporre che la perdita di

coesione interfacciale influisca più sulla capacità deformativa che sulla resistenza ultima. L'analisi delle rigidità evidenzia una marcata riduzione progressiva passando dal primo al terzo stadio. Il modulo iniziale E_1 presenta un valore medio di 1260 kN/mm^2 , ma con una dispersione elevata ($\text{COV} = 47\%$), suggerendo una sensibilità significativa dello stadio elastico iniziale alle condizioni di esposizione e alle diversità a livello microstrutturale indotte dall'attacco salino. Il modulo E_2 si riduce a 195 kN/mm^2 ($\text{COV} = 38\%$), mentre E_3 assume un valore medio di 139 kN/mm^2 con una dispersione più contenuta ($\text{COV} = 19\%$), indicando una risposta più stabile nella fase dominata dal contributo del tessuto in PBO. Questo andamento è coerente con l'ipotesi che l'ambiente salino agisca principalmente sulla matrice e sull'interfaccia, mentre la fibra in PBO mantenga una buona stabilità chimica e meccanica.

Nel complesso, i risultati confermano che, dopo 1000 ore di esposizione in soluzione salina, il degrado del sistema si manifesta prevalentemente come riduzione di rigidità e aumento della variabilità deformativa, mentre la capacità resistente ultima risulta solo moderatamente penalizzata. Viene, pertanto, individuato l'interfaccia fibra-matrice come il principale punto critico per questo tipo di invecchiamento, a fronte di una buona resistenza delle fibre in PBO.

In figura 5-9 sono riportati i grafici di tutti i campioni del gruppo S3 in termini di sforzo-deformazione, in particolare, nel secondo grafico, vengono riportati i valori riferiti al modello trilineare semplificato, con in rosso la media di questo gruppo.

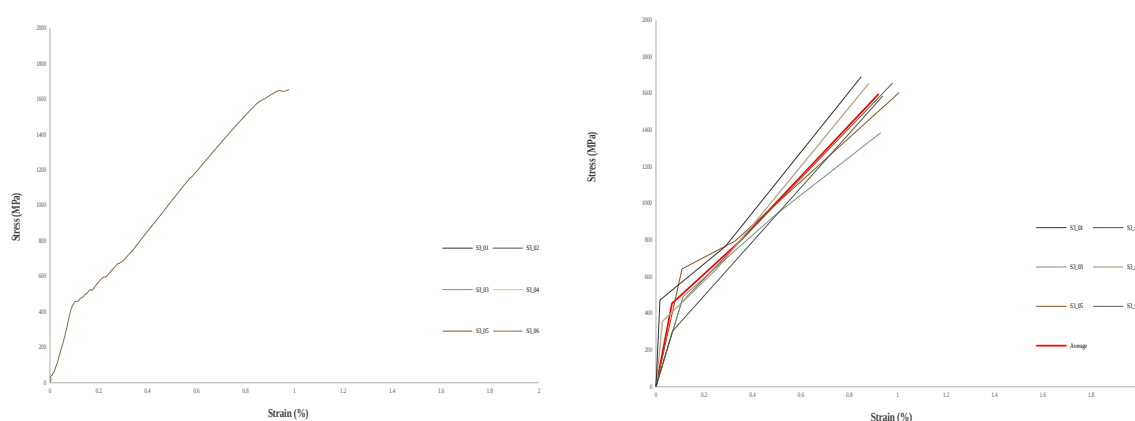


Figura Analisi e discussione dei risultati-39: Curve sforzo-deformazione coupon S3.

Nella tabella 5-5vengono riportati i risultati numerici in termini di sforzo-deformazione di questa serie.

ID	S3_01	S3_02	S3_03	S3_04	S3_05	S3_06	MEDIA	COV
σ_I (MPa)	472	302	491	357	642	459	454	24%
σ_{II} (MPa)	764	-	936	640	793	-	780	13%
σ_{III} (MPa)	1690*	1584	1384	1654	1603	1655	1595	6%
ϵ_I (%)	0,017	0,068	0,113	0,027	0,108	0,105	0,068	60%
ϵ_{II} (%)	0,287	-	0,494	0,250	0,326	-	0,344	47%
ϵ_{III} (%)	0,849*	0,938	0,930	0,881	1,005	0,979	0,922	6%
E_1 (kN/mm ²)	2850	444	436	1324	561	435	1009	87%
E_2 (kN/mm ²)	266	-	190	256	-	243	237	12%
E_3 (kN/mm ²)	199*	169	149	188	158	169	172	10%
σ_{III}/f_{ft}	0,56	0,53	0,46	0,55	0,53	0,55	0,53	6%

*valore influenzato dal fatto che la prova è stata interrotta per non danneggiare la cella di carico.

Tabella Analisi e discussione dei risultati-18: Risultati coupon S3.

I risultati mostrano un comportamento meccanico complessivamente stabile in termini di capacità resistente, ma accompagnato da una marcata variabilità nelle fasi iniziali della risposta, a conferma di un progressivo degrado localizzato principalmente nella matrice e all'interfaccia fibra-matrice. La tensione ultima media σ_{III} risulta pari a 1595 MPa, con un coefficiente di variazione estremamente contenuto (COV = 6%), indicando un'elevata ripetibilità del comportamento a rottura anche dopo un'esposizione prolungata all'ambiente salino, ricordiamo però che per il provino S3_01 la prova è stata interrotta per non danneggiare la cella di carico. Il rapporto medio σ_{III} / f_{ft} di 0,53 (COV = 6%) evidenzia che la capacità resistente residua del composito rimane superiore al 50% della resistenza nominale del tessuto, confermando la buona stabilità chimica e meccanica delle fibre in PBO anche in condizioni ambientali fortemente aggressive. Rispetto ai provini condizionati per 1000 h, si osserva inoltre un leggero incremento del valore medio di σ_{III} (da 1477 a 1595 MPa), suggerendo che l'esposizione prolungata non induce un degrado progressivo della resistenza ultima e che eventuali fenomeni di assestamento o ulteriore maturazione della matrice possano compensare parzialmente gli effetti dell'attacco salino. Le tensioni caratteristiche dei primi due stadi risultano invece più sensibili al condizionamento. Il valore medio di σ_I pari a 454 MPa (COV = 24%) è significativamente inferiore rispetto a quello osservato dopo 1000 h, indicando un'anticipazione del

danneggiamento iniziale della matrice. Analogamente, la tensione di transizione σ_{II} di 780 MPa (COV = 13%) si colloca su valori comparabili, ma con una maggiore dispersione nei singoli provini, a conferma di un'interazione fibra-matrice più eterogenea dopo un'esposizione prolungata. Le deformazioni associate evidenziano una netta distinzione tra i diversi stadi di comportamento. Le deformazioni iniziali ϵ_I mostrano una dispersione molto elevata (valore medio 0,068%, COV = 60%), riflettendo una risposta fortemente influenzata dal degrado microstrutturale della matrice e dalla distribuzione non uniforme del danneggiamento microstrutturale indotto dal tipo di invecchiamento. Anche ϵ_{II} presenta una variabilità significativa (media 0,344%, COV = 47%). Al contrario, la deformazione ultima ϵ_{III} risulta estremamente stabile, con un valore medio di 0,922% e COV pari al 6%, indicando che la fase finale della risposta è governata prevalentemente dal comportamento del tessuto in PBO, meno sensibile ai meccanismi di degrado chimico. L'analisi dei moduli elastici conferma ulteriormente questa interpretazione. Il modulo iniziale E_1 mostra una dispersione molto elevata (valore medio 1009 kN/mm², COV = 87%), evidenziando una forte eterogeneità a livello della matrice e dell'interfaccia. Il modulo intermedio E_2 , pari in media a 237 kN/mm² (COV = 12%), risulta più stabile e confrontabile con i valori osservati dopo 1000 h. Il modulo finale E_3 , con valore medio 172 kN/mm² e COV del 10%, conferma una risposta meccanica regolare nella fase dominata dalla fibra, con rigidità residua sostanzialmente preservata.

Nel complesso, i risultati ottenuti dopo 3000 ore di immersione salina indicano che il degrado del sistema non porta verso una riduzione della resistenza ultima, ma si manifesta principalmente come progressiva perdita di rigidità iniziale e aumento della dispersione delle deformazioni nei primi stadi di carico. La stabilità dei valori di σ_{III} , ϵ_{III} ed E_3 conferma che la fibra in PBO rappresenta l'elemento più durabile del sistema, mentre il comportamento a lungo termine in ambiente salino è governato dai meccanismi di deterioramento dell'interfaccia fibra-matrice, in accordo con quanto riportato in letteratura per sistemi FRCM esposti a soluzioni saline.

Infine, in figura 5-10 ed in tabella 5-6 viene mostrato il confronto delle medie dei risultati dei provini non trattati (NT), di quelli soggetti ad immersione per 1000 ore (S1) e di quelli soggetti a immersione per 3000 ore (S3).

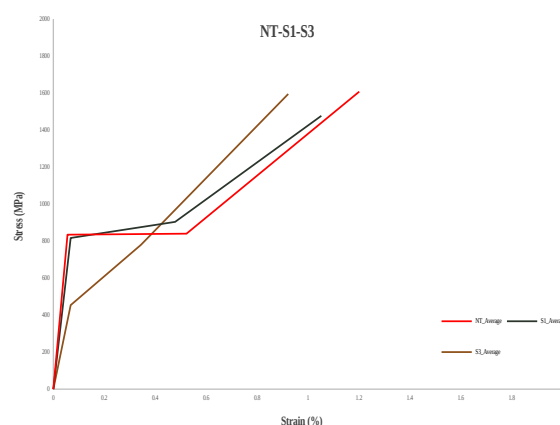


Figura Analisi e discussione dei risultati-40: Confronto risultati sforzo-deformazione delle medie dei provini NT-S1 ed S3

		σ_I	σ_{II}	σ_{III}	ϵ_I	ϵ_{II}	ϵ_{III}	E_I	E_2	E_3	σ_{III}/f_{ft}
		(MPa)	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	
NT	Media	835	840	1608	0,033	0,314	1,200	3245	276	225	0,53
	COV	10%	11%	5%	48%	18%	8%	53%	19%	11%	5%
S1	Media	817	904	1477	0,068	0,478	1,052	1260	195	139	0,49
	COV	14%	13%	10%	28%	32%	16%	47%	38%	19%	10%
S3	Media	454	780	1595	0,068	0,344	0,922	1009	237	172	0,53
	COV	24%	13%	6%	60%	47%	6%	87%	12%	10%	6%

Tabella Analisi e discussione dei risultati-19: Confronto valori medi e COV coupon NT, S1 ed S3.

Dall'analisi dei risultati emerge che il comportamento dei provini S1 non mostra variazioni significative rispetto ai campioni non trattati, mantenendo una risposta meccanica sostanzialmente sovrapponibile. Questo suggerisce che, per tempi di immersione limitati, l'azione della soluzione salina non produce effetti rilevanti sulla matrice e sul legame fibra-malta. Al contrario, i provini S3, immersi per un periodo più prolungato, mostrano un'evoluzione del comportamento meccanico più evidente, con un anticipo della fase di rottura e una riduzione dell'andamento trilineare. Tale fenomeno indica un progressivo deterioramento dell'interfaccia fibra-matrice, probabilmente dovuto alla penetrazione dei cloruri e alla conseguente perdita di coesione nella matrice cementizia. Invece, la resistenza ultima non mostra variazioni significative tra i tre gruppi, suggerendo che la degradazione si manifesti principalmente nella fase di adesione e trasferimento di sforzo, più che nella capacità portante

finale del composito. L'insieme dei risultati conferma che la durata dell'esposizione in ambiente salino influisce sul comportamento globale del sistema, e che periodi prolungati di immersione inducono un deterioramento progressivo della risposta deformativa anche in assenza di una riduzione marcata della resistenza di picco.

5.2.2 Risultati SolL1000 e SolL3000

Di seguito sono riportati i risultati dei provini soggetti ad immersione per 1000 (SolL1000) e 3000 (SolL3000) ore in soluzione composta da acqua deionizzata con aggiunta di cloruro di sodio all'4% (NaCl) e sodio solfato decaidrato al 2% (Na₂SO₄).

A livello visivo, fig. 5-11, si possono vedere dei cambiamenti, già dopo 1000 ore si manifestano sui provini efflorescenze e variazioni cromatiche che aumentano nel caso dei provini immersi per 3000 ore. Rispetto ai provini analizzati nel paragrafo precedente però, la presenza di degrado è minore.



Figura Analisi e discussione dei risultati-41: a) provino prima e dopo l'invecchiamento (1000 ore),
b) provino prima e dopo l'invecchiamento (3000 ore).

In figura 5-12 sono riportati i grafici forza-spostamento delle prove eseguite sui sei campioni soggetti a immersione per 1000 ore (a) e sui sei immersi per 3000 ore (b). Il gruppo SolL1000 presenta un comportamento più omogeneo rispetto al gruppo SolL3000, ed anche il

comportamento trilineare nella prima serie è più presente che nella seconda anche se molto meno leggibile rispetto ai provini non trattati. Inoltre, nella maggior parte dei casi, fatta eccezione per il provino SolL1000_01, le prove sono state interrotte poiché la cella di carico utilizzata poteva sostenere un valore massimo di 5000 N.

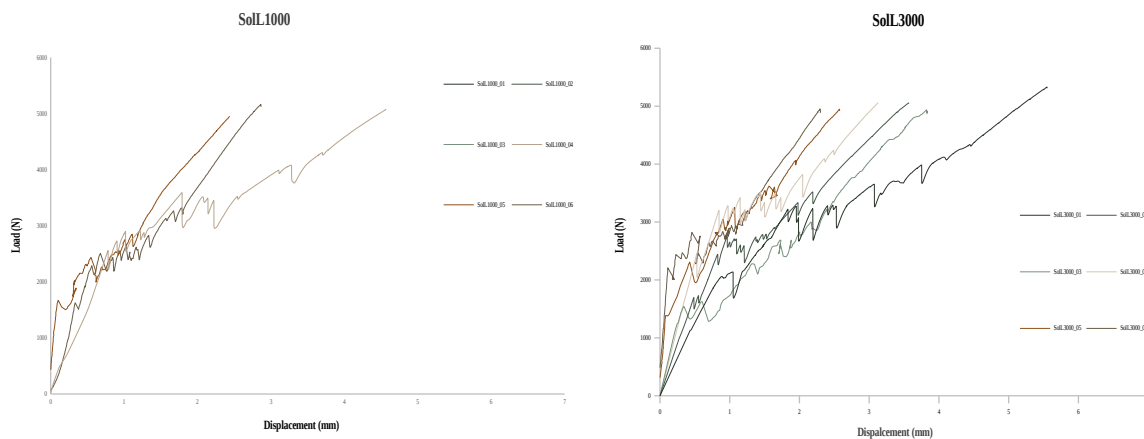


Figura Analisi e discussione dei risultati-42: Curve carico-spostamento provini SolL1000 e SolL3000.

In figura 5-13 sono riportate le immagini di due esempi di prova, come detto in precedenza, le prove sono state interrotte per non causare danni alla cella di carico; pertanto, l'immagine mostra il solo formarsi di fessurazioni lungo tutta la lunghezza libera senza giungere però a rottura. L'unico provino che ha raggiunto la completa rottura della matrice, nella parte inferiore a ridosso della piastra, ed il conseguente scorrimento della fibra, è il provino SolL1000_01 (fig. 5-14).



Figura Analisi e discussione dei risultati-43: Provini SolL3000_05 ed SolL1000_05, esempio prove interrotte.



Figura Analisi e discussione dei risultati-44: Provino SolL1000_01, rottura matrice parte inferiore.

In figura 5-15 sono riportati i grafici di tutti i campioni del gruppo SolL1000 in termini di sforzo-deformazione, in particolare, nel secondo grafico, vengono riportati i valori riferiti al modello semplificato, con in rosso la media.

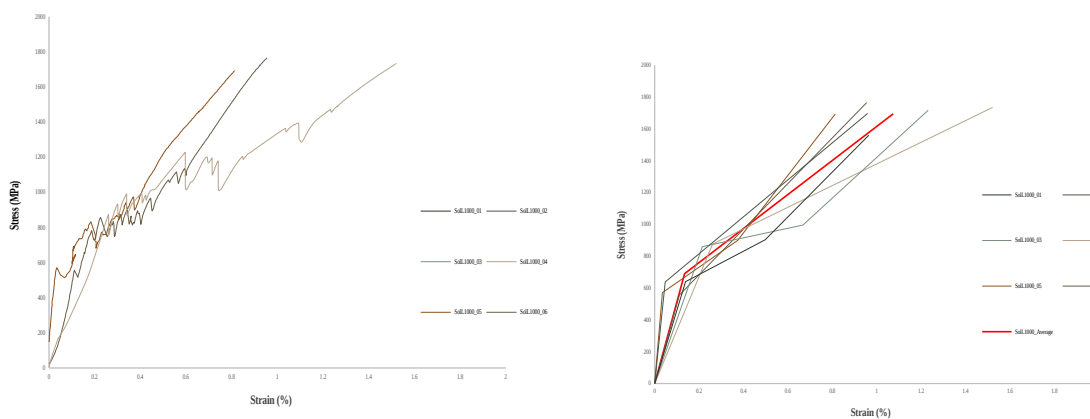


Figura Analisi e discussione dei risultati-45: Curve sforzo-deformazione coupon SolL1000.

Nella tabella 5-7 vengono riportati i risultati numerici in termini di sforzo-deformazione di questa serie.

ID	SolL1000 _01	SolL1000 _02	SolL1000 _03	SolL1000 _04	SolL1000 _05	SolL1000 _06	MEDIA	COV
σ_1 (MPa)	640	639	860	876	571	556	690	19%

ID	SolL1000 _01	SolL1000 _02	SolL1000 _03	SolL1000 _04	SolL1000 _05	SolL1000 _06	MEDIA	COV
σ_{II} (MPa)	903	-	996	-	899	-	-	-
σ_{III} (MPa)	1560	1697*	1717*	1734*	1693*	1765*	1694*	4%
ϵ_I (%)	0,139	0,048	0,215	0,261	0,035	0,111	0,135	61%
ϵ_{II} (%)	0,498	-	0,668	-	0,374	-	-	-
ϵ_{III} (%)	0,964	0,959*	1,232*	1,522*	0,813*	0,955*	1,074*	22%
E_1 (kN/mm ²)	460	1340	401	336	1645	499	780	66%
E_2 (kN/mm ²)	181	-	149	-	241	-	-	-
E_3 (kN/mm ²)	162	177*	139*	114*	208*	185*	164*	19%
σ_{III}/f_t	0,52	0,56	0,57	0,58	0,56	0,59	0,56	4%

*valore influenzato dal fatto che la prova è stata interrotta per non danneggiare la cella di carico.

Tabella Analisi e discussione dei risultati- 20: Risultati coupon SolL1000.

I risultati delle prove evidenziano un comportamento meccanico complessivamente stabile in termini di capacità resistente, con una dispersione particolarmente contenuta dei parametri associati allo stato limite ultimo, a fronte di una maggiore variabilità nella fase iniziale della risposta. La tensione ultima media σ_{III} risulta pari a 1694 MPa, con un coefficiente di variazione molto basso (COV = 4%), ricordiamo però che per tre dei sei provini la prova è stata interrotta per non danneggiare la cella di carico; pertanto, questo valore può essere suscettibile di difetto. Il rapporto medio σ_{III} / f_t di 0,56 (COV = 4%) conferma che, anche in questo caso, il sistema mantiene una quota significativa della resistenza nominale del tessuto in PBO. Rispetto ai provini immersi per 1000 h nella prima soluzione salina, si osserva un incremento della tensione ultima media (da circa 1477 MPa a 1694 MPa), suggerendo che la diversa composizione della soluzione non abbia prodotto un degrado più severo della fibra, ma abbia piuttosto influenzato principalmente la risposta della matrice e dell'interfaccia. Le tensioni caratteristiche dei primi stadi risultano più disperse. Il valore medio di σ_I di 690 MPa (COV = 19%) evidenzia una risposta iniziale meno omogenea rispetto allo stato limite ultimo, mentre i valori di σ_{II} , rilevati solo per alcuni provini, mostrano una perdita del comportamento trilineare in cui la seconda fase non risulta più riconoscibile. Le deformazioni associate mostrano una marcata differenziazione tra i diversi stadi. Le deformazioni iniziali ϵ_I presentano una dispersione molto elevata (valore medio 0,135%, COV = 61%), indicativa di un comportamento fortemente influenzato da

danneggiamenti microstrutturali localizzati e dalla variabilità della matrice dopo l'esposizione salina. Al contrario, la deformazione ultima ε_{III} risulta relativamente più stabile, con un valore medio pari a 1,074% (COV = 22%), leggermente superiore a quello osservato nei provini immersi nella prima soluzione salina, indicando una buona capacità deformativa residua del sistema, anche in questo caso il dato è suscettibile di errore dato che per tre provini la prova è stata interrotta. L'analisi dei moduli elastici conferma la maggiore sensibilità delle fasi iniziali al condizionamento ambientale. Il modulo E_1 mostra un'elevata dispersione (valore medio 780 kN/mm², COV = 66%), evidenziando una risposta iniziale non uniforme legata al degrado della matrice e dell'interfaccia. Il modulo finale E_3 , con valore medio 164 kN/mm² e COV del 19%, conferma una rigidità residua stabile nella fase governata dalla fibra in PBO.

Nel complesso, i risultati ottenuti dopo 1000 ore di immersione in questa soluzione mostrano che il sistema mantiene un'elevata capacità resistente e buona stabilità a rottura, mentre il degrado indotto dall'ambiente salino si manifesta principalmente come aumento della dispersione nelle fasi iniziali di carico e come una maggiore variabilità dei parametri legati alla matrice e all'interfaccia fibra-matrice.

In figura 5-16 sono riportati i grafici di tutti i campioni del gruppo SolL3000 in termini di sforzo-deformazione, ed anche in questo caso, nel secondo grafico, vengono riportati i valori riferiti al modello trilineare semplificato, con in rosso la media.

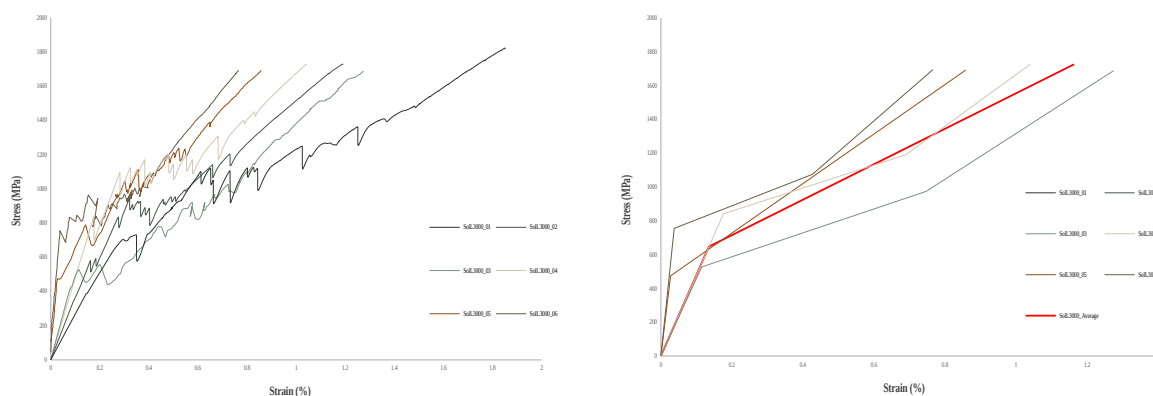


Figura Analisi e discussione dei risultati-46: Curve sforzo-deformazione coupon SolL3000.

Nella tabella 5-8 vengono riportati i risultati numerici in termini di sforzo-deformazione di questa serie.

ID	SolL3000 _01	SolL3000 _02	SolL3000 _03	SolL3000 _04	SolL3000 _05	SolL3000 _06	MEDIA	COV
σ_I (MPa)	704	580	527	841	474	755	647	20%
σ_{II} (MPa)	-	-	974	1191	-	1075	-	-
σ_{III} (MPa)	1823*	1730*	1688*	1728*	1692*	1694*	1726*	3%
ϵ_I (%)	0,295	0,162	0,115	0,176	0,027	0,038	0,135	67%
ϵ_{II} (%)	-	-	0,747	0,689	-	0,427	-	-
ϵ_{III} (%)	1,850*	1,189*	1,274*	1,041*	0,858*	0,765*	1,163*	30%
E_1 (kN/mm ²)	239	359	458	478	1736	2009	880	81%
E_2 (kN/mm ²)	-	-	130	173	-	252	-	-
E_3 (kN/mm ²)	99*	145*	132*	166*	197*	221*	160*	25%
σ_{III}/f_t	0,60	0,56	0,56	0,57	0,56	0,56	0,57	3%

*valore influenzato dal fatto che la prova è stata interrotta per non danneggiare la cella di carico.

Tabella Analisi e discussione dei risultati-21: Risultati coupon SolL3000.

I risultati delle prove mostrano un comportamento meccanico complessivamente molto stabile in termini di capacità resistente ultima, confermando l'elevata durabilità della fibra in PBO anche in condizioni di esposizione prolungata ad ambiente salino aggressivo. La tensione ultima media σ_{III} risulta pari a 1726 MPa, con un coefficiente di variazione estremamente contenuto (COV = 3%), ciò è dovuto al fatto che tutte le prove sono state interrotte per non danneggiare la cella di carico; pertanto, si ritiene che il valore della tensione ultima possa sia superiore di quello registrato. Il rapporto σ_{III} / f_t di 0,57 (COV = 3%) indica che, anche dopo un periodo di esposizione prolungato, i provini mantengono una quota significativa e molto uniforme della resistenza nominale del tessuto in PBO. Rispetto ai provini immersi per 1000 h nella medesima soluzione (SolL1000), si osserva un ulteriore incremento della tensione ultima media (da circa 1694 MPa a 1726 MPa), suggerendo che l'invecchiamento prolungato non ha indotto un degrado diretto della fibra, ma ha probabilmente interessato prevalentemente la matrice e l'interfaccia. Le tensioni associate alle fasi iniziali mostrano invece una maggiore dispersione. Il valore medio di σ_I pari a 647 MPa (COV = 20%) è leggermente inferiore rispetto al caso SolL1000, indicando una risposta iniziale più sensibile al prolungamento dell'esposizione

salina. I valori di σ_{II} , rilevati solo in alcuni provini, anche in questo caso mostrano una perdita del comportamento trilineare in cui la seconda fase non risulta più riconoscibile. Per quanto riguarda le deformazioni, le ε_I presentano una dispersione molto elevata (valore medio 0,135%, COV = 67%), confermando che la fase iniziale è fortemente influenzata da fenomeni localizzati di degrado microstrutturale e da una risposta non uniforme della matrice. Mentre la deformazione ultima ε_{III} mostra un valore medio pari a 1,163% (COV = 30%), leggermente superiore rispetto ai provini immersi per 1000 h, evidenziando una buona capacità deformativa residua del sistema anche dopo esposizione prolungata. L'analisi dei moduli elastici conferma che il degrado indotto dall'ambiente salino agisce principalmente sulle fasi iniziali del comportamento meccanico. Il modulo E_1 presenta una dispersione molto elevata (valore medio 880 kN/mm², COV = 81%), a testimonianza di una risposta iniziale fortemente eterogenea. Il modulo finale E_3 , invece, mostra una buona stabilità, con un valore medio pari a 160 kN/mm² e COV del 25%, confermando che la fase governata dalla fibra in PBO risulta poco influenzata dall'invecchiamento salino anche a lungo termine.

Nel complesso, i risultati ottenuti dopo 3000 ore di immersione confermano che il sistema studiato presenta un'elevata resistenza residua e una risposta a rottura estremamente ripetibile, mentre il prolungamento dell'esposizione accentua principalmente la variabilità delle fasi iniziali legate alla matrice e all'interfaccia fibra-matrice. L'elevata dispersione di σ_I , ε_I ed E_1 , indica che l'interfaccia costituisce il punto maggiormente vulnerabile in ambiente salino, soprattutto in termini di risposta elastica iniziale.

Infine, in figura 5-17 ed in tabella 5-9 viene mostrato il confronto delle medie dei risultati dei provini non trattati (NT), di quelli soggetti ad immersione per 1000 ore (SolL1000) ed infine di quelli soggetti a immersione per 3000 ore (SolL3000).

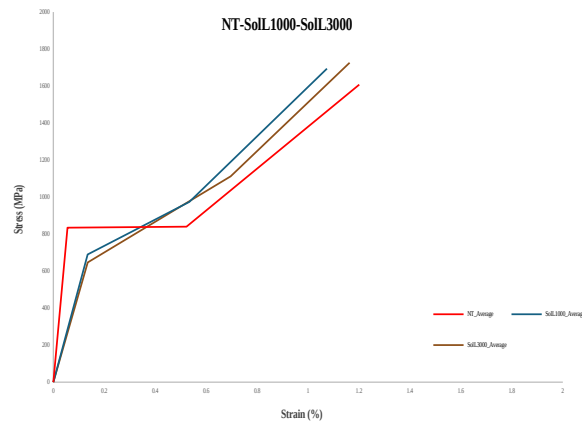


Figura Analisi e discussione dei risultati-47: Confronto risultati sforzo-deformazione delle medie dei provini NT-SolL1000 ed SolL3000.

		σ_I (MPa)	σ_{II} (MPa)	σ_{III} (MPa)	ϵ_I (%)	ϵ_{II} (%)	ϵ_{III} (%)	E_I (kN/mm ²)	E_2 (kN/mm ²)	E_3 (kN/mm ²)	σ_{III}/f_{It}
NT	Media	835	840	1608	0,033	0,314	1,200	3245	276	225	0,53
	COV	10%	11%	5%	48%	18%	8%	53%	19%	11%	5%
SolL1000	Media	690	-	1694*	0,135	-	1,074*	780	-	164*	0,56
	COV	19%	-	4%	61%	-	22%	66%	-	19%	4%
SolL3000	Media	647	-	1726*	0,135	-	1,163*	880	-	160*	0,57
	COV	20%	-	3%	67%	-	30%	81%	-	25%	3%

*valore influenzato dal fatto che la prova è stata interrotta per non danneggiare la cella di carico.

Tabella Analisi e discussione dei risultati-22: Confronto valori medi e COV coupon NT, SolL1000 ed SolL3000.

Il confronto tra i risultati dei provini non trattati (NT) e quelli sottoposti a immersione per 1000 (SolL1000) e 3000 (SolL3000) consente di valutare in modo diretto l'effetto dell'esposizione salina prolungata sul comportamento meccanico dei sistemi PBO-FRCM, distinguendo tra risposta iniziale, fase di fessurazione e comportamento governato dalla fibra. Dal punto di vista della resistenza ultima, i risultati mostrano che l'esposizione salina non induce un degrado della capacità resistente della fibra in PBO, ma anzi è associata a un lieve incremento della tensione ultima media. I provini NT presentano una σ_{III} media pari a circa 1608 MPa, mentre i provini SolL1000 e SolL3000 raggiungono valori medi rispettivamente di 1694 MPa e 1726 MPa, con un incremento complessivo dell'ordine del +5-7% rispetto alla condizione non trattata. Anche il

rapporto σ_{III} / f_{ft} passa da circa 0,53 (NT) a 0,56 (SolL1) e 0,57 (SolL3), confermando che la fibra mantiene, e in parte migliora, la propria efficienza resistente dopo immersione salina. Inoltre, la dispersione dei risultati si riduce sensibilmente, con COV che scende da circa 10% nei NT a 4% e 3% nei provini immersi, indicando una risposta a rottura più ripetibile, sottolineando però che tale risultato è affetto da possibile difetto poiché, in molti casi, le prove sono state interrotte. Diverso è il comportamento nelle fasi iniziali e intermedie. La tensione di prima fessurazione σ_I nei provini NT è mediamente più elevata e più omogenea, mentre nei provini SolL1000 e SolL3000 si osserva una maggiore dispersione (COV intorno al 20%) e valori medi comparabili o leggermente inferiori. Questo andamento suggerisce che l'ambiente salino agisca prevalentemente sulla matrice e sull'interfaccia fibra-matrice, anticipando la fessurazione e rendendo meno uniforme la risposta iniziale. Analogamente, la fase intermedia σ_{II} , quando identificabile, mostra valori coerenti tra le diverse condizioni, ma con una maggiore difficoltà di individuazione nei provini invecchiati, segno di una transizione più graduale e meno netta tra le fasi del comportamento. Per quanto riguarda la deformabilità, i provini NT mostrano una ϵ_{III} media pari a circa 1,2%, mentre i provini SolL1000 e SolL3000 raggiungono valori medi rispettivamente di 1,07% e 1,16%, indicando un incremento significativo della deformazione ultima dopo immersione salina. Questo aspetto suggerisce che il sistema, pur con un'interfaccia più danneggiata, sviluppa una maggiore capacità deformativa globale, probabilmente associata a un progressivo rilassamento della matrice e a un comportamento più spiccatamente governato dalla fibra. L'analisi dei moduli elastici conferma che il degrado indotto dall'ambiente salino è concentrato soprattutto nelle fasi iniziali. Il modulo E_1 risulta elevato e relativamente più stabile nei provini NT, mentre nei provini SolL1000 e SolL3000 mostra una drastica dispersione (COV fino all'80%), evidenziando una forte eterogeneità della rigidità iniziale dovuta a microfessurazione e perdita di coesione della matrice. Per quanto riguarda il modulo elastico E_3 , associato alla fase governata prevalentemente dalla fibra, i provini non trattati (NT) presentano un valore medio pari a 225 kN/mm², significativamente superiore rispetto a quello misurato nei provini sottoposti a immersione salina. In particolare, E_3 si riduce a circa 164 kN/mm² nei provini SolL1000 e a circa 160 kN/mm² nei provini SolL3000. Questo dato indica che, sebbene l'immersione salina non comprometta la resistenza ultima della fibra (σ_{III} rimane comparabile o addirittura superiore rispetto ai NT), essa influisce sulla rigidità globale del sistema nella fase finale, riducendo l'efficienza del trasferimento degli sforzi tra matrice e fibra. La diminuzione di E_3 può quindi essere interpretata come un effetto del danneggiamento progressivo dell'interfaccia fibra-matrice, che porta a un comportamento più deformabile del composito, pur in presenza di una fibra strutturalmente integra. È inoltre significativo osservare che il

valore di E_3 rimane sostanzialmente costante passando da 1000 a 3000 ore di immersione, suggerendo che la perdita di rigidità avvenga prevalentemente nelle prime fasi di esposizione, senza un degrado progressivo marcato al crescere del tempo di invecchiamento. Questo conferma ancora una volta che l'ambiente salino agisce soprattutto sull'interfaccia e sulla matrice, mentre la fibra in PBO conserva buone prestazioni meccaniche anche per tempi di esposizione prolungati.

Nel complesso, il confronto evidenzia che la seconda soluzione salina, anche per tempi di esposizione prolungati, non compromette la resistenza ultima del sistema, ma agisce selettivamente sull'interfaccia e sulla matrice, aumentando la variabilità della risposta iniziale e modificando la distribuzione delle deformazioni. Il passaggio da 1000 a 3000 ore non introduce un ulteriore degrado marcato della capacità resistente, ma accentua la separazione tra una fase iniziale più fragile e dispersa e una fase finale stabile e governata dalla fibra, confermando l'elevata durabilità del PBO in ambiente salino e il ruolo critico dell'interfaccia come principale meccanismo di vulnerabilità.

5.2.3 Risultati SolS1000 e SolS3000

Di seguito sono riportati i risultati dei provini soggetti ad immersione per 1000 (SolS1000) e 3000 (SolS3000) ore in soluzione composta da acqua deionizzata con aggiunta di sodio solfato decaidrato (4%) e cloruro di sodio (8%).

In fig.5-18 vengono mostrati i provini tipo dopo l'invecchiamento, per mostrare come già a livello visivo siano notabili dei cambiamenti. Come nel caso precedente si ha il manifestarsi di efflorescenze e variazioni cromatiche che aumentano all'aumentare del tempo di immersione. Questa tipologia manifesta un degrado maggiore rispetto a quella denominata SolL, dovuta al fatto che la soluzione presenta quantitativi maggiori di sale e sodio.



Figura Analisi e discussione dei risultati-48: a) provino prima e dopo l'invecchiamento (1000 ore),
b) provino prima e dopo l'invecchiamento (3000 ore).

In figura 5-19 sono riportati i grafici forza spostamento delle prove eseguite sui sei campioni soggetti a immersione per 1000 ore (a) e sui sei immersi per 3000 ore (b). Il gruppo SolS1000 presenta un comportamento più omogeneo rispetto al gruppo SolS3000, ed anche il comportamento trilineare nel primo gruppo è ancora visibile anche se non in tutte le prove, mentre per il secondo gruppo è riscontrabile solo in due campioni su sei, rispettivamente SolS3000_02 e SolS3000_03. Inoltre, nella maggior parte dei casi, fatta eccezione per il provino SolS1000_05; SolS1000_06; SolS3000_02 e SolS3000_04, le prove sono state interrotte poiché la cella di carico utilizzata poteva sostenere un valore massimo di 5000 N.

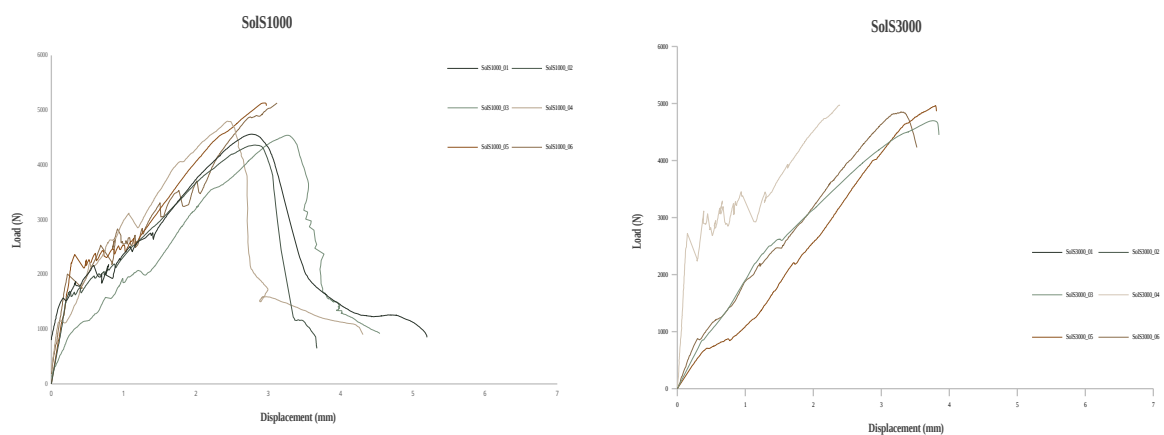


Figura Analisi e discussione dei risultati-49: Curve carico-spostamento provini SolS1000 e SolS3000.

In figura 5-20 sono mostrati i tipi di rottura, dato che la maggior parte delle prove è stata interrotta, l'immagine mostra solo la presenza di fessurazioni lungo tutta la lunghezza libera dei campioni. I provini SolS1000_01, SolS1000_03 e SolS1000_04 hanno raggiunto la rottura, avvenuta nella parte inferiore o nella parte superiore a ridosso delle piastre (fig. 5-21). Il provino SolS3000_03 ha raggiunto la rottura per sfaldamento della malta lungo la porzione incollata alla piastra e i provini SolS1000_02, SolS3000_01 e SolS3000_06 per sfaldamento della malta e separazione tra matrice e fibra (fig. 5-22). Questo comportamento anomalo rispetto agli altri test è avvenuto probabilmente perché, dopo l'immersione in soluzione, i provini apparivano incurvati e quindi non più perfettamente piani.



Figura Analisi e discussione dei risultati-50: Provini SolS1000_05 ed SolL3000_04, prove interrotte.



Figura Analisi e discussione dei risultati-51: Provino SolS1000_01; SolS1000_03 e SolS1000_04, rottura matrice

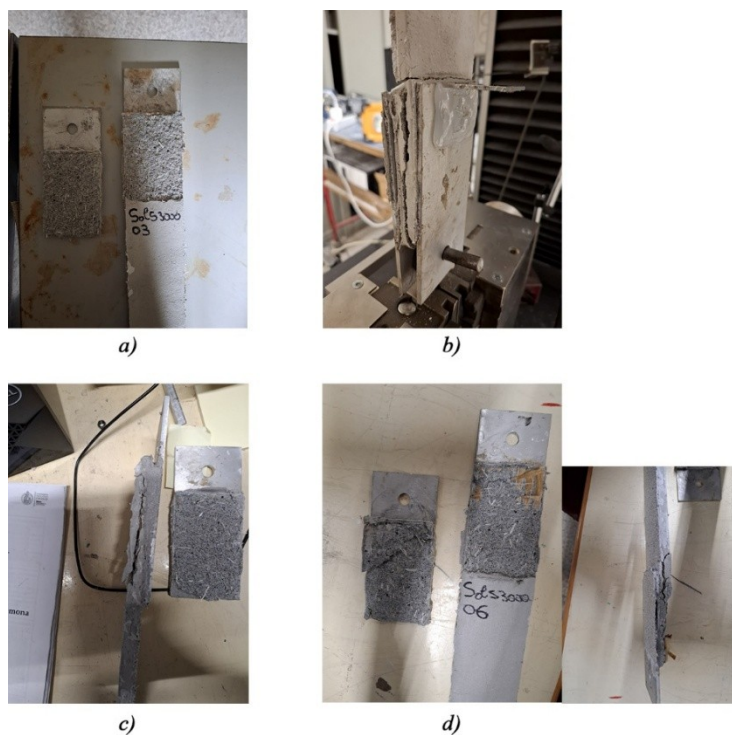


Figura Analisi e discussione dei risultati-52: a) Provino SolS3000_3; b) Provino SolS1000_02; c) Provino SolS3000_01; d) Provino SolS3000_06.

In figura 5-23 sono riportati i grafici di tutti i campioni del gruppo SolS1000 in termini di sforzo-deformazione, ed anche in questo caso, nel secondo grafico, vengono riportati i valori riferiti al modello trilineare semplificato, con in rosso la media.

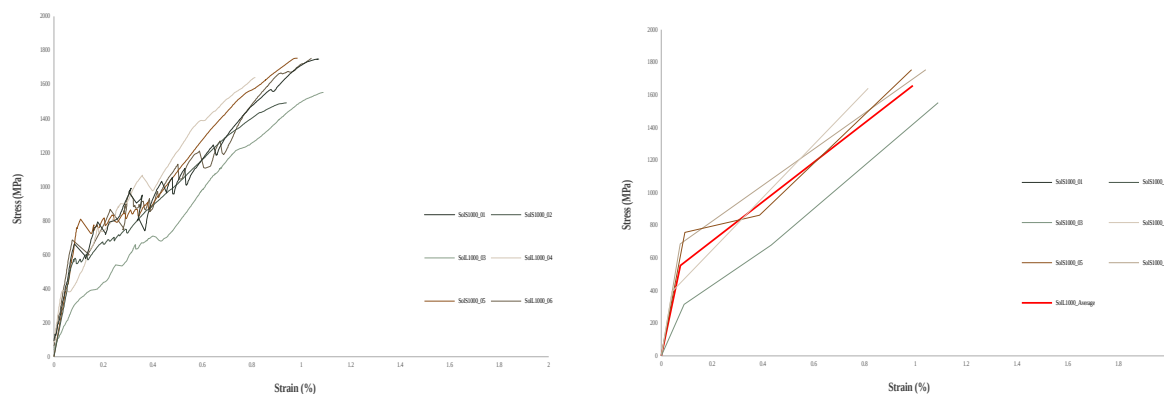


Figura Analisi e discussione dei risultati-53: Curve sforzo-deformazione coupon SolS1000.

Nella tabella 5-10 vengono riportati i risultati numerici in termini di sforzo-deformazione di questa serie.

ID	SolS1000 _01	SolS1000 _02	SolS1000 _03	SolS1000 _04	SolS1000 _05	SolS1000 _06	MEDIA	COV
σ_I (MPa)	662	508	315	394	757	686	554	29%
σ_{II} (MPa)	-	-	679	-	862	-	-	-
σ_{III} (MPa)	1749	1492	1553	1640	1754*	1754*	1657	6%
ϵ_I (%)	0,083	0,066	0,090	0,042	0,093	0,074	0,075	23%
ϵ_{II} (%)	-	-	0,432	-	0,387	-	-	-
ϵ_{III} (%)	1,071	0,941	1,090	0,814	0,985*	1,041*	0,990	9%
E_1 (kN/mm ²)	798	775	351	930	816	923	765	25%
E_2 (kN/mm ²)	-	-	157	-	223	-	-	-
E_3 (kN/mm ²)	163	159	142	201	178*	169*	169	11%
σ_{III}/f_{It}	0,58	0,49	0,52	0,54	0,58	0,58	0,55	6%

*valore influenzato dal fatto che la prova è stata interrotta per non danneggiare la cella di carico.

Tabella Analisi e discussione dei risultati- 23: Risultati coupon SolS1000.

I provini mostrano un comportamento meccanico complessivamente stabile nella fase finale governata dalla fibra, a fronte di una maggiore dispersione nelle fasi iniziali e intermedie del comportamento a trazione. La resistenza ultima σ_{III} presenta un valore medio pari a 1657 MPa, con un coefficiente di variazione contenuto (6%), indicativo di una buona ripetibilità sperimentale, bisogna sottolineare che, come per i casi precedenti, alcune prove sono state interrotte per non danneggiare la cella di carico, e tale valore, pertanto, potrebbe essere suscettibile di errore. Il valore della resistenza ultima risulta anche comparabile con quelli osservati per le altre condizioni di immersione salina e conferma che, anche in questo ambiente aggressivo, la fibra in PBO mantiene un'elevata capacità resistente. Coerentemente, il rapporto σ_{III}/f_{It} di 0,55 evidenzia un buon livello di sfruttamento della resistenza a trazione della fibra. La deformazione ultima ϵ_{III} assume un valore medio pari a 0,99%, con una dispersione limitata (COV pari al 9%). Questo dato suggerisce che il composito conserva una buona capacità deformativa globale.

Per quanto riguarda il modulo elastico E_3 , associato alla fase fessurata completamente sviluppata e dominata dal contributo della fibra, si osserva un valore medio pari a circa 169 kN/mm², con una variabilità moderata (COV pari a 11%). Rispetto ai provini non trattati, per i quali E_3 risulta sensibilmente più elevato, tale riduzione conferma l'effetto dell'ambiente salino sulla rigidità globale del sistema, riconducibile principalmente a un progressivo indebolimento dell'interfaccia fibra-matrice, più che a un degrado della fibra stessa. Le fasi iniziali del comportamento (σ_I , ε_I , E_I) mostrano invece una dispersione più marcata (COV fino al 29% per σ_I), evidenziando una risposta meno uniforme della matrice e dell'adesione iniziale, verosimilmente influenzata dall'azione chimico-fisica della soluzione salina sul legante e sulla zona di interfaccia. Analogamente, la fase intermedia σ_{II} è osservabile solo in un numero limitato di provini, a conferma di una transizione meno netta tra fessurazione diffusa e piena attivazione della fibra.

Nel complesso, i risultati indicano che l'immersione per 1000 ore non compromette significativamente la capacità portante ultima del sistema PBO-FRCM, ma induce una riduzione della rigidità e una maggiore variabilità nella risposta iniziale, coerente con quanto già osservato per le altre condizioni di esposizione ambientale investigate.

In figura 5-24 sono riportati i grafici di tutti i campioni del gruppo SolS3000 in termini di sforzo-deformazione, ed anche in questo caso, nel secondo grafico, vengono riportati i valori riferiti al modello trilineare semplificato, con in rosso la media.

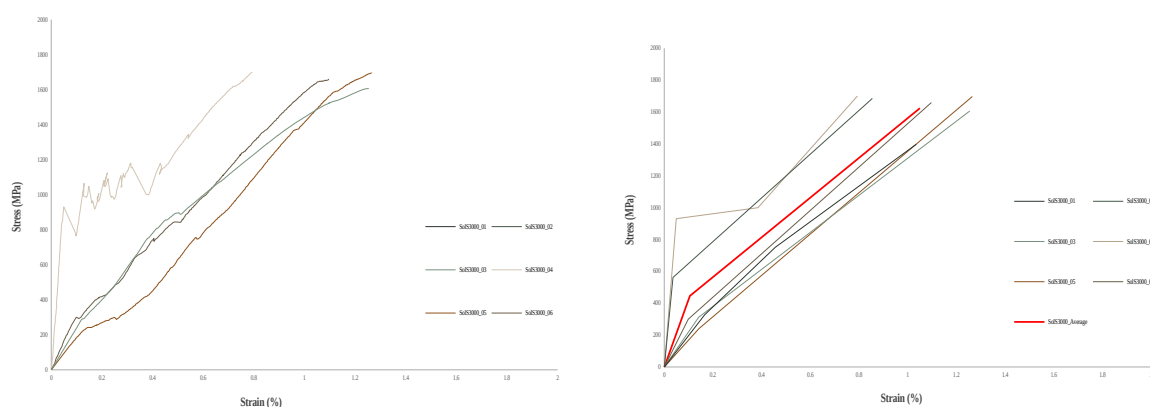


Figura Analisi e discussione dei risultati-54: Curve sforzo-deformazione coupon SolS3000.

Nella tabella 5-11 vengono riportati i risultati numerici in termini di sforzo-deformazione di questa serie.

ID	SolS3000 _01	SolS3000 _02	SolS3000 _03	SolS3000 _04	SolS3000 _05	SolS3000 _06	MEDIA	COV
σ_I (MPa)	328	562	312	930	241	300	446	54%
σ_{II} (MPa)	-	-	-	999	-	-	-	-
σ_{III} (MPa)	1398	1685*	1606	1700*	1697	1659	1624	7%
ϵ_I (%)	0,166	0,036	0,141	0,049	0,142	0,099	0,105	46%
ϵ_{II} (%)	-	-	-	0,385	-	-	-	-
ϵ_{III} (%)	1,035	0,855*	1,255	0,794*	1,265	1,097	1,050	17%
E_1 (kN/mm ²)	198	1578	221	1890	169	304	727	99%
E_2 (kN/mm ²)	-	-	-	260	-	-	-	-
E_3 (kN/mm ²)	135	197*	128	214*	134	151	160	21%
σ_{III}/f_t	0,46	0,56	0,53	0,56	0,56	0,55	0,54	7%

*valore influenzato dal fatto che la prova è stata interrotta per non danneggiare la cella di carico.

Tabella Analisi e discussione dei risultati- 24: Risultati coupon SolS3000.

I risultati evidenziano una risposta meccanica complessivamente ancora governata dal contributo della fibra in PBO, ma con segni più marcati di degrado della fase iniziale e dell'interazione fibra-matrice, rispetto al caso a 1000 ore. La resistenza ultima σ_{III} presenta un valore medio pari a 1624 MPa, con una dispersione contenuta (COV di 7%), confermando una buona ripetibilità dei risultati e una sostanziale conservazione della capacità resistente ultima del sistema anche a seguito di un'esposizione prolungata. Il rapporto σ_{III}/f_t pari a 0,54 risulta in linea con quanto osservato per i provini immersi a 1000 ore nella stessa soluzione e per le altre condizioni saline investigate, indicando un livello di sfruttamento della fibra comparabile. La deformazione ultima ϵ_{III} assume un valore medio pari a 1,05%, con una variabilità moderata (COV di 17%). Tale valore, confrontabile con quello riscontrato per i provini SolS1000, suggerisce che l'esposizione prolungata non induce una perdita significativa di duttilità globale, nonostante il degrado ambientale. Il modulo elastico E_3 , rappresentativo della fase fessurata completamente sviluppata, risulta pari in media a circa 160 kN/mm², con un COV del 21%. Questo valore, leggermente inferiore rispetto al caso a 1000 ore, conferma una progressiva

riduzione della rigidità del composito, coerente con un indebolimento dell'interfaccia fibra-matrice e con una minore efficacia del trasferimento di sforzo in presenza di esposizioni saline prolungate. Le fasi iniziali del comportamento mostrano invece una marcata dispersione: la tensione σ_I presenta un COV elevato (54%), mentre il modulo E_I evidenzia una variabilità estremamente accentuata (COV di 99%). Ciò indica una risposta fortemente eterogenea della matrice e del primo stadio di adesione, verosimilmente influenzata da differenze locali nel grado di penetrazione della soluzione salina e nel livello di degrado microstrutturale. Analogamente, la fase intermedia σ_{II} risulta scarsamente individuabile, emergendo in modo netto in un solo provino, a conferma di una transizione poco definita tra fessurazione e piena attivazione della fibra.

Nel complesso, i risultati dei provini SolS3000 indicano che l'immersione prolungata incide prevalentemente sulla rigidità e sulla risposta iniziale del sistema, aumentando la dispersione dei parametri associati alla matrice e all'interfaccia, mentre la capacità portante ultima e la deformabilità globale restano sostanzialmente preservate, in continuità con quanto osservato per le altre condizioni di invecchiamento in ambiente salino.

Infine, in figura 5-25 ed in tabella 5-9 viene mostrato il confronto delle medie dei risultati dei provini non trattati (NT), di quelli soggetti ad immersione per 1000 ore (SolS1000) ed infine di quelli soggetti a immersione per 3000 ore (SolS3000).

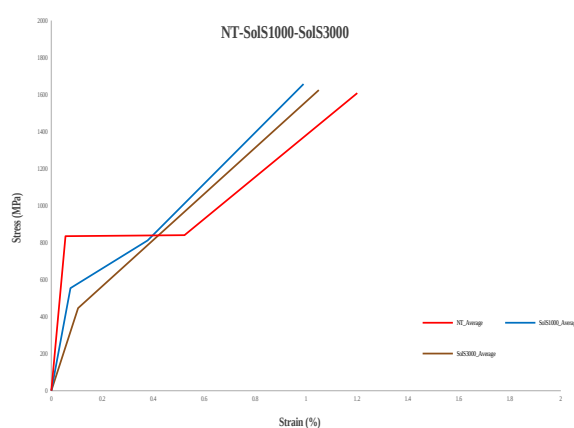


Figura Analisi e discussione dei risultati-55: Confronto risultati sforzo-deformazione delle medie dei provini NT-SolS1000 ed SolS3000.

		σ_I	σ_{II}	σ_{III}	ϵ_I	ϵ_{II}	ϵ_{III}	E_I	E_{II}	E_{III}	σ_{III}/f_{ft}
		(MPa)	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(%)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	
NT	Media	835	840	1608	0,033	0,314	1,200	3245	276	225	0,53
	COV	10%	11%	5%	48%	18%	8%	53%	19%	11%	5%
SolS1000	Media	554	-	1657	0,075	-	0,990	765	-	169	0,55
	COV	29%	-	6%	23%	-	9%	25%	-	11%	6%
SolS3000	Media	446	-	1624	0,105	-	1,050	727	-	160	0,54
	COV	54%	-	7%	17%	-	17%	99%	-	21%	7%

*valore influenzato dal fatto che la prova è stata interrotta per non danneggiare la cella di carico.

Tabella Analisi e discussione dei risultati- 25: Confronto valori medi e COV coupon NT, SolS1000 ed SolS3000.

I provini non trattati mostrano una resistenza ultima media pari a circa 1608 MPa, con un rapporto σ_{III}/f_{ft} di 0,49, indicativo di un parziale sfruttamento della resistenza nominale della fibra, coerente con un meccanismo di crisi governato dall'interfaccia fibra-matrice. Dopo 1000 ore di immersione nella terza soluzione (SolS1000), la resistenza ultima aumenta lievemente, attestandosi su un valore medio di circa 1657 MPa, con un incremento del rapporto σ_{III}/f_{ft} fino a circa 0,55. Tale andamento suggerisce che, nelle fasi iniziali di esposizione, l'azione della soluzione salina non determini un immediato deterioramento del sistema, ma possa piuttosto favorire un temporaneo miglioramento del trasferimento di sforzo, probabilmente riconducibile a fenomeni di ulteriore maturazione della matrice e a una migliore collaborazione fibra-malta. Prolungando l'invecchiamento fino a 3000 ore (SolS3000), la resistenza ultima si riduce lievemente rispetto ai valori di SolS1000, raggiungendo una media di circa 1624 MPa, comunque del tutto comparabile a quella dei provini non trattati. Il rapporto σ_{III}/f_{ft} , pari a circa 0,54, conferma che anche a lungo termine l'esposizione salina non comporta una perdita significativa della capacità resistente ultima del sistema, evidenziando una buona stabilità della fibra nei confronti dell'ambiente aggressivo considerato. Diversamente, effetti più marcati dell'invecchiamento emergono analizzando la deformazione ultima e la rigidità nella fase fessurata. I provini NT presentano una deformazione ultima media pari a circa 1,2%, mentre i campioni SolS1000 e SolS3000 mostrano valori sensibilmente più elevati, rispettivamente pari a circa 0,99% e 1,05%. L'aumento progressivo della deformabilità ultima indica una risposta più duttile del composito, associata a una maggiore diffusione della fessurazione e a un progressivo indebolimento dell'interfaccia fibra-matrice, che consente alla fibra di mobilitare

deformazioni più elevate prima della crisi. Tale interpretazione è ulteriormente confermata dall'analisi del modulo elastico E_3 , che per i provini non trattati è pari a circa 225 kN/mm², mentre si riduce a circa 169 kN/mm² dopo 1000 ore e a circa 160 kN/mm² dopo 3000 ore di immersione. La riduzione complessiva della rigidezza, dell'ordine del 25-30%, evidenzia come l'azione salina incida principalmente sulla qualità del legame fibra-matrice e sul meccanismo di trasferimento degli sforzi nella fase fessurata, senza tuttavia compromettere il contributo resistente finale della fibra in PBO.

Infine, l'analisi delle fasi iniziali del comportamento meccanico mette in luce un sensibile aumento della dispersione dei risultati per i provini invecchiati, con valori di COV significativamente superiori rispetto ai NT. Ciò suggerisce che l'esposizione salina agisca in modo non uniforme sulla microstruttura della matrice e sull'interfaccia, generando risposte meccaniche localmente differenziate. Nel complesso, il confronto mostra che l'invecchiamento induce modifiche rilevanti nella rigidezza e nella deformabilità del sistema, riconducibili a fenomeni di degrado interfaccia-matrice, mentre la resistenza ultima rimane sostanzialmente invariata anche a lungo termine. Questo comportamento conferma che, per i sistemi PBO-FRCM, la durabilità in ambiente salino è governata principalmente dall'evoluzione delle proprietà interfacciali piuttosto che da un degrado diretto della fibra. Tale comportamento può essere attribuito alla maggiore concentrazione di sali e di sodio nella soluzione, che ha determinato un'azione più aggressiva sulla matrice e sull'interfaccia fibra-malta, riducendo la capacità di trasferimento degli sforzi nel lungo periodo. Nel complesso, i dati indicano che, pur mantenendo una buona capacità portante, l'esposizione prolungata in soluzioni saline più concentrate porta a un deterioramento progressivo della fase iniziale di adesione e a una perdita di stabilità del comportamento post-fessurativo, aspetto che richiede ulteriori indagini per definire la soglia di durabilità del sistema in tali condizioni.

5.2.4 Confronto tra i risultati delle varie tipologie di invecchiamento (ambiente salino)

In questa sezione vengono riportati i risultati ottenuti dalle tre tipologie di invecchiamento accelerato riferite all'ambiente salino, riportati in dettaglio nelle sezioni precedenti. In tabella 5-13 vengono riportate le medie dei risultati dei provini non trattati (NT); degli S1; S3; SolL1000; SolL3000; SolS1000 e SolS3000 .

		σ_I (MPa)	σ_{II} (MPa)	σ_{III} (MPa)	ϵ_I (%)	ϵ_{II} (%)	ϵ_{III} (%)	E_I (kN/mm ²)	E_{II} (kN/mm ²)	E_{III} (kN/mm ²)	σ_{III}/f_{It}
NT	Media	835	840	1608	0,033	0,314	1,200	3245	276	225	0,53
	COV	10%	11%	5%	48%	18%	8%	53%	19%	11%	5%
S1	Media	817	904	1477	0,068	0,478	1,052	1260	195	139	0,49
	COV	14%	13%	10%	28%	32%	16%	47%	38%	19%	10%
S3	Media	454	780	1595	0,068	0,344	0,922	1009	237	172	0,53
	COV	24%	13%	6%	60%	47%	6%	87%	12%	10%	6%
SolL1000	Media	690	-	1694*	0,135	-	1,074*	780	-	164*	0,56
	COV	19%	-	4%	61%	-	22%	66%	-	19%	4%
SolL3000	Media	647	-	1726*	0,135	-	1,163*	880	-	160*	0,57
	COV	20%	-	3%	67%	-	30%	81%	-	25%	3%
SolS1000	Media	554	-	1657	0,075	-	0,990	765	-	169	0,55
	COV	29%	-	6%	23%	-	9%	25%	-	11%	6%
SolS3000	Media	446	-	1624	0,105	-	1,050	727	-	160	0,54
	COV	54%	-	7%	17%	-	17%	99%	-	21%	7%

*valore influenzato dal fatto che la prova è stata interrotta per non danneggiare la cella di carico.

Tabella Analisi e discussione dei risultati-26: Confronto valori medi e COV coupon NT, SolL1000, SolL3000, SolS1000 ed SolS3000.

Nel complesso, il confronto tra i provini non trattati (NT) e quelli sottoposti a immersione in diverse soluzioni saline, per durate di 1000 e 3000 ore, evidenzia un quadro articolato in cui l'azione dell'ambiente aggressivo incide in modo selettivo sulle diverse componenti del comportamento meccanico dei sistemi PBO-FRCM. In termini di resistenza ultima a trazione, tutti i cicli di immersione considerati mostrano valori medi di σ_{III} confrontabili con quelli dei NT (attorno ai 1600 MPa), con rapporti σ_{III}/f_{It} compresi indicativamente tra 0,53 e 0,57, senza una chiara tendenza al degrado al crescere del tempo di esposizione. Ciò indica che la fibra in PBO mantiene sostanzialmente inalterata la propria capacità resistente, confermando un'elevata stabilità anche in presenza di soluzioni saline aggressive. Diversamente, effetti più significativi emergono analizzando la rigidezza e la deformabilità, che risultano fortemente influenzate sia

dal tipo di soluzione sia dalla durata dell'immersione. Rispetto ai NT, caratterizzati da un modulo E_3 di 225 kN/mm², tutti i provini immersi mostrano una riduzione sistematica della rigidità nella fase fessurata, con valori medi di E_3 compresi tra circa 160 e 170 kN/mm², indipendentemente dalla soluzione considerata. Tale riduzione, dell'ordine del 25-30%, risulta già evidente dopo 1000 ore e non mostra incrementi proporzionali passando a 3000 ore, suggerendo che il danno interfacciale si sviluppi prevalentemente nelle fasi iniziali di esposizione. Parallelamente, le deformazioni ultime ε_{III} risultano in generale maggiori rispetto ai NT (1,2%), raggiungendo valori medi compresi tra 0,99% e oltre 1,1% nei provini invecchiati, con un aumento più marcato nei campioni sottoposti a immersioni prolungate. Questo incremento di deformabilità è coerente con un progressivo indebolimento del legame fibra-matrice, che consente alla fibra di mobilitare deformazioni più elevate prima della crisi, a fronte di una minore capacità di trasferimento degli sforzi nella fase fessurata. Il confronto tra le diverse soluzioni saline non evidenzia differenze drastiche in termini di resistenza ultima, mentre risulta più discriminante rispetto alla dispersione dei risultati e alla risposta nelle fasi iniziali e intermedie della curva sforzo-deformazione. In particolare, alcune soluzioni mostrano un aumento significativo dei coefficienti di variazione di σ_t , ε_t ed E_t , indicando un'azione più eterogenea sulla microstruttura della matrice e sull'interfaccia, verosimilmente legata a differenti meccanismi di diffusione ionica e cristallizzazione dei sali.

I grafici che seguono (fig. 5-26) sintetizzano l'evoluzione delle principali grandezze meccaniche in termini di incremento o riduzione percentuale rispetto ai provini non trattati, costituendo uno strumento di supporto alla lettura critica dei risultati e alla valutazione comparativa dell'effetto delle diverse immersioni saline. In particolare, vengono confrontati i valori di: i) tensione di fessurazione della matrice; ii) resistenza ultima a trazione; iii) di deformazione ultima; iv) di pendenza dello stadio di completa fessurazione. La linea tratteggiata in rosso, presente nei vari grafici, rappresenta il valore medio dei provini che non trattati.

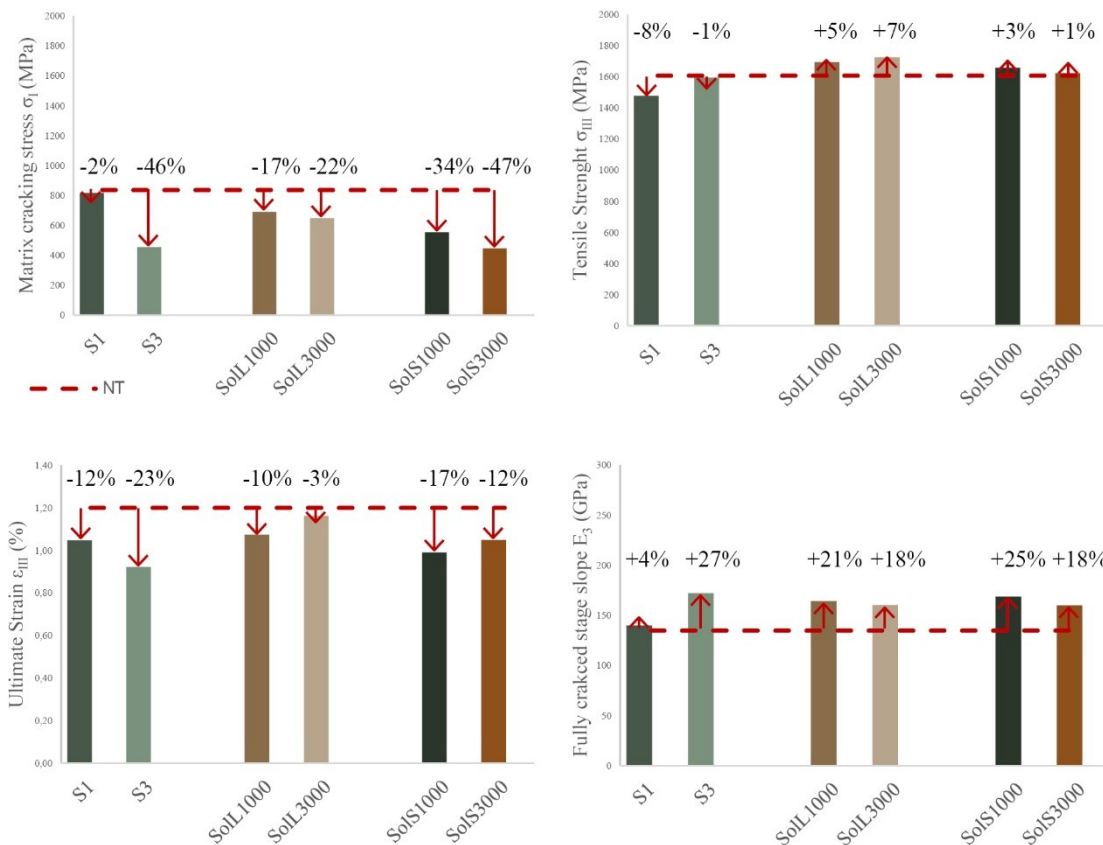


Figura Analisi e discussione dei risultati-56: Proprietà Meccaniche dei differenti tipi di invecchiamento (ambiente salino).

I valori di tensione di fessurazione della matrice calano per tutte le tipologie ed il calo è maggiore all'aumentare del tempo di immersione. I provini S1 ed S3, mostrano la maggior variazione, per i provini S1 i valori non subiscono notevoli variazioni rispetto ai provini non trattati, il calo è solo del 2%, mentre gli S3 hanno un calo del 46%. I provini che mostrano la diminuzione maggiore sia per immersione per 1000 che per 3000 ore sono i SolS, in particolare i SolS1000 hanno una diminuzione del 34% e i SolS3000 del 47%. I coupon SolL hanno presentato una variazione minore, infatti i SolL1000 presentano una diminuzione del -17% ed i SolL3000 del 22%. La matrice pertanto tende a fessurarsi per tensioni minori all'aumentare dei Sali in soluzione e all'aumentare del tempo di immersione. I valori di resistenza a trazione tendono ad aumentare leggermente in particolare per i provini SolL, che presentano per SolL1000 un incremento del 5% e per SolL3000 di 7%. I provini SolS invece hanno valori più simili a quelli dei campioni non trattati, SolS1000 ha un incremento del 3% e SolS3000 del 1%. I provini S1 ed S3 a differenza delle altre due tipologie presentano un lieve decremento; S1 del 8% ed S3 del 1%. La tensione ultima, al contrario della tensione di fessurazione della matrice,

tende ad aumentare all'aumentare della concentrazione di Sali e all'aumentare del tempo di immersione. I valori di deformazione ultima sono per lo più inferiori rispetto ai campioni non trattati, in particolare per i provini S1 (-12%) ed S3 (-23%). I provini SolL sono quelli con i valori più simili rispetto al caso non trattato con valori per SolL1000 di decremento del 10% e per SolL3000 del 3%. I coupon SolS presentano infine valori per SolS1000 di decremento del 17% e i SolS3000 del 12%. La pendenza dello stadio di completa fessurazione aumenta sempre rispetto ai campioni non condizionati. I valori maggiore e minore di questo incremento sono dati dai provini S1, (incremento del 4%) ed S3 (incremento del 27%). I provini SolL e SolS presentano valori simili con valori maggiori per immersioni di 1000 ore; infatti, SolL1000 ha un incremento del 21% e SolS1000 del 25%, mentre SolL3000 e SolS3000 del 18%. In generale, si evince che la differenza di immersione ha causato variazioni notevoli di valori solo per i casi S1 ed S3, mentre i SolL e i SolS presentano valori molto più omogenei tra le 1000 e le 3000 ore. Riguardo queste ultime due tipologie si può notare anche come l'aumento di sodio e solfato abbia causato, nei provini SolS, una diminuzione di tutti i valori analizzati ad eccezione del modulo elastico E_3 , ad indicare come l'aumento di sali riduca le capacità del composito.

Nel complesso, l'analisi comparativa indica che l'immersione in soluzione salina non compromette la capacità resistente finale dei sistemi PBO-FRCM, nemmeno per esposizioni prolungate fino a 3000 ore, ma induce modifiche sostanziali nella rigidità, nella deformabilità e nella stabilità del legame fibra-matrice. Il comportamento osservato conferma che il meccanismo di degrado dominante è di tipo interfacciale, mentre la fibra in PBO conserva un ruolo strutturale efficace anche in condizioni ambientali aggressive. Tali risultati rafforzano l'importanza di valutare la durabilità dei sistemi FRCM non solo in termini di resistenza ultima, ma soprattutto considerando l'evoluzione delle proprietà di rigidità e del trasferimento degli sforzi, aspetti cruciali per una corretta progettazione e verifica a lungo termine.

5.3 Risultati cicli Caldo-Umido

5.3.1 Risultati CU

Di seguito sono riportati i risultati delle prove sui provini soggetti a cicli caldo-umido con forno a 70°C ed immersione in acqua normale, denominati CU. A livello visivo, come si può notare in figura 5-27 non sono apprezzabili variazioni cromatiche o manifestazioni di degrado ad eccezione dei coupon soggetti a 40 e 50 cicli, dove si manifesta un incremento della porosità.

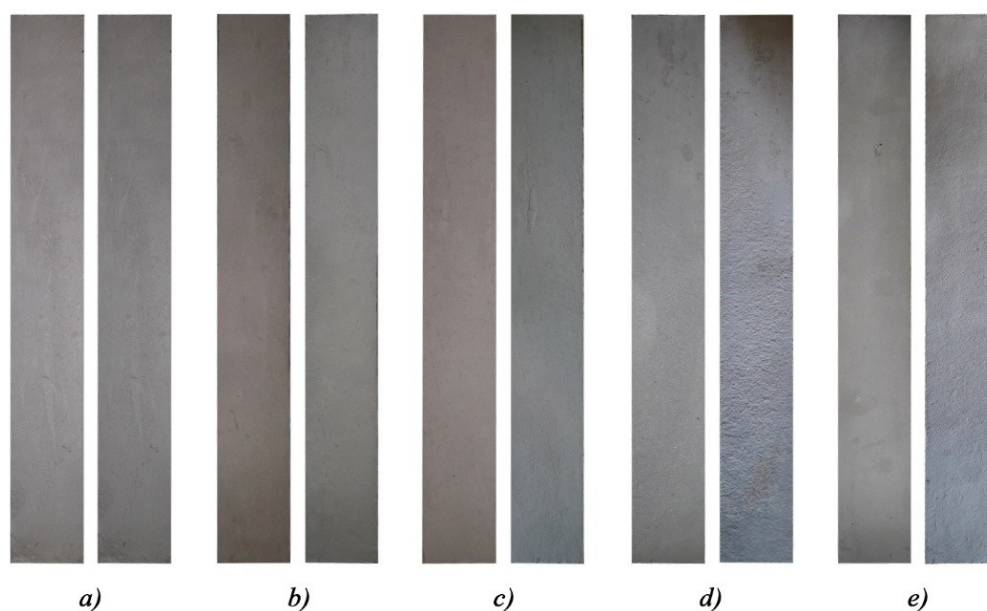


Figura Analisi e discussione dei risultati-57: a) provino prima e dopo 10 cicli, b) provino prima e dopo 20 cicli, c) provino prima e dopo 30 cicli, d) provino prima e dopo 40 cicli, e) provino prima e dopo 50 cicli.

In particolare, per questo gruppo non vengono riportati i valori medi poiché, sono stati studiati soltanto tre provini per numero di cicli; quindi, vengono mostrati 5 grafici differenti in funzione del numero di cicli. Per ciascuno di questi, nel grafico semplificato, sforzo-deformazione, i valori dei tre provini vengono confrontati con il valore medio dei provini non trattati (NT) (fig. 5-28).

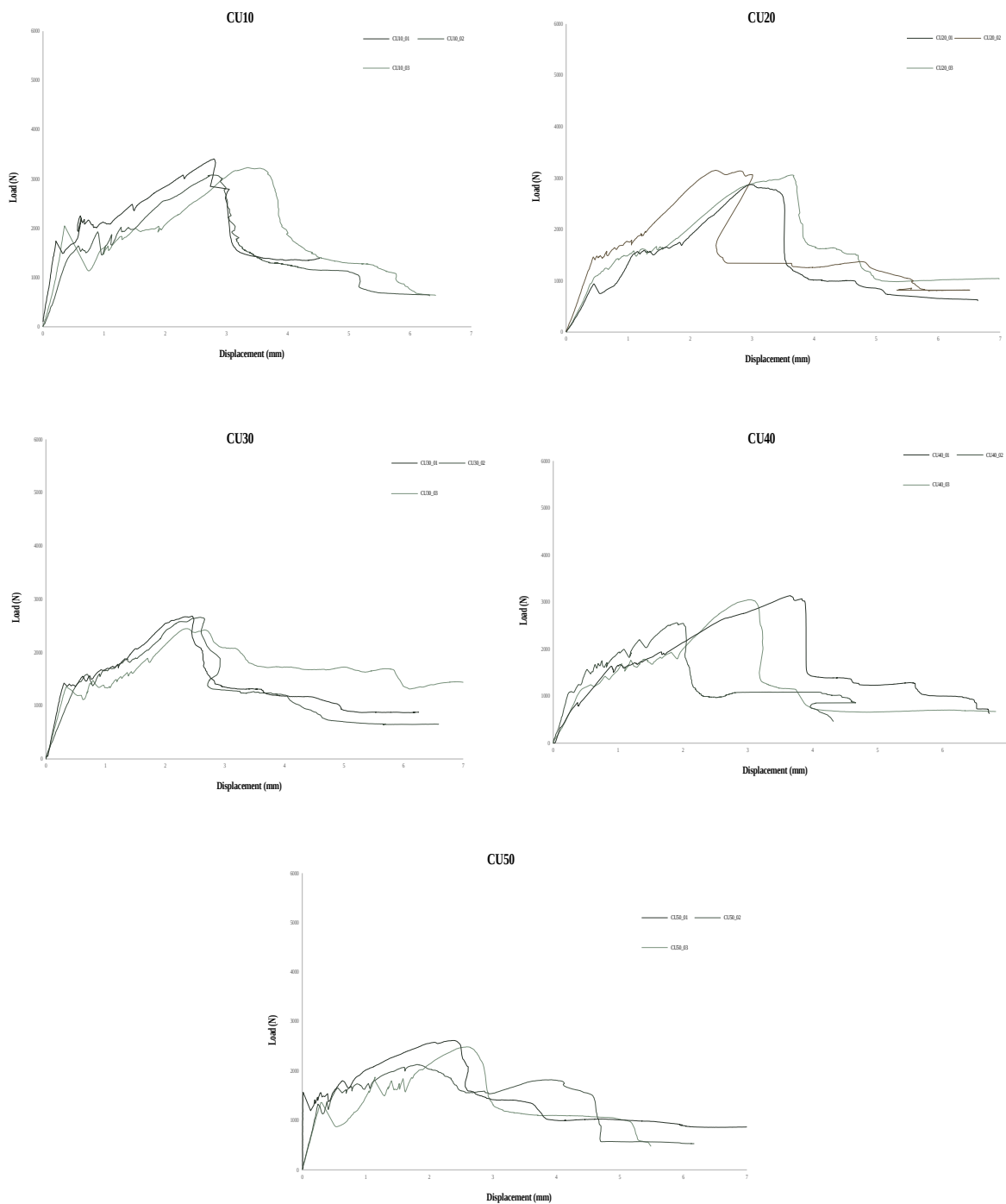


Figura Analisi e discussione dei risultati-58: Risultati carico-spostamento dei provini CU10-CU20-CU30-CU40 e CU50.

Come si evince già dai grafici sopra riportati i valori di carico sono nettamente inferiori rispetto ai provini che non trattati, ciò è ben visibili già dopo solo 10 cicli.

In figura 5-29 sono riportate le immagini della rottura tipo intercorsa durante i test per questo tipo di coupon. Come per gli altri casi, la rottura si è verificata nella parte superiore od inferiore

della luce libera a ridosso della piastra e successivo scorrimento della fibra. Solo il provino CU_50_02 presenta una rottura a distanza di 10 cm dalla piastra inferiore.

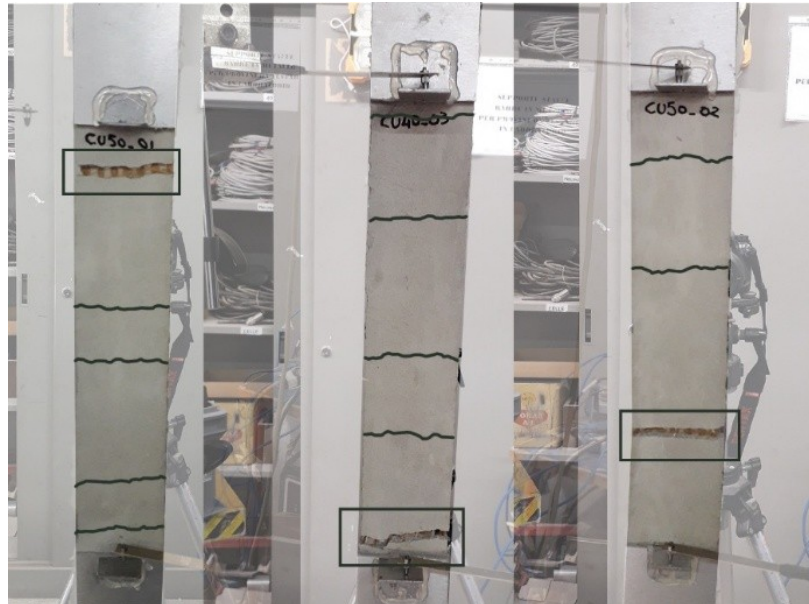
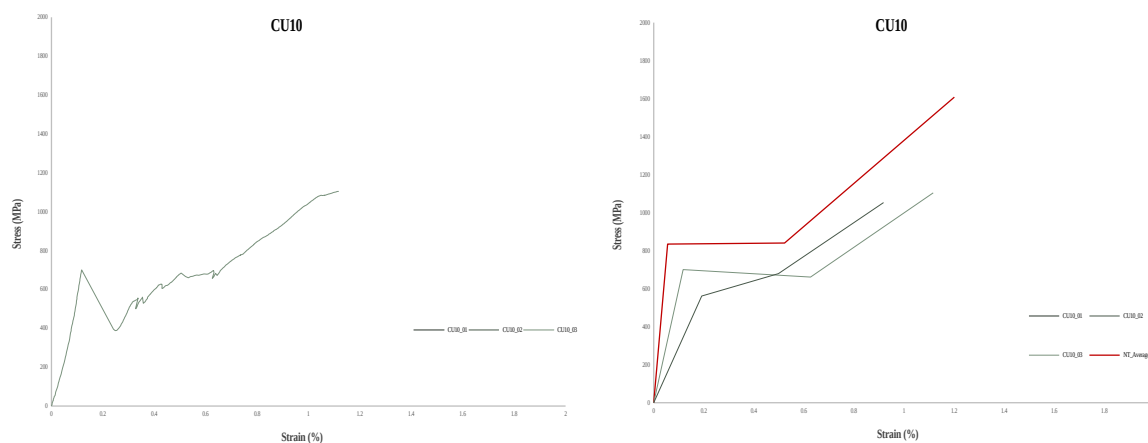
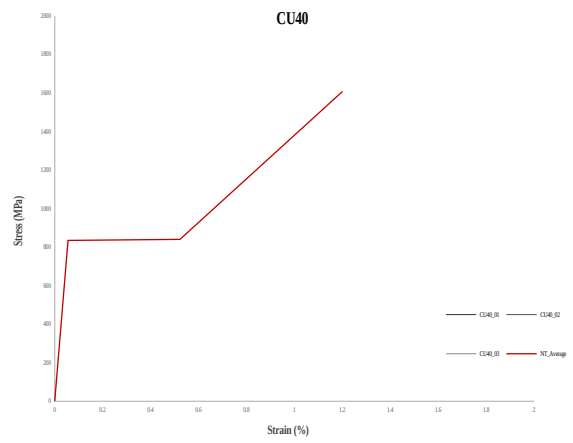
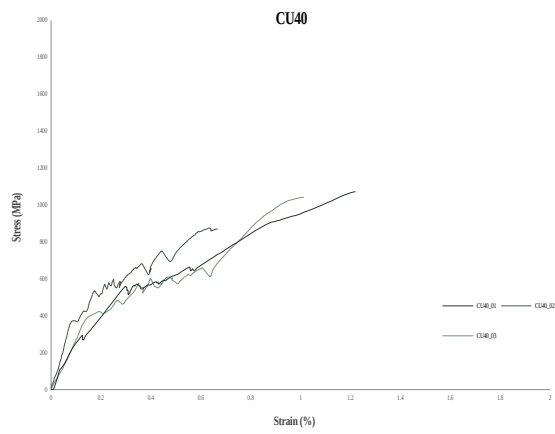
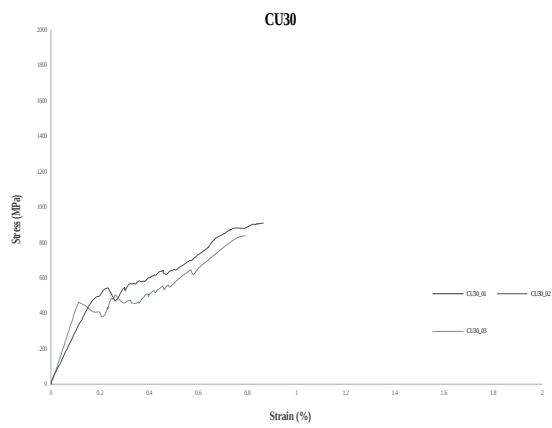
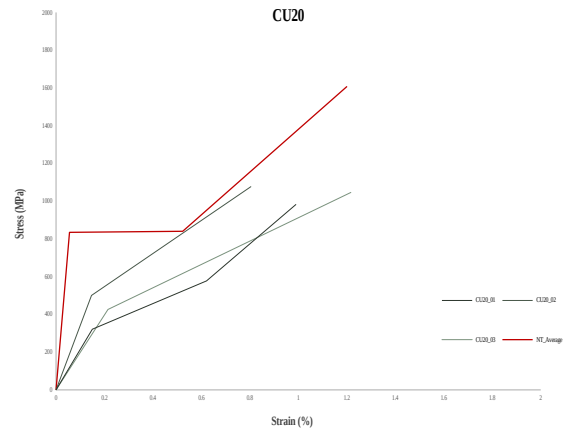
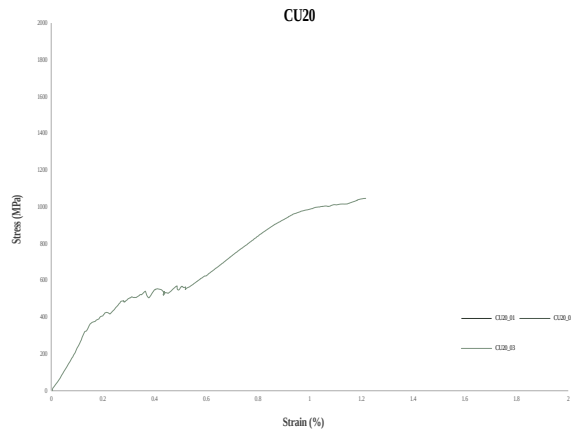


Figura Analisi e discussione dei risultati-59: Provini CU_50_01; CU_40_03 e CU_50_02, nei quali è ben visibile il tipo di rottura intercorso e il manifestarsi di fessure lungo tutta la lunghezza libera.

In fig. 5-30 ed in tabella 5-14 vengono riportati i valori in termini di sforzo-deformazione suddivisi per numero di cicli.





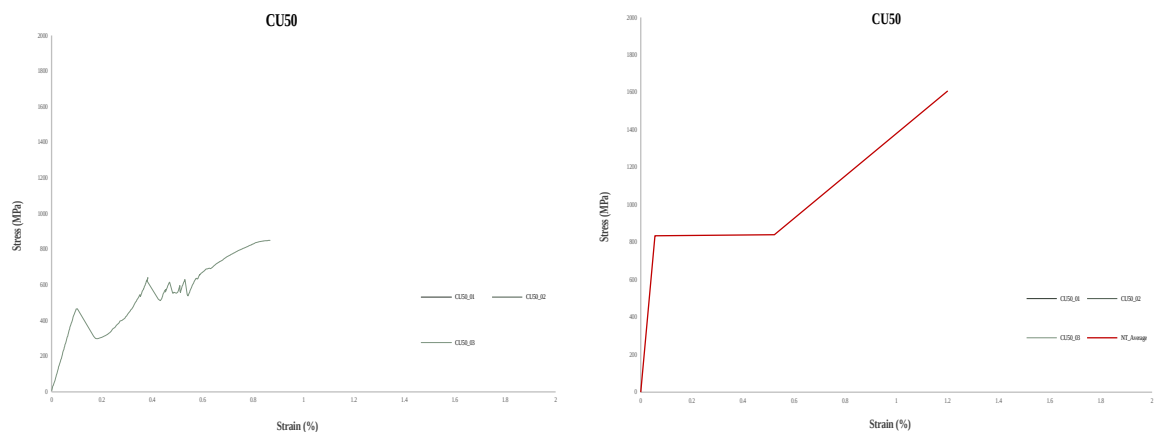


Figura Analisi e discussione dei risultati-60: Curve sforzo-deformazione coupon CU10-CU20-CU30-CU40-CU50.

ID	σ_I (MPa)	σ_{II} (MPa)	σ_{III} (MPa)	ϵ_I (%)	ϵ_{II} (%)	ϵ_{III} (%)	E_1 (kN/mm ²)	E_2 (kN/mm ²)	E_3 (kN/mm ²)	σ_{III}/f_{It}
CU10_01	595	-	1165	0,070	-	0,931	844	-	125	0,39
CU10_02	561	679	1053	0,192	0,498	0,918	293	136	115	0,35
CU10_03	700	661	1104	0,118	0,626	1,116	596	106	99	0,37
CU20_01	321	577	983	0,150	0,621	0,991	214	93	99	0,33
CU20_02	500	-	1077	0,146	-	0,805	342	-	134	0,36
CU20_03	426	-	1046	0,214	-	1,004	252	-	106	0,34
CU30_01	487	-	917	0,101	-	0,814	482	-	113	0,30
CU30_02	540	-	909	0,222	-	0,866	243	-	113	0,30
CU30_03	463	-	837	0,114	-	0,791	407	-	106	0,28
CU40_01	294	-	1072	0,125	-	1,220	236	-	88	0,36
CU40_02	375	-	875	0,091	-	0,635	413	-	138	0,29
CU40_03	425	-	1042	0,193	-	0,955	220	-	103	0,35
CU50_01	536	-	882	0,005	-	0,694	9849	-	127	0,29
CU50_02	455	-	729	0,083	-	0,604	549	-	121	0,24
CU50_03	467	-	850	0,102	-	0,867	456	-	98	0,28
NT	835	840	1608	0,033	0,314	1,200	3245	276	225	0,53

Tabella Analisi e discussione dei risultati-27: Risultati coupon CU10-CU20-CU30-CU40-CU50 con confronto NT.

I risultati mostrano un'evoluzione progressiva delle prestazioni meccaniche al crescere del numero di cicli. Rispetto ai provini non trattati (NT), i coupon invecchiati mostrano una risposta meccanica più dispersa nelle fasi iniziali della curva sforzo-deformazione e una maggiore variabilità dei parametri legati alla prima fessurazione e alla rigidità iniziale. Per quanto riguarda la resistenza ultima a trazione σ_{III} , i valori risultano complessivamente compresi tra circa 730 e 1165 MPa, con una tendenza generale alla riduzione all'aumentare dei cicli. Nei provini CU10, sottoposti a 10 cicli, σ_{III} assume valori relativamente elevati (1053-1165 MPa), mentre per CU20 e CU30 si osserva un progressivo calo, con minimi pari a 837-983 MPa. Nei provini CU40 e CU50 la dispersione aumenta: sebbene alcuni campioni mantengano valori prossimi a 1050 MPa (CU40_01 e CU40_03), altri scendono sotto i 900 MPa, fino a un minimo di 729 MPa per CU50_02. Questi valori risultano inferiori rispetto ai provini non trattati, nei quali la resistenza ultima è tipicamente più elevata. Tale andamento suggerisce che l'alternanza di saturazione e asciugatura ad alta temperatura inneschi meccanismi di danneggiamento crescente. Un comportamento analogo emerge analizzando il rapporto σ_{III}/f_{It} , che passa da valori prossimi a 0,37-0,39 nei CU10 a valori mediamente inferiori (0,28-0,30) nei CU30-CU50, indicando una progressiva riduzione della capacità del composito di sfruttare la resistenza intrinseca della fibra PBO, soprattutto se paragonati ai valori dei provini non trattati (0,53). Questo dato è coerente con un indebolimento del trasferimento tensionale, più che con un degrado diretto della fibra. In termini di σ_I , i valori misurati nei provini condizionati risultano generalmente inferiori a quelli dei NT e caratterizzati da una dispersione elevata, con valori compresi indicativamente tra 300 e 700 MPa lungo l'intero intervallo di cicli (10-50 cicli). Tale comportamento suggerisce una riduzione della capacità della matrice di contribuire alla risposta iniziale del composito, coerente con la formazione di microfessure e con un progressivo indebolimento dello strato corticale della malta. Il confronto con i NT conferma quindi una maggiore sensibilità della fase pre-fessurativa ai cicli caldo-umido rispetto alle immersioni saline. La σ_{II} non risulta sistematicamente individuabile nella maggior parte dei provini sottoposti a cicli caldo-umido, in particolare per CU20 fino ai CU50. A differenza dei provini NT, nei quali la σ_{II} è generalmente associata a una chiara variazione di pendenza della curva sforzo-deformazione, nei provini invecchiati la transizione tra la fase post-fessurativa iniziale e quella governata dalla fibra appare più graduale e priva di un punto di discontinuità ben definito. La deformazione ultima ε_{III} rimane nel complesso compresa tra 0,60% e 1,22%, senza una chiara tendenza monotona con il numero di cicli. Tuttavia, nei provini sottoposti a un numero

elevato di cicli (CU40 e CU50) si osserva una maggiore variabilità, con valori sia inferiori a 0,70% sia superiori a 1,20%, suggerendo una risposta meccanica meno stabile e una maggiore sensibilità alle condizioni locali di danneggiamento della matrice. Il confronto con i NT indica che la capacità deformativa globale del sistema non viene drasticamente compromessa dai cicli caldo-umido, mentre risulta più influenzata la rigidità del composito. L'analisi dei moduli elastici evidenzia come E_1 ed E_2 siano i parametri più sensibili al condizionamento. I valori di E_1 risultano fortemente dispersi e, in alcuni casi, significativamente inferiori a quelli dei NT, a conferma del degrado della risposta iniziale e del ruolo predominante della matrice nelle prime fasi di carico. Il modulo E_3 mostra valori generalmente compresi tra circa 90 e 135 kN/mm², con una lieve tendenza alla riduzione per i provini sottoposti a un numero elevato di cicli. In particolare, i valori più bassi (circa 88-103 kN/mm²) si riscontrano in alcuni campioni CU40 e CU50. Anche in questo caso, l'elevata dispersione suggerisce che il degrado non sia uniforme, ma fortemente influenzato da microfessurazione, ritiro differenziale e possibile danneggiamento localizzato della matrice dovuto ai cicli termo-igrometrici.

Nel complesso, i risultati evidenziano che i cicli caldo-umido con immersione e asciugatura accelerata determinano un degrado progressivo delle prestazioni meccaniche del sistema, con effetti più evidenti sulla resistenza ultima normalizzata e sulla rigidità post-fessurativa rispetto alla deformabilità ultima. Rispetto all'invecchiamento in soluzione salina, questo tipo di condizionamento sembra produrre un danneggiamento più graduale e fortemente disperso, riconducibile principalmente a fenomeni di fatica termo-igrometrica e di deterioramento dell'interfaccia, piuttosto che a un attacco chimico diretto della fibra. Il confronto con i provini NT mette in evidenza come i cicli caldo-umido incidano prevalentemente sulla qualità del legame fibra-matrice e sulla risposta pre e post-fessurativa iniziale, piuttosto che sulla resistenza ultima della fibra. Questo comportamento è coerente con quanto osservato negli altri ambienti di invecchiamento analizzati e conferma che, anche in questo caso, il meccanismo di degrado dominante nei sistemi PBO-FRCM è di tipo interfacciale, mentre il contributo resistente del rinforzo rimane relativamente stabile.

5.3.2 Risultati CU50

I risultati dei cicli caldo-umido con asciugatura a 70 °C hanno mostrato un livello di degrado particolarmente severo, tale da suggerire una possibile sovrastima degli effetti

dell'invecchiamento. Per questo motivo, la prova è stata replicata su ulteriori provini, adottando la medesima sequenza di cicli ma riducendo la temperatura del forno a 50 °C, con l'obiettivo di valutare l'evoluzione del danno in condizioni termiche meno aggressive. Di seguito sono riportati i risultati delle prove sui provini soggetti a cicli caldo-umido con forno a 50°C ed immersione in acqua normale, denominati CU50.

A livello visivo non si riscontrano cambiamenti notevoli, come per il caso precedente. Le differenti gradazioni di colore visibili nella figura 5-31 sono dovute alla differente esposizione a cui sono state fatte le fotografie.

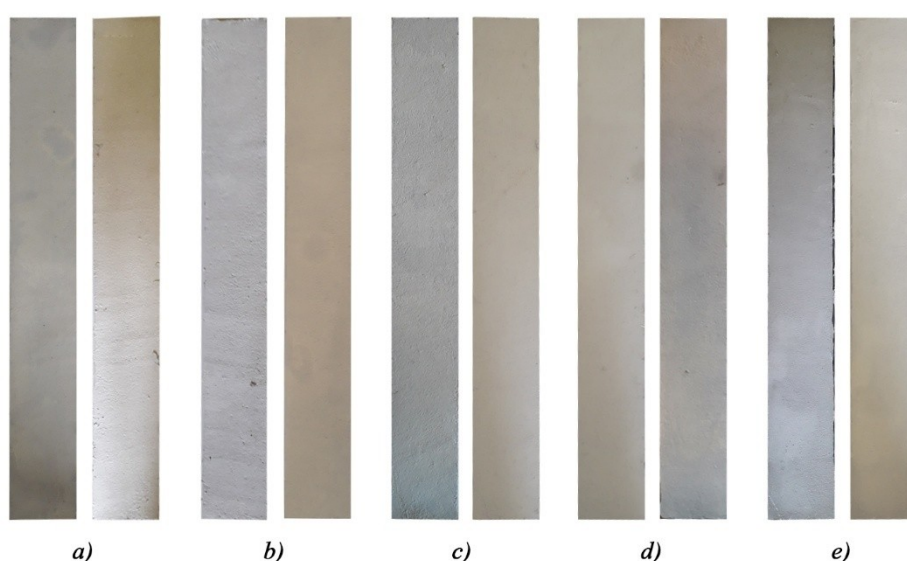


Figura Analisi e discussione dei risultati-61: a) provino prima e dopo 10 cicli, b) provino prima e dopo 20 cicli, c) provino prima e dopo 30 cicli, d) provino prima e dopo 40 cicli, e) provino prima e dopo 50 cicli.

Anche per questo gruppo non vengono riportati i valori medi poiché, sono stati studiati soltanto tre provini per numero di cicli. Vengono pertanto mostrati 5 grafici differenti in funzione del numero di cicli. Per ciascuno di questi, nel grafico semplificato sforzo-deformazione, i valori dei tre provini vengono confrontati con il valore medio dei provini non trattati (NT).

In figura 5-32 vengono mostrati i risultati in termini di carico-spostamento.

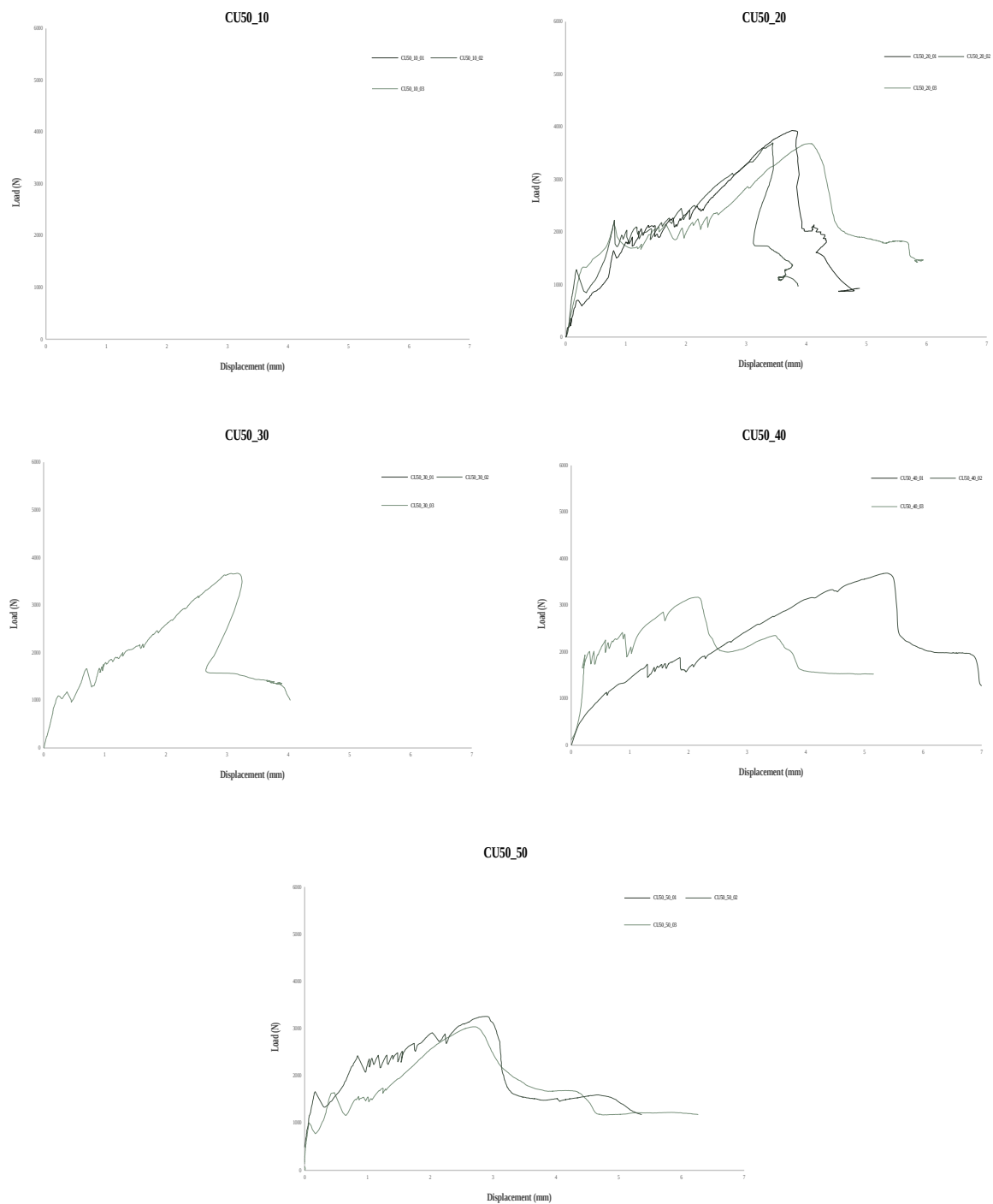


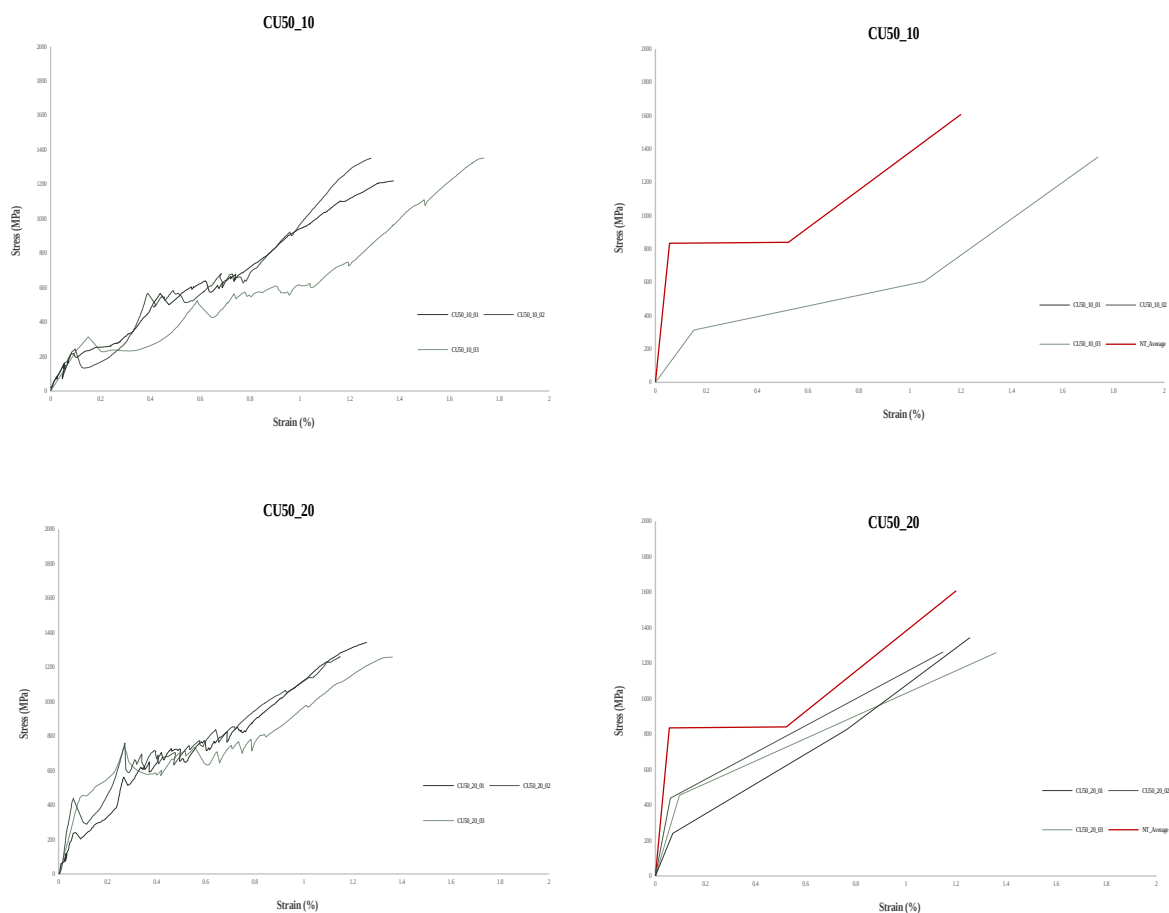
Figura Analisi e discussione dei risultati-62: Risultati carico-spostamento dei provini CU50_10-CU50_20-CU50_30-CU50_40 e CU50_50.

La figura 5-33 mostra i provini a test ultimato con la classica rottura intercorsa anche per le altre tipologie fino ad ora indagate.



Figura Analisi e discussione dei risultati-63: Provini CU50_20_03; CU50_40_03, nei quali è ben visibile il tipo di rottura intercorso e il manifestarsi di fessure lungo tutta la lunghezza libera.

In fig. 5-34 ed in tabella 5-15 vengono riportati i valori in termini di sforzo-deformazione suddivisi per numero di cicli.



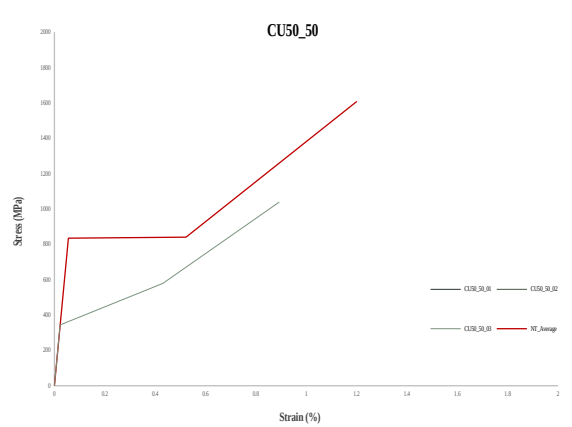
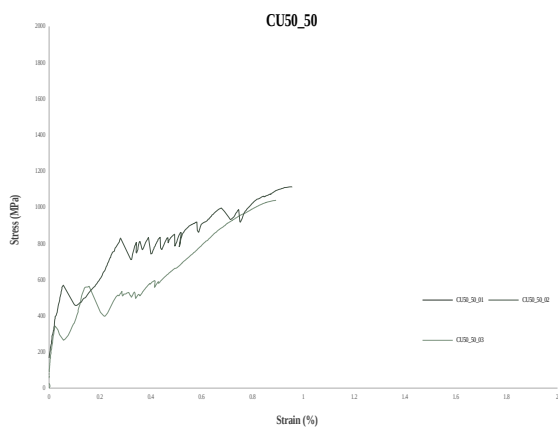
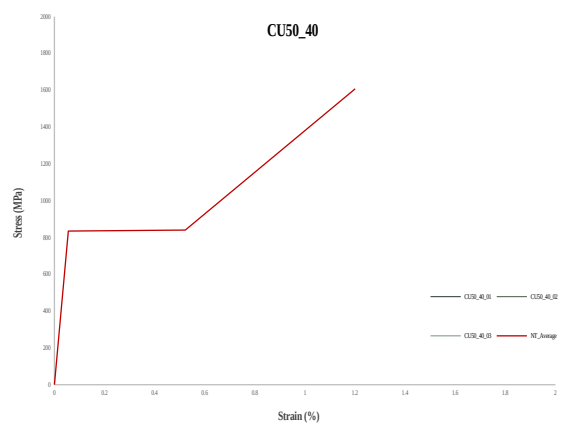
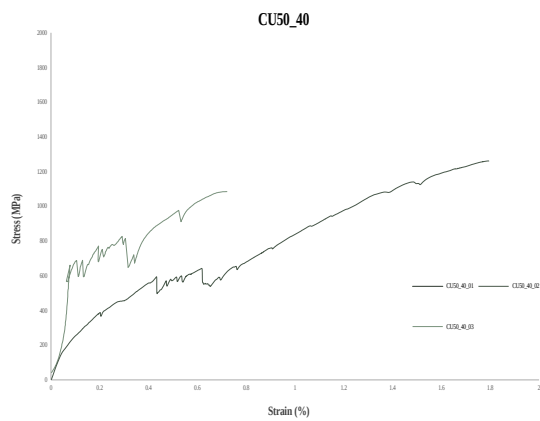
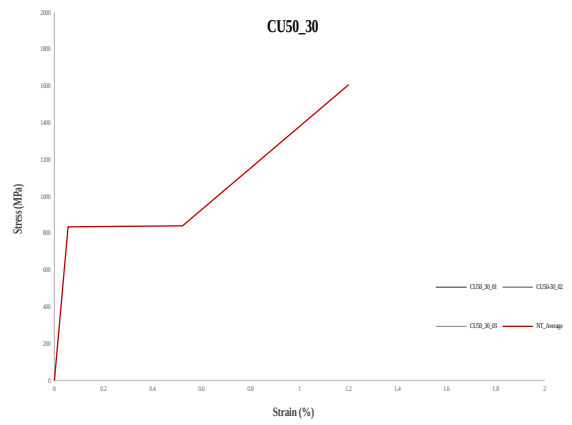
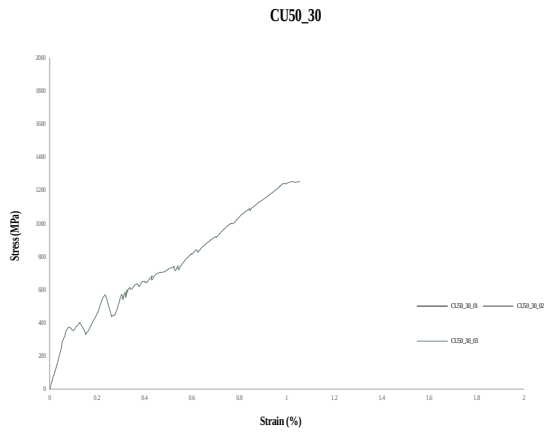


Figura Analisi e discussione dei risultati-64: Curve sforzo-deformazione coupon CU50_10-CU50_20-CU50_30-CU50_40-CU50_50.

ID	σ_I (MPa)	σ_{II} (MPa)	σ_{III} (MPa)	ϵ_I (%)	ϵ_{II} (%)	ϵ_{III} (%)	E_1 (kN/mm ²)	E_2 (kN/mm ²)	E_3 (kN/mm ²)	σ_{III}/f_t
CU50_10_01	162	-	1220	0,056	-	1,375	290	-	89	0,40

ID	σ_I (MPa)	σ_{II} (MPa)	σ_{III} (MPa)	ϵ_I (%)	ϵ_{II} (%)	ϵ_{III} (%)	E_1 (kN/mm ²)	E_2 (kN/mm ²)	E_3 (kN/mm ²)	σ_{III}/f_{ft}
CU50_10_02	244	-	1351	0,098	-	1,287	248	-	105	0,45
CU50_10_03	314	605	1352	0,151	1,056	1,739	208	57	78	0,45
CU50_20_01	240	824	1343	0,096	0,763	1,255	345	-	107	0,45
CU50_20_02	438	-	1263	0,060	-	1,149	734	-	110	0,42
CU50_20_03	455	-	1259	0,096	-	1,361	472	-	93	0,42
CU50_30_01	215	-	1290	0,129	-	1,026	167	-	126	0,43
CU50_30_02	417	-	1232	0,286	-	1,128	146	-	109	0,41
CU50_30_03	374	-	1254	0,079	-	1,054	471	-	119	0,42
CU50_40_01	325	-	1162	0,060	-	1,281	542	-	91	0,39
CU50_40_02	373	-	1262	0,188	-	1,796	198	-	70	0,42
CU50_40_03	661	-	1085	0,079	-	0,722	842	-	150	0,36
CU50_50_01	733	-	1013	0,055	-	0,572	1329	-	177	0,34
CU50_50_02	569	-	1114	0,056	-	0,963	1017	-	116	0,37
CU50_50_03	344	579	1039	0,023	0,431	0,893	1523	134	116	0,34
NT	835	840	1608	0,033	0,314	1,200	3245	276	225	0,53

Tabella Analisi e discussione dei risultati-28: Risultati coupon CU50_10-CU50_20-CU50_30-CU50_40-CU50_50, con confronto NT.

I risultati evidenziano un degrado progressivo delle prestazioni meccaniche all'aumentare del numero di cicli, seppur con una severità inferiore rispetto a quanto osservato per i cicli con asciugatura a 70 °C. In generale, il comportamento a trazione è riconducibile a una risposta bilineare con una marcata riduzione della rigidità e dell'efficienza del rinforzo rispetto ai provini non trattati. Con riferimento alla resistenza ultima σ_{III} , i valori medi dei provini condizionati risultano compresi tra circa 1350 MPa per 10-20 cicli e 1200-1250 MPa per 30 cicli, fino a scendere a valori prossimi a 1050-1100 MPa dopo 50 cicli. Rispetto ai provini non trattati (σ_{III} pari a 1608 MPa), la perdita di resistenza varia indicativamente tra il 15-20% per i cicli meno numerosi e raggiunge valori dell'ordine del 35-40% dopo 50 cicli, confermando l'effetto cumulativo del condizionamento termo-igrometrico. La deformazione ultima ϵ_{III} mostra un andamento meno monotono, con valori generalmente compresi tra 1.0% e 1.4% fino a 40 cicli, e una riduzione più evidente per i provini sottoposti a 50 cicli (ϵ_{III} compresa tra 0.6-

1.0%). In ogni caso, rispetto ai provini non trattati (ϵ_{III} pari a 0.72%), le deformazioni ultime risultano spesso maggiori nei cicli intermedi, indicando una risposta più deformabile del composito prima della rottura, verosimilmente legata a un progressivo danneggiamento dell'interfaccia fibra-matrice. Il modulo elastico E_3 evidenzia una riduzione significativa già a partire dai primi cicli. I valori medi si collocano prevalentemente tra 80 e 120 kN/mm², con una dispersione crescente al crescere del numero di cicli, mentre i provini non trattati presentano un valore medio di 225 kN/mm². La riduzione di E_3 risulta quindi dell'ordine del 50-65%, indicando che la rigidità del sistema è una delle proprietà più sensibili al condizionamento caldo-umido, anche in presenza di una temperatura di asciugatura moderata. Il rapporto σ_{III}/f_t fornisce una sintesi efficace della perdita di efficienza del rinforzo. Per i provini non trattati il valore medio è pari a 0.53, mentre per i provini sottoposti a cicli caldo-umido a 50 °C il rapporto si riduce progressivamente, assumendo valori compresi tra 0.40-0.45 per 10–20 cicli, 0.41-0.43 per 30 cicli, fino a 0.34-0.37 dopo 50 cicli. Tale andamento conferma che il danneggiamento indotto dai cicli termo-igrometrici compromette in modo significativo la capacità del sistema FRCM di mobilitare la resistenza teorica del tessuto.

Nel complesso, il confronto con i provini non trattati evidenzia come i cicli caldo-umido con asciugatura a 50 °C inducano un degrado progressivo ma più controllato rispetto ai cicli a 70 °C, interessando principalmente la rigidità e l'efficienza del rinforzo più che la sola resistenza ultima. L'incremento del numero di cicli amplifica tali effetti, suggerendo che il danno sia di natura cumulativa e prevalentemente localizzato all'interfaccia fibra-matrice, piuttosto che imputabile a un degrado diretto del tessuto.

5.3.3 Risultati provini WDL

Di seguito sono riportati i risultati delle prove sui provini soggetti a cicli caldo-umido con forno a 50°C ed immersione in soluzione, composta da acqua deionizzata con aggiunta di sodio solfato decaidrato (2%) e cloruro di sodio (4%). Questi provini sono identificati con il codice WDL.

A livello visivo (fig. 5-35) già dopo 10 cicli iniziano a comparire piccole fessurazioni con direzione longitudinale (dettaglio fig. 5.36), e dopo 30 cicli si manifestano alterazioni cromatiche entrambe le tipologie di degrado aumentano all'aumentare dei cicli.

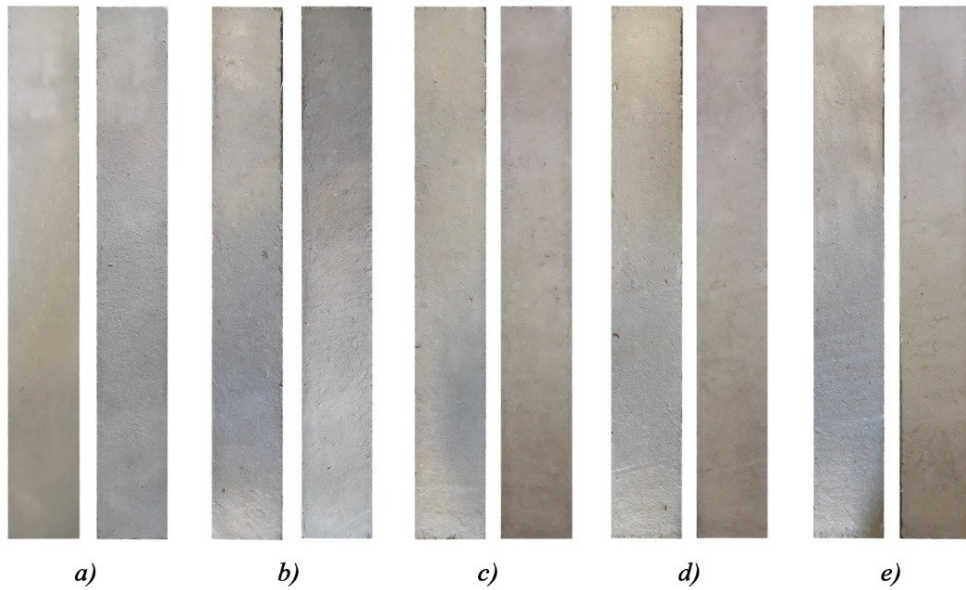


Figura Analisi e discussione dei risultati-65: a) provino prima e dopo 10 cicli, b) provino prima e dopo 20 cicli, c) provino prima e dopo 30 cicli, d) provino prima e dopo 40 cicli, e) provino prima e dopo 50 cicli.



Figura Analisi e discussione dei risultati-66: Dettaglio comparsa fessurazioni longitudinali, WDL_30_01 e WDL_50_01.

Anche per questo gruppo non vengono riportati i valori medi poiché, sono stati studiati soltanto tre provini per numero di cicli. Vengono pertanto mostrati 5 grafici differenti. Per ciascuno di questi, nel grafico semplificato sforzo-deformazione, i valori dei tre provini vengono confrontati con il valore medio dei provini non trattati (NT).

In figura 5-37 vengono mostrati i risultati in termini di carico-spostamento.

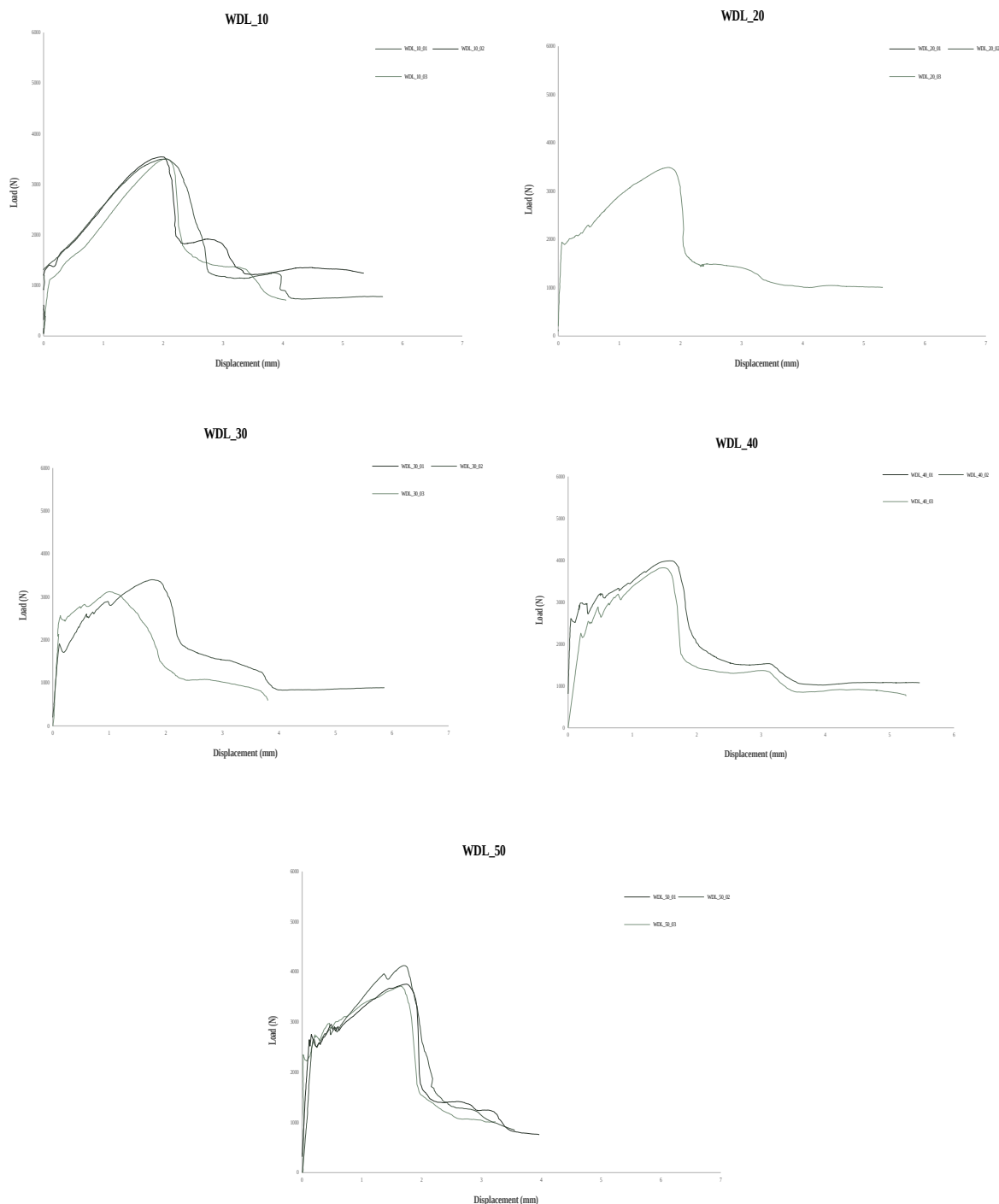


Figura Analisi e discussione dei risultati-67: Risultati carico-spostamento dei provini WDL_10-WDL_20-WDL_30-WDL_40 e WDL_50.

In figura 5-38 vengono riportati, a titolo di esempio, due campioni che mostrano le tipologie di rottura intercorse. Fanno eccezione i provini WDL_30_01; WDL_30_03 e WDL_50_02 (fig. 5-39), per i quali la rottura e successivo scorrimento è avvenuta nella zona centrale della lunghezza libera.

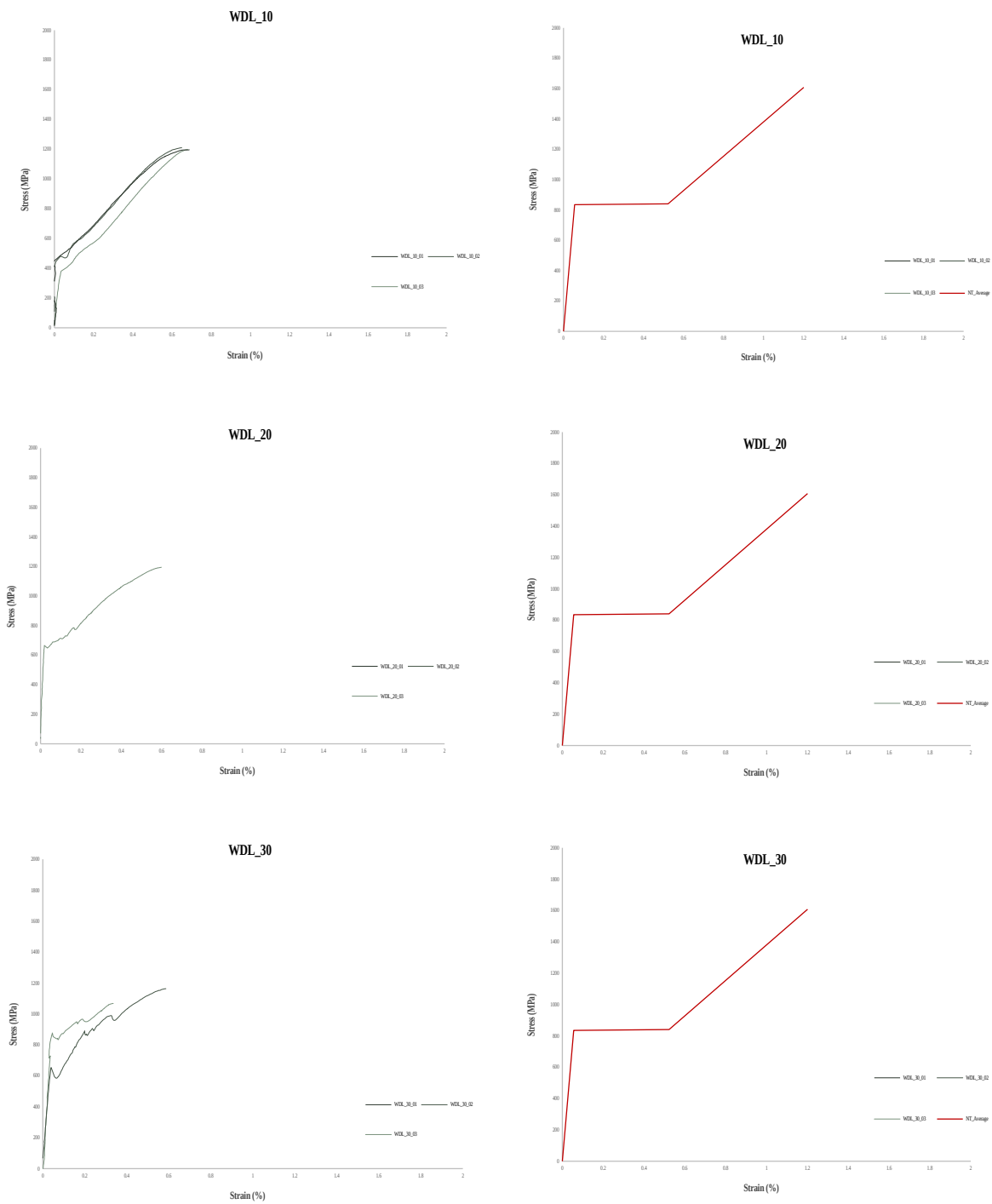


Figura Analisi e discussione dei risultati-68: Provini WDL_30_02; WDL_10_02, nei quali è ben visibile il tipo di rottura intercorso e il manifestarsi di fessure lungo tutta la lunghezza libera.



Figura Analisi e discussione dei risultati-69: Provini WDL_30_01; WDL_30_02; WDL_50_02, nei quali la rottura è avvenuta nella zona centrale della lunghezza libera.

In fig. 5-39 ed in tabella 5-16 vengono riportati i valori in termini di sforzo-deformazione suddivisi per numero di cicli.



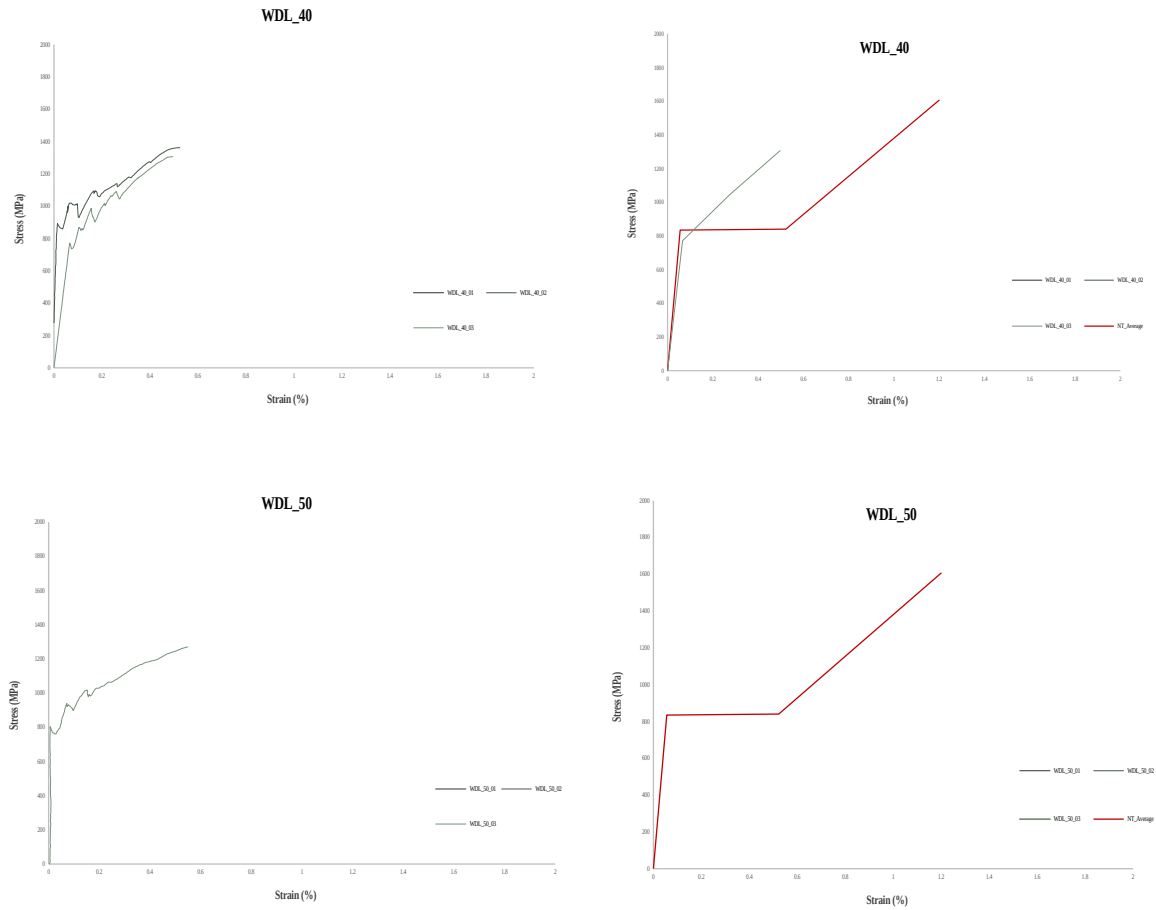


Figura Analisi e discussione dei risultati-70: Curve Sforzo-Deformazione provini WDL_10-WDL_20-WDL_30-WDL_40 e WDL_50.

ID	σ_I (MPa)	σ_{II} (MPa)	σ_{III} (MPa)	ϵ_I (%)	ϵ_{II} (%)	ϵ_{III} (%)	E_1 (kN/mm ²)	E_2 (kN/mm ²)	E_3 (kN/mm ²)	σ_{III}/f_{ft}
WDL_10_01	459	-	1196	0,007	-	0,688	7044	-	174	0,40
WDL_10_02	443	-	1211	0,007	-	0,650	6446	-	186	0,40
WDL_10_03	381	-	1199	0,035	-	0,679	1101	-	176	0,40
WDL_20_01	660	-	1114	0,032	-	0,446	2044	-	250	0,37
WDL_20_02	683	-	1177	0,055	-	0,628	1234	-	187	0,39
WDL_20_03	665	-	1194	0,019	-	0,599	3486	-	199	0,40
WDL_30_01	760	-	1090	0,021	-	0,516	3590	-	211	0,36
WDL_30_02	654	-	1163	0,040	-	0,586	1650	-	198	0,39
WDL_30_03	728	-	1068	0,036	-	0,335	2037	-	318	0,35
WDL_40_01	708	-	1136	0,017	-	0,424	4090	-	268	0,38

ID	σ_I (MPa)	σ_{II} (MPa)	σ_{III} (MPa)	ϵ_I (%)	ϵ_{II} (%)	ϵ_{III} (%)	E_1 (kN/mm ²)	E_2 (kN/mm ²)	E_3 (kN/mm ²)	σ_{III}/f_{ft}
WDL_40_02	892	-	1363	0,015	-	0,526	6089	-	259	0,45
WDL_40_03	772	1046	1306	0,066	0,275	0,497	1165	380	263	0,43
WDL_50_01	804	-	1270	0,041	-	0,581	1955	-	219	0,42
WDL_50_02	911	-	1410	0,066	-	0,568	1373	-	248	0,47
WDL_50_03	804	-	1270	0,006	-	0,549	13820	-	231	0,42
NT	835	840	1608	0,033	0,314	1,200	3245	276	225	0,53

Tabella Analisi e discussione dei risultati-29: Risultati coupon WDL_10-WDL_20-WDL_30-WDL_40-WDL_50 e confronto con NT.

I risultati delle prove mostrano un degrado complessivo delle prestazioni meccaniche più marcato rispetto ai cicli in sola acqua, confermando il ruolo penalizzante dell'azione combinata di umidità, temperatura e presenza di sali. In tutti i casi, il comportamento a trazione rimane riconducibile a una risposta bilineare, con evidenti riduzioni della rigidità e dell'efficienza del rinforzo rispetto ai provini non trattati. Con riferimento alla resistenza ultima σ_{III} , i valori dei provini condizionati risultano sistematicamente inferiori rispetto ai NT (σ_{III} pari a 1608 MPa). Per 10 cicli, σ_{III} si colloca attorno a 1200 MPa, con una riduzione di circa 25%; per 20-30 cicli i valori medi si attestano tra 1100 e 1200 MPa, mentre per 40 e 50 cicli si osserva una maggiore dispersione, con valori compresi tra 1270 e 1410 MPa. Nonostante alcuni provini mostrino recuperi parziali di resistenza, il confronto complessivo indica una perdita di σ_{III} generalmente compresa tra 20% e 35%, senza una chiara tendenza monotona con il numero di cicli, segno di un danneggiamento governato da fenomeni locali e interfacciali. Per quanto riguarda la tensione di prima fessurazione σ_I , i provini mostrano valori generalmente inferiori e più dispersi rispetto ai provini non trattati. Nei NT, σ_I risulta ben definita e pari a circa 835 MPa, mentre nei campioni condizionati i valori di σ_I si collocano in un intervallo ampio, tipicamente compreso tra 380 e 900 MPa, con una tendenza a valori medi inferiori già a partire dai primi cicli. In particolare, per 10-20 cicli σ_I si attesta prevalentemente tra 450 e 680 MPa, evidenziando una riduzione dell'ordine del 20-45% rispetto ai NT. Questo comportamento suggerisce una anticipazione del fenomeno di fessurazione della matrice, attribuibile alla microfessurazione indotta dai cicli termo-igrometrici e alla presenza dei sali, che riducono la coesione della matrice e la capacità di trasferimento degli sforzi iniziali. Un aspetto ancora più significativo riguarda la difficoltà, o l'impossibilità, di individuare in modo univoco la tensione σ_{II} per la maggior parte dei provini

invecchiati. Mentre nei provini non trattati σ_{II} è chiaramente identificabile (σ_{II} pari a 840 MPa), nei campioni sottoposti a cicli caldo-umido salini tale stadio intermedio risulta non rintracciabile. Ciò indica che il passaggio tra il primo stadio (matrice non fessurata) e il regime di trazione dominato dalla fibra avviene in modo più graduale e meno netto, senza un plateau riconducibile a un efficace meccanismo di trasferimento degli sforzi fibra-matrice. La perdita di riconoscibilità di σ_{II} rappresenta un chiaro indicatore di degrado dell'aderenza interfacciale: la matrice, già danneggiata dai cicli caldo-umido e dall'azione salina, non è più in grado di garantire un'adeguata collaborazione con il tessuto dopo la fessurazione. Di conseguenza, il comportamento meccanico del composito risulta dominato precocemente dalla fibra, con una riduzione sia della rigidità post-fessurativa sia della capacità di sfruttare pienamente il contributo del rinforzo, come confermato dalla diminuzione del rapporto σ_{III}/f_{ft} rispetto ai provini non trattati. Infatti, l'andamento del rapporto σ_{III}/f_{ft} , che per i provini non trattati presenta il valore medio è pari a 0.53, nei provini sottoposti a cicli caldo-umido in soluzione salina si riduce stabilmente a valori compresi tra 0.35 e 0.45, con una perdita media dell'ordine del 15-35%. Questo dato conferma che l'esposizione ciclica in ambiente salino compromette in modo rilevante la capacità del sistema di mobilitare la resistenza teorica del tessuto. La deformazione ultima ϵ_{III} evidenzia una riduzione significativa rispetto ai provini non trattati (ϵ_{III} di 0.72%). Nei provini sottoposti a cicli caldo-umido salini, ϵ_{III} assume valori prevalentemente compresi tra 0.35% e 0.65%, con minimi prossimi a 0.33-0.45% già a 20-30 cicli. Tale riduzione indica una perdita di capacità deformativa del sistema, attribuibile a un progressivo irrigidimento e indebolimento dell'interfaccia fibra-matrice indotto dalla cristallizzazione dei sali e dai cicli termo-igrometrici. Il modulo elastico E_3 mostra valori compresi indicativamente tra 170 e 320 kN/mm², con una tendenza complessivamente inferiore o comparabile a quella dei provini non trattati (E_3 di 225 kN/mm²). Nei primi cicli (10-20) E_3 risulta spesso ridotto o simile ai NT, mentre a 30-40 cicli si osservano valori anche superiori, verosimilmente legati a un irrigidimento apparente del composito. Tuttavia, tale aumento non si traduce in un miglioramento delle prestazioni globali, poiché è accompagnato da una marcata riduzione della deformazione ultima.

Nel complesso, il confronto con i provini non trattati evidenzia che i cicli caldo-umido in soluzione salina, anche con una temperatura di asciugatura moderata (50 °C), inducono un degrado significativo e cumulativo delle prestazioni meccaniche, più severo rispetto ai cicli in sola acqua. Il danno risulta principalmente localizzato all'interfaccia fibra-matrice, con effetti evidenti sulla deformabilità e sull'efficienza del rinforzo, mentre la resistenza ultima mostra una

maggior dispersione e una sensibilità meno monotona al numero di cicli. In generale, dall'analisi complessiva dei risultati si può dedurre che per un numero limitato di cicli il comportamento meccanico dei coupon risulta maggiormente influenzato dall'azione dell'essiccazione in forno, che tende a incrementare la rigidità e la resistenza del primo tratto della curva tensione-deformazione. Al contrario, per cicli più prolungati, diventa predominante l'effetto dell'immersione in soluzione salina, la quale, rispetto all'acqua demineralizzata, grazie alla presenza dei sali favorisce un incremento della resistenza iniziale della matrice e quindi della tensione di prima fessurazione. Tuttavia, indipendentemente dal numero di cicli, la resistenza ultima σ_{III} risulta sempre significativamente ridotta rispetto ai provini non trattati, evidenziando un marcato degrado del meccanismo di trasferimento degli sforzi e dell'efficacia globale del rinforzo.

5.3.4 Risultati provini WDS

Di seguito sono riportati i risultati delle prove sui provini soggetti a cicli caldo-umido con forno a 50°C ed immersione in soluzione, composta da acqua deionizzata con aggiunta di sodio solfato decaidrato (4%) e cloruro di sodio (8%). Questi provini sono identificati con il codice WDS.

A livello visivo (fig. 5-41) si notano delle forme di degrado che aumentano all'aumentare del numero di cicli; in particolare si possono notare fessurazioni longitudinali a partire già dai 10 cicli (fig. 5-42); dai 20 cicli sono ben visibili variazioni cromatiche e a partire dai 30 cicli sono presenti, in maniera diffusa efflorescenze.

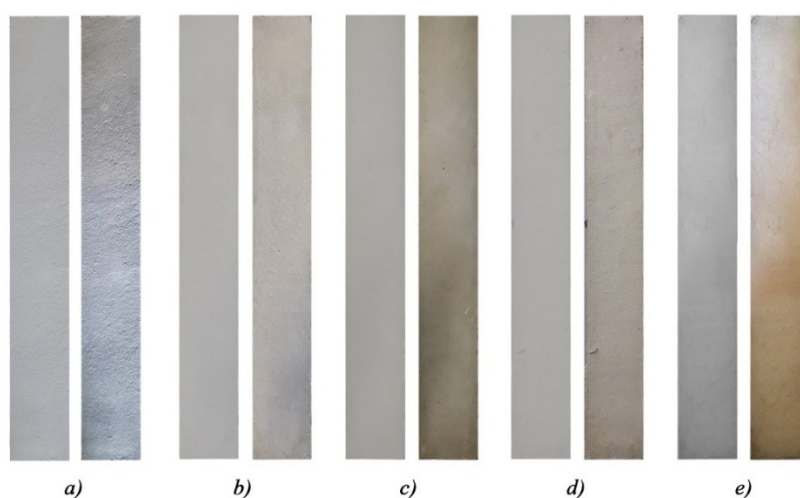


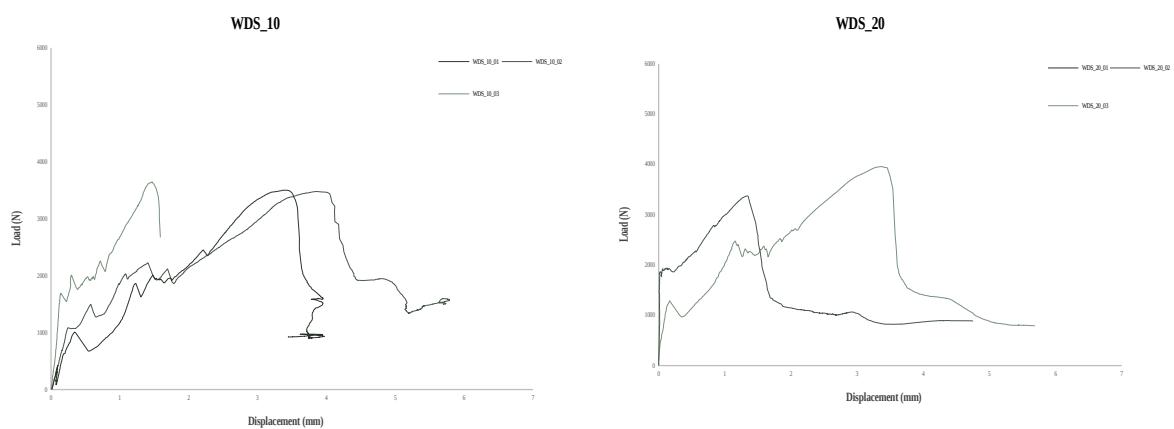
Figura Analisi e discussione dei risultati-71: a) provino prima e dopo 10 cicli, b) provino prima e dopo 20 cicli, c) provino prima e dopo 30 cicli, d) provino prima e dopo 40 cicli, e) provino prima e dopo 50 cicli.



Figura Analisi e discussione dei risultati-72: Dettaglio comparsa fessurazioni longitudinali, WDS_50_02.

Anche per questo gruppo non vengono riportati i valori medi poiché, sono stati studiati soltanto tre provini per numero di cicli. Vengono pertanto mostrati 5 grafici differenti in funzione del numero di cicli. Per ciascuno di questi, nel grafico semplificato sforzo-deformazione, i valori dei tre provini vengono confrontati con il valore medio dei provini non trattati (NT).

In figura 5-43 vengono mostrati i risultati in termini di carico-spostamento.



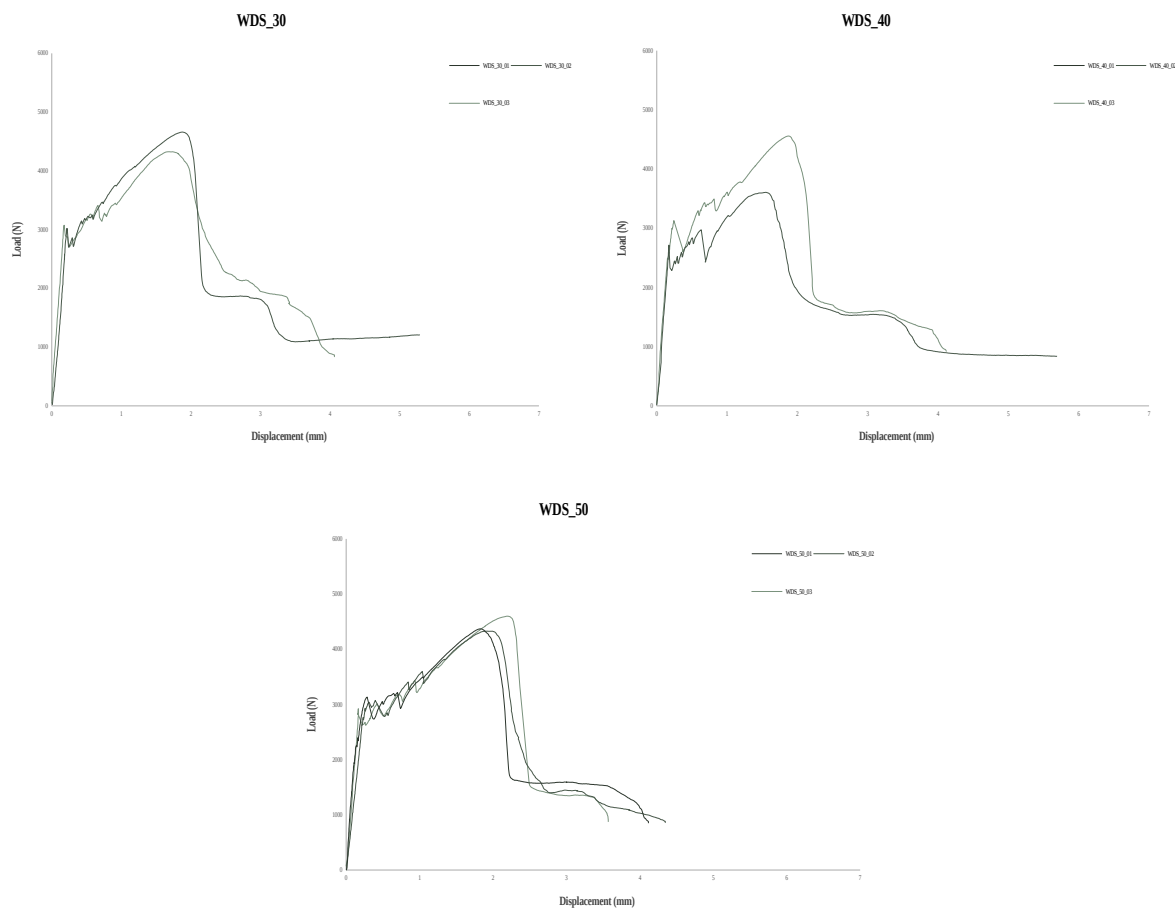


Figura Analisi e discussione dei risultati-73: Risultati carico-spostamento dei provini WDS_10-WDS_20-WDS_30-WDS_40 e WDS_50.

In figura 5-44 sono mostrati i tipi di rottura avvenuti per questa serie di test, uguali a quelli dei casi sopra studiati; senza nessuna eccezione la rottura è avvenuta nel lembo superiore o inferiore della lunghezza libera con successivo scorrimento della fibra.

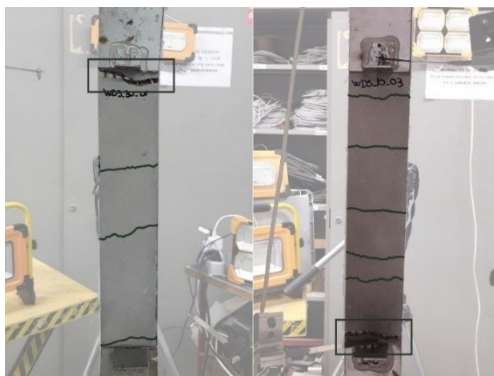
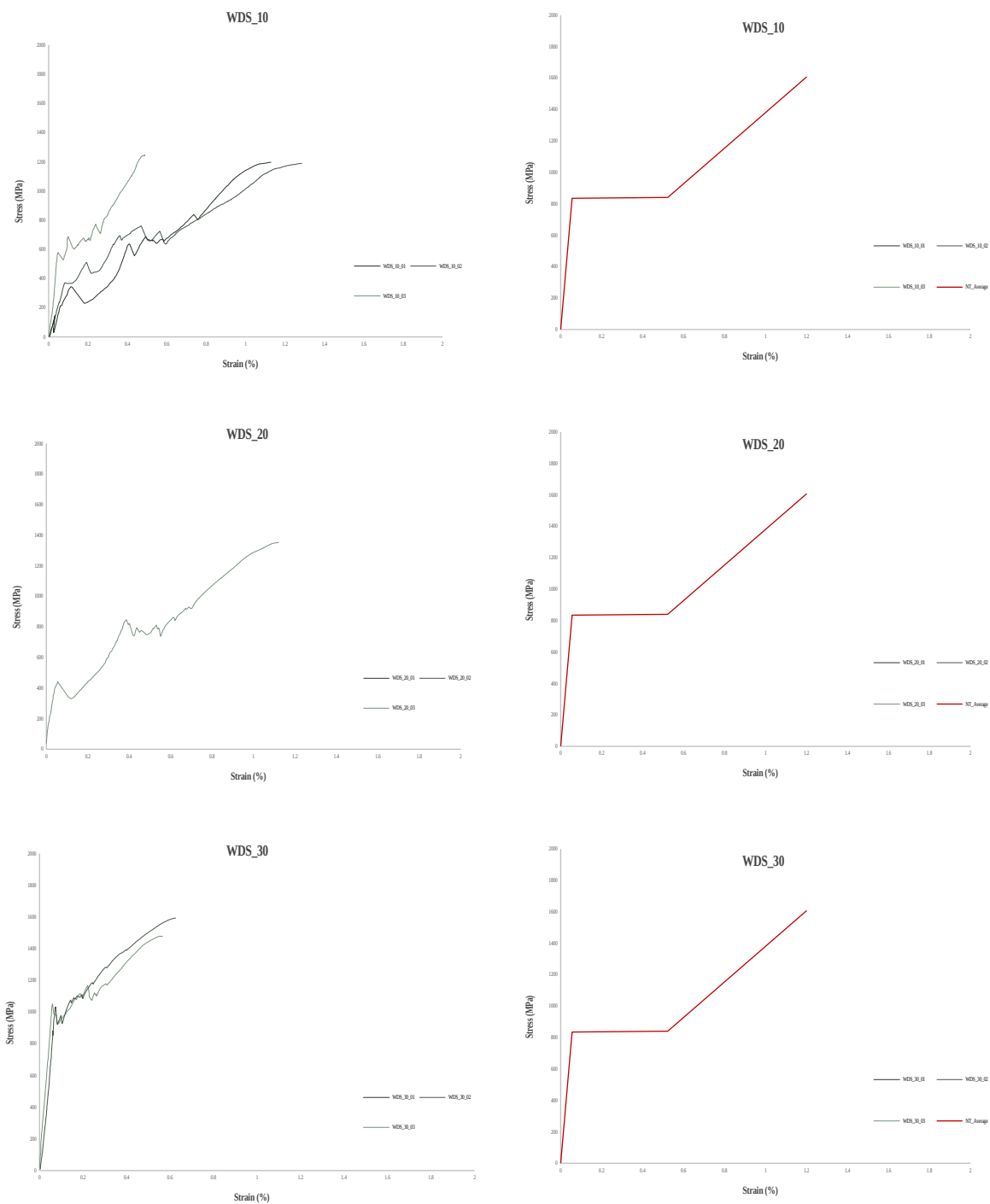


Figura Analisi e discussione dei risultati-74: Provini WDS_30_01; WDS_10_03, nei quali è ben visibile il tipo di rottura intercorso e il manifestarsi di fessure lungo tutta la lunghezza libera.

In fig. 5-45 ed in tabella 5-17 vengono riportati i valori in termini di sforzo-deformazione suddivisi per numero di cicli.



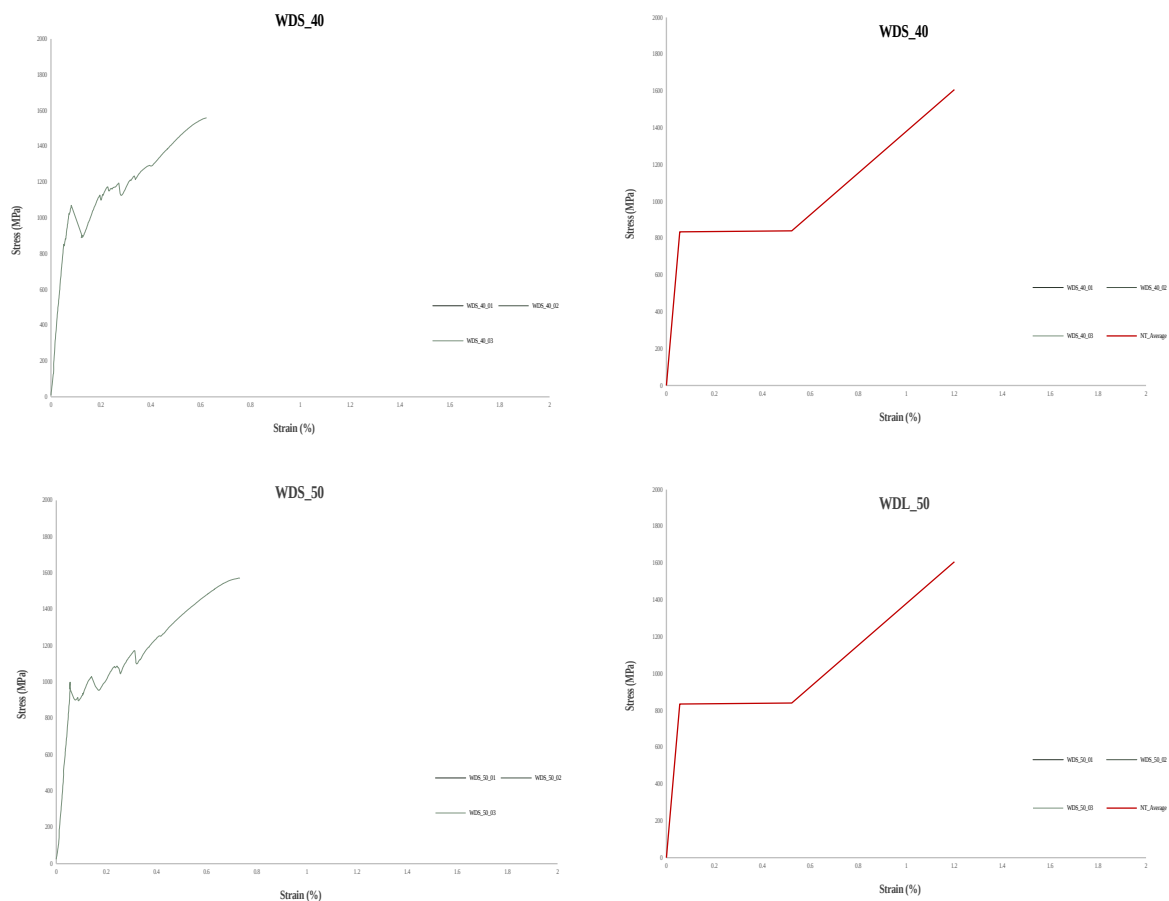


Figura Analisi e discussione dei risultati-75: Curve Sforzo-Deformazione provini WDS_10-WDS_20- WDS_30-WDS_40 e WDS_50.

ID	σ_I (MPa)	σ_{II} (MPa)	σ_{III} (MPa)	ϵ_I (%)	ϵ_{II} (%)	ϵ_{III} (%)	E_1 (kN/mm ²)	E_2 (kN/mm ²)	E_3 (kN/mm ²)	σ_{III}/f_{It}
WDS_10_01	145	-	1196	0,033	-	1,129	436	-	106	0,40
WDS_10_02	371	-	1189	0,082	-	1,286	451	-	92	0,39
WDS_10_03	578	-	1246	0,047	-	0,489	1221	-	255	0,41
WDS_20_01	744	-	1250	0,054	-	0,688	1379	-	182	0,41
WDS_20_02	637	-	1154	0,011	-	0,446	5810	-	259	0,38
WDS_20_03	440	-	1353	0,055	-	1,122	799	-	121	0,45
WDS_30_01	485	-	1117	0,042	-	0,427	1144	-	261	0,37
WDS_30_02	881	-	1593	0,062	-	0,627	1430	-	254	0,53
WDS_30_03	1051	-	1479	0,060	-	0,566	1759	-	261	0,49
WDS_40_01	989	-	1285	0,075	-	0,359	1311	-	357	0,43

ID	σ_I (MPa)	σ_{II} (MPa)	σ_{III} (MPa)	ϵ_I (%)	ϵ_{II} (%)	ϵ_{III} (%)	E_1 (kN/mm ²)	E_2 (kN/mm ²)	E_3 (kN/mm ²)	σ_{III}/f_{ft}
WDS_40_02	928	-	1233	0,058	-	0,518	1605	-	238	0,41
WDS_40_03	852	-	1559	0,052	-	0,374	1650	-	417	0,52
WDS_50_01	1072	-	1494	0,095	-	0,611	1127	-	244	0,50
WDS_50_02	901	-	1480	0,072	-	0,642	1250	-	230	0,49
WDS_50_03	999	-	1573	0,055	-	0,733	1804	-	215	0,52
NT	835	840	1608	0,033	0,314	1,200	3245	276	225	0,53

Tabella Analisi e discussione dei risultati-30: Risultati coupon WDS_10-WDS_20-WDS_30-WDS_40-WDS_50 e confronto con NT.

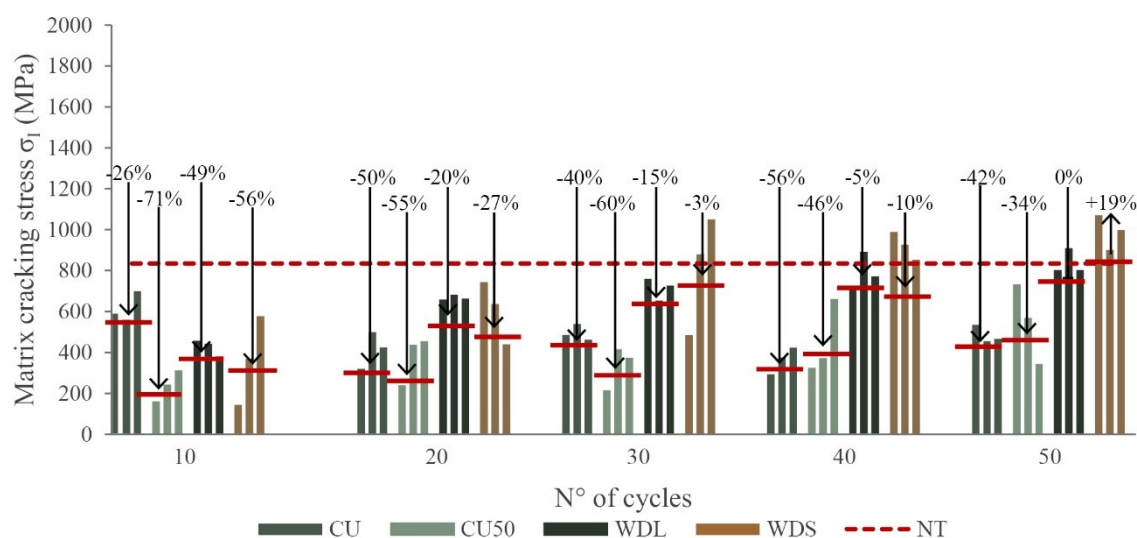
I risultati mostrano un comportamento meccanico fortemente influenzato dal numero di cicli e dalla severità dell'ambiente di esposizione. La tensione di prima fessurazione σ_I risulta in generale inferiore rispetto ai provini non trattati (σ_I , NT pari a 835 MPa), in particolare per 10 e 20 cicli, con valori anche inferiori a 450 MPa, indicando un precoce danneggiamento della matrice. Per cicli più elevati (30-50 cicli) si osserva invece una maggiore dispersione e, in alcuni casi, valori di σ_I comparabili o superiori a quelli dei NT, suggerendo un possibile effetto di densificazione iniziale della matrice indotto dalla presenza dei sali, seppur accompagnato da elevata variabilità. Analogamente a quanto osservato nei precedenti cicli caldo-umido, la tensione σ_{II} non risulta chiaramente individuabile, a differenza dei provini non trattati, nei quali è ben definita (σ_{II} , NT pari a 840 MPa). Ciò indica una progressiva perdita della fase di transizione associata alla fessurazione diffusa della matrice, con un comportamento che tende a passare più rapidamente dal primo al terzo tratto della curva tensione-deformazione. La tensione ultima σ_{III} mostra valori medi inferiori rispetto ai NT (σ_{III} , NT di 1608 MPa) per la maggior parte dei cicli, in particolare per 10 e 20 cicli, mentre per 30-50 cicli alcuni coupon raggiungono valori prossimi a quelli dei provini non trattati. Tuttavia, il rapporto σ_{III}/f_{ft} , che nei NT è pari a 0,53, risulta mediamente compreso tra 0,38 e 0,52, confermando una riduzione dell'efficienza del rinforzo e del meccanismo di trasferimento degli sforzi fibra-matrice a seguito dell'invecchiamento. Le deformazioni ultime ϵ_{III} risultano generalmente confrontabili o inferiori a quelle dei NT (ϵ_{III} , NT di 1,2%), con una tendenza a valori più bassi per cicli intermedi (30-40 cicli), indicando una ridotta capacità deformativa del composito. Coerentemente, il modulo elastico del terzo tratto E_3 risulta spesso inferiore a quello dei provini non trattati (E_3 ,

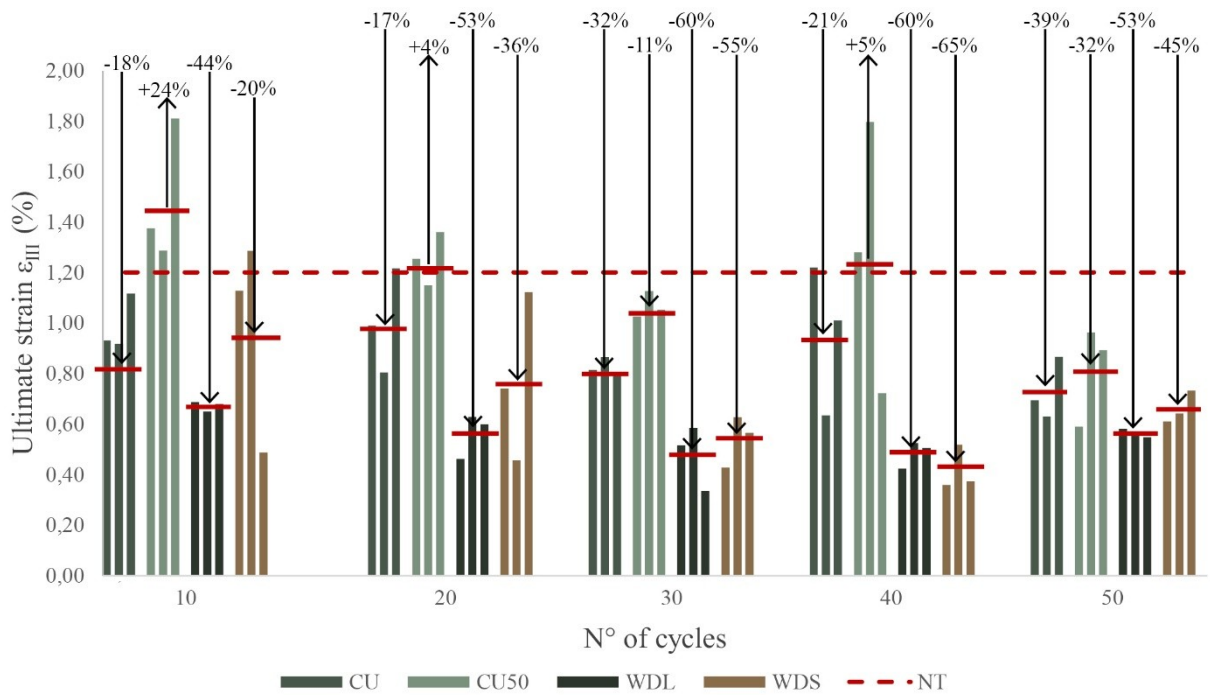
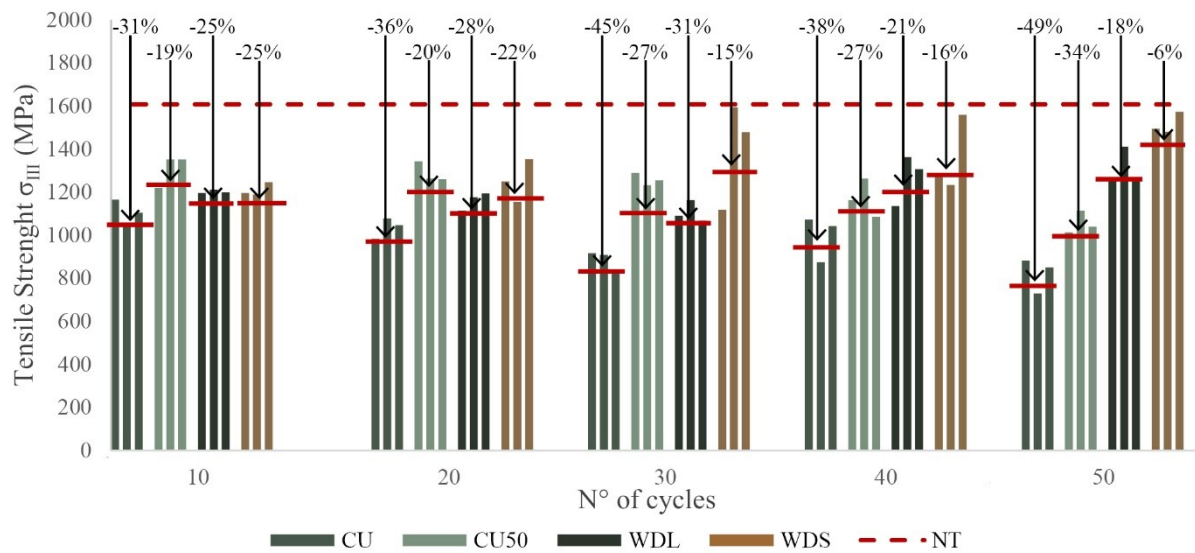
NT pari a 225 kN/mm²), nonostante alcuni valori elevati e fortemente dispersi, riconducibili alla variabilità del danneggiamento locale della matrice e dell'ancoraggio delle fibre.

Nel complesso, i risultati confermano che l'esposizione a cicli caldo-umido in presenza di una soluzione salina più aggressiva accentua il degrado del comportamento meccanico dei coupon rispetto ai provini non trattati, con una riduzione marcata delle prestazioni ultime e una perdita di definizione delle fasi intermedie della risposta a trazione, pur mostrando, per un numero elevato di cicli, effetti contrastanti sulla resistenza iniziale della matrice.

5.3.5 Confronto tra i risultati delle varie tipologie di invecchiamento (cicli caldo-umido)

In questa sezione vengono riportati i risultati ottenuti dalle quattro tipologie di invecchiamento accelerato riferite ai cicli caldo-umido, riportati in dettaglio nelle sezioni precedenti. In fig. 5-46 vengono confrontati i valori di: i) tensione di fessurazione della matrice; ii) di resistenza a trazione; iii) di deformazione ultima e iv) di pendenza dello stadio di completa fessurazione. La linea tratteggiata in rosso, presente nei vari grafici rappresenta il valore medio dei provini non trattati. Poiché sono stati studiati solo tre provini per ciclo, non si è ritenuto opportuno creare grafici con i soli valori medi; pertanto, sono rappresentati i valori di tutti i test con, per ogni tipo e ciclo, inserita una linea rossa continua che rappresenta la media e l'incremento o decremento percentuale rispetto alla media dei coupon non trattati. Così da mostrare quanto i risultati per tipo siano omogenei o quanto fortemente disomogenei.





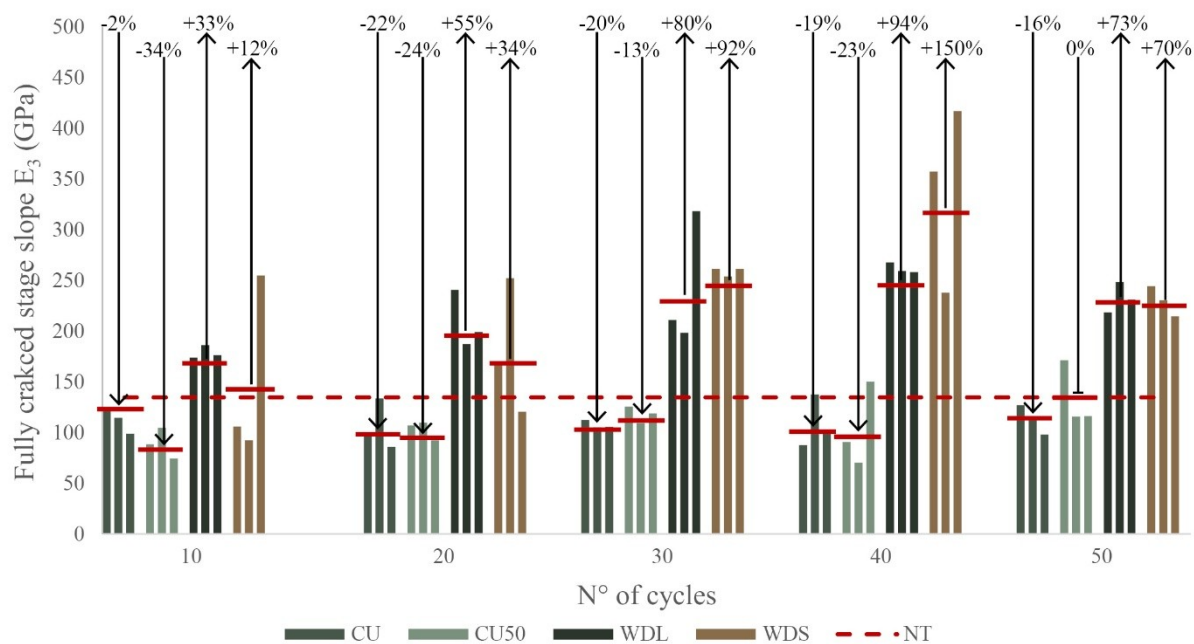


Figura Analisi e discussione dei risultati-76: Proprietà Meccaniche dei differenti tipi di invecchiamento (cicli caldo umido).

Come si evince dai grafici si può notare che le proprietà meccaniche dei provini soggetti a cicli con immersione in acqua normale ed essiccazione a 70 ed a 50°C calano drasticamente rispetto ai provini non trattati e hanno anche la tendenza a diminuire all'aumentare del numero di cicli. I provini soggetti ad immersione in soluzione salina ed essiccazione a 50°C mostrano un calo delle prestazioni soprattutto per i primi 10 e 20 cicli, mentre queste tendono ad aumentare per i cicli successivi; ad eccezione della deformazione ultima che avviene tendenzialmente per valori inferiori rispetto ai provini non trattati e cala all'aumentare dei cicli.

Analizzando il grafico inerente alla fessurazione della matrice notiamo che, dopo 10 cicli, tutte le tipologie si fessurano per tensioni molto più basse rispetto ai non trattati; infatti, i CU presentano un calo del 26%, i CU50 del 71%, i WDL del 49% e i WDS del 56%. All'aumentare dei cicli invece le tensioni di fessurazione aumentano ed in alcuni casi, la matrice si fessura per valori di tensione più alta rispetto ai coupon non trattati. Dopo 50 cicli per i coupon CU abbiamo un calo del 42% per i CU50 del 34%; i WDL ritornano a valori affini ai provini non trattati ed i WDS presentano un incremento del 19%. Questi comportamenti fanno supporre che l'immersione in soluzione salina incrementi la resistenza della matrice già dopo 30 cicli; quindi, più a lungo i provini rimangono immersi più le prestazioni aumentano.

Il grafico della resistenza ultima a trazione è quello in cui si ha meno variazione tra le varie tipologie. Anche in questo caso, solo per i provini immersi in soluzione salina (WDL, WDS) per i primi cicli, si ha un calo notevole, mentre all'aumentare dei cicli la resistenza aumenta fino a ritornare a valori simili a quelli dei coupon non trattati, infatti per 10 cicli i WDL e WDS presentano un calo di 25%, mentre per 50 cicli i WDL hanno un calo del 18% ed i WDS di 6%. Anche in questo caso, la presenza di Sali nelle soluzioni incrementa la resistenza ultima dei coupon.

Il grafico della deformazione ultima è quello in cui abbiamo la deviazione maggiore del dato per tutte le tipologie, quindi risulta molto complesso analizzarlo, si può solo dire che in generale, per tutte le tipologie, la deformazione tende a diminuire all'aumentare del numero di cicli.

Anche il grafico del modulo elastico di completa fessurazione presenta alte deviazioni, dipendendo direttamente dalla deformazione ultima. In generale, si può vedere che, per le tipologie WDL e WDS si ha un notevole incremento a partire dai 30 cicli, dovuto ai valori alti di resistenza ultima e ai valori bassi di deformazione ultima. Mentre per i provini CU e CU50 si hanno valori più o meno omogenei indipendentemente dal numero di cicli.

5.4 Pull-off test

Di seguito vengono riportati i risultati dei test di pull-off eseguiti sui cubetti. I risultati sono espressi in termini di resistenza allo strappo e carico ultimi, vengono analizzati i tipi di rottura soprattutto facendo riferimento ai casi di test su composito applicato a substrato. Vengono analizzate le variazioni dei risultati tra i vari tipi di provini e quindi tra i vari tipi di invecchiamento. Le analisi sono divise in gruppi a seconda dell'invecchiamento subito e poi confrontate tra di loro. Come per i coupon, anche in questo caso i risultati sono suddivisi in due macrocategorie; Ambiente Salino e Cicli caldo-umido.

5.4.1 Risultati provini CFV

Di seguito vengono riportati i risultati dei provini non trattati, denominati CFV. In questo caso i test sono stati effettuati solo sulle quattro facce laterali. Su due delle quali è stato applicato il composito, ricordando che, tali facce presentano due differenti intensità di rugosità, una bassa ed una alta; di conseguenza i risultati porteranno la denominazione Low, nel caso di substrato con bassa rugosità; High, substrato con alta rugosità ed infine Concrete, nel caso di test eseguiti su substrato senza composito.

In tabella 5-18 sono riportati i risultati per ogni provino, evidenziando il tipo di faccia, il livello di rugosità; la resistenza ultima, il carico ultimo e il tipo di rottura.

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
CFV_01_A	Concrete		2,67	1,36	
CFV_01_A'	FRCM	Low	1,69	0,86	F3
CFV_01_B	FRCM	High	2,59	1,32	F1
CFV_01_B'	Concrete		2,96	1,51	
CFV_02_A	FRCM	High	2,14	1,09	F3
CFV_02_A'	Concrete		3,12	1,59	
CFV_02_B	FRCM	Low	1,93	0,99	F3
CFV_02_B'	Concrete		2,13	1,08	
CFV_03_A	FRCM	High	1,71	0,87	F3
CFV_03_A'	Concrete		2,07	1,05	
CFV_03_B	Concrete		1,65	0,84	
CFV_03_B'	FRCM	Low	2,33	1,19	F1
CFV_04_A	FRCM	Low	2,03	1,03	F1
CFV_04_A'	Concrete		2,32	1,18	
CFV_04_B	FRCM	High	1,96	1	F3
CFV_04_B'	Concrete		2,58	1,32	

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
CFV_05_A	FRCM	Low	2,37	1,21	F3
CFV_05_A'	Concrete		4,10	2,09	
CFV_05_B	FRCM	High	3,02	1,54	F3
CFV_05_B'	Concrete		2,75	1,40	
CFV_06_A	FRCM	Low	0,05	0,06	F3
CFV_06_A'	Concrete		4,40	2,24	
CFV_06_B	FRCM	High	1,77	0,9	F3
CFV_06_B'	Concrete		3,96	2,02	

Tabella Analisi e discussione dei risultati-31: Risultati CFV.

Nella tabella 5-19 vengono riportati i valori medi per questa serie.

ID	Side	Roughening	Strenght (MPa)	COV (%)	Failure Mode
CFV	Concrete		1,47	28,70	-
CFV	FRCM	Low	0,91	43,66	67% F3 33%F1
CFV	FRCM	High	1,10	22,11	84% F3 16% F1

Tabella Analisi e discussione dei risultati-32: Risultati valori medi CFV.

Dalle tabelle riportate risulta che i valori medi di resistenza sono maggiori per le prove effettuate sulle facce con substrato più scabro. Il metodo di rottura prevalente è l’F3, cioè il distacco dell’interfaccia fibra-malta. Questo avviene probabilmente perché il tessuto in PBO presenta una maglia molto fitta che potrebbe compromettere la compenetrazione e quindi l’aderenza tra i due strati di malta. Ciò avviene per tutte le tipologie analizzate e riportate nei paragrafi seguenti. Solo in tre casi: CFV_01_B; CFV_03_B’ e CFV_04_A la rottura è avvenuta per delaminazione del substrato (F1) (fig.5-47).

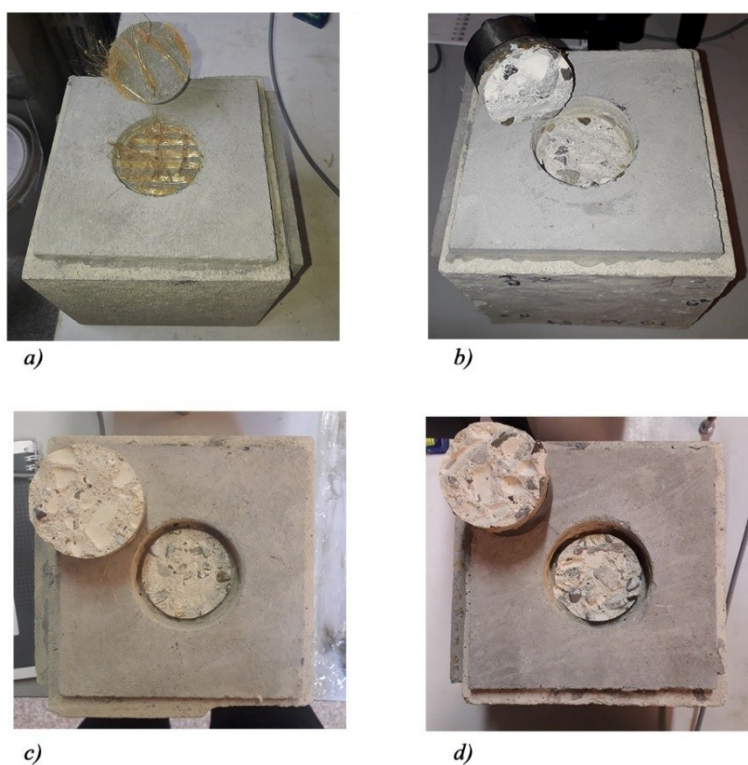


Figura Analisi e discussione dei risultati-77: tipi di rotture: a) CFV_02_A; b) CFV_01_B; c) CFV_03_B'; d) CFV_04_A.

In figura 5-48, per maggior chiarezza e comprensione dei dati, sono riportati i grafici con le percentuali dei modi di rottura avvenuti per questa serie.



Figura Analisi e discussione dei risultati-78: tipi di rotture: Low (faccia con livello di rugosità basso), High (faccia con livello di rugosità alto).

Al fine di inquadrare criticamente i risultati sperimentali ottenuti dalle prove di pull-off, è stato condotto un confronto con i dati disponibili in letteratura relativi ai sistemi FRCM, con particolare riferimento ai rinforzi in fibra di PBO applicati su substrati in calcestruzzo. È tuttavia opportuno evidenziare come le indagini sperimentali di pull-off su sistemi FRCM siano ancora limitate e caratterizzate da una marcata eterogeneità in termini di configurazione di prova, preparazione del substrato, tipologia di materiale e parametri misurati. Tali differenze rendono possibile un confronto diretto solo con un numero ristretto di studi e, nella maggior parte dei casi, su base prevalentemente qualitativa. Alcuni contributi presenti in letteratura hanno affrontato il tema dell'adesione FRCM tramite prove di pull-off, sebbene spesso con materiali e substrati differenti rispetto alla presente ricerca. Donnini et al. (2016) hanno studiato sistemi FRCM con fibre di carbonio applicati su substrati in muratura, analizzando l'effetto di diverse tipologie di impregnazione del tessuto. I risultati hanno evidenziato che la modalità di rottura predominante si verifica all'interfaccia malta-tessuto e che l'adozione di rivestimenti differenti non modifica sostanzialmente il meccanismo di collasso. In alcuni casi, un'elevata impregnazione del tessuto ha condotto a prestazioni peggiori, poiché il rinforzo ha agito come elemento distaccante, riducendo l'area di contatto efficace tra i due strati di matrice. Carozzi e Poggi (2015) hanno analizzato diverse tipologie di sistemi FRCM, con fibre in vetro, carbonio e PBO, applicati su substrati in muratura. Gli autori hanno osservato che, nel contesto analizzato, i sistemi con fibra di vetro hanno mostrato le migliori prestazioni di adesione, mentre le modalità di rottura risultano fortemente influenzate dalla geometria del tessuto e dall'interazione con la matrice inorganica. Un contributo più recente è rappresentato dallo studio di Sokołowski et al. (2022), che hanno investigato sistemi PBO-FRCM applicati su substrati lignei mediante prove di pull-off. I risultati hanno evidenziato una buona adesione complessiva del composito al substrato; tuttavia, gli autori sottolineano come le modalità di danneggiamento interfacciale, così come le condizioni di prova e la preparazione superficiale, influenzino in modo significativo i risultati sperimentali, rendendo necessaria un'attenta interpretazione dei dati.

Un riferimento particolarmente rilevante per il confronto con la presente ricerca è fornito da Ebeada e Younis (2019), che hanno studiato l'adesione di sistemi FRCM applicati su calcestruzzo mediante prove di pull-off. Le lastre in calcestruzzo armato rinforzate con FRCM, sia in fibra di carbonio sia in PBO, sono state testate analizzando l'influenza del materiale di rinforzo, del livello di rugosità del substrato (assenza, bassa e alta rugosità) e dell'età dei campioni (7, 28, 56 e 84 giorni). I risultati hanno evidenziato il ruolo chiave della preparazione

superficiale e della maturazione del sistema: i campioni con elevata rugosità hanno mostrato un incremento medio della resistenza al pull-off pari al 74% rispetto a quelli lisci, mentre i provini testati a 84 giorni hanno evidenziato un aumento medio del 54% rispetto a quelli testati a 7 giorni. Inoltre, il sistema PBO-FRCM ha mostrato una resistenza allo strappo leggermente superiore rispetto alla controparte in fibra di carbonio. Le modalità di rottura osservate includono sia il distacco all'interfaccia tessuto–matrice sia il collasso del substrato in calcestruzzo, con una maggiore incidenza di quest'ultima modalità nei sistemi in carbonio-FRCM. Nel complesso, la modalità di collasso risulta principalmente governata dalla geometria del tessuto e dalla rugosità del substrato. La Tabella 5-20 riporta il confronto tra i risultati sperimentali ottenuti nella presente ricerca e quelli disponibili in letteratura per i sistemi PBO-FRCM, evidenziando analogie e differenze in termini di resistenza di adesione e modalità di rottura.

ID	Test age	Roughening	Strenght (MPa)	COV (%)	Failure Mode
Ebeada e Younis (2019)	7	-	0,61	1,2	F2
	28	-	0,75	17,5	F2
	56	-	1,07	13,8	F3
	84	-	1,09	13,2	F3
	7	Low	0,93	17,6	30% F2 70%F3
	28	Low	0,97	11,4	F3
	56	Low	1,14	13,3	F3
	84	Low	1,28	11,7	F3
	7	0	1,18	22,6	F3
	28	High	1,34	11,6	F3
	56	High	1,52	16,2	F3
	84	High	1,56	14,5	F3
	CFV	-	0,91	43,66	67% F3 33%F1
	CFV	-	1,10	22,11	84% F3

Tabella Analisi e discussione dei risultati-33: *Confronto risultati sperimentali dei provini non trattati con risultati di letteratura (Ebeada e Younis, 2019).*

I risultati ottenuti da Ebeada e Younis mostrano una buona coerenza con quelli della presente ricerca. In particolare, per i substrati caratterizzati da bassa rugosità, gli autori riportano valori di resistenza al pull-off compresi tra 0,93 e 1,28 MPa, risultati confrontabili con il valore medio di 0,91 MPa misurato nel presente studio. Per i substrati a maggiore rugosità, i valori in letteratura variano invece tra 1,18 e 1,56 MPa, risultando leggermente superiori rispetto al valore di 1,10 MPa ottenuto in questa ricerca. Tale differenza può verosimilmente essere attribuita al diverso livello di rugosità del substrato adottato nelle due sperimentazioni, parametro che non è possibile confrontare in modo quantitativo diretto.

In entrambi gli studi emerge comunque una chiara correlazione tra l'aumento della rugosità del substrato e l'incremento della resistenza di adesione. Inoltre, la modalità di rottura prevalente risulta essere di tipo F3, confermando che il collasso avviene principalmente in prossimità dell'interfaccia matrice-calcestruzzo, piuttosto che all'interfaccia tessuto-matrice.

5.5 Risultati cicli Ambiente Salino

5.5.1 Risultati CS1-CFS1

Di seguito sono riportati i risultati dei provini soggetti ad immersione per 1000 ore in soluzione realizzata come da normativa ASTM D1141-98. Denominati CS1 e CFS1; il primo gruppo è composto da sei provini sui quali la fibra è stata applicata dopo l'invecchiamento mentre, il gruppo CFS1, è composto da sei provini sui quali la fibra è stata applicata prima dell'invecchiamento. Per entrambe le tipologie il composito è stato applicato su due delle facce laterali che presentano, anche in questo caso, due differenti livelli di scabrosità.

Nella figura 5-49 sono riportati alcuni campioni tipo che mostrano, a livello visivo, gli effetti dell'invecchiamento. Si nota subito la presenza di copiose efflorescenze su tutta la superficie del composito e anche il degrado sulla faccia in calcestruzzo è notevole; quest'ultimo presenta, oltre ad efflorescenze (anche se in minor quantità rispetto al composito), microfessurazioni e aumento della porosità.

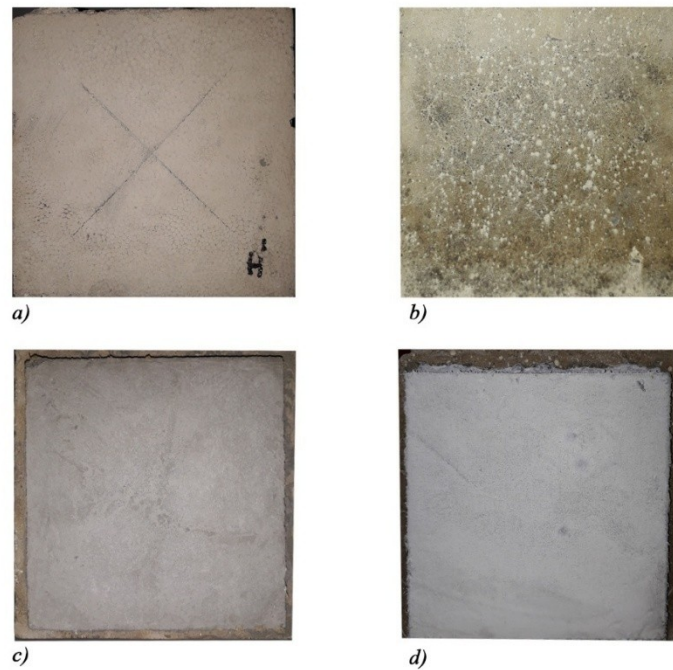


Figura Analisi e discussione dei risultati-79: a) provino prima dell'invecchiamento faccia calcestruzzo, b) provino dopo 1000 ore faccia calcestruzzo, c) provino prima dell'invecchiamento faccia composito, d) provino dopo 1000 ore faccia composito.

Nella tabella 5-21 sono riportati i valori delle prove effettuate sui provini CS1.

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
CS1_01_A	FRCM	Low	2,06	1,05	F1
CS1_01_A'	Concrete		2,90	1,52	
CS1_01_B	FRCM	High	2,60	1,33	F3
CS1_01_B'	Concrete		3,27	1,66	
CS1_02_A	FRCM	Low	1,97	1,00	F3
CS1_02_A'	Concrete		5,65	2,88	
CS1_02_B	FRCM	High	3,13	1,59	F3
CS1_02_B'	Concrete		4,24	2,16	
CS1_03_A	FRCM	Low	1,96	1,00	F1

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
CS1_03_A'	Concrete		2,92	1,49	
CS1_03_B	FRCM	High	2,18	1,11	F1
CS1_03_B'	Concrete		2,82	1,44	
CS1_04_A	FRCM	Low	2,16	1,10	F3
CS1_04_A'	Concrete		3,79	1,93	
CS1_04_B	FRCM	High	2,87	1,46	F3
CS1_04_B'	Concrete		3,93	2,00	
CS1_05_A	FRCM	Low	2,17	1,10	F3
CS1_05_A'	Concrete		2,05	1,04	
CS1_05_B	FRCM	High	2,30	1,17	F3
CS1_05_B'	Concrete		3,56	1,81	
CS1_06_A	FRCM	Low	2,29	1,17	F3
CS1_06_A'	Concrete		3,06	1,56	
CS1_06_B	FRCM	High	2,51	1,28	F3
CS1_06_B'	Concrete		2,70	1,37	

Tabella Analisi e discussione dei risultati-34: Risultati CS1.

Nella tabella 5-22 sono riportati i valori delle prove effettuate sui provini CFS1.

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
CFS1_01_A	FRCM	Low	1,50	0,77	F3
CFS1_01_A'	Concrete		2,13	1,08	
CFS1_01_B	FRCM	High	2,03	1,03	F3
CFS1_01_B'	Concrete		2,74	1,40	
CFS1_02_A	FRCM	Low	2,60	1,32	F3

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
CFS1_02_A'	Concrete		2,63	1,34	
CFS1_02_B	FRCM	High	2,76	1,41	F3
CFS1_02_B'	Concrete		3,23	1,65	
CFS1_03_A	FRCM	Low	1,63	0,83	F3
CFS1_03_A'	Concrete		3,16	1,61	
CFS1_03_B	FRCM	Low	2,83	1,44	F3
CFS1_03_B'	Concrete		3,02	1,54	
CFS1_04_A	FRCM	Low	1,60	0,81	F3
CFS1_04_A'	Concrete		3,16	1,61	
CFS1_04_B	FRCM	High	2,83	1,44	F3
CFS1_04_B'	Concrete		3,88	1,98	
CFS1_05_A	FRCM	Low	2,16	1,10	F2
CFS1_05_A'	Concrete		3,23	1,65	
CFS1_05_B	FRCM	High	2,83	1,44	F3
CFS1_05_B'	Concrete		3,88	1,98	
CFS1_06_A	FRCM	Low	1,15	0,58	F3
CFS1_06_A'	Concrete		2,96	1,51	
CFS1_06_B	FRCM	High	1,75	0,89	F3
CFS1_06_B'	Concrete		3,70	1,89	

Tabella Analisi e discussione dei risultati-35: Risultati CFS1.

Nella tabella 5-23 vengono riportati i valori medi per queste due serie, inserendo anche i valori medi dei provini non trattati e l'eventuale incremento-diminuzione rispetto a questi.

ID	Side	Roughening	Strenght (MPa)	COV (%)	Bond Improvement (%)	Failure Mode
CFV	Concrete		1,47	28,70	-	-

ID	Side	Roughening	Strenght (MPa)	COV (%)	Bond Improvement (%)	Failure Mode
CS1	Concrete		1,74		+18	-
CFS1	Concrete		1,62		+10	-
CFV	FRCM	Low	0,91	43,66	-	67% F3 33%F1
CS1	FRCM	Low	1,07	5,66	+ 18	67% F3 33%F1
CFS1	FRCM	Low	0,90	26,37	- 0,55	84% F3 16% F1
CFV	FRCM	High	1,10	22,11	-	84% F3 16% F1
CS1	FRCM	High	1,32	12,37	+20	84% F3 16% F1
CFS1	FRCM	High	1,24	17,64	+13	100% F3

Tabella Analisi e discussione dei risultati-36: Risultati valori medi CS1, CFS1 e confronto con CFV.

Per una migliore comprensione dei dati, in figura 5-50, vengono graficizzati, tramite istogrammi, i risultati riportati in tabella.

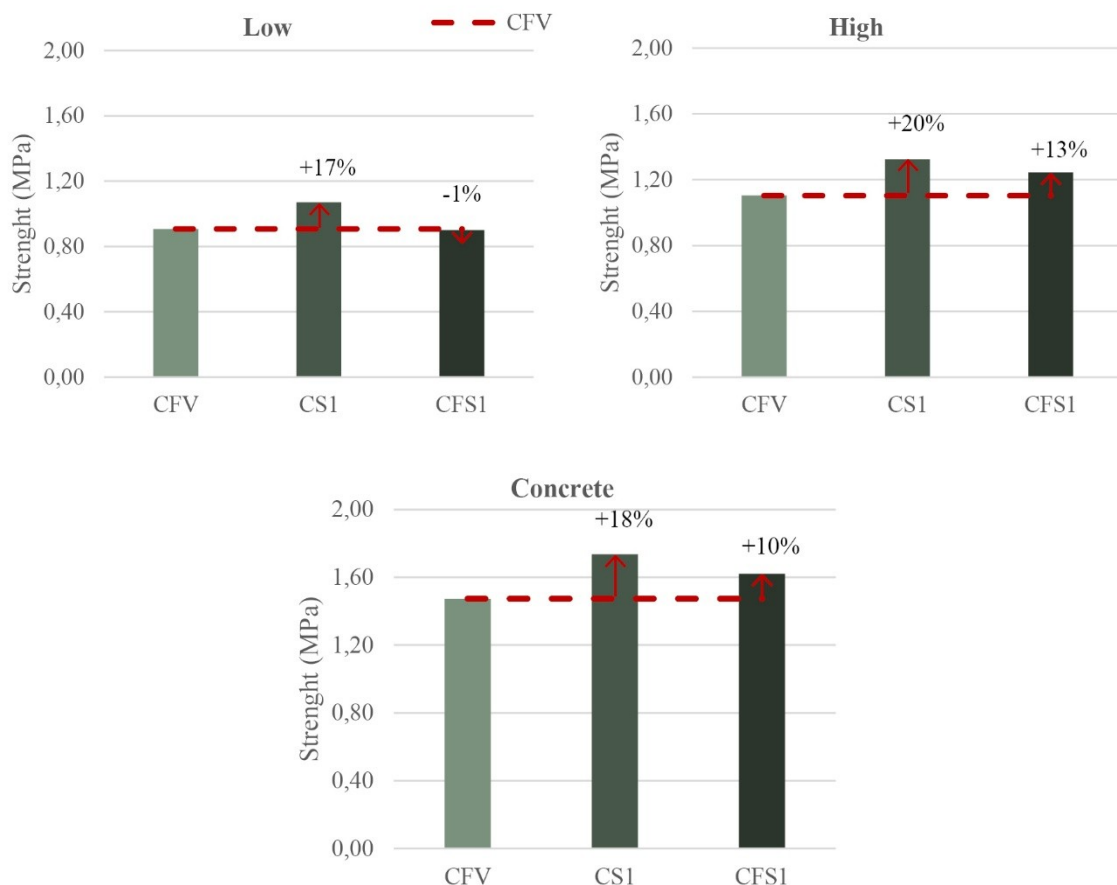


Figura Analisi e discussione dei risultati-80: Risultati resistenza provini CS1 e CFS1 confrontati con quelli non condizionati (CFV).

Da quanto sopra riportato si deduce che, tendenzialmente, l'immersione in soluzione salina incrementa la resistenza allo strappo per tutte le tipologie analizzate, unica eccezione si ha per i campioni CFS1, sulla faccia denominata Low, i quali non subiscono nessuna variazione rispetto ai provini non trattati. La maggior rugosità in tutte le tipologie incrementa la resistenza, infatti, per i cubetti CS1 si ha un incremento del 23% del valore medio rilevato tra la faccia denominata Low e quella denominata High; lo stesso per i provini CFS1, con un incremento del 37%. I cubetti con fibra applicata dopo l'invecchiamento mostrano risultati di resistenza più alti di quelli con composito invecchiato; con un incremento della resistenza del legame substrato-composito del 20% nel caso di superficie più scabrosa. Anche il substrato in cemento presenta prestazioni migliori dopo l'invecchiamento con un incremento della resistenza allo strappo del 18% per i provini CS1 e del 10% per i provini CFS1.

Il metodo di rottura prevalente, anche in questo caso, è l'F3, cioè il distacco dell'interfaccia fibra-malta. Le eccezioni sono: CS1_01_A; CS1_03_A; CS1_03_B per i quali la rottura è

avvenuta per delaminazione del substrato (F1); e per distacco anomalo in parte per delaminazione del substrato ed in parte per distacco dell'interfaccia per il cubetto CFS1_05_A, che è stato considerato con modalità di rottura F1 (Fig.5-51). I grafici in figura 5-52 mostrano le percentuali di modalità di rottura di questi due gruppi.

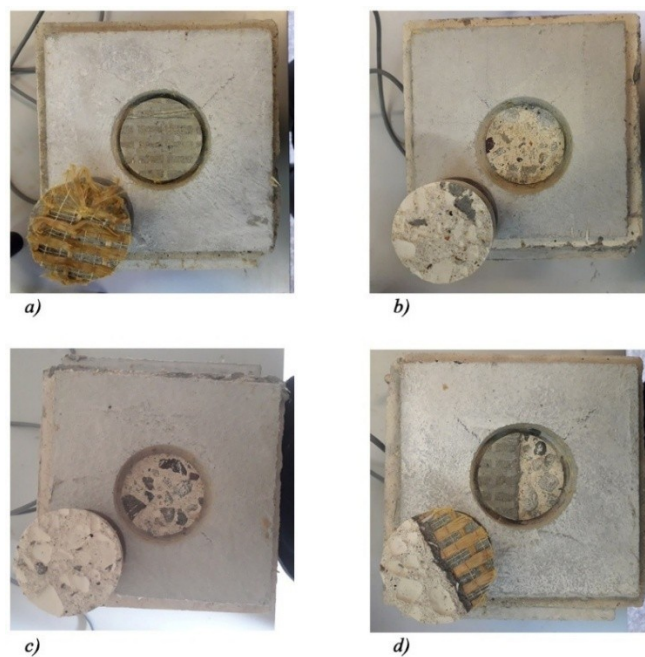


Figura Analisi e discussione dei risultati-81: tipi di rotture: a) CFS1_04_A; b) CS1_03_A; c) CS1_03_B; d) CFS1_05_A.

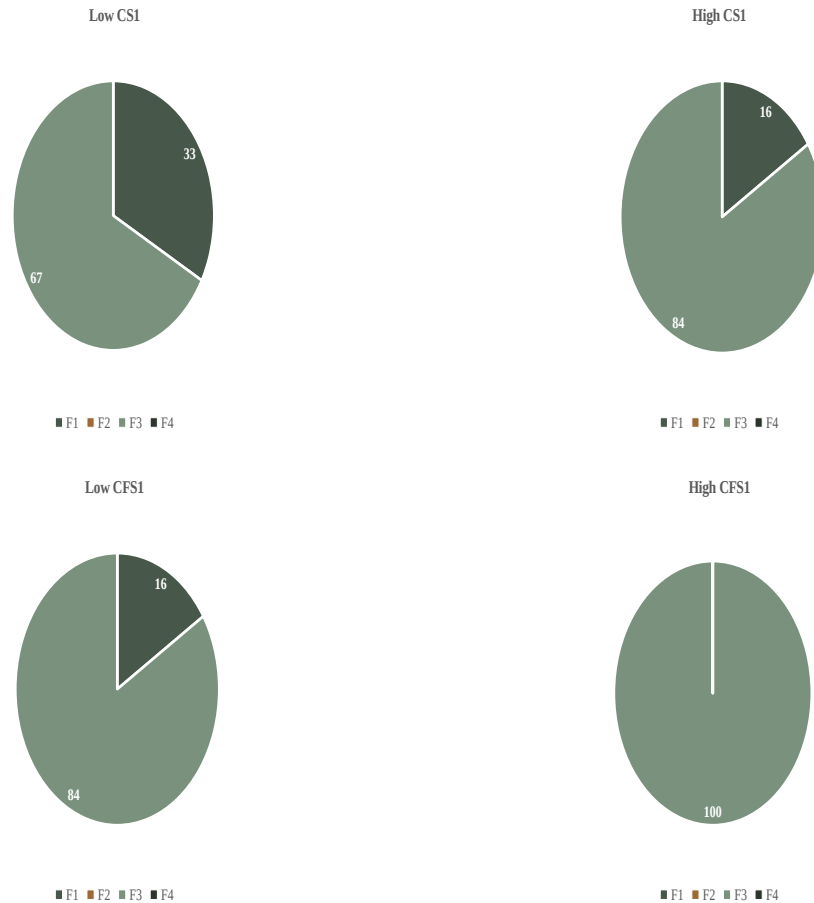


Figura Analisi e discussione dei risultati-82: Tipi di rotture: Low (faccia con livello di rugosità basso), High (faccia con livello di rugosità alto).

5.5.2 Risultati CS3-CFS3

Di seguito sono riportati i risultati dei provini soggetti ad immersione per 3000 ore in soluzione realizzata come da normativa ASTM D1141-98. Denominati CS3 e CFS3; il primo gruppo è composto da sei provini con composito applicato dopo l'invecchiamento mentre, il gruppo CFS3, è composto da sei provini ai quali il composito è stato applicato prima dell'invecchiamento. Per entrambe le tipologie la matrice è stata applicata su due delle facce laterali con due differenti livelli di scabrosità.

La figura 5-53 mostra le trasformazioni, a livello visivo, avvenute con questo tipo di invecchiamento. Anche in questo caso, sono ben visibili copiose efflorescenze sia sul composito che sul calcestruzzo, in particolare il composito ne risulta completamente ricoperto, mentre nel calcestruzzo è presente in minor quantità. In quest'ultimo sono presenti anche

microfessurazioni, incremento della porosità e anche disgregazione del materiale, ben visibile agli spigoli dei cubetti.

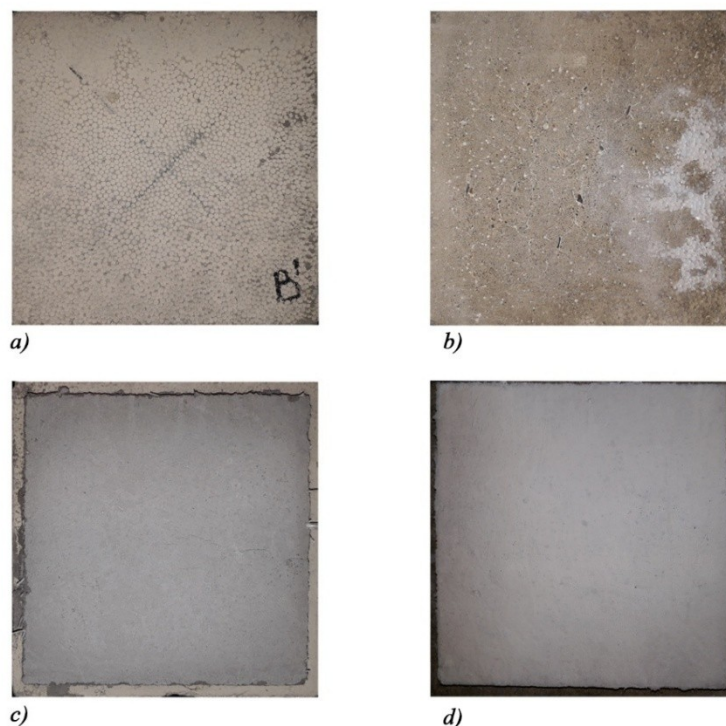


Figura Analisi e discussione dei risultati-83: a) provino prima dell'invecchiamento faccia calcestruzzo, b) provino dopo 3000 ore faccia calcestruzzo, c) provino prima dell'invecchiamento faccia composito, d) provino dopo 3000 ore faccia composito.

Nella tabella 5-24 sono riportati i valori delle prove effettuate sui provini CS3.

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
CS3_01_A	FRCM	Low	2,04	1,04	F3
CS3_01_A'	Concrete	-	3,81	1,94	-
CS3_01_B	FRCM	High	1,49	0,76	F3
CS3_01_B'	Concrete	-	2,70	1,37	-
CS3_02_A	FRCM	Low	2,45	1,25	F3
CS3_02_A'	Concrete	-	3,92	2,00	-
CS3_02_B	FRCM	High	2,60	1,32	F3

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
CS3_02_B'	Concrete	-	2,38	1,21	-
CS3_03_A	FCM	Low	2,70	1,38	F3
CS3_03_A'	Concrete	-	3,14	1,6	-
CS3_03_B	FRCM	High	1,62	0,82	F3
CS3_03_B'	Concrete	-	2,38	1,21	-
CS3_04_A	FRCM	Low	1,13	0,57	F3
CS3_04_A'	Concrete	-	5,76	2,93	-
CS3_04_B	FRCM	High	2,37	1,21	F2
CS3_04_B'	Concrete	-	3,86	1,96	-
CS3_05_A	FRCM	Low	2,80	1,43	F3
CS3_05_A'	Concrete	-	3,07	1,56	-
CS3_05_B	FRCM	High	1,49	0,76	F3
CS3_05_B'	Concrete	-	3,44	1,75	-
CS3_06_A	FRCM	Low	1,91	0,97	F3
CS3_06_A'	Concrete	-	3,38	1,72	-
CS3_06_B	FRCM	High	2,01	1,02	F3
CS3_06_B'	Concrete	-	3,27	1,66	-

Tabella Analisi e discussione dei risultati-37: Risultati CS3.

Nella tabella 5-25 sono riportati i valori delle prove effettuate sui provini CFS3.

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
CFS3_01_A	FRCM	Low	2,50	1,27	F3
CFS3_01_A'	Concrete	-	5,49	2,08	-
CFS3_01_B	FRCM	High	3,48	1,77	F3
CFS3_01_B'	Concrete	-	4,53	2,30	-

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
CFS3_02_A	FRCM	Low	2,06	1,05	F3
CFS3_02_A'	Concrete	-	3,26	1,66	-
CFS3_02_B	FRCM	High	1,69	0,86	F3
CFS3_02_B'	Concrete	-	4,16	2,12	-
CFS3_03_A	FRCM	Low	1,61	0,82	F1
CFS3_03_A'	Concrete	-	3,21	1,64	-
CFS3_03_B	FRCM	High	2,31	1,17	F3
CFS3_03_B'	Concrete	-	1,69	0,86-	
CFS3_04_A	FRCM	Low	1,78	0,91	F3
CFS3_04_A'	Concrete	-	4,99	2,54	-
CFS3_04_B	FRCM	High	3,21	1,63	F1
CFS3_04_B'	Concrete	-	3,76	1,91	-
CFS3_05_A	FRCM	Low	2,24	1,14	F3
CFS3_05_A'	Concrete	-	4,01	2,04	-
CFS3_05_B	FRCM	High	2,27	1,16	F1
CFS3_05_B'	Concrete	-	2,64	1,35	-
CFS3_06_A	FRCM	Low	2,95	1,50	F3
CFS3_06_A'	Concrete	-	4,27	2,17	-
CFS3_06_B	FRCM	High	2,91	1,48	F3
CFS3_06_B'	Concrete	-	4,57	2,33	-

Tabella Analisi e discussione dei risultati-38: Risultati CFS3.

Nella tabella 5-26 vengono riportati i valori medi di queste due tipologie, inserendo anche i valori medi dei provini non trattati e l'eventuale incremento-diminuzione rispetto a questi.

ID	Side	Roughening	Strenght (MPa)	COV (%)	Bond Improvement (%)	Failure Mode
CFV	Concrete		1,47	28,70	-	-
CS3	Concrete		1,84	23,95	+ 25	-
CFS3	Concrete		1,92	23,50	+ 30	-
CFV	FRCM	Low	0,91	43,66	-	67% F3 33%F1
CS3	FRCM	Low	1,11	26,37	+ 22	100% F3
CFS3	FRCM	Low	1,12	20,26	+ 23	84% F3 16% F1
CFV	FRCM	High	1,10	22,11	-	84% F3 16% F1
CS3	FRCM	High	0,98	38,38	-11	84% F3 16% F2
CFS3	FRCM	High	1,35	23,12	+ 23	67% F3 33%F1

Tabella Analisi e discussione dei risultati-39: Risultati valori medi CS3, CFS3 e confronto con CFV.

Per una migliore comprensione dei dati, in figura 5-54, vengono graficizzati, tramite istogrammi, i risultati riportati in tabella.

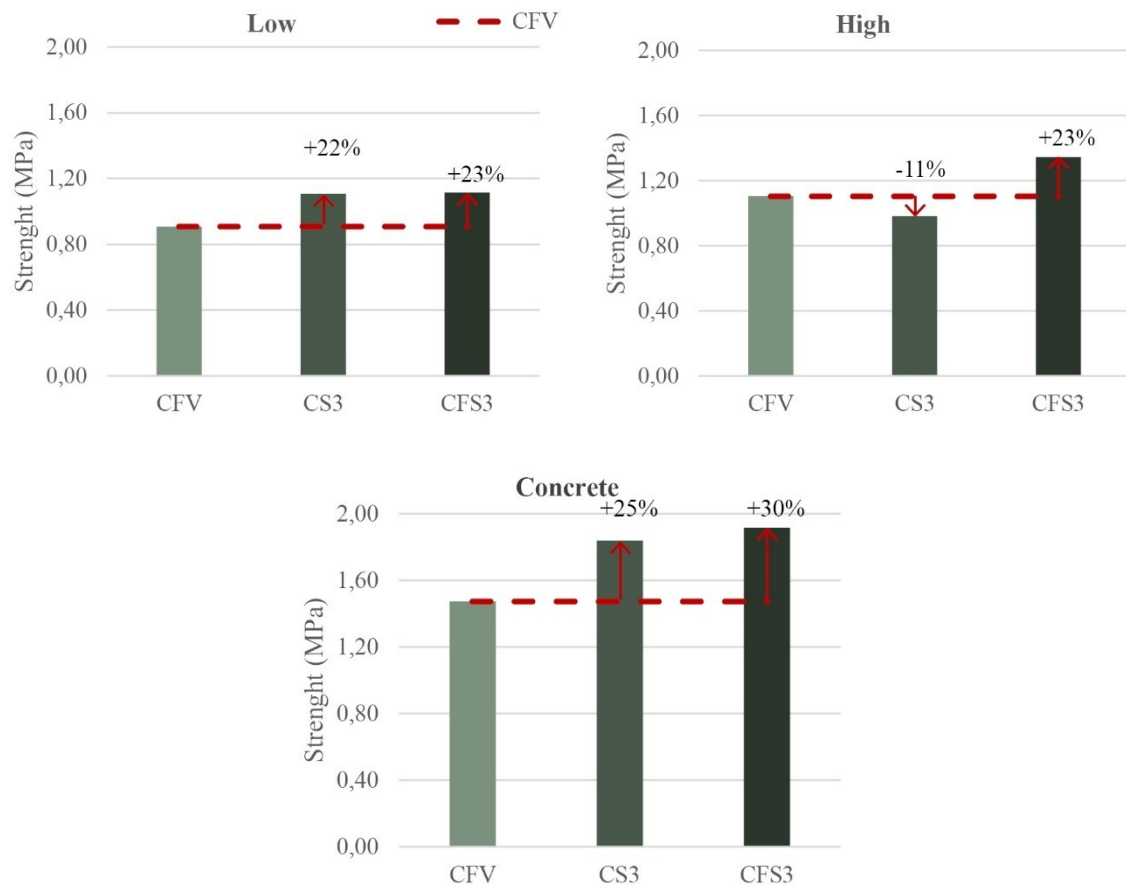


Figura Analisi e discussione dei risultati-84: Risultati resistenza provini CS3 e CFS3 confrontati con quelli non condizionati (CFV).

Anche per questo gruppo, l'immersione in soluzione salina incrementa la resistenza allo strappo per tutte le tipologie analizzate, ad eccezione dei campioni CS3, sulla faccia denominata High, che presentano una diminuzione del 11 %. La maggior rugosità, invece, incrementa la resistenza per i cubetti CFS3 che presentano un incremento del 23% del valore medio rilevato tra la faccia denominata Low e quella denominata High. Non sono riscontrabili differenze incisive tra il gruppo con composito applicato prima dell'invecchiamento (CFS3) e quelli con l'applicazione dopo l'invecchiamento (CS3), infatti per la categoria Low mostrano valori di resistenza pressoché uguali, mentre nel caso denominato High per il gruppo CS3 si ha un calo notevole, come detto in precedenza. In generale, si può affermare che i sali incrementano la resistenza per la maggior parte delle tipologie analizzate, anche nel caso di faccia di solo substrato in calcestruzzo.

Il metodo di rottura prevalente, è sempre l'F3, cioè il distacco dell'interfaccia fibra-malta. Si sono riscontrate eccezioni, infatti: il cubetto CS3_04_B ha presentato una rottura anomala, in

parte per distacco interfaccia matrice-substrato (F2) ed in parte per distacco fibra matrice (F3), è stata considerata con rottura di tipo F2. I cubetti CFS3_03_A; CFS3_04_B; CFS3_05_B, invece, per delaminazione del substrato (F1) (fig.5-55). In figura 5-56, sono mostrate, graficizzate, le percentuali di modalità di rottura per una miglior comprensione del dato.

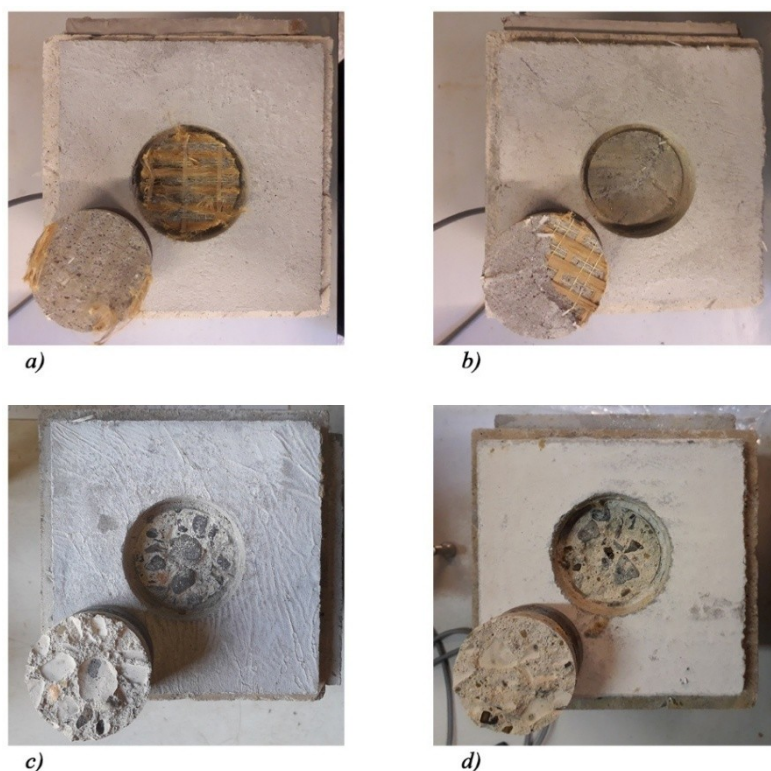


Figura Analisi e discussione dei risultati-85: Tipi di rotture: a) CS3_03_B; b) CS3_04_B; c) CFS3_03_A; d) CFS3_05_B.

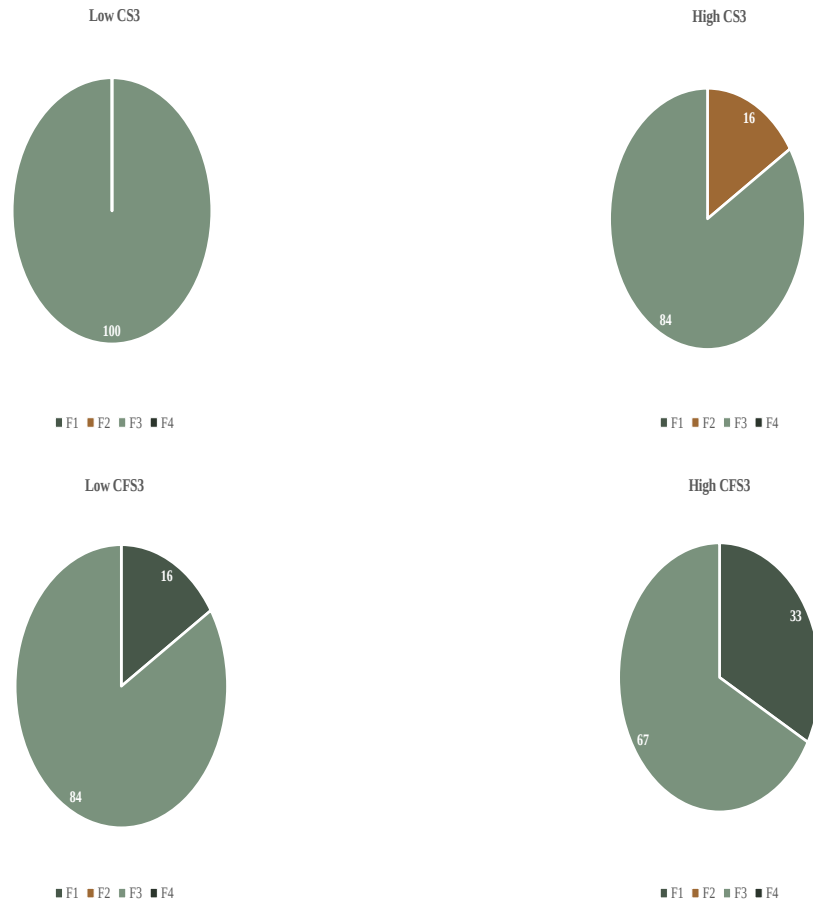


Figura Analisi e discussione dei risultati-86: Tipi di rotture: Low (faccia con livello di rugosità basso), High (faccia con livello di rugosità alto).

5.5.3 Confronto risultati CS1/CS3 e CFS1/CFS3

Di seguito vengono confrontati i risultati dei gruppi di cubetti analizzati nei paragrafi precedenti, per mostrare le differenze di comportamento all'aumentare del tempo di immersione, da 1000 a 3000 ore. In figura 5-57 vengono riportati i grafici con i valori in termini di resistenza allo strappo delle varie tipologie di invecchiamento con confronto anche con il valore dei provini non invecchiati (CFV).

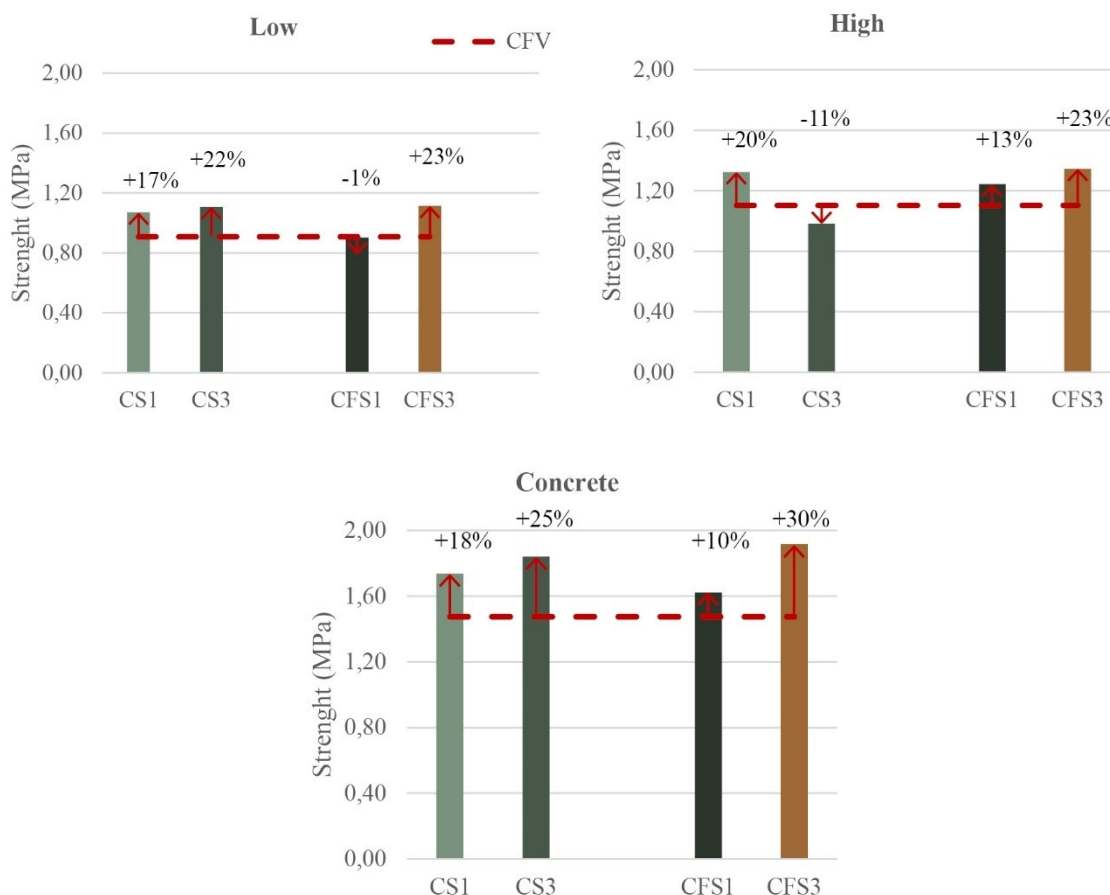


Figura Analisi e discussione dei risultati-87: Risultati confronto resistenza provini CS1/CS3 e CFS1/CFS3 e CFV.

Dai grafici sopra riportati si deduce che, ad eccezione del gruppo CS1/CS3 High, in tutti gli altri casi, all'aumentare dell'immersione in soluzione incrementa la resistenza allo strappo, sia per il composito che per il calcestruzzo. I tipi di rottura sono in maggioranza di tipo F3, distacco fibra matrice, per tutte le tipologie con sporadici casi di rottura per tipo F1, delaminazione substrato in calcestruzzo, e F2 distacco interfaccia matrice-substrato. Ad indicare che l'immersione non altera il legame tra composito e substrato.

5.5.4 Risultati SolL1

Di seguito sono riportati i risultati dei provini soggetti ad immersione per 1000 ore in soluzione composta da acqua deionizzata, cloruro di sodio all'4% (NaCl) e sodio solfato decaidrato al 2% (Na₂SO₄), denominati SolL1. Il gruppo è composto da sei provini con composito applicato, su

due facce laterali, prima dell'invecchiamento e su altre due facce laterali dopo l'invecchiamento. Anche in questo caso il composito è stato applicato su substrato con due livelli di scabrosità, Low bassa ed High alta. Alle due tipologie è stato applicato l'epiteto pre o post a seconda che il composito sia stato applicato prima (pre) o dopo (post) l'invecchiamento accelerato. I test su solo substrato sono stati effettuati sulla faccia inferiore di ogni provino.

La figura 5-58 mostra le trasformazioni, a livello visivo. Sono visibili lievi efflorescenze sul composito. Le facce in calcestruzzo presentano patina, sporadiche efflorescenze ed un lieve incremento della porosità. Rispetto ai campioni CS1 e CFS1 mostrano un degrado nettamente inferiore, segno che la soluzione utilizzata in questo caso danneggia, a livello superficiale, meno sia l'FRCM che il calcestruzzo.

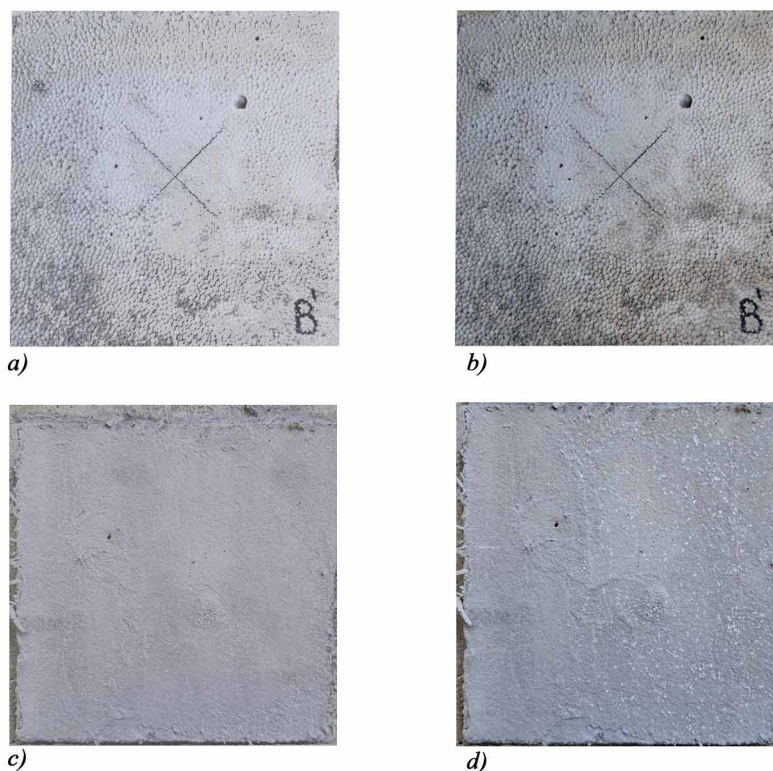


Figura Analisi e discussione dei risultati-88: a) provino prima dell'invecchiamento faccia calcestruzzo, b) provino dopo 1000 ore faccia calcestruzzo, c) provino prima dell'invecchiamento faccia composito, d) provino dopo 1000 ore faccia composito.

Nella tabella 5-27 sono riportati i valori delle prove effettuate sui provini SolL1.

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
SolL1_01_A	FRCM	Low (pre)	1,78	0,91	F3
SolL1_01_A'	FRCM	Low (post)	1,51	0,77	F2
SolL1_01_B	FRCM	High (pre)	2,41	1,23	F3
SolL1_01_B'	FRCM	High (post)	1,95	0,99	F2
SolL1_01_cls	Concrete	-	4,73	2,41	-
SolL1_02_A	FRCM	Low (pre)	1,55	0,79	F3
SolL1_02_A'	FRCM	Low (post)	2,29	1,16	F2
SolL1_02_B	FRCM	High (pre)	3,07	1,57	F3
SolL1_02_B'	FRCM	High (post)	1,59	0,81	F2
SolL1_02_cls	Concrete	-	4,64	2,32	-
SolL1_03_A	FRCM	Low (pre)	3,33	1,70	F3
SolL1_03_A'	FRCM	Low (post)	0,64	0,33	F2
SolL1_03_B	FRCM	High (pre)	1,63	0,83	F3
SolL1_03_B'	FRCM	High (post)	0	0	F2
SolL1_03_cls	Concrete	-	6,22	3,17	-
SolL1_04_A	FRCM	Low (pre)	2,47	1,26	F3
SolL1_04_A'	FRCM	Low (post)	2,93	1,49	F3
SolL1_04_B	FRCM	High (pre)	2,07	1,05	F1
SolL1_04_B'	FRCM	High (post)	1,74	0,89	F1
SolL1_04_cls	Concrete	-	2,71	1,38	-
SolL1_05_A	FRCM	Low (pre)	2,88	1,47	F3
SolL1_05_A'	FRCM	Low (post)	2,01	1,02	F2
SolL1_05_B	FRCM	High (pre)	3,49	1,78	F3
SolL1_05_B'	FRCM	High (post)	1,52	0,77	F2
SolL1_05_cls	Concrete	-	3,7	1,88	-
SolL1_06_A	FRCM	Low (pre)	3,08	1,57	F3
SolL1_06_A'	FRCM	Low (post)	2,06	1,05	F3
SolL1_06_B	FRCM	High (pre)	1,53	0,78	F3

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
SolL1_06_B'	FRCM	High (post)	1,47	0,75	F3
SolL1_06_cls	Concrete	-	5,72	2,91	-

Tabella Analisi e discussione dei risultati-40: Risultati SolL1.

Nella tabella 5-28 vengono riportati i valori medi di questo gruppo, inserendo anche i valori medi dei provini non trattati e l'eventuale incremento-diminuzione rispetto a questi.

ID	Side	Roughening	Strenght (MPa)	COV (%)	Bond Improvement (%)	Failure Mode
CFV	Concrete		1,47	29	-	-
SolL1	Concrete		2,19	36	+49	-
CFV	FRCM	Low	0,91	44	-	67% F3 33%F1
SolL1_pre	FRCM	Low	1,28	26	+41	83% F3 17% F4
SolL1_post	FRCM	Low	0,97	7	+37	33% F3 67% F2
CFV	FRCM	High	1,10	22	-	84% F3 16% F1
SolL1_pre	FRCM	High	2,37	15	+115	83% F3 17% F2
SolL1_post	FRCM	High	1,38	23	+25	17% F1 66% F2 17% F3

Tabella Analisi e discussione dei risultati-41: Risultati valori medi CS3, CFS3 e confronto con CFV.

Per una migliore comprensione dei dati, in figura 5-59, vengono graficizzati, tramite istogrammi, i risultati riportati in tabella.

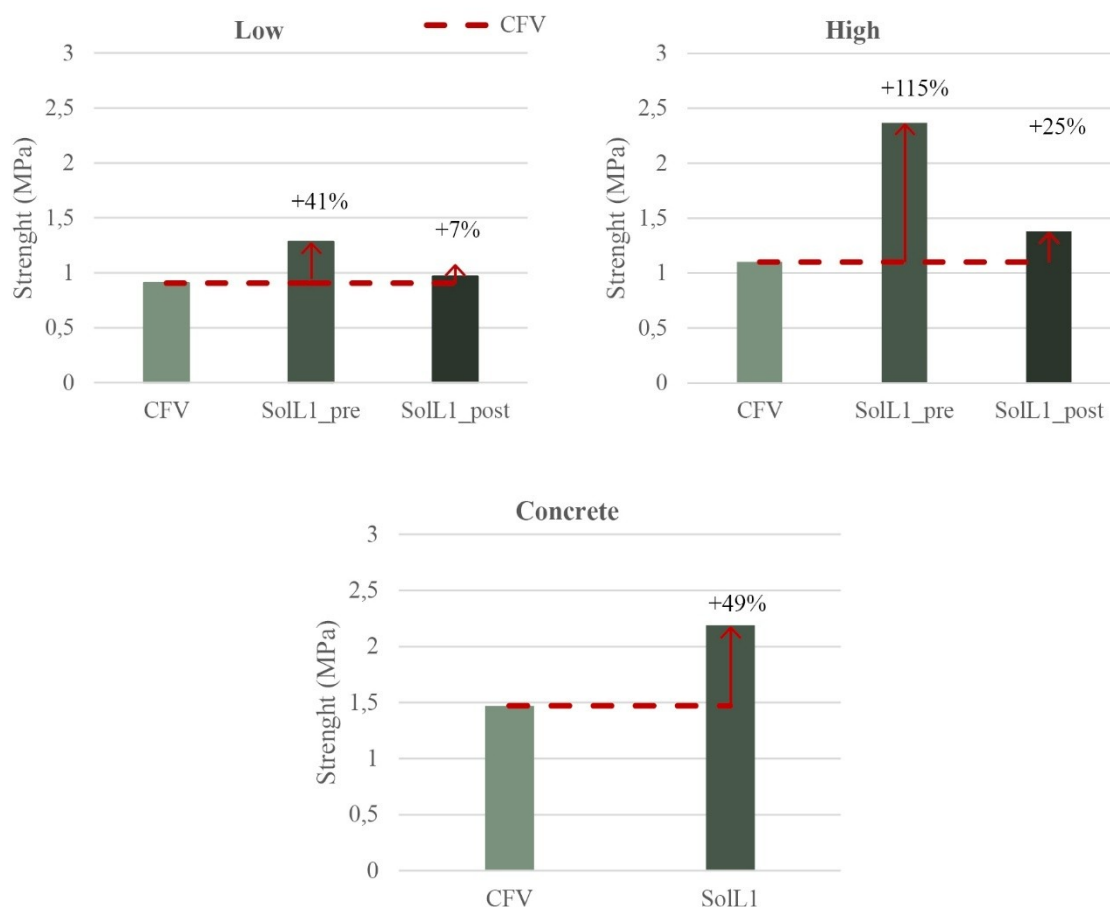


Figura Analisi e discussione dei risultati-89: Risultati resistenza provini SolL1 confrontati con quelli non condizionati (CFV).

L'immersione in soluzione incrementa la resistenza allo strappo per tutte le tipologie analizzate; L'incremento risulta maggiore nel caso di composito invecchiato con valori pari al 41% per le facce con minor rugosità (SolL1_Low pre) e al 115% per le facce con maggior rugosità (SolL1_High pre). Anche qui la maggior rugosità incrementa la resistenza con valori di +84% del valore medio rilevato tra la faccia denominata Low_pre e quella denominata High_pre; e del +42% tra i Low_post ed i High_post. Anche i test effettuati sul solo substrato in calcestruzzo mostrano un incremento della resistenza pari al 49%.

Nel caso di composito applicato prima dell'invecchiamento, il metodo di rottura prevalente, è sempre l'F3, cioè il distacco dell'interfaccia fibra-malta. Mentre, nel caso di composito applicato dopo l'invecchiamento si ha una rottura prevalente per distacco composito-substrato (F2), ciò indica che il substrato in calcestruzzo, nonostante la superficie resa più ruvida, presenta una minor aderenza con la matrice; ciò è dovuto all'invecchiamento subito che ne ha

alterato la composizione a livello superficiale. Si sono verificate rotture per distacco del substrato (F1) nel caso di SolL1_04_B e SolL1_04_B' (Fig.5-60). In figura 5-61, sono mostrate, graficizzate, le percentuali di modalità di rottura per una miglior comprensione del dato.

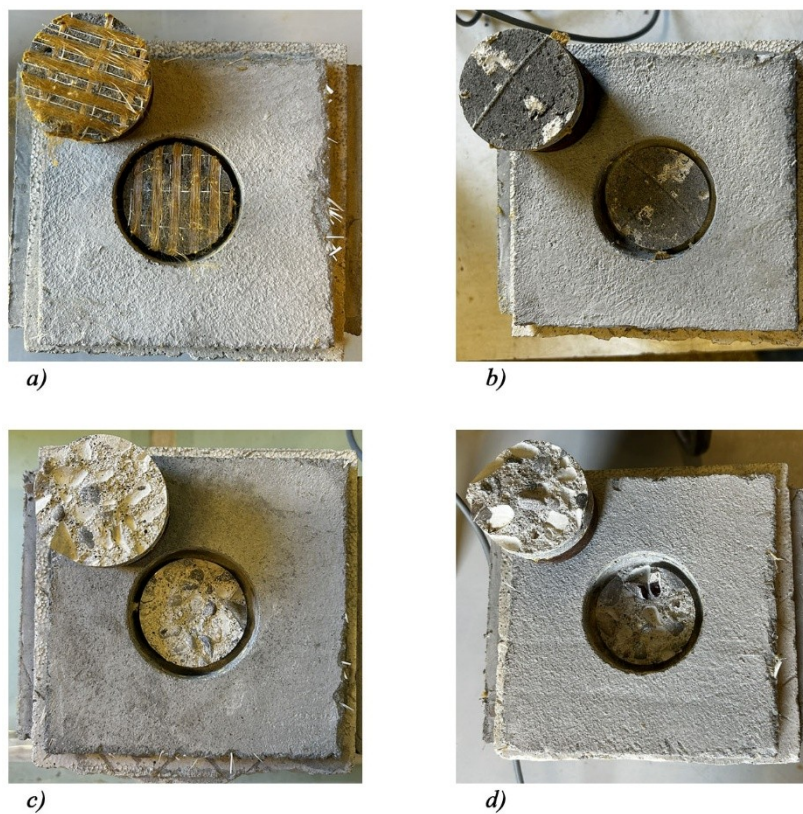


Figura Analisi e discussione dei risultati-90: Tipi di rotture: a) SolL1_01_A; b) SolL1_05_B; c) SolL1_04_B; d) SolL1_04_B'.

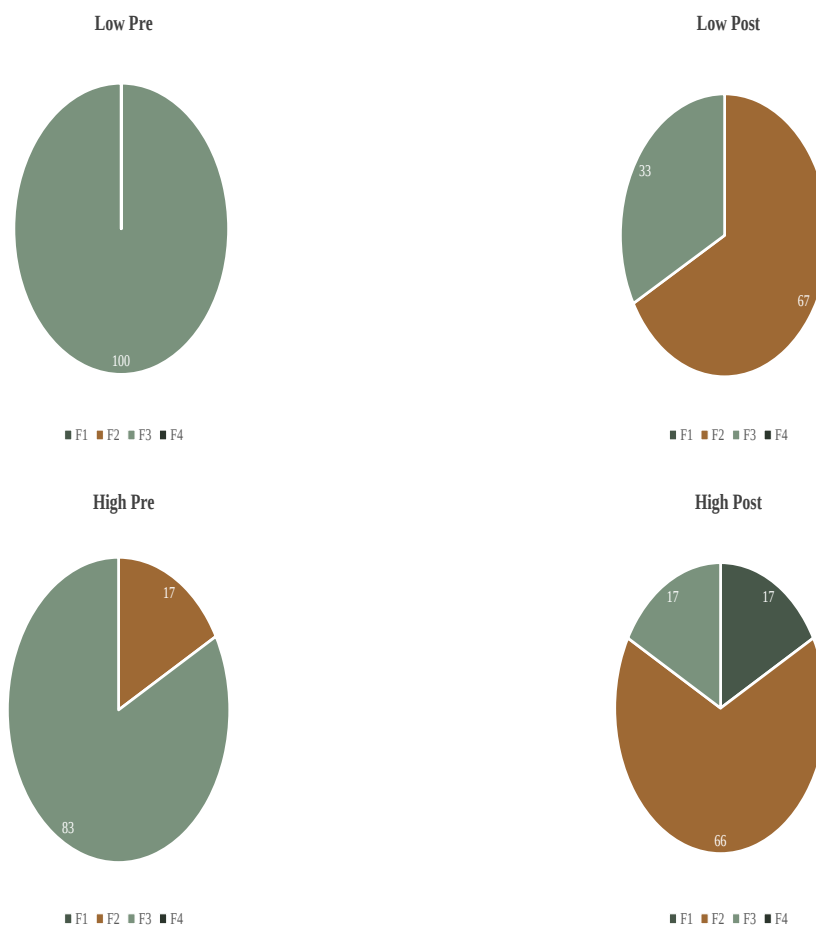


Figura Analisi e discussione dei risultati-91: Tipi di rotture: Low (faccia con livello di rugosità basso) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), High (faccia con livello di rugosità alto) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), provini SolL1.

5.5.5 Risultati SolL3

Di seguito sono riportati i risultati dei provini soggetti ad immersione per 3000 ore in soluzione composta da acqua deionizzata, cloruro di sodio all'4% (NaCl) e sodio solfato decaidrato al 2% (Na₂SO₄), denominati SolL3. Il gruppo è composto da sei provini con composito applicato, su due facce laterali, prima dell'invecchiamento e su altre due facce laterali dopo l'invecchiamento. Anche in questo caso il composito è stato applicato su substrato con due livelli di scabrosità, Low bassa ed High alta. Alle due tipologie è stato applicato l'epiteto pre o post a seconda che il composito sia stato applicato prima (pre) o dopo (post) l'invecchiamento accelerato. I test su solo substrato sono stati effettuati sulla faccia inferiore di ogni provino.

La figura 5-62 mostra le trasformazioni, a livello visivo, avvenute con questo tipo di invecchiamento sia sul substrato che sul composito. Sono visibili efflorescenze sul composito, presente anche nel calcestruzzo ma in minor quantità. In quest'ultimo sono presenti anche patina ed un lieve incremento della porosità. In generale questa soluzione ha danneggiato meno la superficie dei provini rispetto a quelli immersi in soluzione secondo formula ASTM.

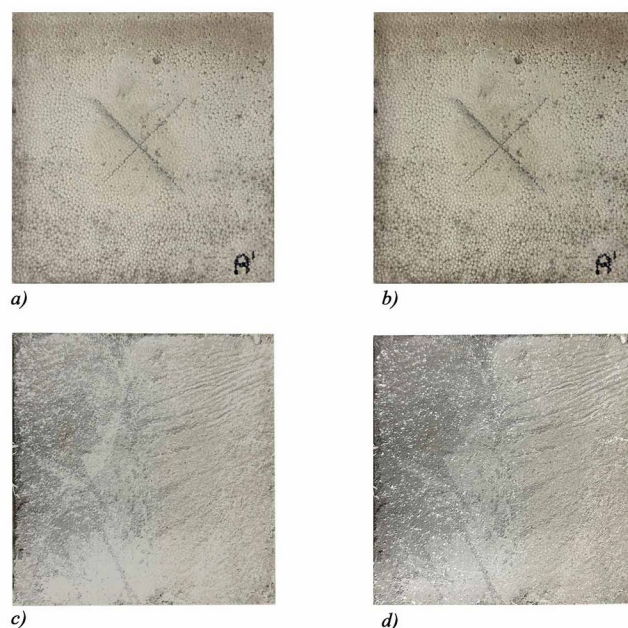


Figura Analisi e discussione dei risultati-92: a) provino prima dell'invecchiamento faccia calcestruzzo, b) provino dopo 3000 ore faccia calcestruzzo, c) provino prima dell'invecchiamento faccia composito, d) provino dopo 3000 ore faccia composito.

Nella tabella 5-29 sono riportati i valori delle prove effettuate sui provini SolL3.

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
SolL3_01_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
SolL3_01_A'	FRCM	Low (post)	1,30	0,67	F2
SolL3_01_B	FRCM	High (pre)	0,86	0,44	F3
SolL3_01_B'	FRCM	High (post)	1,43	0,73	F2
SolL3_01_cls	Concrete	-	4,60	2,34	-
SolL3_02_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
SolL3_02_A'	FRCM	Low (post)	1,43	0,73	F2
SolL3_02_B	FRCM	High (pre)	2,08	1,06	F3
SolL3_02_B'	FRCM	High (post)	2,10	1,07	F2
SolL3_02_cls	Concrete	-	3,84	1,96	-
SolL3_03_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
SolL3_03_A'	FRCM	Low (post)	0	0	F2
SolL3_03_B	FRCM	High (pre)	0	0	F3
SolL3_03_B'	FRCM	High (post)	0,66	0,34	F2
SolL3_03_cls	Concrete	-	4,72	2,40	-
SolL3_04_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
SolL3_04_A'	FRCM	Low (post)	0	0	F2
SolL3_04_B	FRCM	High (pre)	0	0	F2
SolL3_04_B'	FRCM	High (post)	0	0	F2
SolL3_04_cls	Concrete	-	5,40	2,75	-
SolL3_05_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
SolL3_05_A'	FRCM	Low (post)	1,41	0,72	F2
SolL3_05_B	FRCM	High (pre)	1,54	0,78	F3
SolL3_05_B'	FRCM	High (post)	1,22	0,62	F2
SolL3_05_cls	Concrete	-	2,83	1,44	-
SolL3_06_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F2
SolL3_06_A'	FRCM	Low (post)	1,64	0,84	F2
SolL3_06_B	FRCM	High (pre)	0	0	F3
SolL3_06_B'	FRCM	High (post)	1,34	0,68	F3
SolL3_06_cls	Concrete	-	3,43	1,74	-

Tabella Analisi e discussione dei risultati-42: Risultati SolL3.

Nella tabella 5-30 vengono riportati i valori medi di questo gruppo, inserendo anche i valori medi dei provini non trattati e l'eventuale incremento-diminuzione rispetto a questi.

ID	Side	Roughening	Strenght (MPa)	COV (%)	Bond Improvement (%)	Failure Mode
CFV	Concrete	-	1,47	29	-	-
SolL3	Concrete	-	2,11	20	+43	-
CFV	FRCM	Low	0,91	44	-	67% F3 33%F1
SolL3_pre	FRCM	Low	0	0	-100	83% F3 17% F2
SolL3_post	FRCM	Low	0,49	72	-46	100% F2
CFV	FRCM	High	1,10	22	-	84% F3 16% F1
SolL3_pre	FRCM	High	0,38	110	-65	83% F3 17% F2
SolL3_post	FRCM	High	0,49	58	-48	17% F3 83% F2

Tabella Analisi e discussione dei risultati-43: Risultati valori medi SolL3 e confronto con CFV.

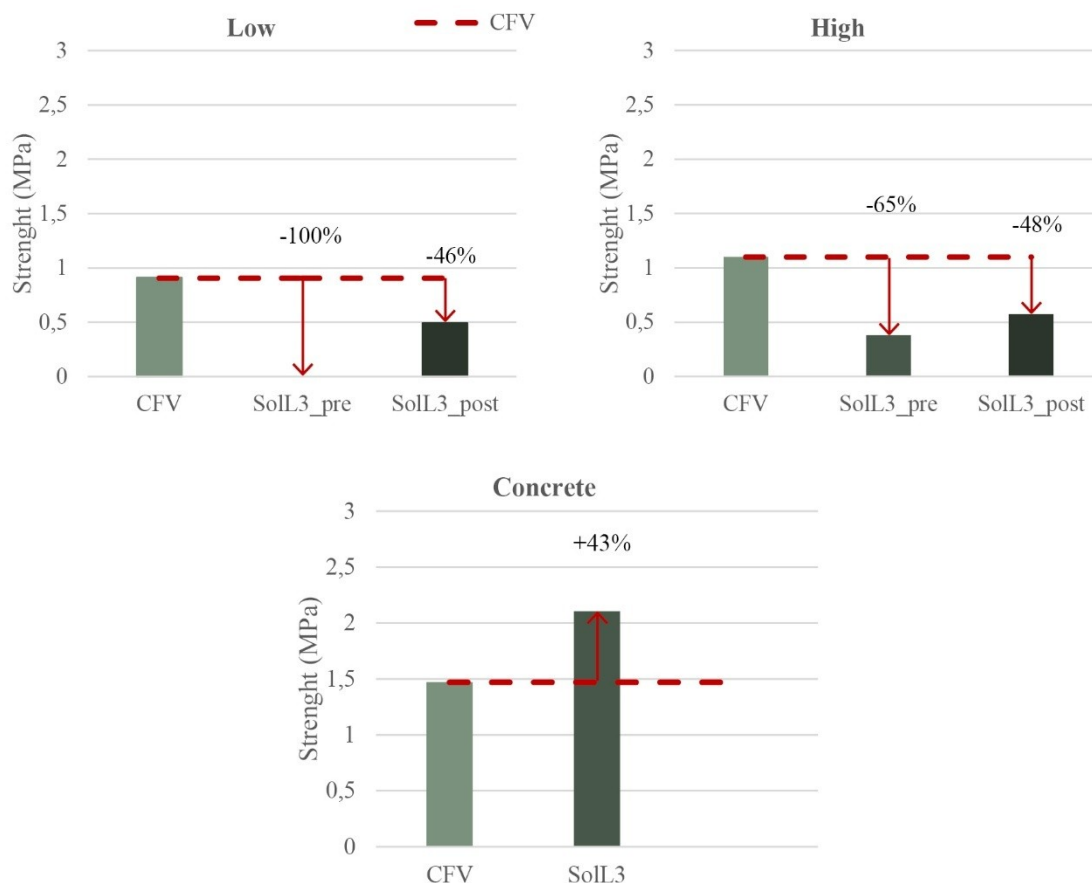


Figura Analisi e discussione dei risultati-93: Risultati resistenza provini SolL3 confrontati con quelli non condizionati (CFV).

L'immersione in soluzione ha diminuito drasticamente la resistenza allo strappo per tutte le tipologie analizzate; ad eccezione dei test effettuati sul solo substrato in calcestruzzo che presentano un incremento del +43%. L'abbassamento risulta maggiore nel caso di composito invecchiato con valori pari a -100% per le facce con minor rugosità (SolL3_Low pre) e al -65% per le facce con maggior rugosità (SolL3_High pre). Mentre nel caso di composito applicato dopo l'invecchiamento, la resistenza risulta sempre in calo ma con valori nella media inferiori; rispettivamente -46% per i SolL3_Low_post e di -48% per i SolL3_High_post). Anche qui la maggior rugosità incrementa la resistenza con valori di +100% del valore medio rilevato tra la faccia denominata Low_pre e quella denominata High_pre; e del +16% tra i Low_post ed i High_post. I test effettuati su substrato in calcestruzzo continuano a mostrare incrementi, a significare che l'immersione prolungata in soluzioni saline aumenta la resistenza allo strappo, in questo caso abbiamo un aumento del +43% rispetto ai provini non trattati.

Il metodo di rottura prevalente, è sempre l’F3, cioè il distacco dell’interfaccia fibra-malta, nel caso di composito applicato prima dell’invecchiamento. Nel caso di composito applicato dopo l’invecchiamento si ha una rottura prevalente per distacco composito-substrato (F2), ciò indica che il substrato in calcestruzzo, nonostante la superficie resa più ruvida, presenta una minor aderenza con la matrice dovuta all’invecchiamento subito che ne ha alterato la composizione a livello superficiale, impedendo una corretta aderenza con il composito. In fig.5-64 vengono mostrati alcuni esempi delle tipiche rotture avvenuti per questa serie di provini. In figura 5-65, sono mostrate, graficizzate, le percentuali di modalità di rottura per una miglior comprensione del dato.

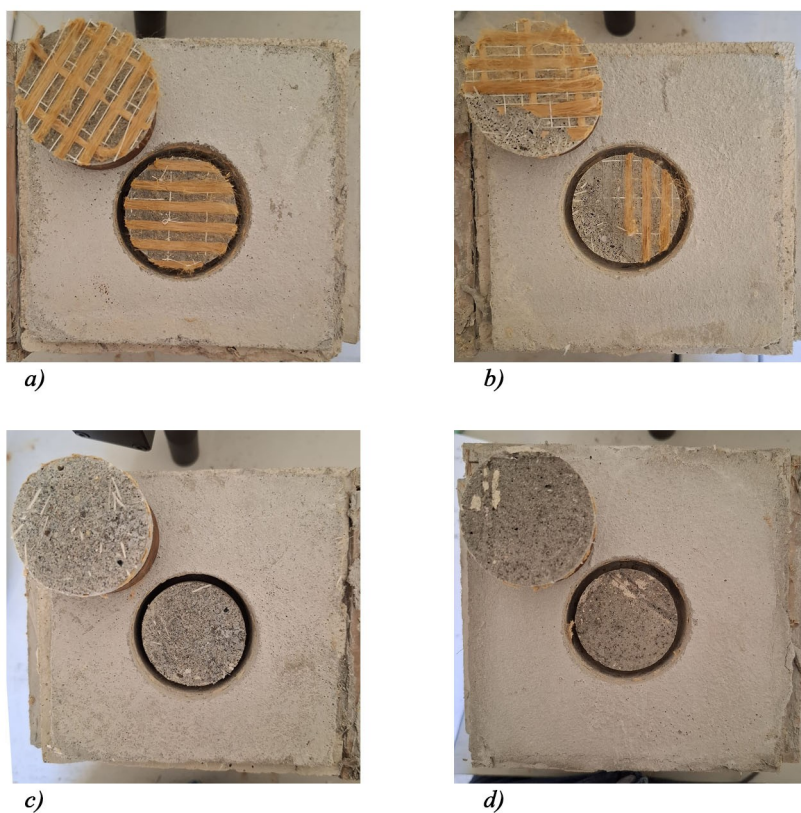


Figura Analisi e discussione dei risultati-94: Tipi di rotture: a) SolL3_02_B; b) SolL3_01_B; c) SolL3_06_A; d) SolL3_04_B’.

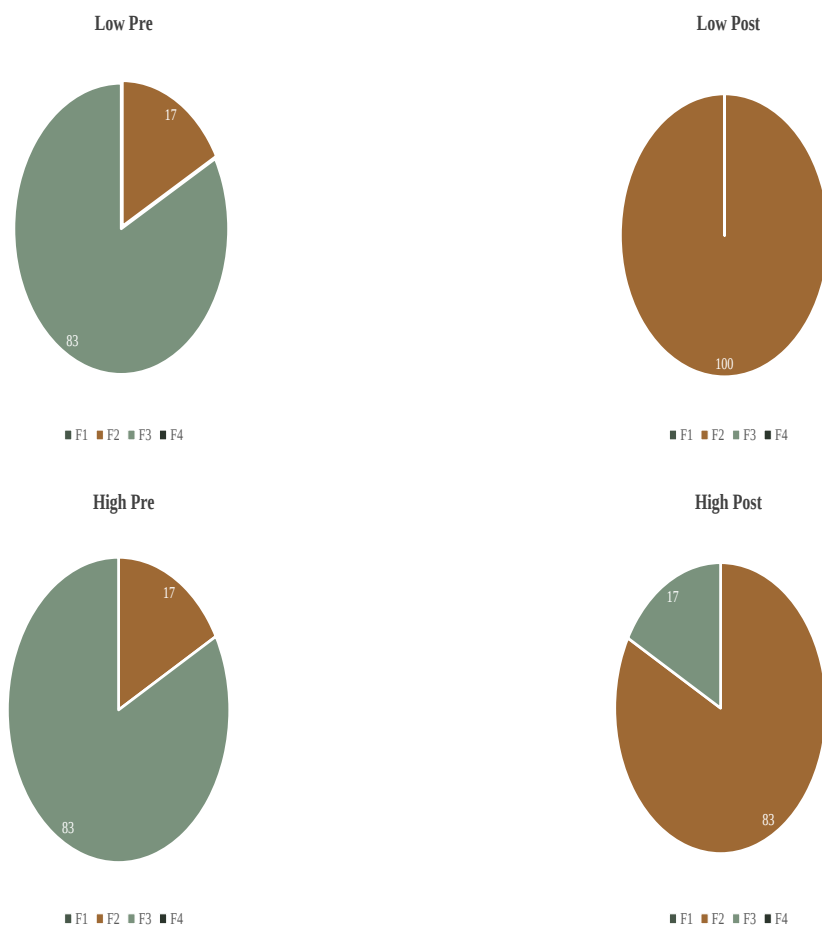


Figura Analisi e discussione dei risultati-95: Tipi di rotture: Low (faccia con livello di rugosità basso) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), High (faccia con livello di rugosità alto) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), provini SolL3.

5.5.6 Confronto risultati SolL1 e SolL3

Di seguito vengono confrontati i risultati dei gruppi di cubetti analizzati nei paragrafi precedenti, per mostrare le differenze di comportamento all'aumentare del tempo di immersione, da 1000 a 3000 ore. In figura 5-66 vengono riportati i grafici con i valori in termini di resistenza allo strappo delle varie tipologie mettendo a confronto anche il valore dei provini non invecchiati.

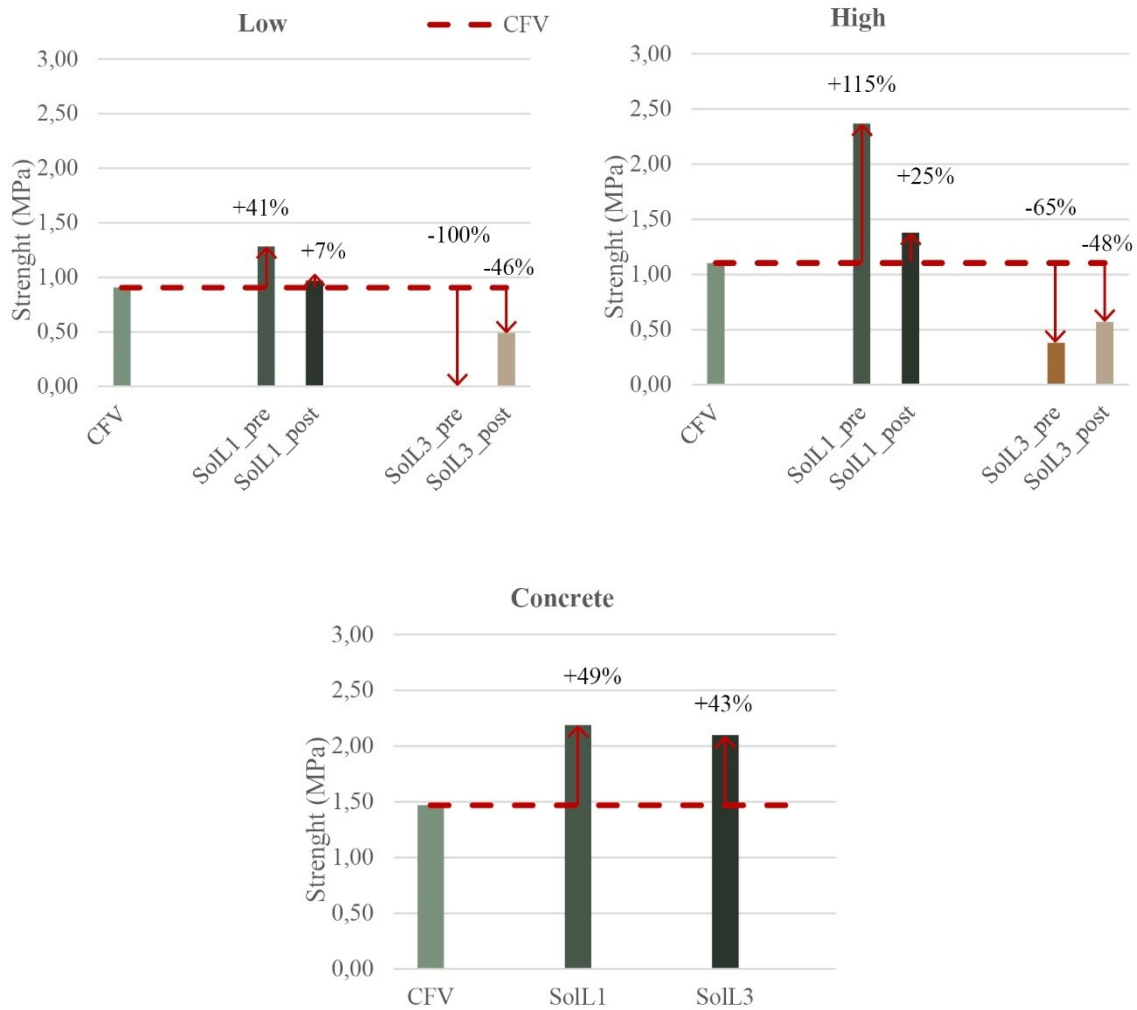


Figura Analisi e discussione dei risultati-96: Risultati confronto resistenza provini SolL1, SolL3 e CFV.

Per i provini immersi per 1000 ore si registra un incremento in tutte e quattro le tipologie analizzate, mentre per quelli immersi 3000 ore si ha un drastico calo della resistenza, ad indicare che questa tipologia di soluzione salina risulta essere molto più aggressiva di quella analizzata in precedenza e che all'aumentare del tempo di immersione si registra un drastico calo della resistenza. Il fatto che l'immersione per 1000 ore mostri un incremento può essere dovuto al fatto che l'acqua e soprattutto i Sali presenti, abbiano diminuito il livello di porosità di entrambi i materiali incrementandone la resistenza e l'adesione; ma prolungando il tempo di immersione i Sali iniziano a saturare la malta e a danneggiare i materiali, indebolendone il legame; ciò è avvalorato anche dai differenti tipi di rottura, infatti si ha un netto incremento, soprattutto per i provini immersi 3000 ore, del distacco composito-substrato (F2).

5.5.7 Risultati SolS1

Di seguito sono riportati i risultati dei provini soggetti ad immersione per 1000 ore in soluzione composta da acqua deionizzata, cloruro di sodio all'8% (NaCl) e sodio solfato decaidrato al 4% (Na₂SO₄), denominati SolS1. Il gruppo è composto da sei provini con composito applicato, su due facce laterali, prima dell'invecchiamento e su altre due facce laterali dopo l'invecchiamento. Anche in questo caso il composito è stato applicato su substrato con due livelli di scabrosità, Low bassa ed High alta. Alle due tipologie è stato applicato l'epiteto pre o post a seconda che il composito sia stato applicato prima (pre) o dopo (post) l'invecchiamento accelerato. I test su solo substrato sono stati effettuati sulla faccia inferiore di ogni provino.

La figura 5-67 mostra le trasformazioni, a livello visivo, avvenute con questo tipo di invecchiamento sia sul substrato che sul composito. Sono visibili efflorescenze sul composito, mentre nel calcestruzzo è presente in minor quantità. In quest'ultimo sono presenti anche patina ed un lieve incremento della porosità. In generale questa soluzione ha danneggiato meno la superficie dei provini rispetto ai provini immersi in soluzione secondo formula ASTM.

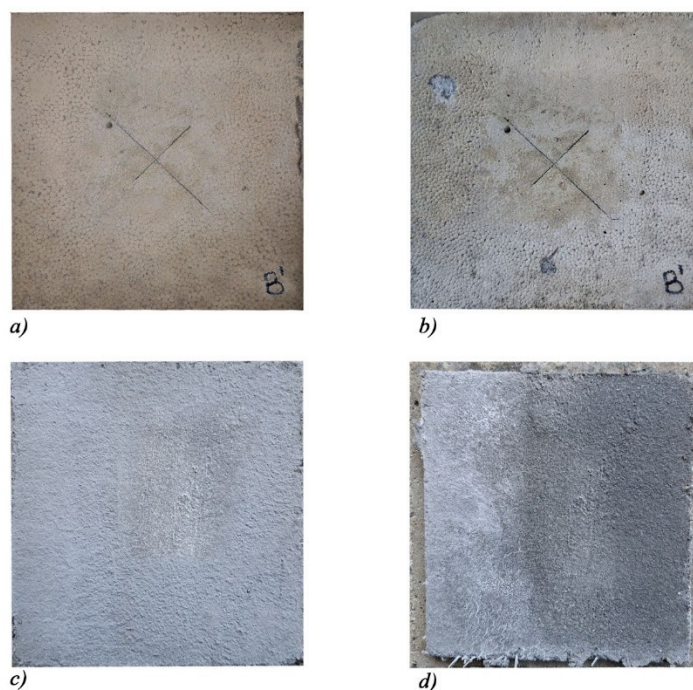


Figura Analisi e discussione dei risultati-97: a) provino prima dell'invecchiamento faccia calcestruzzo, b) provino dopo 1000 ore faccia calcestruzzo, c) provino prima dell'invecchiamento faccia composito, d) provino dopo 1000 ore faccia composito.

Nella tabella 5-31 sono riportati i valori delle prove effettuate sui provini SolS1.

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
SolS1_01_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
SolS1_01_A'	FRCM	Low (post)	1,20	0,61	F2
SolS1_01_B	FRCM	High (pre)	0,78	0,40	F3
SolS1_01_B'	FRCM	High (post)	0,96	0,49	F2
SolS1_01_cls	Concrete	-	2,66	1,36	-
SolS1_02_A	FRCM	Low (pre)	0,27	0,14	F3
SolS1_02_A'	FRCM	Low (post)	1,89	0,96	F2
SolS1_02_B	FRCM	High (pre)	1,93	0,98	F3
SolS1_02_B'	FRCM	High (post)	0,43	0,22	F2
SolS1_02_cls	Concrete	-	2,23	1,14	-
SolS1_03_A	FRCM	Low (pre)	2,31	1,17	F3
SolS1_03_A'	FRCM	Low (post)	1,37	0,70	F2
SolS1_03_B	FRCM	High (pre)	0,28	0,14	F3
SolS1_03_B'	FRCM	High (post)	0,77	0,39	F2
SolS1_03_cls	Concrete	-	2,64	1,35	-
SolS1_04_A	FRCM	Low (pre)	2,19	1,12	F3
SolS1_04_A'	FRCM	Low (post)	1,79	0,89	F3
SolS1_04_B	FRCM	High (pre)	2,61	1,33	F1
SolS1_04_B'	FRCM	High (post)	0	0	F2
SolS1_04_cls	Concrete	-	2,64	1,35	-
SolS1_05_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
SolS1_05_A'	FRCM	Low (post)	2,63	1,34	F3
SolS1_05_B	FRCM	High (pre)	3,18	1,62	F3
SolS1_05_B'	FRCM	High (post)	0,90	0,46	F2
SolS1_05_cls	Concrete	-	3,88	1,98	-

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
SolS1_06_A	FRCM	Low (pre)	1,05	0,53	F3
SolS1_06_A'	FRCM	Low (post)	0,46	0,24	F2
SolS1_06_B	FRCM	High (pre)	0,62	0,32	F3
SolS1_06_B'	FRCM	High (post)	0	0	F2
SolS1_06_cls	Concrete	-	2,19	1,12	-

Tabella Analisi e discussione dei risultati-44: Risultati SolS1.

Nella tabella 5-32 vengono riportati i valori medi di questo gruppo, inserendo anche i valori medi dei provini non trattati e l'eventuale incremento-diminuzione rispetto a questi.

ID	Side	Roughening	Strenght (MPa)	COV (%)	Bond Improvement (%)	Failure Mode
CFV	Concrete	-	1,47	29	-	-
SolS1	Concrete	-	1,24	33	-16	-
CFV	FRCM	Low	0,91	44	-	67% F3 33%F1
SolS1_pre	FRCM	Low	0,49	100	-46	100% F3
SolS1_post	FRCM	Low	0,79	42	-13	83% F3 17% F2
CFV	FRCM	High	1,10	22	-	84% F3 16% F1
SolS1_pre	FRCM	High	0,80	69	-27	33% F3 67% F2
SolS1_post	FRCM	High	0,26	78	-76	100% F2

Tabella Analisi e discussione dei risultati-45: Risultati valori medi SolS1 e confronto con CFV.

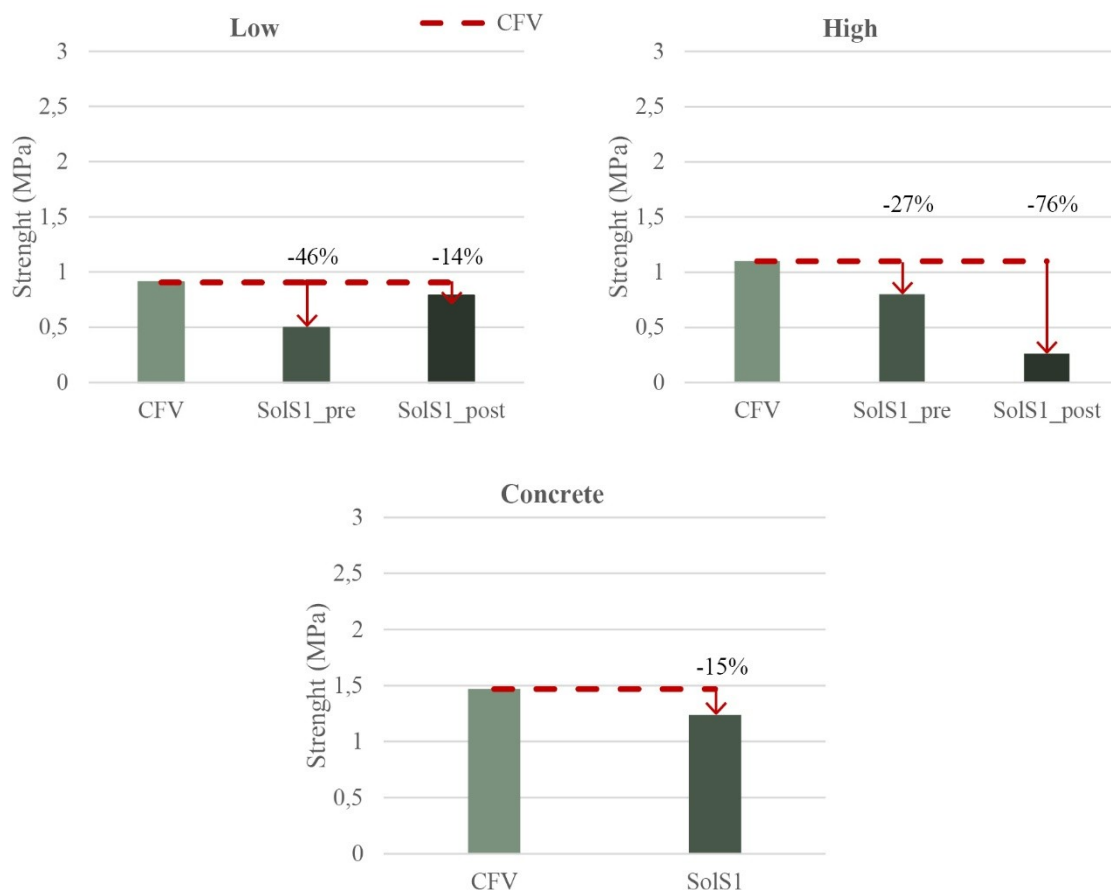


Figura Analisi e discussione dei risultati-98: Risultati resistenza provini SolS1 confrontati con quelli non condizionati (CFV).

L'immersione in soluzione in questo caso diminuisce la resistenza allo strappo per tutte le tipologie analizzate; la maggior concentrazione di Sali, rispetto ai casi precedentemente analizzati, danneggia già dopo 1000 ore sia il composito che il calcestruzzo; annullando l'effetto benefico di riempimento dei pori riscontrato per i casi precedenti. Infatti, anche il substrato in calcestruzzo presenta un calo della resistenza allo strappo del -15%. La maggior diminuzione si ha nel caso di composito non invecchiato con valori pari al -76% per le facce con maggior rugosità (SolS1_High post). In questo caso la maggior rugosità superficiale non ha migliorato la resistenza; i provini con composito non invecchiato mostrano un calo del -67% della resistenza tra faccia High e faccia Low, mentre nel caso di composito invecchiato si ha un incremento del 63%.

Per le facce con composito invecchiato, il metodo di rottura prevalente, è sempre l'F3, cioè il distacco dell'interfaccia fibra-malta. Nel caso di composito applicato dopo l'invecchiamento si ha una rottura prevalente per distacco composito-substrato (F2), ciò indica, anche in questo

caso, che il substrato in calcestruzzo, nonostante la superficie resa più ruvida, presenta una minor aderenza con la matrice dovuta all'invecchiamento subito che ne ha alterato la composizione a livello superficiale. In fig.5-69 vengono mostrati alcuni esempi delle tipiche rotture avvenuti per questa serie di provini. In figura 5-70, sono mostrate, graficizzate, le percentuali di modalità di rottura per una miglior comprensione del dato.

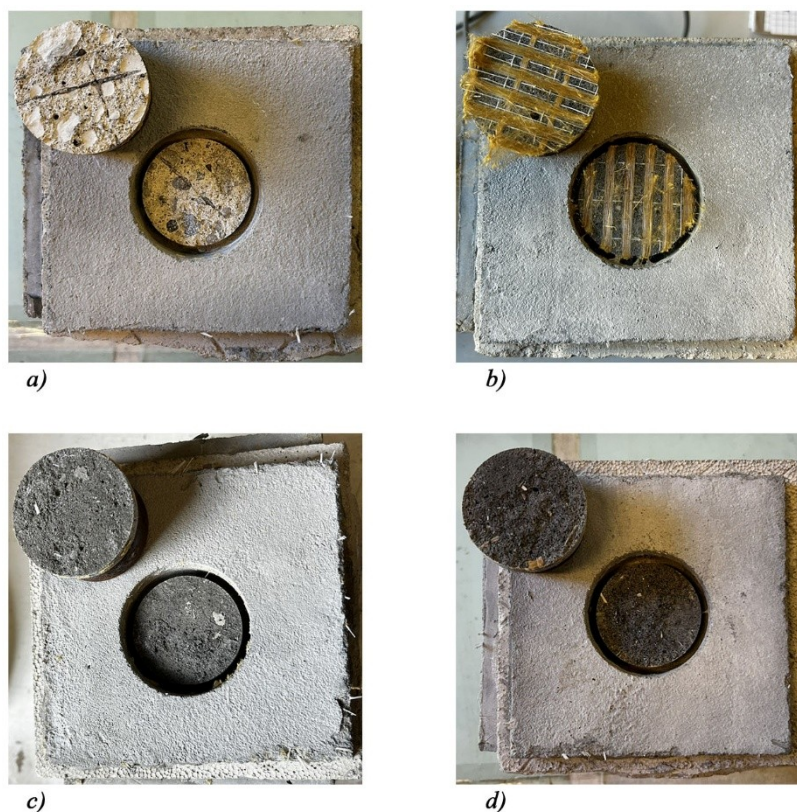


Figura Analisi e discussione dei risultati-99: Tipi di rotture: a) SolS1_04_B; b) SolS1_02_A; c) SolS1_06_A'; d) SolS1_03_B'.

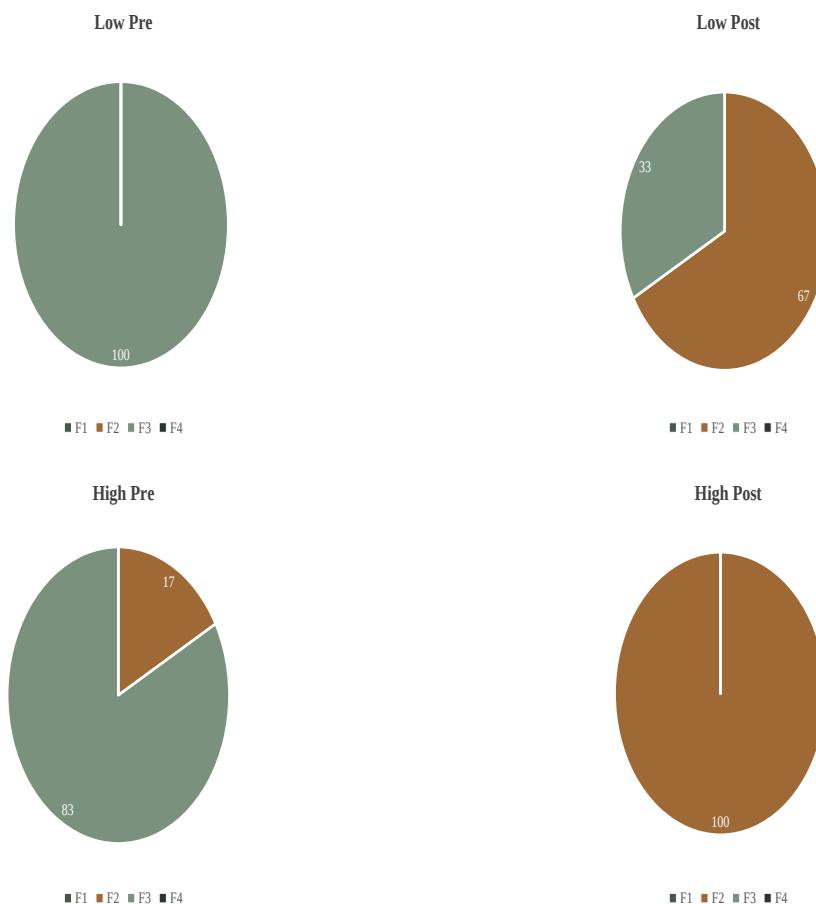


Figura Analisi e discussione dei risultati- 100: Tipi di rotture: Low (faccia con livello di rugosità basso) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), High (faccia con livello di rugosità alto) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), provini SolS1.

5.5.8 Risultati SolS3

Di seguito sono riportati i risultati dei provini soggetti ad immersione per 3000 ore in soluzione composta da acqua deionizzata, cloruro di sodio all'8% (NaCl) e sodio solfato decaidrato al 4% (Na₂SO₄), denominati SolS3. Il gruppo è composto da sei provini con composito applicato, su due facce laterali, prima dell'invecchiamento e su altre due facce laterali dopo l'invecchiamento. Anche in questo caso il composito è stato applicato su substrato con due livelli di scabrosità, Low bassa ed High alta. Alle due tipologie è stato applicato l'epiteto pre o post a seconda che il composito sia stato applicato prima (pre) o dopo (post) l'invecchiamento accelerato. I test su solo substrato sono stati effettuati sulla faccia inferiore di ogni provino.

La figura 5-71 mostra le trasformazioni, a livello visivo, avvenute con questo tipo di invecchiamento sia sul substrato che sul composito. Sono visibili efflorescenze sul composito, mentre nel calcestruzzo è presente in minor quantità. In quest'ultimo sono presenti anche patina ed un incremento della porosità. In generale questa soluzione ha danneggiato meno la superficie dei provini rispetto ai provini immersi in soluzione secondo formula ASTM.

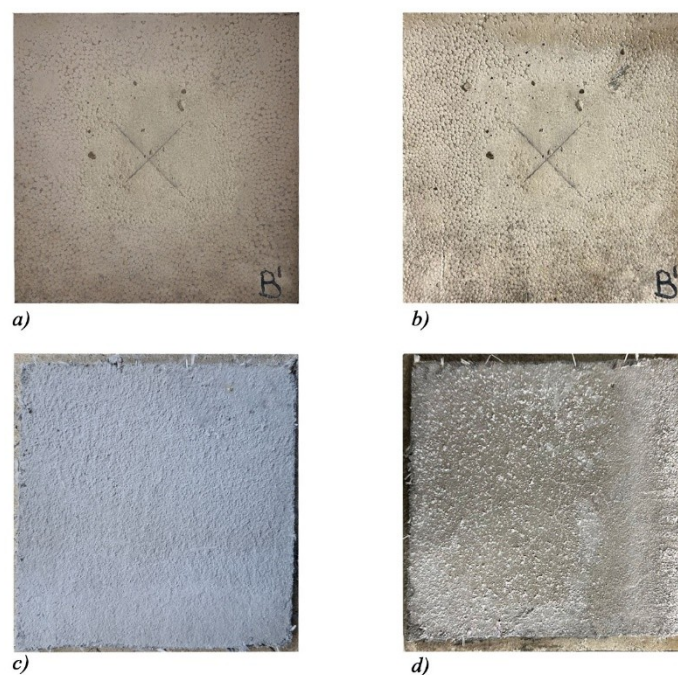


Figura Analisi e discussione dei risultati-101: a) provino prima dell'invecchiamento faccia calcestruzzo, b) provino dopo 1000 ore faccia calcestruzzo, c) provino prima dell'invecchiamento faccia composito, d) provino dopo 1000 ore faccia composito.

Nella tabella 5-33 sono riportati i valori delle prove effettuate sui provini SolS3.

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
SolS3_01_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
SolS3_01_A'	FRCM	Low (post)	0	0	F2
SolS3_01_B	FRCM	High (pre)	0	0	F3
SolS3_01_B'	FRCM	High (post)	0,45	0,23	F2
SolS3_01_cls	Concrete	-	5,28	2,69	-

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
SolS3_02_A	FRCM	Low (pre)	0	0	*
SolS3_02_A'	FRCM	Low (post)	0	0	F2
SolS3_02_B	FRCM	High (pre)	0	0	F2
SolS3_02_B'	FRCM	High (post)	0,93	0,47	F2
SolS3_02_cls	Concrete	-	3,82	1,95	-
SolS3_03_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
SolS3_03_A'	FRCM	Low (post)	0	0	F2
SolS3_03_B	FRCM	High (pre)	0	0	F2
SolS3_03_B'	FRCM	High (post)	0,91	0,46	F2
SolS3_03_cls	Concrete	-	3,01	1,53	-
SolS3_04_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
SolS3_04_A'	FRCM	Low (post)	0	0	F2
SolS3_04_B	FRCM	High (pre)	0	0	F2
SolS3_04_B'	FRCM	High (post)	0	0	F2
SolS3_04_cls	Concrete	-	3,17	1,62	-
SolS3_05_A	FRCM	Low (pre)	0	0	*
SolS3_05_A'	FRCM	Low (post)	0	0	F2
SolS3_05_B	FRCM	High (pre)	0	0	F3
SolS3_05_B'	FRCM	High (post)	0,35	0,18	F2
SolS3_05_cls	Concrete	-	3,82	1,95	-
SolS3_06_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
SolS3_06_A'	FRCM	Low (post)	0,33	0,17	F2
SolS3_06_B	FRCM	High (pre)	0	0	F2
SolS3_06_B'	FRCM	High (post)	0	0	F2
SolS3_06_cls	Concrete	-	3,98	2,03	-

*distacco anomalo del primo strato di malta.

Tabella Analisi e discussione dei risultati-46: Risultati SolS3.

Nella tabella 5-34 vengono riportati i valori medi di questo gruppo, inserendo anche i valori medi dei provini non trattati e l'eventuale incremento-diminuzione rispetto a questi.

ID	Side	Roughening	Strenght (MPa)	COV (%)	Bond Improvement (%)	Failure Mode
CFV	Concrete	-	1,47	29	-	-
SolS3	Concrete	-	1,96	19	+33	-
CFV	FRCM	Low	0,91	44	-	67% F3 33%F1
SolS3_pre	FRCM	Low	0	0	-100	67% F3 33% F2
SolS3_post	FRCM	Low	0,03	231	-97	100% F2
CFV	FRCM	High	1,10	22	-	84% F3 16% F1
SolS3_pre	FRCM	High	0	0	-100	33% F3 67% F2
SolS3_post	FRCM	High	0,22	86	-80	100% F2

Tabella Analisi e discussione dei risultati-47: Risultati valori medi SolS3 e confronto con CFV.

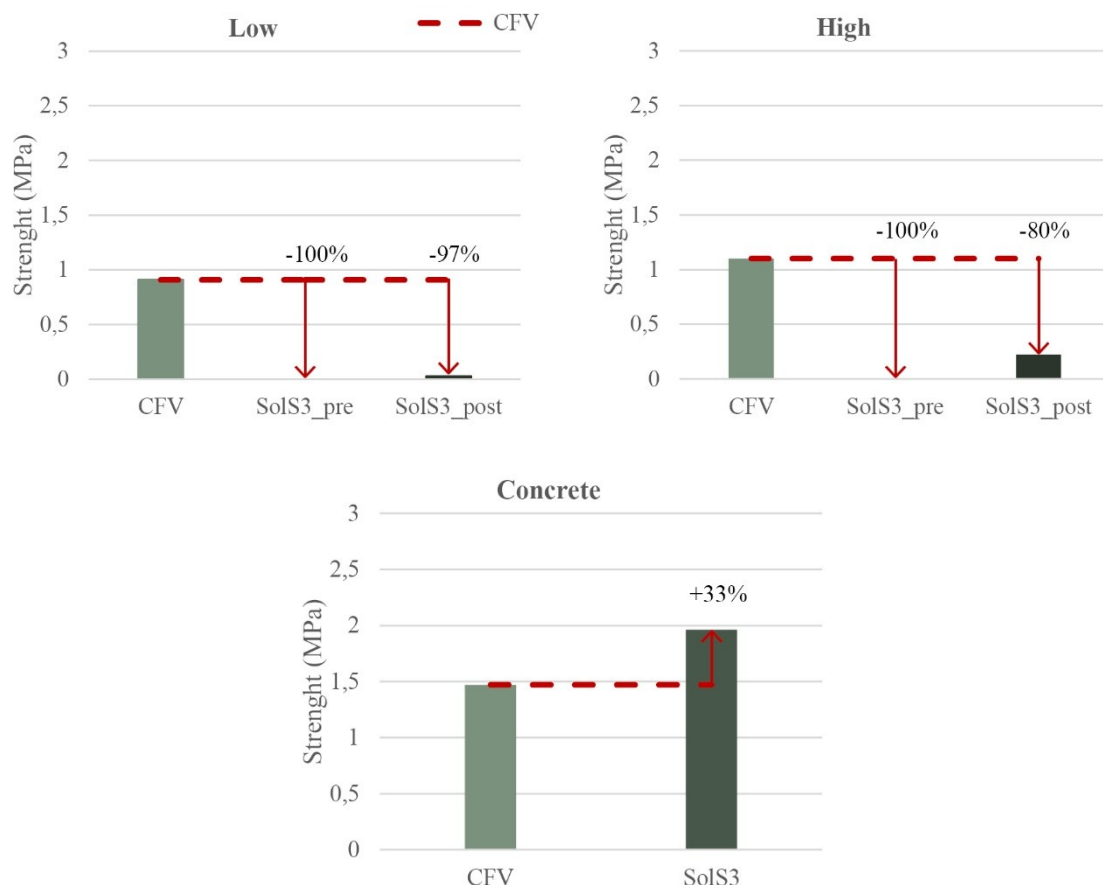


Figura Analisi e discussione dei risultati-102: Risultati resistenza provini SolS3 confrontati con quelli non condizionati (CFV).

L'immersione in soluzione diminuisce drasticamente la resistenza allo strappo per tutte le tipologie analizzate ad eccezione dei test su solo substrato in cui si attesta un incremento del +33%. La maggior diminuzione si ha nel caso di composito invecchiato con valori pari al -100% per entrambe le tipologie (alta e bassa rugosità del substrato). Nel caso di composito non invecchiato, la diminuzione è molto simile con -97% per le facce Low post e -80% per High post. In questo caso la maggior rugosità superficiale non ha migliorato la resistenza per nessuna delle due tipologie, dato il drastico calo della resistenza per tutti i casi analizzati. La forte concentrazione di Sali e il tempo prolungato di immersione danneggiano completamente sia il legame tra composito e substrato che la sola matrice quando invecchiata.

Per le facce con composito invecchiato e livello basso di rugosità il metodo di rottura prevalente, è sempre l'F3, cioè il distacco dell'interfaccia fibra-malta. Per composito invecchiato e livello alto di rugosità e, nel caso di composito applicato dopo l'invecchiamento si ha una rottura prevalente per distacco composito-substrato (F2), anche in questo caso, il

substrato in calcestruzzo, nonostante la superficie resa più ruvida, presenta una minor aderenza con la matrice dovuta all'invecchiamento subito che ne ha alterato la composizione a livello superficiale. Per i test effettuati su SolS3_02_A e SolS3_05_A si è manifestato un tipo di rottura anomalo; con distacco del solo primo strato di malta, ad indicare il forte deterioramento della matrice. In fig.5-73 vengono mostrati alcuni esempi delle tipiche rotture avvenuti per questa serie di provini e dei due distacchi anomali. In figura 5-74, sono mostrate, graficizzate, le percentuali di modalità di rottura per una miglior comprensione del dato.

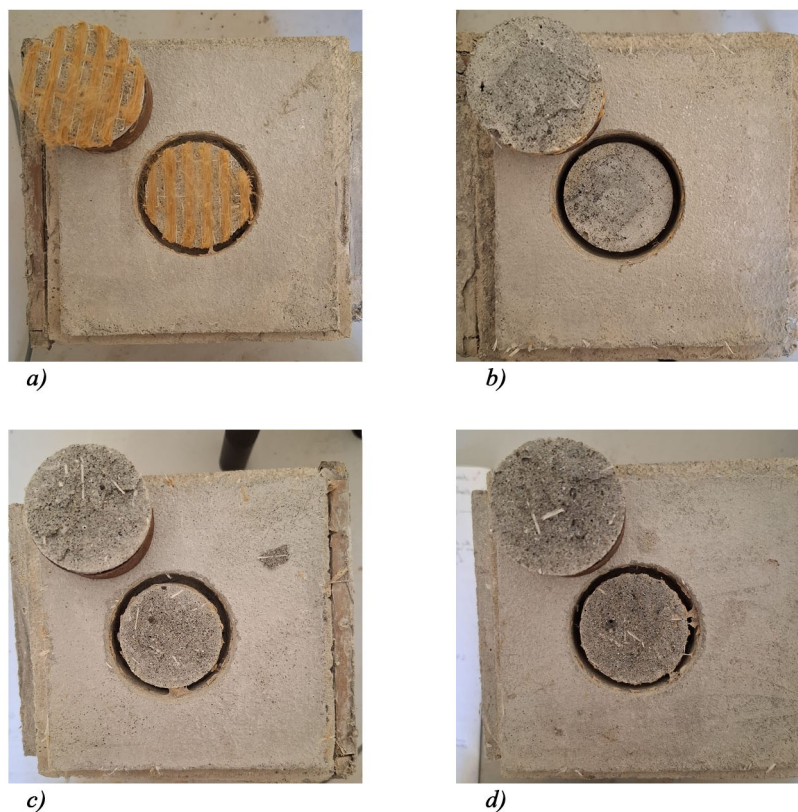


Figura Analisi e discussione dei risultati-103: Tipi di rotture: a) SolS3_01_B; b) SolS3_04_B; c) SolS3_02_A; d) SolS3_05_A.



*distacco anomalo del primo strato di malta.

Figura Analisi e discussione dei risultati- 104: Tipi di rotture: Low (faccia con livello di rugosità basso) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), High (faccia con livello di rugosità alto) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), provini SolS3.

5.5.9 Confronto risultati SolS1 e SolS3

Di seguito vengono confrontati i risultati dei gruppi di cubetti analizzati nei paragrafi precedenti, per mostrare le differenze di comportamento all'aumentare del tempo di immersione, da 1000 a 3000 ore. In figura 5-75 vengono riportati i grafici con i valori in termini di resistenza delle varie tipologie di invecchiamento con messo a confronto anche il valore per i provini non invecchiati.

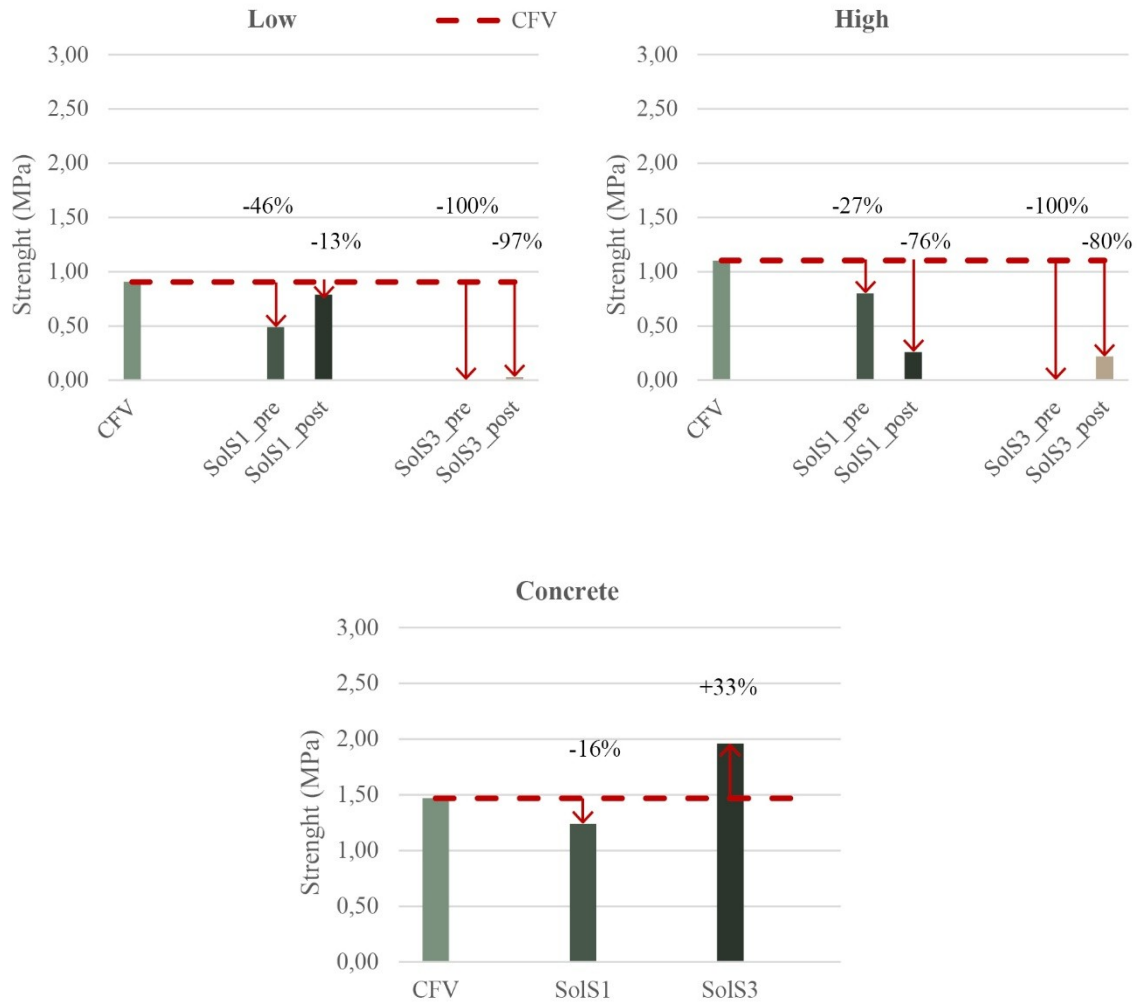
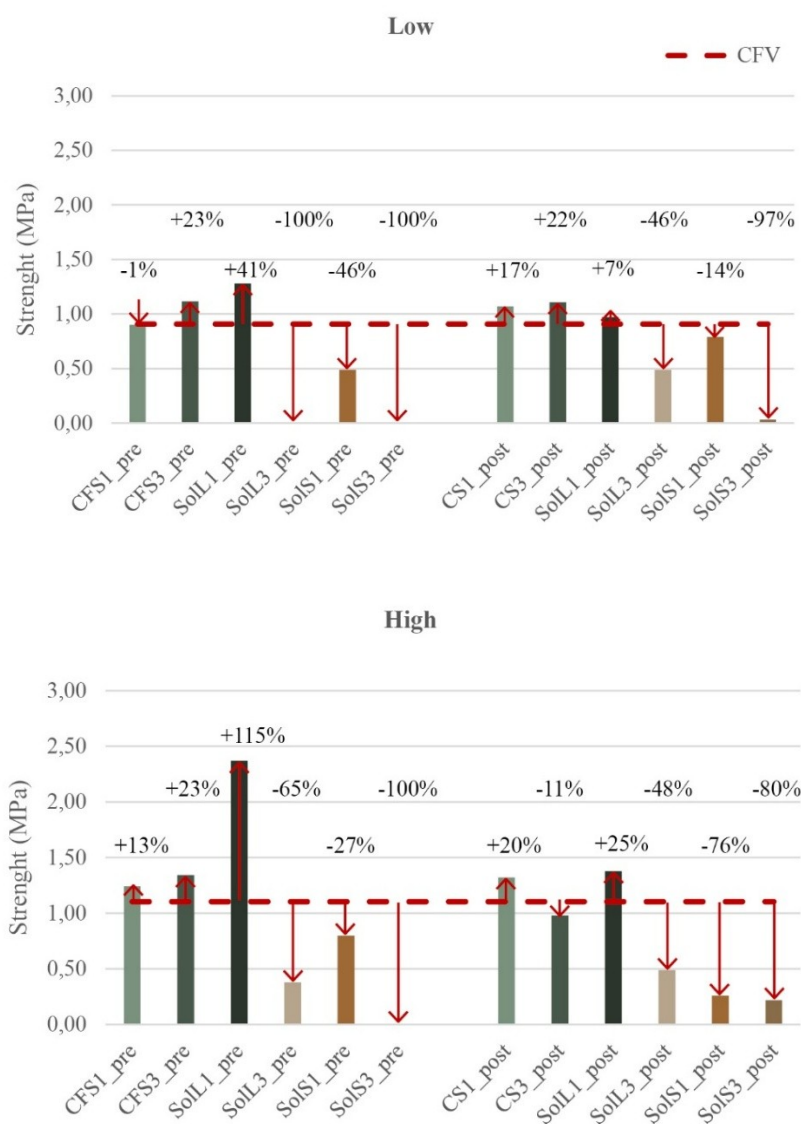


Figura Analisi e discussione dei risultati-105: Risultati confronto resistenza provini SolL1, SolL3 e CFV.

Dai grafici sopra riportati si deduce che, questa soluzione con alta concentrazione di Sali risulta essere molto aggressiva. Già dopo 1000 ore si ha un discreto calo della resistenza allo strappo per tutte le tipologie di facce con FRCM applicato, all'aumentare del tempo di immersione la resistenza si azzerava completamente sempre per tutte le tipologie analizzate. Ciò indica che la soluzione ha irrimediabilmente compromesso il legame composito-substrato e, nel caso di FRCM invecchiato riduce a zero anche le proprietà meccaniche della matrice. I tipi di rottura sono in maggioranza di tipo F2, distacco composito-substrato, per quasi tutte le tipologie ciò avvalorava il fatto che l'immersione altera irrimediabilmente il legame tra composito e substrato.

5.5.10 Confronto tra i risultati delle varie tipologie di invecchiamento (ambiente salino)

In questa sezione vengono riportati i risultati ottenuti dalle tre tipologie di invecchiamento accelerato riferite all'ambiente salino, riportati in dettaglio nelle sezioni precedenti. In fig. 5-76 vengono confrontati i valori di: i) resistenza allo strappo su facce con bassa rugosità (Low); ii) resistenza allo strappo su facce con alta rugosità (High); iii) di resistenza allo strappo di facce di solo substrato (Concrete). La linea tratteggiata in rosso, presente nei vari grafici, rappresenta il valore medio dei provini che non trattati (CFV).



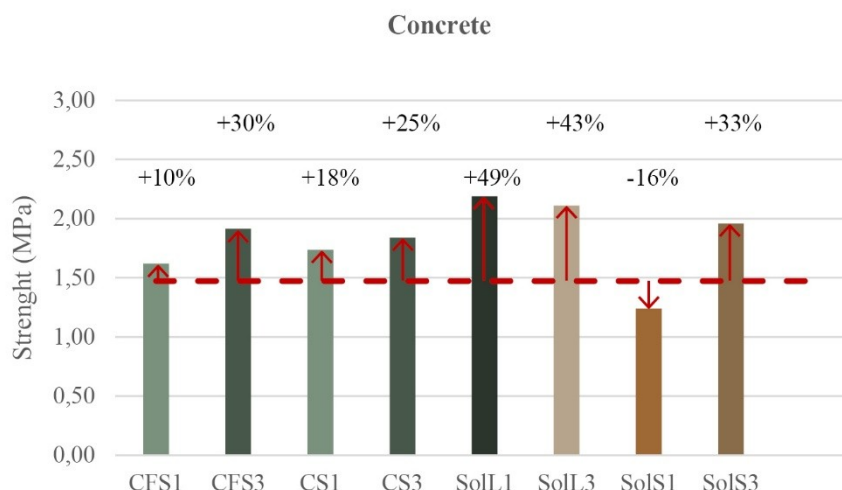


Figura Analisi e discussione dei risultati- 106: Proprietà Meccaniche dei differenti tipi di invecchiamento (ambiente salino).

L'analisi comparativa dei risultati ottenuti per le tre diverse tipologie di invecchiamento in ambiente salino consente di individuare differenze significative nel comportamento dei sistemi FRCM, sia in termini di resistenza allo strappo sia di durabilità del legame composito-substrato. I valori medi riportati nei grafici mostrano nella maggior parte dei casi, in cui è presente il composito, una riduzione della capacità di adesione rispetto ai campioni di riferimento (CFV), ma con intensità e modalità differenti in funzione del tipo di esposizione e delle condizioni superficiali. Nel caso dell'immersione in soluzione salina ASTM, si osserva un comportamento abbastanza omogeneo per tutte le tipologie con valori tra -11% a +23%. Mentre nel caso di soluzioni con cloruro di sodio (NaCl) e sodio solfato decaidrato (Na₂SO₄), in differenti percentuali mostrano una diminuzione della resistenza fino al 100% per tutti i casi analizzati. Tale comportamento è imputabile alla penetrazione prolungata degli ioni cloruro all'interno della matrice, che provoca la dissoluzione parziale dei leganti e l'indebolimento progressivo del contatto fibra-malta. Nei campioni su substrato in calcestruzzo (Concrete), si ha, in prevalenza, un aumento della resistenza, fino al 49% nel caso di SolL1, segno che il degrado è concentrato nel sistema di rinforzo, mentre il supporto migliora la sua integrità strutturale. Nella maggior parte dei casi, ad eccezione di SolL1, la presenza di rugosità elevata si conferma determinante nel limitare la propagazione dei distacchi, grazie a un ancoraggio meccanico più efficace che compensa parzialmente il deterioramento chimico.

5.6 Risultati cicli Caldo-Umido

5.6.1 Risultati T e T70

In questo paragrafo sono mostrati i risultati dei provini soggetti a cicli di caldo umido, con essiccazione in forno a 70°C per 18 ore e successiva immersione in acqua normale per 6 ore. I cubetti di questa categoria sono 30 divisi in due gruppi da 15, suddivisi poi in altri 5 gruppi da 3 provini ciascuno, in cui viene variato il numero di cicli da 10 fino a 50. Questi due gruppi sono denominati T e T70, seguiti dal numero dei cicli e dal numero di provino. La differenza consiste nel fatto che, per i provini denominati T, la matrice è stata applicata prima dell'invecchiamento, su due facce laterali con differente scabrosità; mentre per i T70 la matrice è stata applicata dopo l'invecchiamento.

La figura 5-77 mostra, a livello visivo, i cambiamenti avvenuti sulle facce con composito e senza, per ogni numero di cicli analizzati. Come si può notare, non sono riscontrabili significative trasformazioni, per nessuna delle due facce, si notano solo alcune fessurazioni nel composito a partire dai 20 cicli (fig. 5-78), ma di piccola entità. Non sono state inserite immagini delle facce con composito dei provini T70, poiché questo è stato applicato dopo l'invecchiamento e non presenta, pertanto, segni di degrado.

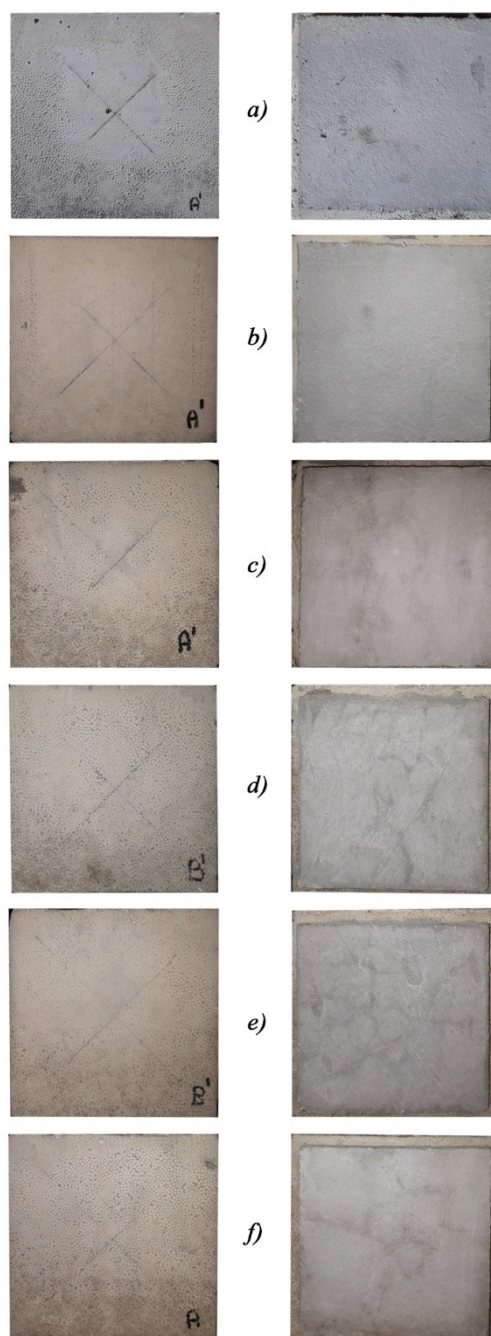


Figura Analisi e discussione dei risultati-107: a) provino prima dell'invecchiamento b) provino dopo 10 cicli, c) provino dopo 20 cicli, d) provino dopo 30 cicli, e) provino dopo 40 cicli, f) provino dopo 50 cicli.

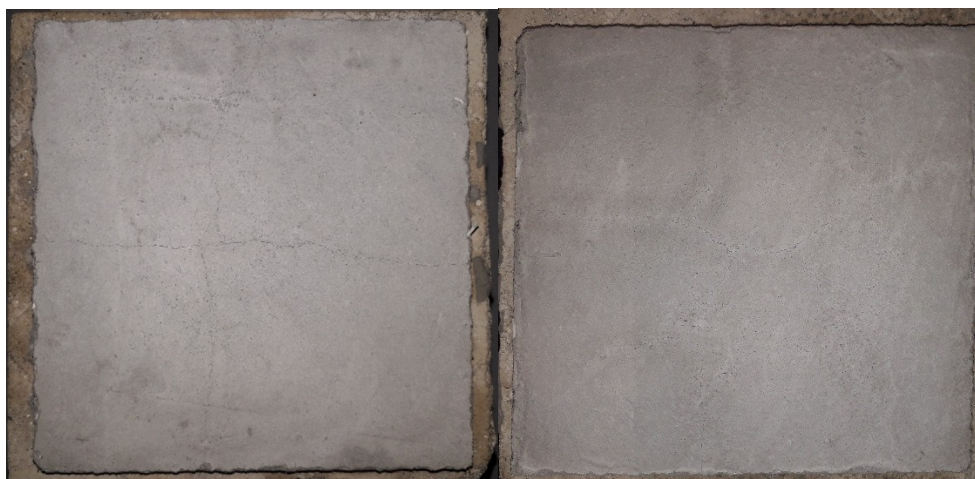


Figura Analisi e discussione dei risultati-108: *Dettaglio fessurazione T20_03 e T30_03.*

Nella tabella 5-35 sono riportati i valori delle prove effettuate sui provini T.

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
T10_01_A	FRCM	Low	1,91	0,97	F2
T10_01_A'	Concrete	-	1,62	0,82	-
T10_01_B	FRCM	High	1,59	0,81	F4
T10_01_B'	Concrete	-	2,04	1,04	-
T10_02_A	FRCM	Low	2,48	1,26	F1
T10_02_A'	Concrete	-	1,29	0,66	
T10_02_B	FRCM	High	1,91	0,97	F3
T10_02_B'	Concrete	-	2,04	1,04	-
T10_03_A	FRCM	Low	2,71	1,38	F3
T10_03_A'	Concrete	-	2,67	1,36	-
T10_03_B	FRCM	High	3,10	1,58	F3
T10_03_B'	Concrete	-	3,66	1,86	-
T20_01_A	FRCM	Low	1,82	0,93	F3
T20_01_A'	Concrete	-	1,50	0,76	-
T20_01_B	FRCM	High	1,47	0,75	F3

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
T20_01_B'	Concrete	-	2,25	1,14	-
T20_02_A	FRCM	Low	2,20	1,12	F3
T20_02_A'	Concrete	-	2,51	1,28	-
T20_02_B	FRCM	High	1,96	1,00	F3
T20_02_B'	Concrete	-	3,03	1,54	-
T20_03_A	FRCM	Low	1,53	0,78	F3
T20_03_A'	Concrete	-	2,95	1,50	-
T20_03_B	FRCM	High	0,39	0,2	F3
T20_03_B'	Concrete	-	2,20	1,12	-
T30_01_A	FRCM	Low	2,03	1,04	F3
T30_01_A'	Concrete	-	2,39	1,22	-
T30_01_B	FRCM	High	1,53	0,78	F3
T30_01_B'	Concrete	-	1,61	0,82	-
T30_02_A	FRCM	High	2,15	1,10	F3
T30_02_A'	Concrete	-	2,23	1,14	-
T30_02_B	FRCM	Low	1,56	0,79	F3
T30_02_B'	Concrete	-	2,19	1,11	-
T30_03_A	FRCM	Low	1,05	0,54	F2
T30_03_A'	Concrete	-	4,31	2,20	-
T30_03_B	FRCM	High	0,73	0,37	F3
T30_03_B'	Concrete	-	3,08	1,57	-
T40_01_A	FRCM	Low	1,21	0,62	F3
T40_01_A'	Concrete	-	3,37	1,71	-
T40_01_B	FRCM	High	1,55	0,79	F3
T40_01_B'	Concrete	-	2,19	1,11	-
T40_02_A	FRCM	Low	2,08	1,06	F3
T40_02_A'	Concrete	-	3,26	1,66	-

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
T40_02_B	FRCM	High	2,60	1,33	F3
T40_02_B'	Concrete	-	2,45	1,25	-
T40_03_A	FRCM	Low	0	0	F2
T40_03_A'	Concrete	-	3,90	1,99	-
T40_03_B	FRCM	High	1,83	0,93	F3
T40_03_B'	Concrete	-	2,56	1,31	-
T50_01_A	FRCM	Low	1,57	0,80	F3
T50_01_A'	Concrete	-	2,87	1,46	-
T50_01_B	FRCM	High	0,88	0,45	F3
T50_01_B'	Concrete	-	3,02	1,54	-
T50_02_A	FRCM	Low	1,92	0,98	F3
T50_02_A'	Concrete	-	2,33	1,19	-
T50_02_B	FRCM	High	1,61	0,82	F3
T50_02_B'	Concrete	-	2,16	0,45	-
T50_03_A	FRCM	Low	1,34	0,68	F3
T50_03_A'	Concrete	-	4,59	2,34	-
T50_03_B	FRCM	High	0	0	F2
T50_03_B'	Concrete	-	3,70	1,88	-

Tabella Analisi e discussione dei risultati-48: Risultati T.

Nella tabella 5-36 sono riportati i valori delle prove effettuate sui provini T70.

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
T70_10_01_A	FRCM	Low	1,61	0,82	F2
T70_10_01_A'	Concrete	-	3,33	1,69	-
T70_10_01_B	FRCM	High	2,85	1,45	F3

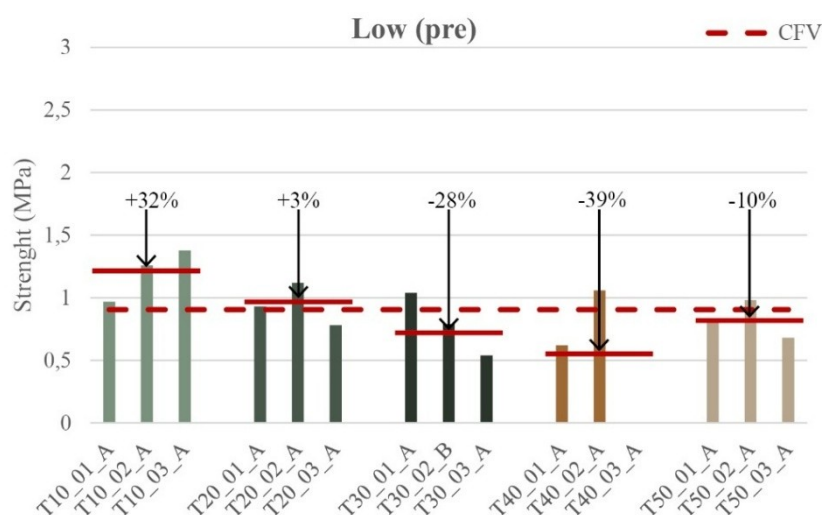
ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
T70_10_01_B'	Concrete	-	3,03	1,54	-
T70_10_02_A	FRCM	Low	2,35	1,19	F2
T70_10_02_A'	Concrete	-	2,69	1,37	-
T70_10_02_B	FRCM	High	2,70	1,37	F2
T70_10_02_B'	Concrete	-	3,79	1,93	-
T70_10_03_A	FRCM	Low	1,90	1,01	F3
T70_10_03_A'	Concrete	-	2,40	1,22	-
T70_10_03_B	FRCM	High	2,54	1,29	F3
T70_10_03_B'	Concrete	-	2,66	1,36	-
T70_20_01_A	FRCM	Low	1,69	0,86	F3
T70_20_01_A'	Concrete	-	2,54	1,29	-
T70_20_01_B	FRCM	High	2,17	1,10	F2
T70_20_01_B'	Concrete	-	3,12	1,59	-
T70_20_02_A	FRCM	Low	0	0	F2
T70_20_02_A'	Concrete	-	2,44	1,24	-
T70_20_02_B	FRCM	High	0,86	0,44	F2
T70_20_02_B'	Concrete	-	3,66	1,86	-
T70_20_03_A	FRCM	Low	0	0	F2
T70_20_03_A'	Concrete	-	3,63	1,85	-
T70_20_03_B	FRCM	High	2,58	1,31	F2
T70_20_03_B'	Concrete	-	4,60	2,34	-
T70_30_01_A	FRCM	Low	1,27	0,65	F2
T70_30_01_A'	Concrete	-	3,02	1,54	-
T70_30_01_B	FRCM	High	1,97	1	F1
T70_30_01_B'	Concrete	-	3,11	1,58	-
T70_30_02_A	FRCM	High	1,95	0,99	F1
T70_30_02_A'	Concrete	-	3,53	1,80	-

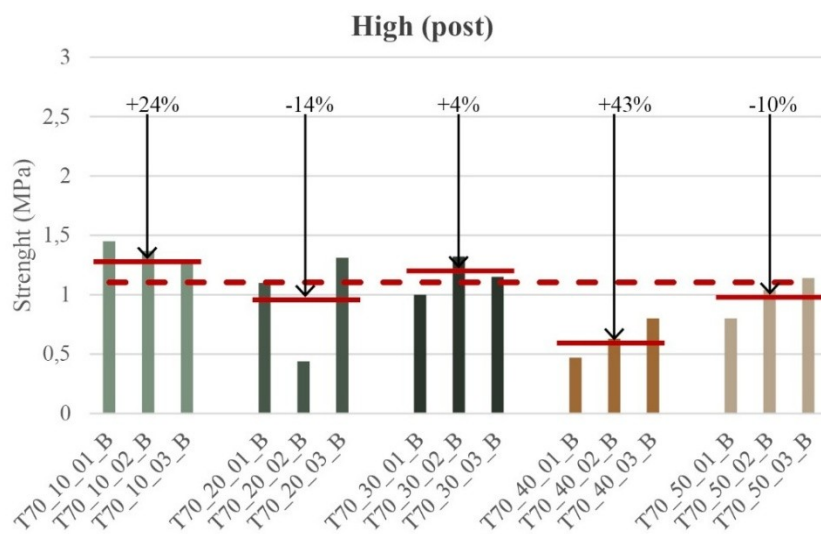
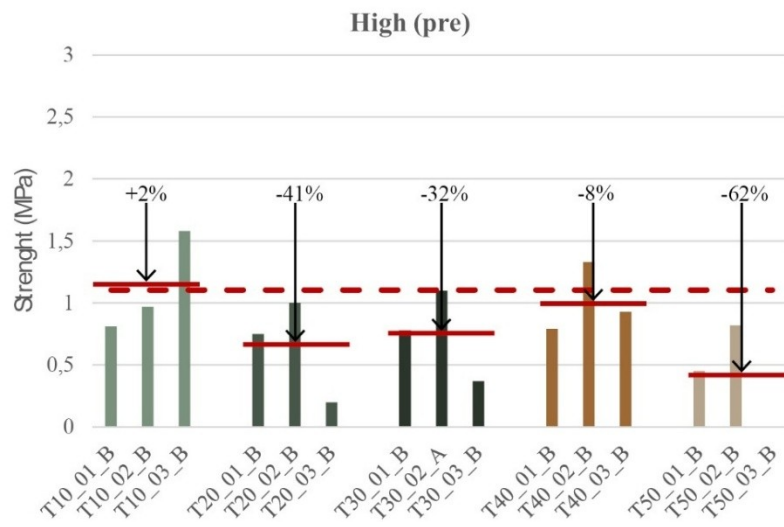
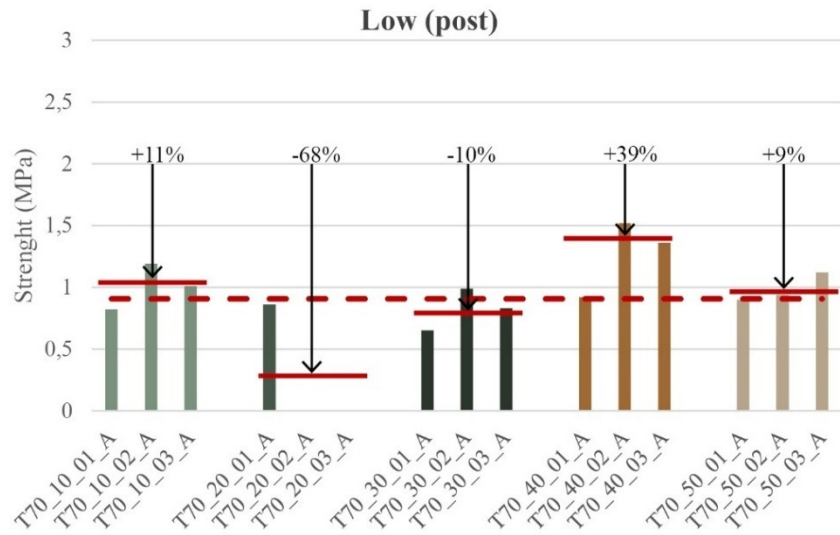
ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
T70_30_02_B	FRCM	Low	2,60	1,32	F3
T70_30_02_B'	Concrete	-	2,85	1,45	-
T70_30_03_A	FRCM	Low	1,64	0,83	F2
T70_30_03_A'	Concrete	-	3,02	1,54	-
T70_30_03_B	FRCM	High	2,25	1,15	F1
T70_30_03_B'	Concrete	-	2,58	1,32	-
T70_40_01_A	FRCM	Low	1,81	0,92	F1
T70_40_01_A'	Concrete	-	3,25	1,66	-
T70_40_01_B	FRCM	High	0,91	0,47	F2
T70_40_01_B'	Concrete	-	1,59	0,81	-
T70_40_02_A	FRCM	Low	2,99	1,52	F3
T70_40_02_A'	Concrete	-	3,00	1,53	-
T70_40_02_B	FRCM	High	1,24	0,63	F1
T70_40_02_B'	Concrete	-	2,74	1,39	-
T70_40_03_A	FRCM	Low	2,68	1,36	F3
T70_40_03_A'	Concrete	-	2,99	1,52	-
T70_40_03_B	FRCM	High	1,56	0,80	F1
T70_40_03_B'	Concrete	-	2,81	1,43	-
T70_50_01_A	FRCM	Low	1,77	0,90	F1
T70_50_01_A'	Concrete	-	3,91	1,99	-
T70_50_01_B	FRCM	High	1,58	0,80	F2
T70_50_01_B'	Concrete	-	2,43	1,24	-
T70_50_02_A	FRCM	Low	1,85	0,94	F1
T70_50_02_A'	Concrete	-	2,50	1,27	-
T70_50_02_B	FRCM	High	2,04	1,04	F1
T70_50_02_B'	Concrete	-	2,44	1,24	-
T70_50_03_A	FRCM	Low	2,19	1,12	F3

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
T70_50_03_A'	Concrete	-	3,39	1,73	-
T70_50_03_B	FRCM	High	2,24	1,14	F2
T70_50_03_B'	Concrete	-	2,36	1,20	-

Tabella Analisi e discussione dei risultati-49: Risultati T70.

Per i test effettuati sulle facce con composito si hanno solo tre prove per tipologia, questo non permette di fare valutazioni considerando solo la media dei risultati. Pertanto, nei grafici sotto riportati, vengono rappresentati i risultati di tutte le prove divise per tipologia, in modo da mostrare quanto il dato sia omogeneo o disomogeneo. Per poter commentare tali dati, nei grafici, è stata inserita una linea rossa continua che rappresenta la media e l'incremento o decremento percentuale rispetto ai cubetti non trattati (CFV). Per le prove sulle facce di solo substrato in calcestruzzo, avendone effettuate due per cubetto, è stato possibile considerare invece la media. Pertanto, i grafici di figura 5-79 rappresentano il valore dei cubetti non trattati per le facce denominate Low e High a cui viene aggiunto l'acronimo pre o post a seconda che i risultati si riferiscano a composito applicato prima dell'invecchiamento (pre) oppure dopo l'invecchiamento (post), e Concrete.





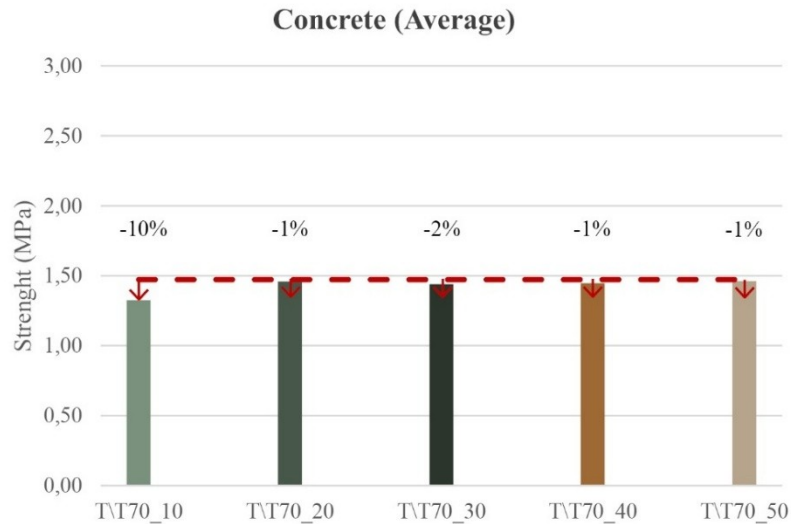


Figura Analisi e discussione dei risultati-109: Risultati resistenza provini T\T70_10, T\T70_20, T\T70_30, T\T70_40 e T\T70_50 confrontati con quelli non condizionati (CFV).

Nel complesso, si osserva che la resistenza media dei provini condizionati risulta generalmente inferiore a quella dei campioni non trattati. Questo comportamento suggerisce che le condizioni di esposizione (temperatura di 70 °C e tempi di trattamento crescenti fino a 50 giorni) hanno inciso in maniera significativa sulla coesione superficiale del calcestruzzo, riducendo la capacità di ancoraggio del composito. Nei provini con superficie Low, la dispersione dei dati è maggiore, indicando una variabilità del legame adesivo dovuta alla minore rugosità e quindi a un'adesione più sensibile alle imperfezioni locali. Solo per le facce low (pre) i valori medi mostrano una tendenza decrescente con l'aumentare del tempo di condizionamento, con valori compresi tra +32% e -39% rispetto ai campioni CFV. Il valore dei provini T40 è fortemente influenzato dal risultato del provino T40_03, questo suggerisce che il dato sia suscettibile di errore. In generale, si nota una notevole variabilità dei risultati tra le diverse configurazioni, indice di una risposta non perfettamente ripetibile del sistema, probabilmente legata alla microstruttura del supporto o a differenze locali nell'adesione. Tale dispersione suggerisce la necessità di ampliare la campagna sperimentale, includendo un numero maggiore di provini per ciascuna condizione, al fine di consolidare le tendenze osservate e definire con maggiore affidabilità il degrado ed i valori di perdita di resistenza nel tempo. Nei test di facce di solo substrato (Concrete) si osserva un comportamento differente: i valori di resistenza mostrano un valore pressoché costante con l'aumentare del tempo di esposizione (valori compresi tra -1% e -10%), indicando che, questo tipo di condizionamento non altera la resistenza allo strappo del

calcestruzzo e che il danno si localizza principalmente nell'interfaccia composito-substrato piuttosto che nel materiale di base.

Il metodo di rottura prevalente, nei test su composito invecchiato, è l'F3, cioè il distacco dell'interfaccia fibra-malta. Per i test su composito non invecchiato, invece, il tipo di rottura prevalente è l'F2 (distacco composito-substrato), aumentano al contempo però, sempre per quest'ultima tipologia i distacchi per delaminazione del substrato (F1). Questo dato è pertanto alquanto contraddittorio dato che si ha un aumento di perdita di aderenza tra i due materiali (40% Low post e 47% High post) e allo stesso tempo un lieve incremento (27% Low post, 33% High post) della coesione. Anche nel caso di composito invecchiato sono presenti rotture differenti; in particolare, abbiamo i cubetti: T10_01_A e T10_02_A con rottura F1, delaminazione del substrato; i T10:01_B e T30_03_A con rottura F2, distacco interfaccia matrice-substrato; ed il provino T10_01_B con rottura F4, distacco colla composito (fig.5-80). In figura 5-81 sono riportati i grafici con le modalità di rottura per questo gruppo.

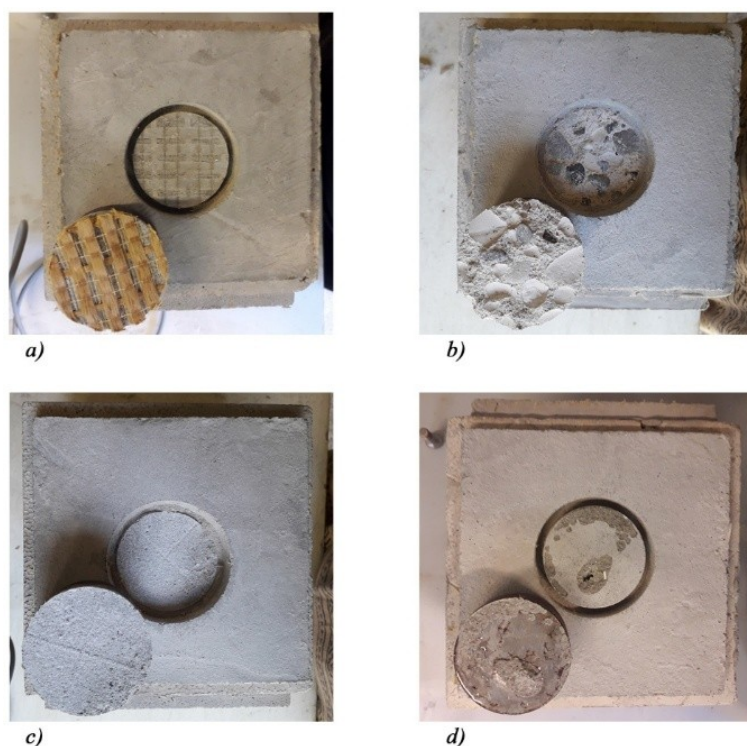


Figura Analisi e discussione dei risultati-110: Tipi di rotture: a) T40_01_A; b) T10_02_A; c) T50_03_B; d) T10_01_B.

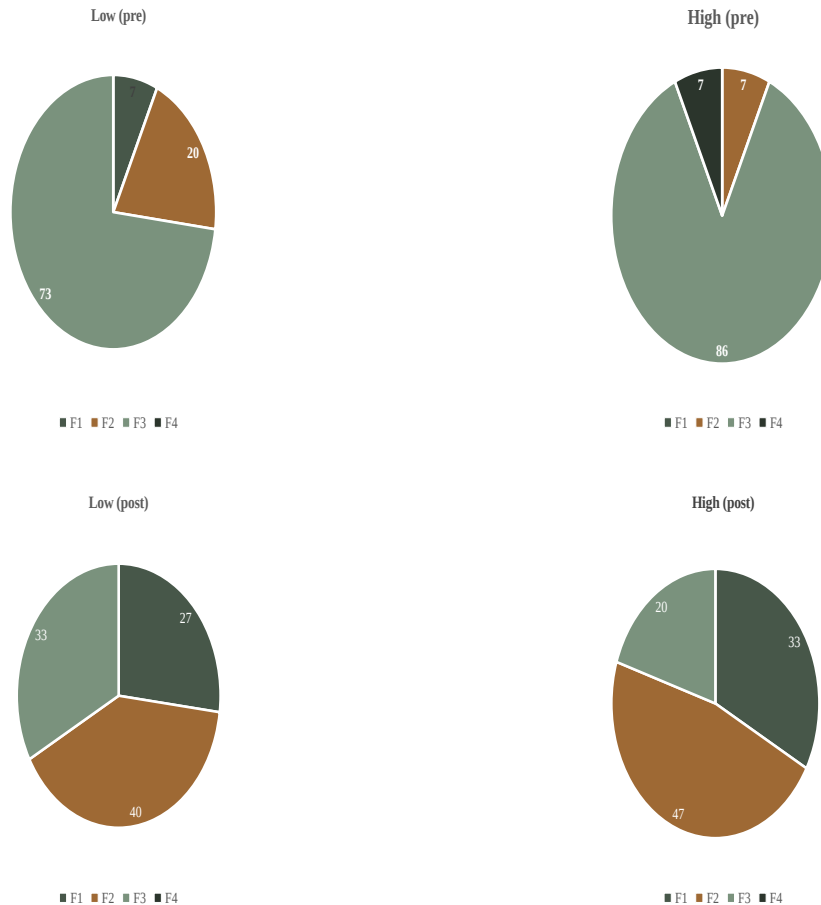


Figura Analisi e discussione dei risultati-111: Tipi di rotture: Low (faccia con livello di rugosità basso) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), High (faccia con livello di rugosità alto) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), provini T e T70.

5.6.2 Risultati T50

In questo paragrafo sono mostrati i risultati dei provini soggetti a cicli di caldo umido, con essiccazione in forno a 50°C per 18 ore e successiva immersione in acqua normale per 6 ore. I cubetti di questa categoria sono 15, suddivisi in 5 gruppi da 3 provini ciascuno, in cui viene variato il numero di cicli da 10 fino a 50. Questo gruppo è denominato T50, seguito dal numero dei cicli e dal numero di provino. Su tutti i cubetti il composito è stato applicato, su due facce laterali, prima dell'invecchiamento e su altre due facce laterali dopo l'invecchiamento. Anche in questo caso il composito è stato applicato su substrato con due livelli di scabrosità, Low bassa ed High alta. Alle due tipologie è stato applicato l'epiteto pre o post a seconda che il composito

sia stato applicato prima (pre) o dopo (post) l'invecchiamento. I test su solo substrato sono stati effettuati sulla faccia inferiore di ogni provino.

La figura 5-82 mostra, a livello visivo, i cambiamenti avvenuti sulle facce con composito e senza, per ogni numero di cicli analizzati. Come si può notare, non sono riscontrabili significative trasformazioni, per nessuna delle due facce, si notano alcune fessurazioni e patina nel composito a partire dai 20 cicli (fig. 5-83), che aumentano all'aumentare dei cicli.

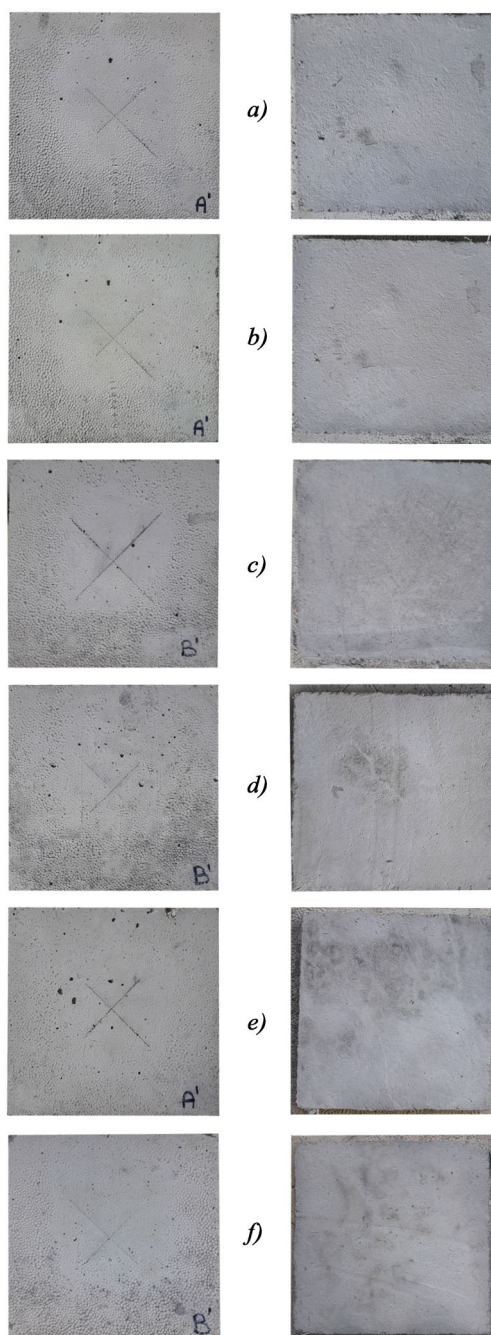


Figura Analisi e discussione dei risultati-112: a) provino prima dell'invecchiamento b) provino dopo 10 cicli, c) provino dopo 20 cicli, d) provino dopo 30 cicli, e) provino dopo 40 cicli, f) provino dopo 50 cicli.



Figura Analisi e discussione dei risultati-113: Dettaglio fessurazione T50_50_01.

Nella tabella 5-37 sono riportati i valori delle prove effettuate sui provini T50.

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
T50_10_01_A	FRCM	Low (pre)	2,69	1,37	F3
T50_10_01_A'	FRCM	Low (post)	2,02	1,03	F3
T50_10_01_B	FRCM	High (pre)	2,79	1,42	F3
T50_10_01_B'	FRCM	High (post)	2,15	1,10	F3
T50_10_01_cls	Concrete	-	2,09	1,06	-
T50_10_02_A	FRCM	Low (pre)	1,25	0,64	F2
T50_10_02_A'	FRCM	Low (post)	2,15	1,10	F3
T50_10_02_B	FRCM	High (pre)	2,92	1,49	F3
T50_10_02_B'	FRCM	High (post)	1,66	0,85	F1
T50_10_02_cls	Concrete	-	2,00	1,02	-
T50_10_03_A	FRCM	Low (pre)	2,50	1,27	F3
T50_10_03_A'	FRCM	Low (post)	0,83	0,42	F4

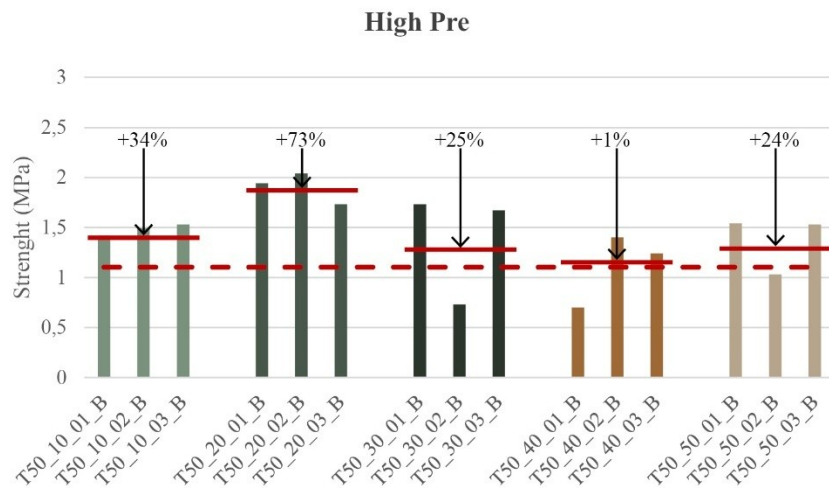
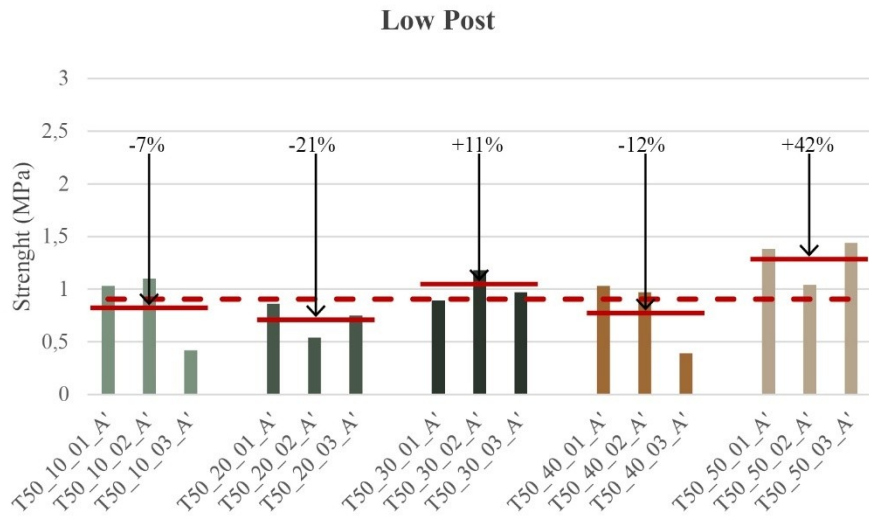
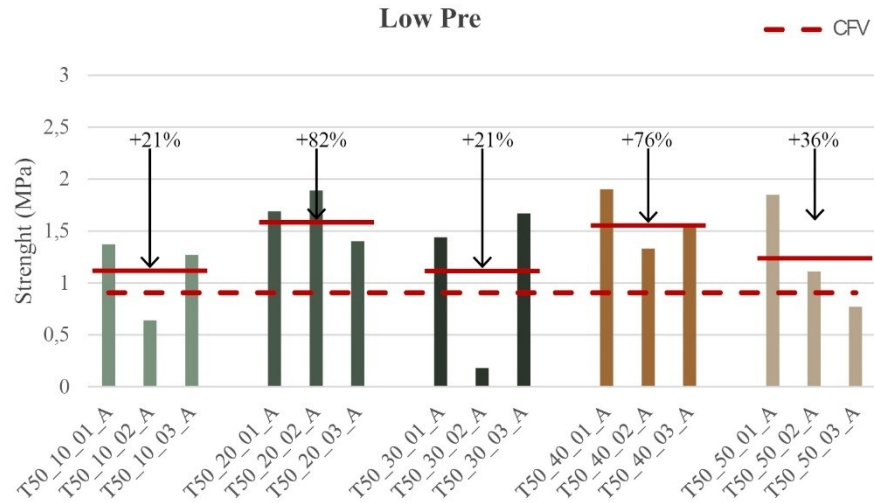
ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
T50_10_03_B	FRCM	High (pre)	3,00	1,53	F3
T50_10_03_B'	FRCM	High (post)	2,14	1,09	F1
T50_10_03_cls	Concrete	-	1,96	1,00	-
T50_20_01_A	FRCM	Low (pre)	3,32	1,69	F3
T50_20_01_A'	FRCM	Low (post)	1,70	0,86	F3
T50_20_01_B	FRCM	High (pre)	3,81	1,94	F3
T50_20_01_B'	FRCM	High (post)	0,84	0,43	F2
T50_20_01_cls	Concrete	-	2,51	1,28	-
T50_20_02_A	FRCM	Low (pre)	3,72	1,89	F3
T50_20_02_A'	FRCM	Low (post)	1,05	0,54	F1
T50_20_02_B	FRCM	High (pre)	4,01	2,04	F1
T50_20_02_B'	FRCM	High (post)	1,16	0,59	F3
T50_20_02_cls	Concrete	-	3,90	1,98	-
T50_20_03_A	FRCM	Low (pre)	2,74	1,40	F3
T50_20_03_A'	FRCM	Low (post)	1,48	0,75	F2
T50_20_03_B	FRCM	High (pre)	3,39	1,73	F3
T50_20_03_B'	FRCM	High (post)	2,26	1,15	F1
T50_20_03_cls	Concrete	-	3,59	1,83	-
T50_30_01_A	FRCM	Low (pre)	2,82	1,44	F3
T50_30_01_A'	FRCM	Low (post)	1,75	0,89	F2
T50_30_01_B	FRCM	High (pre)	3,40	1,73	F3
T50_30_01_B'	FRCM	High (post)	1,82	0,93	F3
T50_30_01_cls	Concrete	-	4,64	2,36	-
T50_30_02_A	FRCM	Low (pre)	0,35	0,18	F2
T50_30_02_A'	FRCM	Low (post)	2,32	1,18	F3
T50_30_02_B	FRCM	High (pre)	1,44	0,73	F3

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
T50_30_02_B'	FRCM	High (post)	1,82	0,93	F3
T50_30_02_cls	Concrete	-	5,60	2,85	-
T50_30_03_A	FRCM	Low (pre)	3,29	1,67	F3
T50_30_03_A'	FRCM	Low (post)	1,90	0,97	F3
T50_30_03_B	FRCM	High (pre)	3,28	1,67	F3
T50_30_03_B'	FRCM	High (post)	1,84	0,94	F2
T50_30_03_cls	Concrete	-	4,53	2,31	-
T50_40_01_A	FRCM	Low (pre)	3,72	1,90	F3
T50_40_01_A'	FRCM	Low (post)	2,82	1,44	F1
T50_40_01_B	FRCM	High (pre)	1,37	0,70	F2
T50_40_01_B'	FRCM	High (post)	2,82	1,44	F3
T50_40_01_cls	Concrete	-	3,95	2,01	-
T50_40_02_A	FRCM	Low (pre)	2,61	1,33	F2
T50_40_02_A'	FRCM	Low (post)	1,91	0,97	F2
T50_40_02_B	FRCM	High (pre)	2,76	1,40	F3
T50_40_02_B'	FRCM	High (post)	1,48	0,75	F2
T50_40_02_cls	Concrete	-	5,45	2,77	-
T50_40_03_A	FRCM	Low (pre)	3,04	1,55	F3
T50_40_03_A'	FRCM	Low (post)	0,76	0,39	F1
T50_40_03_B	FRCM	High (pre)	2,44	1,24	F3
T50_40_03_B'	FRCM	High (post)	1,34	0,68	F3
T50_40_03_cls	Concrete	-	4,02	2,01	-
T50_50_01_A	FRCM	Low (pre)	3,63	1,85	F3
T50_50_01_A'	FRCM	Low (post)	2,72	1,38	F3
T50_50_01_B	FRCM	High (pre)	3,02	1,54	F3
T50_50_01_B'	FRCM	High (post)	2,68	1,36	F3
T50_50_01_cls	Concrete	-	5,77	2,94	-

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
T50_50_02_A	FRCM	Low (pre)	2,19	1,11	F3
T50_50_02_A'	FRCM	Low (post)	2,04	1,04	F3
T50_50_02_B	FRCM	High (pre)	2,01	1,03	F2
T50_50_02_B'	FRCM	High (post)	1,73	0,88	F3
T50_50_02_cls	Concrete	-	4,14	2,07	-
T50_50_03_A	FRCM	Low (pre)	1,51	0,77	F3
T50_50_03_A'	FRCM	Low (post)	2,83	1,44	F3
T50_50_03_B	FRCM	High (pre)	3,00	1,53	F3
T50_50_03_B'	FRCM	High (post)	1,56	0,79	F2
T50_50_03_cls	Concrete	-	3,20	1,63	-

Tabella Analisi e discussione dei risultati-50: Risultati T50.

L'analisi dei grafici riportati in Figura xx evidenzia l'andamento della resistenza allo strappo per le diverse tipologie di provino, confrontate con i valori di riferimento (CFV). Poiché il numero di prove per ciascuna configurazione è limitato (tre per tipologia), è stato scelto di rappresentare i risultati individuali per mettere in evidenza la dispersione o l'omogeneità dei dati. Per poter commentare tali dati, nei grafici, è stata inserita una linea rossa continua che rappresenta la media con l'incremento o decremento percentuale rispetto ai cubetti non trattati (CFV). Pertanto, i grafici di figura 5-84 rappresentano il valore dei risultati divisi per le facce denominate Low e High a cui viene aggiunto l'acronimo pre o post a seconda che i risultati si riferiscano a composito applicato prima dell'invecchiamento (pre) oppure dopo l'invecchiamento (post), e Concrete.



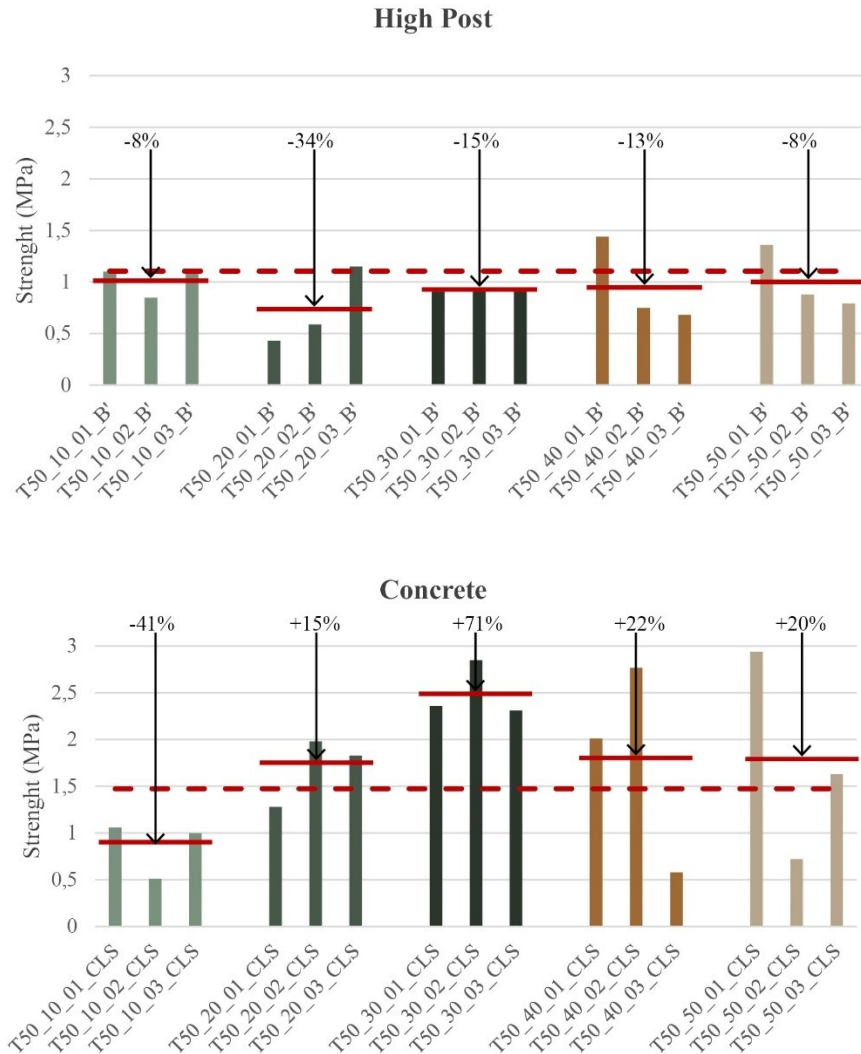


Figura Analisi e discussione dei risultati- 114: Risultati resistenza provini T50_10, T50_20, T50_30, T50_40 e T50_50 confrontati con quelli non condizionati (CFV).

L'analisi dei risultati evidenzia un comportamento differenziato in funzione sia del tempo di esposizione sia della preparazione superficiale. Nel complesso si può affermare che, la resistenza allo strappo media tende ad aumentare rispetto ai campioni di riferimento (CFV), ma con intensità variabile tra le diverse configurazioni. Nei provini con superficie Low, la dispersione dei dati è piuttosto marcata, segno di una risposta meccanica fortemente influenzata da disomogeneità locali dell'interfaccia. Al contrario, i provini con superficie High mostrano un comportamento più stabile e ripetibile. Pur registrandosi, per le facce high post, una diminuzione della resistenza per tutte le tipologie, con valore tra -8% e -34%. Le configurazioni post, in cui il composito è stato applicato su un substrato già sottoposto all'invecchiamento, evidenziano i risultati più penalizzanti, la resistenza allo strappo è inferiore rispetto ai provini

pre, indicando la presenza di danneggiamento superficiale nel calcestruzzo che compromette la qualità dell'interfaccia e riduce la capacità adesiva della matrice. Al contrario, nei provini "pre" l'invecchiamento avviene a sistema già applicato, e il degrado si distribuisce in modo più omogeneo, determinando una perdita complessiva minore. I campioni Concrete mostrano un aumento della resistenza, suggerendo che il danno principale si concentri nella zona di aderenza composito-substrato piuttosto che nel materiale di base. Anche in questo caso si sottolinea l'importanza di ampliare la campagna sperimentale data la variabilità dei dati all'interno di ciascun gruppo. per definire con maggiore affidabilità il degrado di questi sistemi.

Il metodo di rottura prevalente, in tutte le tipologie, è l'F3, cioè il distacco dell'interfaccia fibra-malta. Nel caso di composito non invecchiato aumentano i casi di rottura, in particolare per distacco interfaccia matrice-substrato (F2), e soprattutto in queste tipologie si ha la presenza con valori del 20% sia per Low post che per High post di delaminazione del substrato (F1). In fig.5-85 sono mostrati i risultati di alcune prove; in particolare si mostra la rottura particolare avvenuta per distacco dell'interfaccia colla/composito (F4) del provino T50_10_03_A'; mentre in fig.5-86 sono riportati i grafici con le modalità di rottura per questo gruppo.

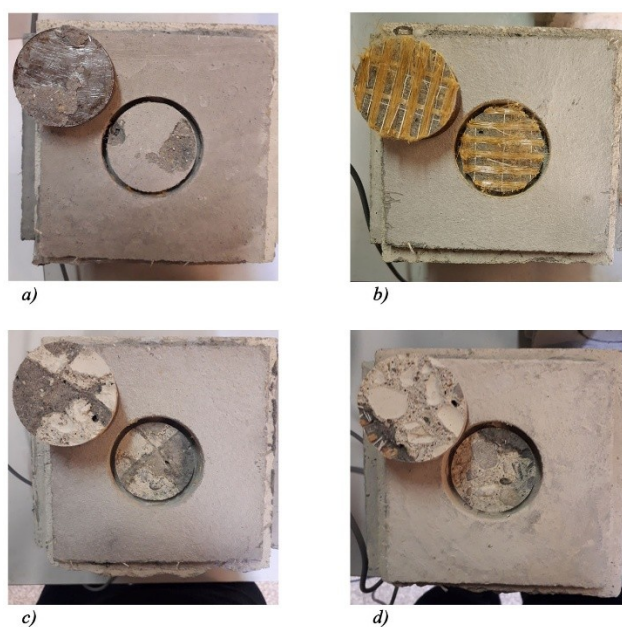


Figura Analisi e discussione dei risultati- 115: Tipi di rotture: a) T50_10_03_A'; b) T50_50_01_B'; c) T50_30_03_B'; d) T50_40_01_A'..

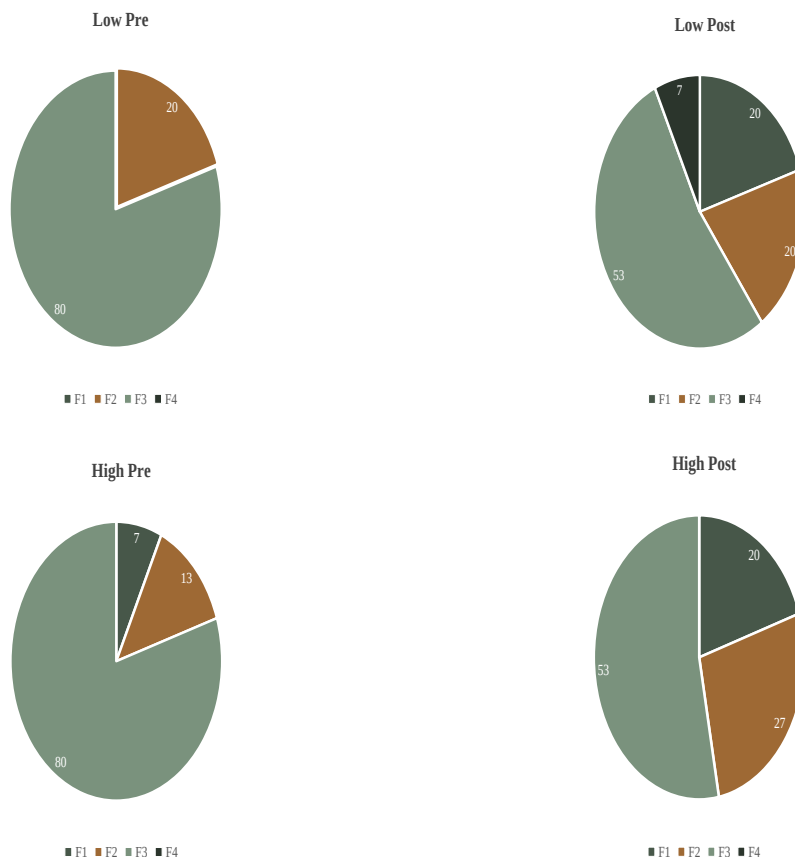


Figura Analisi e discussione dei risultati- 116: Tipi di rotture: Low (faccia con livello di rugosità basso) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), High (faccia con livello di rugosità alto) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), provini T50.

5.6.3 Risultati TS1

In questo paragrafo sono mostrati i risultati dei provini soggetti a cicli di caldo umido, con essiccazione in forno a 50°C per 18 ore e successiva immersione, per 6 ore, in soluzione composta da acqua deionizzata, cloruro di sodio all'4% (NaCl) e sodio solfato decaidrato al 2% (Na₂SO₄). I cubetti di questa categoria sono 15, suddivisi in 5 gruppi da 3 provini ciascuno, in cui viene variato il numero di cicli da 10 fino a 50. Questo gruppo è denominato TS1, seguito dal numero dei cicli e dal numero di provino. Su tutti i cubetti il composito è stato applicato, su due facce laterali, prima dell'invecchiamento e su altre due facce laterali dopo l'invecchiamento. Anche in questo caso il composito è stato applicato su substrato con due livelli di scabrosità, Low bassa ed High alta. Alle due tipologie è stato applicato l'epiteto pre o post a seconda che il

composito sia stato applicato prima (pre) o dopo (post) l'invecchiamento. I test su solo substrato sono stati effettuati sulla faccia inferiore di ogni provino.

La figura 5-87 mostra, a livello visivo, i cambiamenti avvenuti sulle facce con composito e senza, per ogni numero di cicli analizzati. Rispetto ai casi precedenti, di cicli caldo umido, qui si ha un degrado superficiale evidente, con comparsa di efflorescenze che aumenta all'aumentare del numero di cicli. Ciò è riscontrabile soprattutto per il calcestruzzo, mentre nel caso del composito ciò è meno consistente. I provini presentavano anche segni di disgregazione sia del composito che del substrato che aumentavano all'aumentare del numero di cicli.

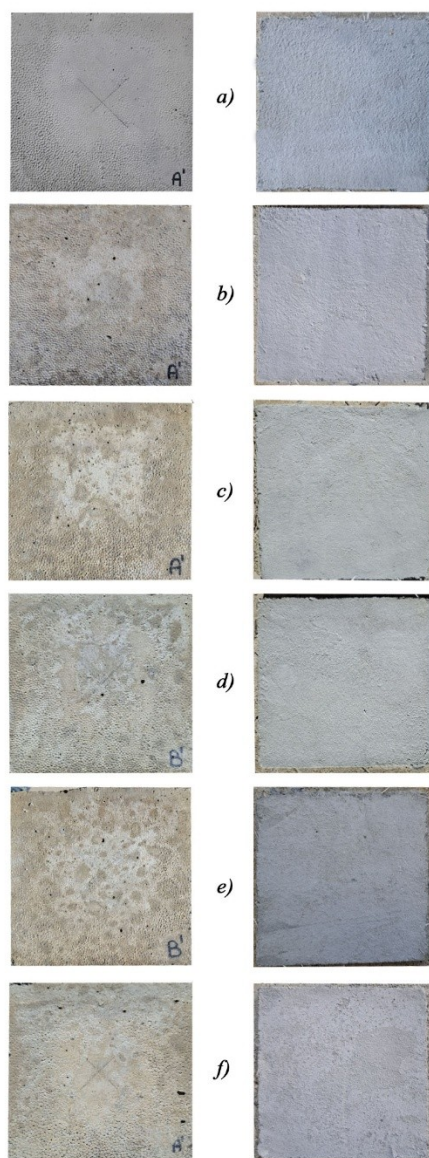


Figura Analisi e discussione dei risultati-117: a) provino prima dell'invecchiamento b) provino dopo 10 cicli, c) provino dopo 20 cicli, d) provino dopo 30 cicli, e) provino dopo 40 cicli, f) provino dopo 50 cicli.

In diversi cubetti si sono osservate fessurazioni localizzate lungo l'interfaccia composito-substrato, segno di un distacco del rinforzo. Queste lesioni, probabilmente dovute alle tensioni interne generate dal rigonfiamento e dal ritiro differenziale tra matrice e calcestruzzo, rappresentano un segnale evidente del deterioramento progressivo del legame adesivo (fig. 5-88).



Figura Analisi e discussione dei risultati-118: Comparsa di lesioni lungo l'interfaccia composito substrato.

Nella tabella 5-38 sono riportati i valori delle prove effettuate sui provini TS1.

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
TS1_10_01_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
TS1_10_01_A'	FRCM	Low (post)	1,26	0,64	F1
TS1_10_01_B	FRCM	High (pre)	0,47	0,24	F3
TS1_10_01_B'	FRCM	High (post)	0,85	0,43	F1
TS1_10_01_cls	Concrete	-	3,10	1,58	-
TS1_10_02_A	FRCM	Low (pre)	0,48	0,25	F3
TS1_10_02_A'	FRCM	Low (post)	2,83	1,44	F3

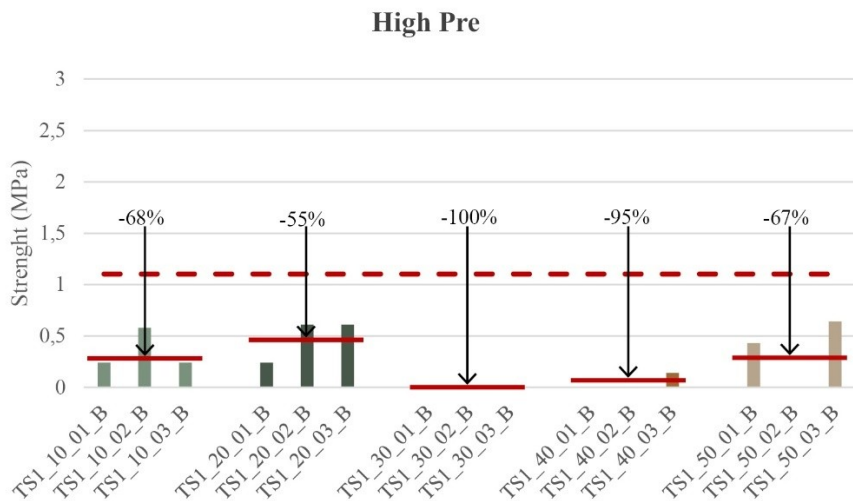
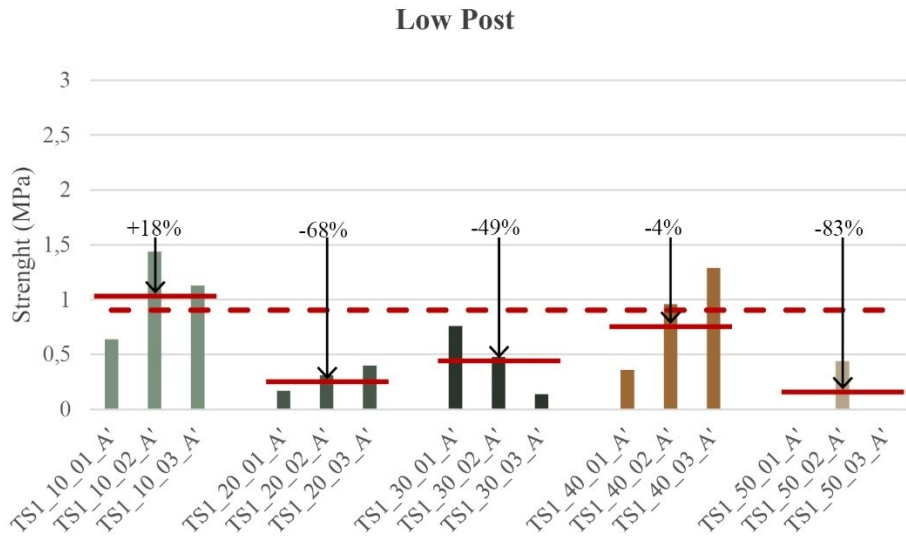
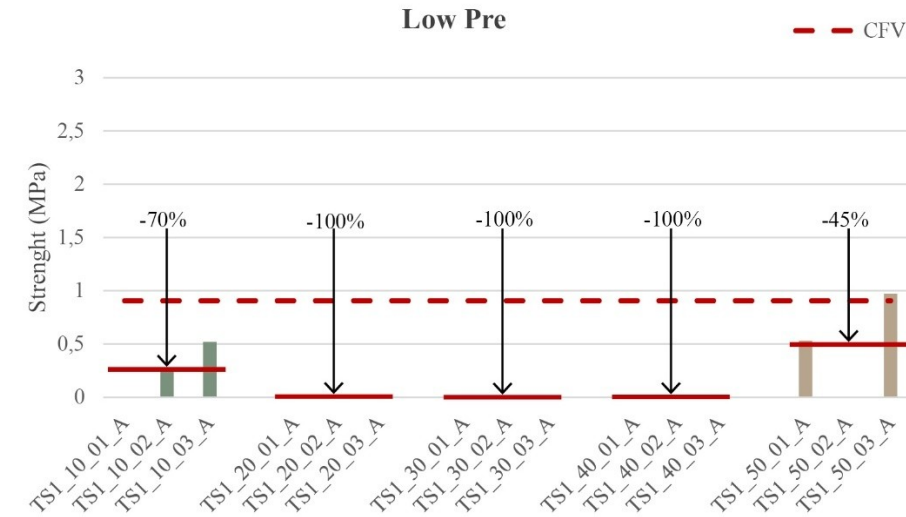
ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
TS1_10_02_B	FRCM	High (pre)	1,14	0,58	F3
TS1_10_02_B'	FRCM	High (post)	1,55	0,79	F3
TS1_10_02_cls	Concrete	-	5,27	2,68	-
TS1_10_03_A	FRCM	Low (pre)	1,01	0,52	F3
TS1_10_03_A'	FRCM	Low (post)	2,23	1,13	F2
TS1_10_03_B	FRCM	High (pre)	0,48	0,24	F3
TS1_10_03_B'	FRCM	High (post)	2,56	1,30	F3
TS1_10_03_cls	Concrete	-	4,23	2,12	-
TS1_20_01_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
TS1_20_01_A'	FRCM	Low (post)	0,33	0,17	F2
TS1_20_01_B	FRCM	High (pre)	0,47	0,24	F3
TS1_20_01_B'	FRCM	High (post)	0	0	F2
TS1_20_01_cls	Concrete	-	3,12	1,56	-
TS1_20_02_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
TS1_20_02_A'	FRCM	Low (post)	0,60	0,31	F2
TS1_20_02_B	FRCM	High (pre)	1,19	0,61	F3
TS1_20_02_B'	FRCM	High (post)	2,25	1,14	F2
TS1_20_02_cls	Concrete	-	3,18	1.62	-
TS1_20_03_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
TS1_20_03_A'	FRCM	Low (post)	0,79	0,40	F2
TS1_20_03_B	FRCM	High (pre)	1,19	0,61	F3
TS1_20_03_B'	FRCM	High (post)	1,22	0,62	F2
TS1_20_03_cls	Concrete	-	3,03	1,54	-
TS1_30_01_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
TS1_30_01_A'	FRCM	Low (post)	1,50	0,76	F2
TS1_30_01_B	FRCM	High (pre)	0	0	F3

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
TS1_30_01_B'	FRCM	High (post)	1,54	0,78	F2
TS1_30_01_cls	Concrete	-	4,17	2,09	-
TS1_30_02_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
TS1_30_02_A'	FRCM	Low (post)	0,95	0,48	F2
TS1_30_02_B	FRCM	High (pre)	0	0	F3
TS1_30_02_B'	FRCM	High (post)	1,21	0,62	F3
TS1_30_02_cls	Concrete	-	4,64	2,37	-
TS1_30_03_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
TS1_30_03_A'	FRCM	Low (post)	0,27	0,14	F2
TS1_30_03_B	FRCM	High (pre)	0	0	F3
TS1_30_03_B'	FRCM	High (post)	2,28	1,16	F3
TS1_30_03_cls	Concrete	-	4,81	2,45	-
TS1_40_01_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
TS1_40_01_A'	FRCM	Low (post)	0,70	0,36	F2
TS1_40_01_B	FRCM	High (pre)	0	0	F3
TS1_40_01_B'	FRCM	High (post)	0,47	0,24	F3
TS1_40_01_cls	Concrete	-	4,83	2,46	-
TS1_40_02_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
TS1_40_02_A'	FRCM	Low (post)	1,88	0,96	F3
TS1_40_02_B	FRCM	High (pre)	0	0	F3
TS1_40_02_B'	FRCM	High (post)	1,22	0,62	F3
TS1_40_02_cls	Concrete	-	4,23	2,12	-
TS1_40_03_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
TS1_40_03_A'	FRCM	Low (post)	2,54	1,29	F3
TS1_40_03_B	FRCM	High (pre)	0,27	0,14	F3
TS1_40_03_B'	FRCM	High (post)	0,99	0,50	F3
TS1_40_03_cls	Concrete	-	3,80	1,94	-

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
TS1_50_01_A	FRCM	Low (pre)	1,05	0,53	F2
TS1_50_01_A'	FRCM	Low (post)	0	0	F3
TS1_50_01_B	FRCM	High (pre)	0,84	0,43	F3
TS1_50_01_B'	FRCM	High (post)	0	0	F3
TS1_50_01_cls	Concrete	-	4,30	2,19	-
TS1_50_02_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
TS1_50_02_A'	FRCM	Low (post)	0,87	0,44	F3
TS1_50_02_B	FRCM	High (pre)	0	0	F3
TS1_50_02_B'	FRCM	High (post)	1,21	0,62	F2
TS1_50_02_cls	Concrete	-	3,96	1,98	-
TS1_50_03_A	FRCM	Low (pre)	1,90	0,97	F2
TS1_50_03_A'	FRCM	Low (post)	0	0	F3
TS1_50_03_B	FRCM	High (pre)	1,25	0,64	F3
TS1_50_03_B'	FRCM	High (post)	0,49	0,25	F3
TS1_50_03_cls	Concrete	-	3,07	1,56	-

Tabella Analisi e discussione dei risultati-51: Risultati TS1.

L'analisi dei grafici riportati in figura 5-89 evidenzia l'andamento della resistenza allo strappo per le diverse tipologie di provino, confrontate con i valori di riferimento (CFV). Poiché il numero di prove per ciascuna configurazione è limitato (tre per tipologia), è stato scelto di rappresentare i risultati individuali per mettere in evidenza la dispersione o l'omogeneità dei dati. Per poter commentare tali risultati, nei grafici, è stata inserita una linea rossa continua che rappresenta la media con l'incremento o decremento percentuale rispetto ai cubetti non trattati (CFV). Infine, i grafici sono divisi in funzione della tipologia di faccia, Low e High, a cui viene aggiunto l'acronimo pre o post a seconda che i risultati si riferiscano a composito applicato prima dell'invecchiamento (pre) oppure dopo l'invecchiamento (post), e Concrete.



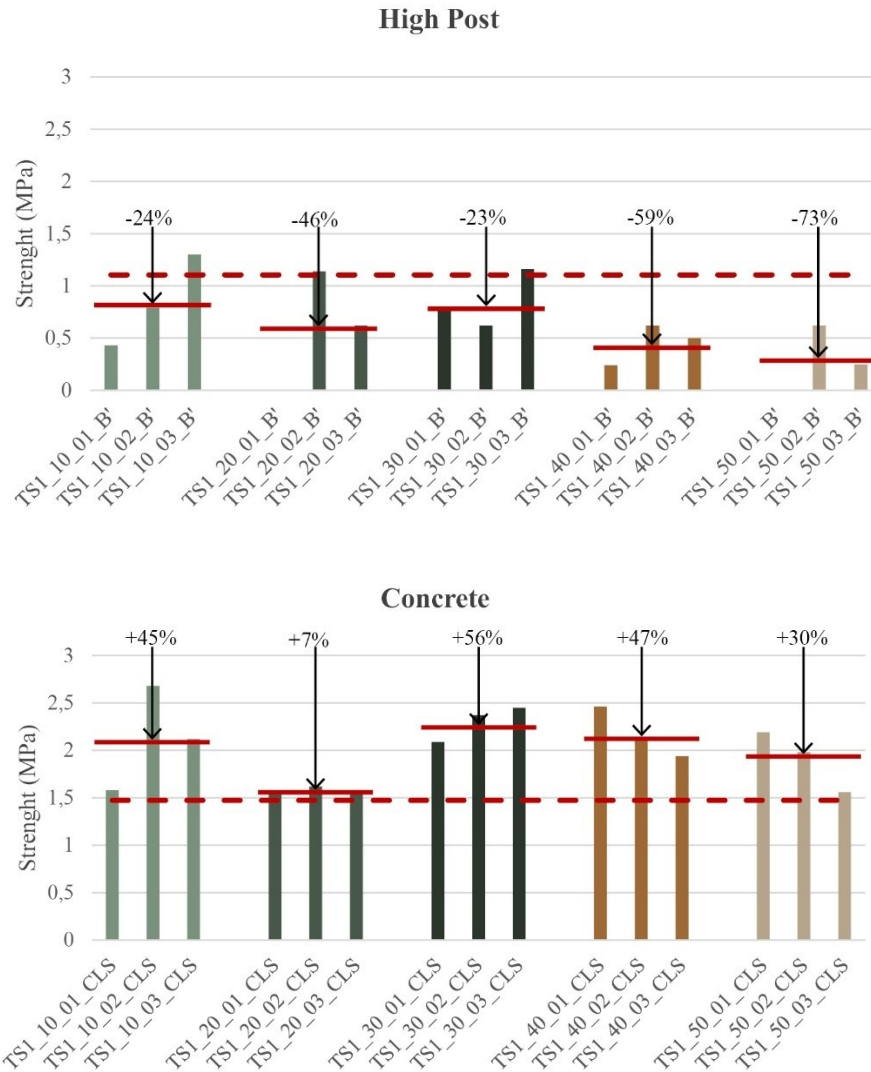


Figura Analisi e discussione dei risultati- 119: Risultati resistenza provini TS1_10, TS1_20, TS1_30, TS1_40 e TS1_50 confrontati con quelli non condizionati (CFV).

Nel complesso, si osserva che questo tipo di invecchiamento si è dimostrato particolarmente aggressivo, determinando perdite di resistenza già dopo pochi cicli di esposizione. L'interazione diretta e continua con la soluzione accelera i fenomeni di diffusione ionica e degrado chimico, rendendo questo condizionamento uno dei più severi per il sistema FRCM. I provini Low pre ed High pre, cioè con composito applicato prima dell'invecchiamento, mostrano un degrado netto, con perdite tra -45% e -100% per i Low pre e tra il -55% e -100% per gli High pre, già dopo 10 cicli. I Low ed High post mostrano un degrado inferiore con perdite tra -4% e -83% per i Low e tra il -23% e il -73% per gli High, ed un lieve incremento (+18%) per i provini dopo 10 cicli per i Low. Questo indica che il composito non invecchiato, mantenendo inalterate le prestazioni meccaniche dei materiali di cui è composto, mantiene una migliore adesione con il substrato

invecchiato. Confrontando le diverse tipologie di superficie, i provini con faccia High mantengono prestazioni migliori rispetto a quelli Low. Questo comportamento è attribuibile alla maggiore rugosità superficiale, che favorisce l'ancoraggio meccanico e riduce la propagazione di distacchi all'interfaccia, anche in presenza di attacco salino. In entrambi i casi, però, si evidenzia diminuzione dell'aderenza una sensibilità accentuata alle microfessurazioni, sintomo di un'adesione più fragile e discontinua, dovuta alla forte aggressività dell'ambiente di condizionamento. I campioni Concrete evidenziano un incremento della resistenza, con valori compresi tra +7% e +56%; indicando che il degrado si concentra principalmente nella zona interfaccia composito-substrato, più che nel materiale di base. Nel complesso, i risultati confermano che l'immersione prolungata in soluzione salina rappresenta una delle condizioni più critiche per il sistema FRCM. Il danno osservato è riconducibile all'attacco chimico dei cloruri, che altera la composizione della matrice e ne aumenta la porosità, e alla riduzione dell'adesione meccanica dovuta alla progressiva perdita di coesione alla superficie del supporto.

Il metodo di rottura prevalente, in tutte le tipologie, è l'F3, cioè il distacco dell'interfaccia fibra-malta. Nel caso di composito non invecchiato aumentano i casi di rottura, in particolare per distacco interfaccia matrice-substrato (F2), e soprattutto in queste tipologie si ha la presenza, sia per Low post che per High post, di casi di delaminazione del substrato (F1). In fig.5-90 sono mostrati i risultati di alcune prove, mentre in fig. 5-91 sono riportati i grafici con le modalità di rottura per questo gruppo.



a)



b)



c)



d)

Figura Analisi e discussione dei risultati-120: Tipi di rotture: a) TS1_40_03_B; b) TS1_50_01_A; c) TS1_20_01_A; d) TS1_10_01_B'.

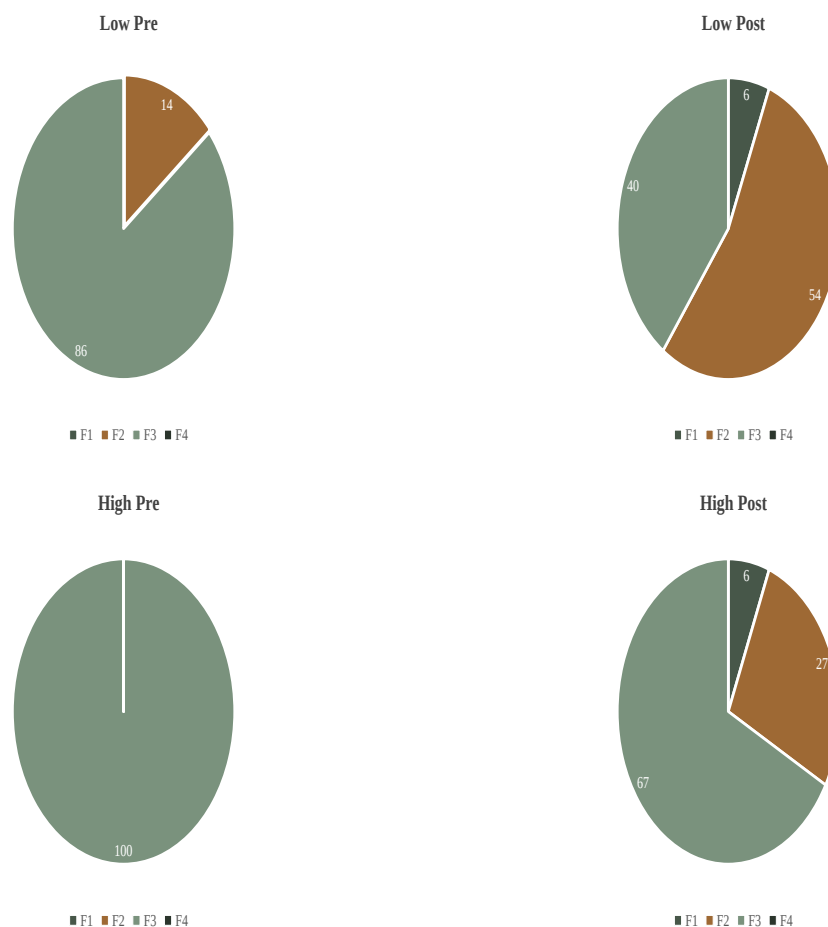


Figura Analisi e discussione dei risultati-121: Tipi di rotture: Low (faccia con livello di rugosità basso) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), High (faccia con livello di rugosità alto) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), provini TS1

5.6.4 Risultati TS2

In questo paragrafo sono mostrati i risultati dei provini soggetti a cicli di caldo umido, con essiccazione in forno a 50°C per 18 ore e successiva immersione, per 6 ore, in soluzione composta da acqua deionizzata, cloruro di sodio all'8% (NaCl) e sodio solfato decaidrato al 4% (Na₂SO₄). I cubetti di questa categoria sono 15, suddivisi in 5 gruppi da 3 provini ciascuno, in cui viene variato il numero di cicli da 10 fino a 50. Questo gruppo è denominato TS2, seguito dal numero dei cicli e dal numero di provino. Su tutti i cubetti il composito è stato applicato, su due facce laterali, prima dell'invecchiamento e su altre due facce laterali dopo l'invecchiamento. Anche in questo caso il composito è stato applicato su substrato con due livelli di scabrosità, Low bassa ed High alta. Alle due tipologie è stato applicato l'epiteto pre o post a seconda che il

composito sia stato applicato prima (pre) o dopo (post) l'invecchiamento. I test su solo substrato sono stati effettuati sulla faccia inferiore di ogni provino.

La figura 5-92 mostra, a livello visivo, i cambiamenti avvenuti sulle facce con composito e senza, per ogni numero di cicli analizzati. Rispetto ai provini TS1, si ha un degrado superficiale maggiore, con comparsa di efflorescenze che aumenta all'aumentare del numero di cicli. Ciò è riscontrabile soprattutto per il calcestruzzo, mentre nel caso del composito ciò è meno consistente. I provini presentavano anche segni di disgregazione ed incremento della porosità sia del composito che del substrato che aumentano all'aumentare del numero di cicli.

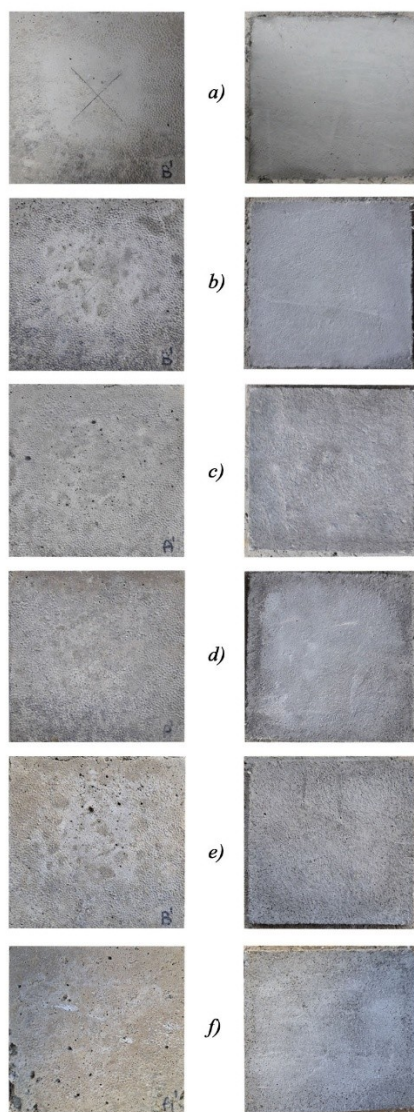


Figura Analisi e discussione dei risultati-122: a) provino prima dell'invecchiamento b) provino dopo 10 cicli, c) provino dopo 20 cicli, d) provino dopo 30 cicli, e) provino dopo 40 cicli, f) provino dopo 50 cicli

In diversi cubetti, come per il caso precedente, si sono osservate fessurazioni localizzate lungo l'interfaccia composito-substrato, segno di un distacco del rinforzo (fig. 5-93). In questo caso, le fessurazioni e i distacchi all'interfaccia risultano ancora più evidenti. Ciò è imputabile alla maggiore aggressività della soluzione di immersione, caratterizzata da una concentrazione salina superiore, che accelera la penetrazione dei cloruri e amplifica i fenomeni di degrado chimico e meccanico del legame composito-substrato.



Figura Analisi e discussione dei risultati-123: Comparsa di lesioni lungo l'interfaccia composito substrato.

Questi fenomeni di degrado hanno iniziato a comparire già in maniera significativa dopo 20 cicli di invecchiamento, come mostrato in figura 5-94. Dopo 24 cicli il composito applicato sul provino TS2_30_02_B, si è naturalmente distaccato dal substrato, segno del forte degrado soprattutto della matrice.



Figura Analisi e discussione dei risultati-124: Lesioni lungo l'interfaccia composito substrato e completo distacco del composito dopo 24cicli.

Nella tabella 5-39 sono riportati i valori delle prove effettuate sui provini TS2.

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
TS2_10_01_A	FRCM	Low (pre)	0,39	0,20	F3
TS2_10_01_A'	FRCM	Low (post)	1,19	0,61	F2
TS2_10_01_B	FRCM	High (pre)	0	0	F3
TS2_10_01_B'	FRCM	High (post)	0	0	F2
TS2_10_01_cls	Concrete	-	3,02	1,51	-
TS2_10_02_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
TS2_10_02_A'	FRCM	Low (post)	1,15	0,58	F2
TS2_10_02_B	FRCM	High (pre)	0,38	0,19	F2
TS2_10_02_B'	FRCM	High (post)	0	0	F3
TS2_10_02_cls	Concrete	-	2,42	1,23	-
TS2_10_03_A	FRCM	Low (pre)	0,31	0,16	F3
TS2_10_03_A'	FRCM	Low (post)	0	0	F2
TS2_10_03_B	FRCM	High (pre)	0,39	0,20	F3
TS2_10_03_B'	FRCM	High (post)	0,61	0,31	F2
TS2_10_03_cls	Concrete	-	3,85	1,96	-
TS2_20_01_A	FRCM	Low (pre)	0,69	0,35	F3
TS2_20_01_A'	FRCM	Low (post)	0,41	0,21	F2
TS2_20_01_B	FRCM	High (pre)	0	0	F2*
TS2_20_01_B'	FRCM	High (post)	0,99	0,50	F2
TS2_20_01_cls	Concrete	-	6,02	3,07	-
TS2_20_02_A	FRCM	Low (pre)	0,45	0,23	F3
TS2_20_02_A'	FRCM	Low (post)	1,09	0,55	F2
TS2_20_02_B	FRCM	High (pre)	0,48	0,24	F3

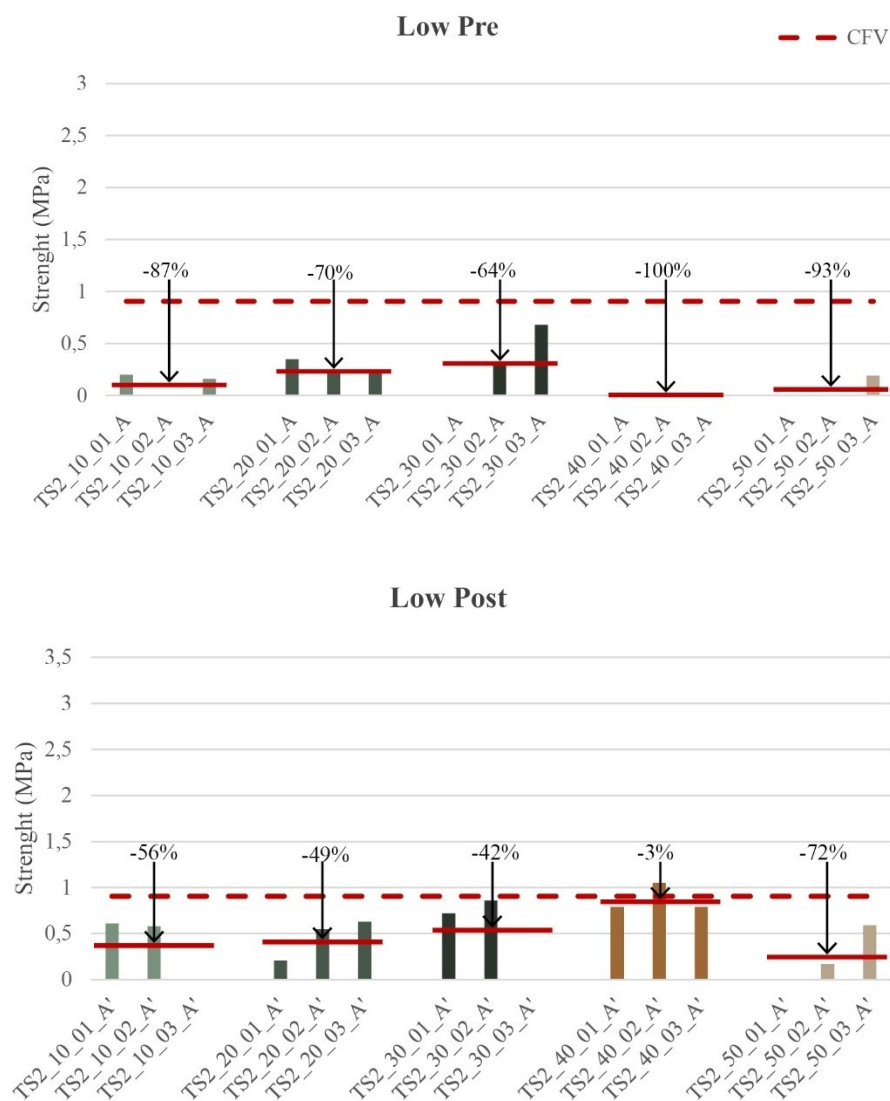
ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
TS2_20_02_B'	FRCM	High (post)	1,29	0,66	F3
TS2_20_02_cls	Concrete	-	4,68	2,34	-
TS2_20_03_A	FRCM	Low (pre)	0,44	0,22	F3
TS2_20_03_A'	FRCM	Low (post)	1,24	0,63	F3
TS2_20_03_B	FRCM	High (pre)	0,84	0,43	F3
TS2_20_03_B'	FRCM	High (post)	1,18	0,60	F3
TS2_20_03_cls	Concrete	-	3,93	2,00	-
TS2_30_01_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
TS2_30_01_A'	FRCM	Low (post)	1,42	0,72	F3
TS2_30_01_B	FRCM	High (pre)	0,64	0,33	F3
TS2_30_01_B'	FRCM	High (post)	1,81	0,92	F2
TS2_30_01_cls	Concrete	-	6,85	3,49	-
TS2_30_02_A	FRCM	Low (pre)	0,62	0,31	F3
TS2_30_02_A'	FRCM	Low (post)	1,68	0,86	F3
TS2_30_02_B	FRCM	High (pre)	0	0	F2*
TS2_30_02_B'	FRCM	High (post)	1,62	0,82	F3
TS2_30_02_cls	Concrete	-	5,02	2,51	-
TS2_30_03_A	FRCM	Low (pre)	1,33	0,68	F2
TS2_30_03_A'	FRCM	Low (post)	0	0	F3
TS2_30_03_B	FRCM	High (pre)	0,28	0,14	F3
TS2_30_03_B'	FRCM	High (post)	0	0	F2*
TS2_30_03_cls	Concrete	-	6,26	3,19	-
TS2_40_01_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
TS2_40_01_A'	FRCM	Low (post)	1,56	0,79	F3
TS2_40_01_B	FRCM	High (pre)	0	0	F3
TS2_40_01_B'	FRCM	High (post)	1,30	0,66	F2

ID	Side	Roughening	Load (KN)	Strenght (MPa)	Failure Mode
TS2_40_01_cls	Concrete	-	3,75	1,87	-
TS2_40_02_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F2
TS2_40_02_A'	FRCM	Low (post)	2,05	1,05	F3
TS2_40_02_B	FRCM	High (pre)	0	0	F2
TS2_40_02_B'	FRCM	High (post)	3,03	1,54	F3
TS2_40_02_cls	Concrete	-	5,21	2,60	-
TS2_40_03_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F3
TS2_40_03_A'	FRCM	Low (post)	1,55	0,79	F2
TS2_40_03_B	FRCM	High (pre)	1,97	1,00	F2
TS2_40_03_B'	FRCM	High (post)	0,34	0,17	F3
TS2_40_03_cls	Concrete	-	3,89	1,98	-
TS2_50_01_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F2
TS2_50_01_A'	FRCM	Low (post)	0	0	F3
TS2_50_01_B	FRCM	High (pre)	0	0	F3
TS2_50_01_B'	FRCM	High (post)	2,12	1,08	F2
TS2_50_01_cls	Concrete	-	3,45	1,76	-
TS2_50_02_A	FRCM	Low (pre)	0	0	F2
TS2_50_02_A'	FRCM	Low (post)	0,33	0,17	F3
TS2_50_02_B	FRCM	High (pre)	0	0	F2
TS2_50_02_B'	FRCM	High (post)	0	0	F3
TS2_50_02_cls	Concrete	-	4,38	2,19	-
TS2_50_03_A	FRCM	Low (pre)	0,37	0,19	F3
TS2_50_03_A'	FRCM	Low (post)	1,15	0,59	F3
TS2_50_03_B	FRCM	High (pre)	0	0	F2
TS2_50_03_B'	FRCM	High (post)	0,32	0,16	F3
TS2_50_03_cls	Concrete	-	3,06	1,56	-

*distacco del composito dal substrato prima di effettuare i test.

Tabella Analisi e discussione dei risultati-52: Risultati TS2.

L'analisi dei grafici riportati in figura 5-95 evidenzia l'andamento della resistenza allo strappo per le diverse tipologie di provino, confrontate con i valori di riferimento (CFV). Poiché il numero di prove per ciascuna configurazione è limitato (tre per tipologia), è stato scelto di rappresentare i risultati individuali per mettere in evidenza la dispersione o l'omogeneità dei dati. Per poter commentare tali risultati, nei grafici, è stata inserita una linea rossa continua che rappresenta la media con l'incremento o decremento percentuale rispetto ai cubetti non trattati (CFV). Infine, i grafici sono divisi in funzione della tipologia di faccia, Low e High, a cui viene aggiunto l'acronimo pre o post a seconda che i risultati si riferiscano a composito applicato prima dell'invecchiamento (pre) oppure dopo l'invecchiamento (post), e Concrete.



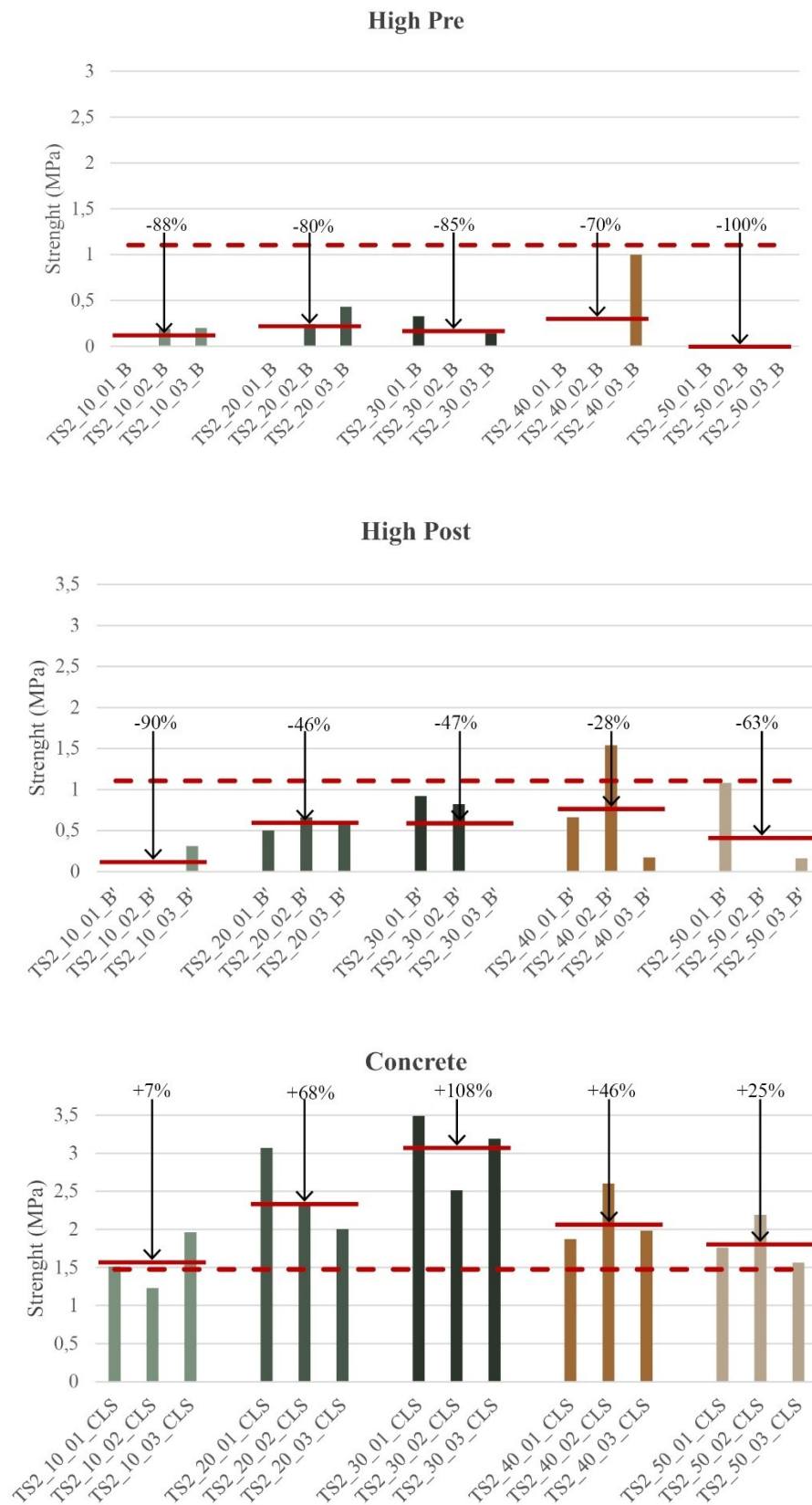


Figura Analisi e discussione dei risultati-125: Risultati resistenza provini TS2_10, TS2_20, TS2_30, TS2_40 e TS2_50 confrontati con quelli non condizionati (CFV).

Nel complesso, si osserva un degrado più marcato rispetto a quanto rilevato per i provini TS1, confermando che l'aumento della concentrazione salina determina un effetto più aggressivo sulla prestazione di aderenza. Già dopo i primi 10-20 cicli, la resistenza allo strappo mostra una riduzione significativa. I provini sottoposti a condizionamento pre, con composito applicato prima dell'invecchiamento del substrato, risultano i più penalizzati. La perdita di adesione è elevata sin dai primi cicli, a causa della danneggiata coesione superficiale, che non consente un efficace ancoraggio della matrice. Questo comportamento indica che anche un sistema inizialmente integro subisce un deterioramento graduale del legame fibra-matrice per effetto della diffusione salina e della perdita di coesione interna alla malta. Inoltre, in diversi campioni sono state osservate fessurazioni localizzate lungo l'interfaccia composito-substrato, più estese e numerose rispetto a quelle riscontrate nei provini TS1. Ciò conferma che la maggiore aggressività della soluzione TS2 accelera la penetrazione dei cloruri favorendo il distacco del rinforzo. I provini post, cioè con composito applicato dopo l'invecchiamento, mantengono una resistenza leggermente superiore, ma anch'essi mostrano un calo drastico, con riduzioni comprese tra il -3% e il -72% per i Low post, e tra il -28% e il -90% per gli High post. Ciò evidenzia il forte danneggiamento superficiale del substrato. Confrontando le due tipologie di superficie, non sono riscontrabili particolari differenze, le facce Low ed High mostrano un comportamento molto simile, indicando che il danneggiamento è così copioso da non variare significativamente in funzione della scabrosità della superficie di adesione tra composito e substrato. Un comportamento differente si registra nei campioni Concrete, che mostrano un incremento significativo della resistenza allo strappo rispetto ai valori iniziali. Questo risultato può essere attribuito a un effetto di sigillatura dei pori indotto dalla soluzione salina, che riduce la porosità e aumenta la coesione del calcestruzzo. Tale fenomeno può determinare un temporaneo miglioramento delle proprietà meccaniche superficiali, pur non escludendo un possibile degrado nel lungo periodo. Nel complesso, i risultati confermano che il condizionamento TS2 rappresenta la condizione più severa tra quelle testate, generando perdite di resistenza già dopo pochi cicli e un degrado progressivo con la durata dell'esposizione. Infine, la notevole variabilità dei dati sperimentali sottolinea l'influenza di fattori locali come la porosità della matrice e la qualità dell'adesione iniziale. Sarà quindi necessario estendere la campagna sperimentale per definire con maggiore accuratezza i parametri di degrado e valutare la reale durabilità del sistema FRCM in ambienti marini o fortemente salini.

Il metodo di rottura prevalente, in tutte le tipologie, è l’F3, cioè il distacco dell’interfaccia fibra-malta. Nel caso di composito non invecchiato aumentano i casi di rottura per distacco interfaccia matrice-substrato (F2). In tutti i casi analizzati non sono avvenute altri tipi di rotture. In fig. 5-96 sono mostrati i risultati di alcune prove a titolo di esempio, mentre in fig.5-97 sono riportati i grafici con le modalità di rottura per questo gruppo.

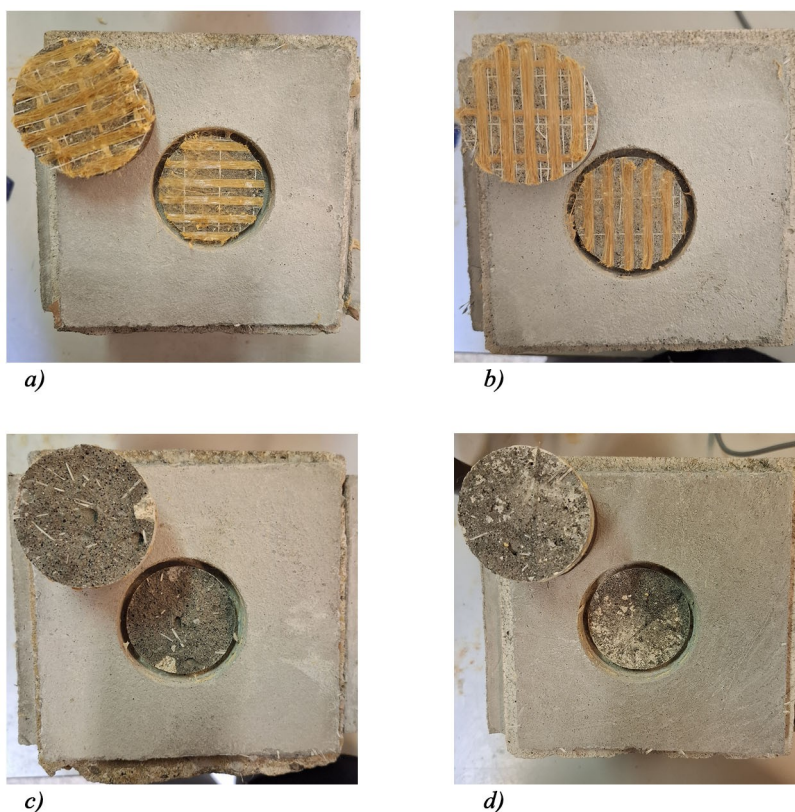


Figura Analisi e discussione dei risultati-126: Tipi di rotture: a) TS2_20_02_A'; b) TS2_10_03_A; c) TS2_50_01_B'; d) TS2_10_02_B.

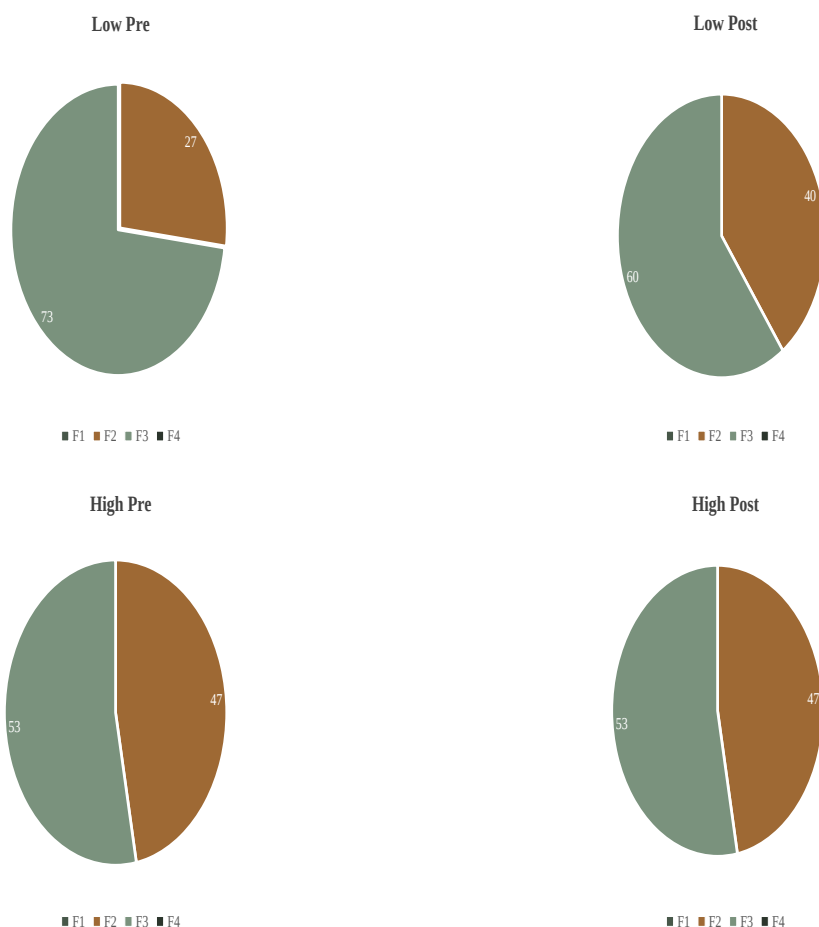
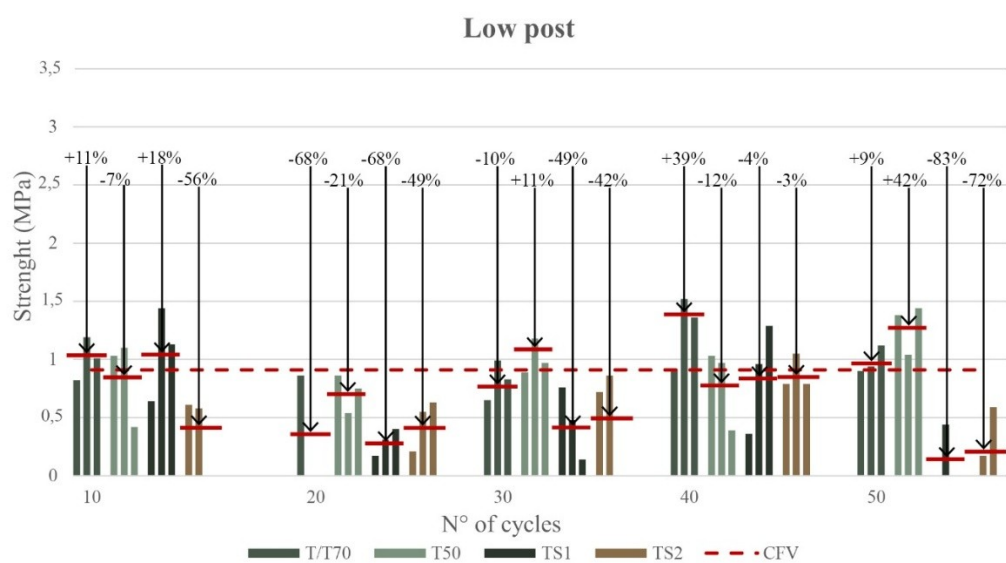
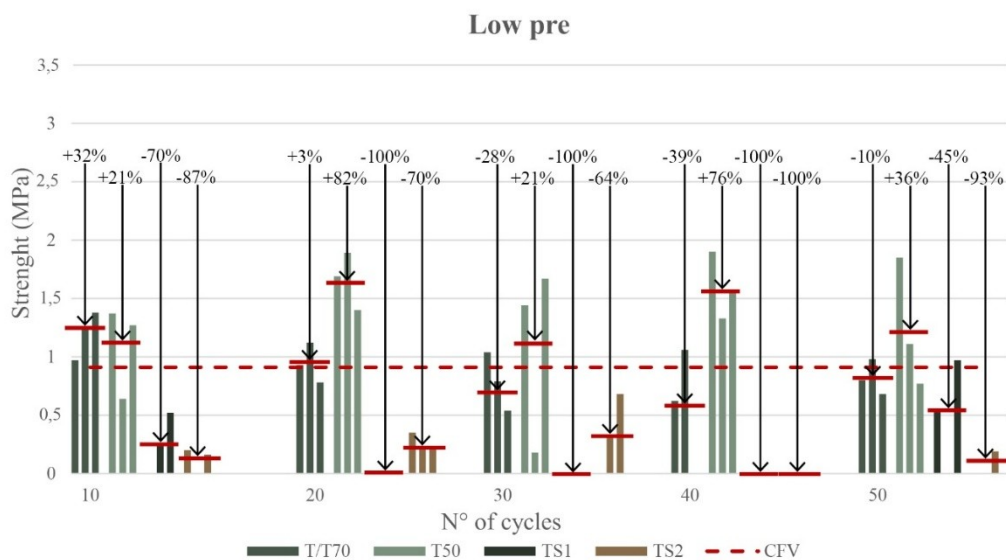


Figura Analisi e discussione dei risultati-127: Tipi di rotture: Low (faccia con livello di rugosità basso) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), High (faccia con livello di rugosità alto) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), provini TS2.

5.6.5 Confronto tra i risultati delle varie tipologie di invecchiamento (cicli caldo umido)

In questa sezione vengono riportati i risultati ottenuti dalle quattro tipologie di invecchiamento accelerato riferite ai cicli caldo-umido, riportati in dettaglio nelle sezioni precedenti. In fig. 5-98 vengono confrontati i valori di: i) resistenza allo strappo su facce con bassa rugosità e composito invecchiato (Low pre); ii) resistenza allo strappo su facce con bassa rugosità e composito non invecchiato (Low post); iii) resistenza allo strappo su facce con alta rugosità e composito invecchiato (High pre); iv) resistenza allo strappo su facce con alta rugosità e composito non invecchiato (High post); v) di resistenza allo strappo di facce di solo substrato (Concrete). La

linea tratteggiata in rosso, presente nei vari grafici, rappresenta il valore medio dei provini che non trattati (CFV).



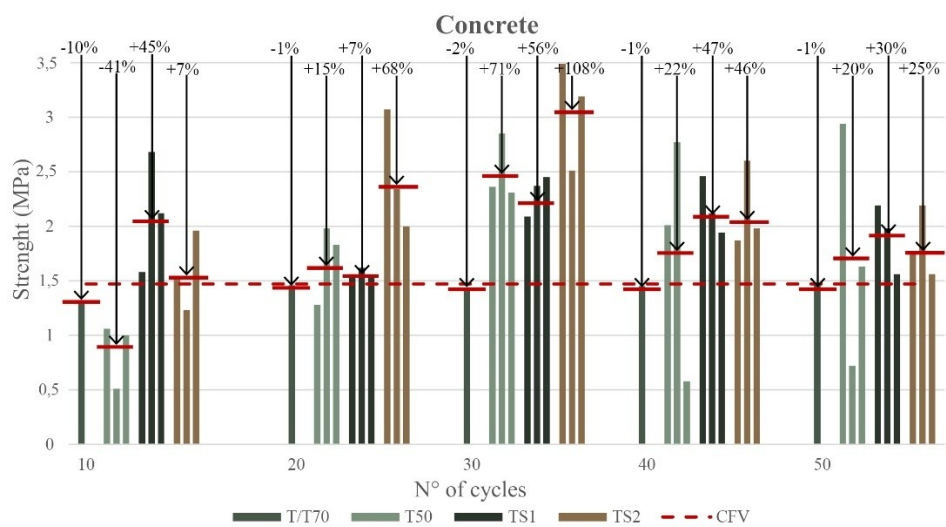
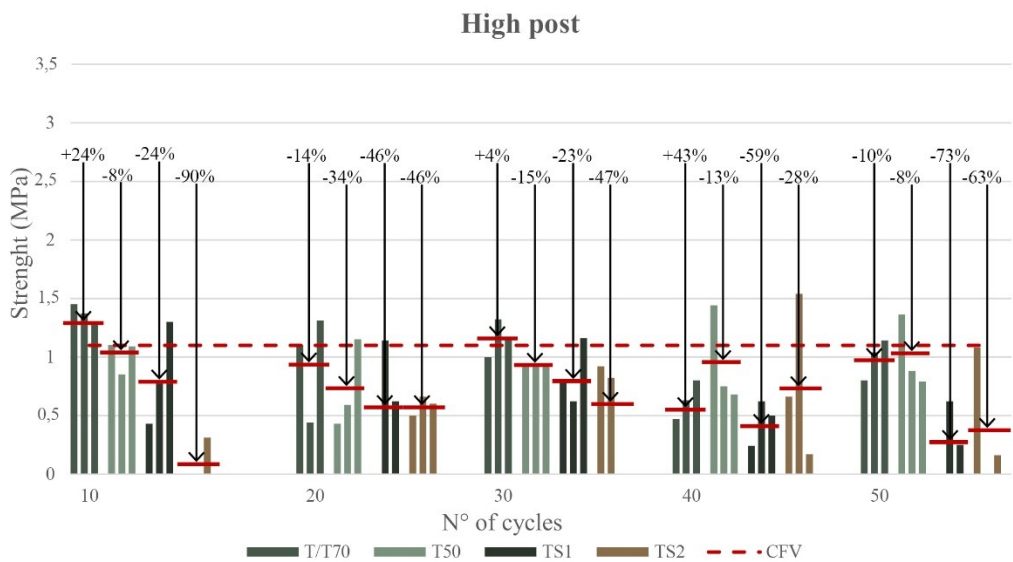
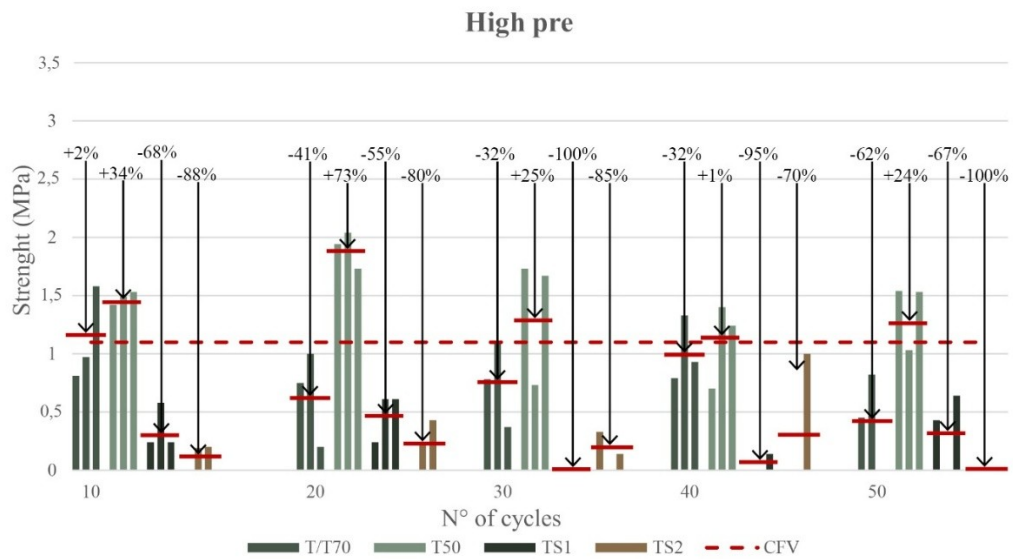


Figura Analisi e discussione dei risultati-128: Proprietà Meccaniche dei differenti tipi di invecchiamento (cicli caldo umido).

L'analisi complessiva dei risultati ottenuti per le diverse configurazioni di invecchiamento dei cicli caldo-umido mette in evidenza un comportamento eterogeneo. I cicli, caratterizzati da alternanze di temperature e umidità elevate, determinano fenomeni di espansione e ritiro differenziale tra la matrice e il substrato, che nel tempo possono compromettere la coesione superficiale e l'adesione del composito. Nel complesso, i valori medi di resistenza allo strappo risultano inferiori a quelli dei campioni non condizionati (CFV), con perdite significative. In particolare, la riduzione di resistenza è generalmente compresa tra il -3% e il -100%, indicando che questo tipo di condizionamento produce un degrado significativo. Fatta eccezione dei provini T50, che mostrano le prestazioni migliori, con incrementi compresi tra il +1% e il +82%. Questo risultato è attribuibile al fatto che il condizionamento a 50 °C risulta meno aggressivo, e il fenomeno predominante è il riempimento dei pori da parte dell'acqua normale, che determina un temporaneo aumento della coesione interna e della resistenza allo strappo. Un comportamento analogo si osserva anche nei provini T/T70, che fino a circa 20 cicli mostrano un incremento prestazionale simile, per poi evidenziare una graduale riduzione di resistenza al proseguire dei cicli, quando i fenomeni di essiccamento e microfessurazione iniziano a prevalere.

Nel complesso, nei provini con superficie a bassa rugosità (Low), le perdite di resistenza risultano più pronunciate, soprattutto per i campioni pre, nei quali il composito è stato applicato prima dell'invecchiamento, con una dispersione significativa dei valori, segno di una adesione più sensibile alla microfessurazione superficiale e alla formazione di condensa all'interfaccia. Nei provini Low post, la resistenza allo strappo risulta maggiore rispetto al caso di composito invecchiato, suggerendo una progressiva decoesione della matrice dovuta alla ripetuta immersione e asciugatura. I provini con superficie ad alta rugosità (High) mostrano invece un comportamento migliore. Le configurazioni High pre presentano perdite significative, ma se confrontate con i risultati dei Low pre, si ha un discreto miglioramento, ciò dovuto al migliore ancoraggio meccanico tra matrice e substrato. Anche i provini High post risultano meno penalizzati rispetto alle superfici Low post. Ciò conferma che la preparazione superficiale del supporto rappresenta un parametro determinante nel limitare gli effetti dei cicli caldo-umido. I campioni di solo calcestruzzo (Concrete) mostrano nel complesso un aumento della resistenza rispetto ai CFV. L'esposizione ai cicli sembra aver determinato un effetto di stabilizzazione o

densificazione superficiale, con un comportamento più omogeneo rispetto alle superfici con composito, dove le tensioni interfaccia fibra-matrice e composito-substrato giocano un ruolo più critico.

5.7 Test di compressione e determinazione del modulo elastico

In questo paragrafo vengono mostrati e discussi i risultati dei test di determinazione del modulo elastico e di resistenza a compressione ultima, su provini cilindrici in calcestruzzo, ricavati dai provini cubici sottoposti ad invecchiamento accelerato. I provini cilindrici prima di essere testati sono sottoposti a rettifica per rispettare il rapporto h/d pari a 1.2, comportando l'eliminazione delle due estremità della carota. I valori qui di seguito presentati, pertanto, rispecchiano il comportamento interno del materiale epurato da possibili variazioni della parte superficiale, oltre i primi 2,5 cm per ciascuna estremità.

Le analisi sono divise in 8 gruppi a seconda dell'invecchiamento accelerato subito e poi confrontate tra di loro. I risultati sono suddivisi in due macrocategorie; Ambiente Salino e Cicli caldo-umido. Per ogni gruppo vengono riportati anche i risultati dei test ultrasonici effettuati sulle carote e confrontati con i risultati dei medesimi test effettuati sui cubetti prima dell'invecchiamento accelerato.

5.7.1 Risultati provini CFV

Di seguito vengono riportati i risultati dei provini non trattati, denominati CFV.

Prima dei test meccanici sono state eseguite prove ultrasoniche, confrontate con quelle effettuate sugli stessi provini prima del prelievo delle carote, al fine di individuare eventuali variazioni nella velocità di propagazione dell'onda (V_{us}). In fig. 5-99 vengono mostrati i risultati ed il confronto sopra detto. I risultati mostrano una diminuzione del 4%, segnale di una lieve perdita di compattezza interna del materiale. Nei paragrafi seguenti, per il confronto con i provini che hanno subito un invecchiamento accelerato, i valori delle prove ultrasoniche saranno confrontate con quelle dei provini CFV-carote (POST).

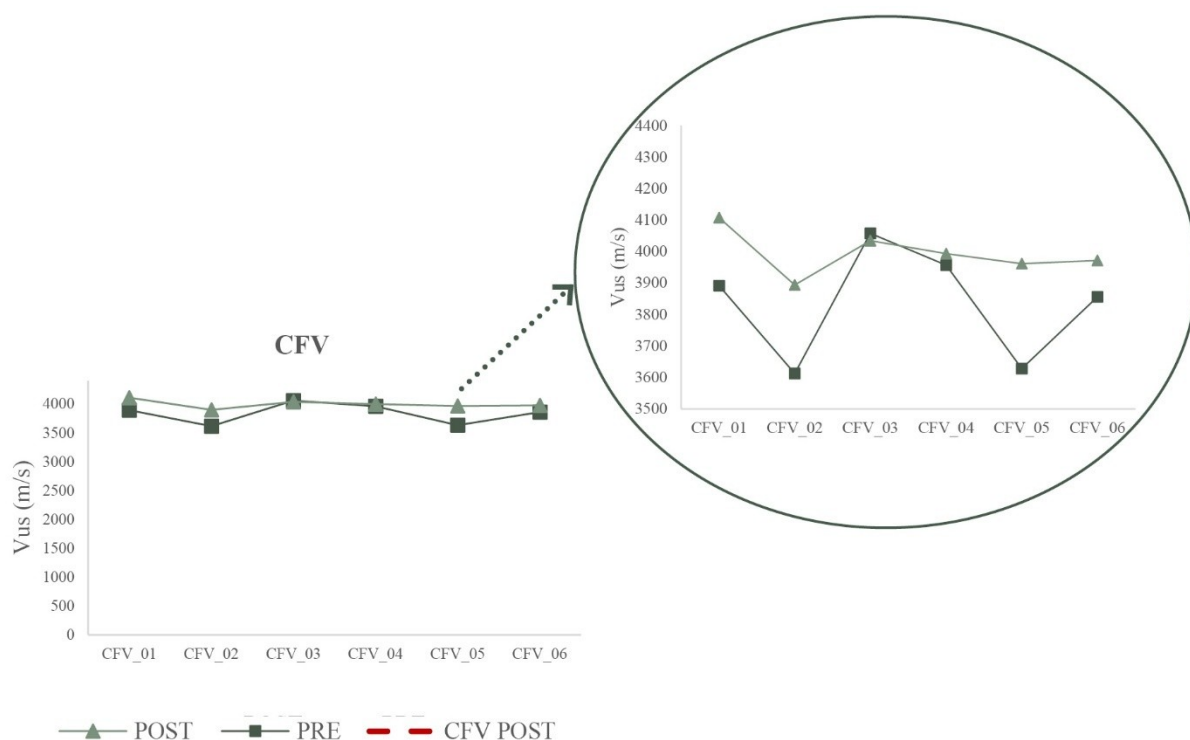


Figura Analisi e discussione dei risultati-129: Confronto test ultrasuoni provini CFV su cubetti (PRE) e su carote (POST).

In tabella 5-40 sono riportati i risultati per ogni provino, indicando il valore del modulo elastico sperimentale e da normativa (NTC 2018 11.2.5) e la resistenza ultima a compressione.

ID	f_c (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)*
CFV_01	16	-	25503
CFV_02	24	-	28782
CFV_03	23	-	28099
CFV_04	21	28175	27421
CFV_05	27	30133	29598
CFV_06	26	29941	29324
Media	23	-	28121
COV	16%	-	5%

*modulo elastico calcolato secondo normativa NTC 2018 11.2.5

Tabella Analisi e discussione dei risultati-53: Valori resistenza ultima a compressione e modulo elastico CFV.

In tabella non sono presenti i valori del modulo elastico dei provini CFV_01; CFV_02 e CFV_03 poiché utilizzati per la determinazione della resistenza a compressione usata come base per i test di determinazione del modulo elastico dei rimanenti provini.

In fig. 5-100 vengono mostrati i valori di resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali confrontati con i valori del modulo elastico istantaneo, ricavato con formula da normativa (NTC 2018 11.2.5), al fine di mostrare quanto i dati ricavati per via sperimentale discostano con quelli ideali da normativa. Le differenze risultano contenute.

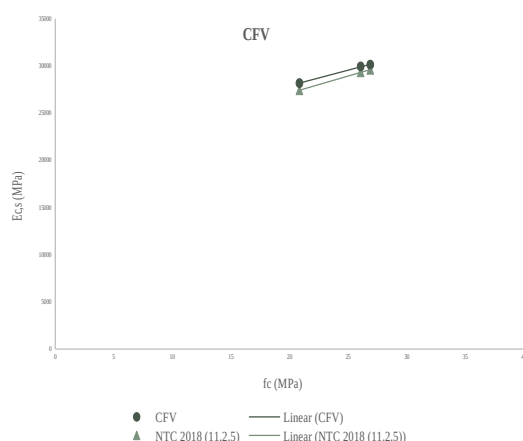


Figura Analisi e discussione dei risultati-130: Confronto resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali confrontati con modulo elastico calcolato come da normativa NTC2018 11.2.5. dei provini CFV.

Questi risultati mostrano valori di resistenza a compressione compresi tra 21 e 27 MPa, con un modulo elastico coerente con i valori teorici. La loro risposta meccanica rappresenta il comportamento del materiale non degradato.

5.8 Risultati Ambiente Salino

5.8.1 Risultati provini CS1-CFS1-CS3-CFS3

Le prove effettuate sui provini CS1–CFS1 (1000 ore di immersione) e CS3–CFS3 (3000 ore di immersione) in soluzione salina secondo la norma ASTM D1141-98 hanno permesso di valutare gli effetti dell'esposizione prolungata sull'integrità meccanica del calcestruzzo. Prima dei test meccanici sono state eseguite prove ultrasoniche, confrontate con quelle effettuate sugli stessi provini prima dell'invecchiamento, al fine di individuare eventuali variazioni nella velocità di propagazione dell'onda (V_{us}). In fig. 5-101 ed in fig. 5-102 vengono mostrati i risultati ed il confronto sopra detto. I risultati mostrano un incremento del 2% per i provini CS1–CFS1 e del 5% per i provini CS3–CFS3, segnale di una maggiore compattezza interna del materiale dovuta probabilmente alla cristallizzazione dei sali nei pori e alla conseguente riduzione della porosità capillare.

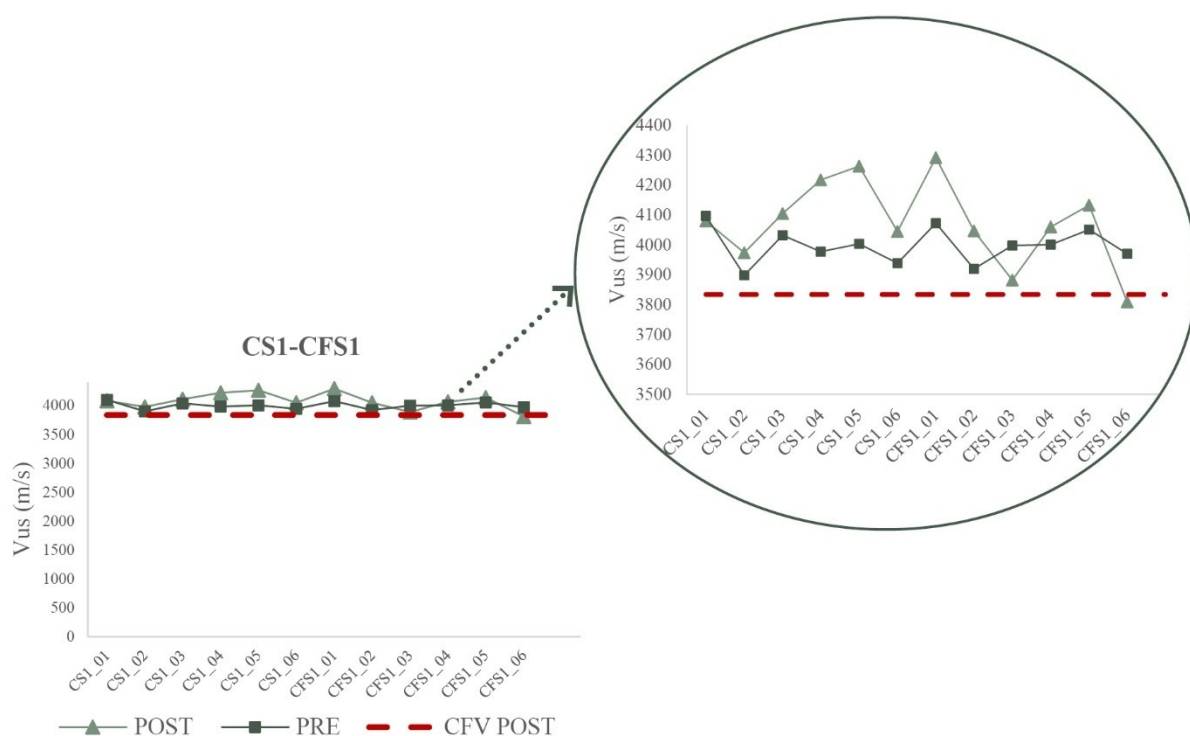


Figura Analisi e discussione dei risultati-131: Confronto test ultrasuoni provini CS1-CFS1 prima e dopo l'invecchiamento accelerato.

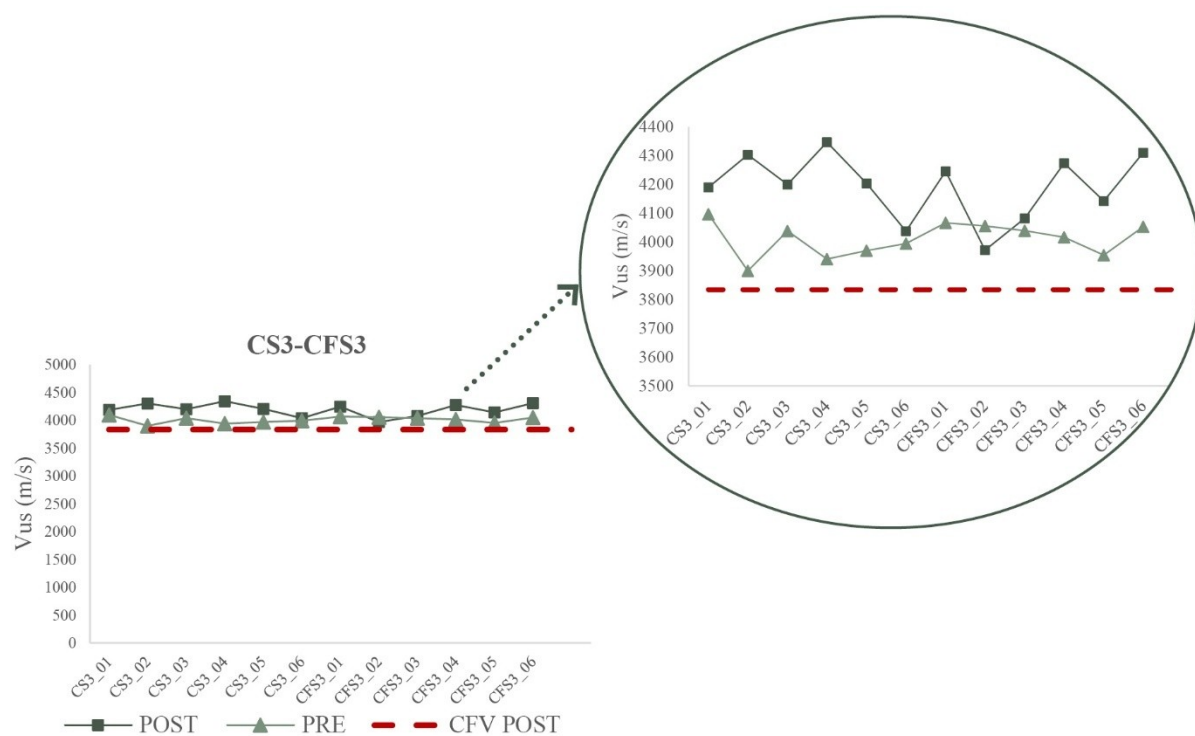


Figura Analisi e discussione dei risultati-132: Confronto test ultrasuoni provini CS3-CFS3 prima e dopo l'invecchiamento accelerato.

In tabella 5-41 e 5-42 sono riportati i risultati per ogni provino, indicando il valore del modulo elastico sperimentale e da normativa e la resistenza ultima a compressione.

ID	f_c (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)*
CS1_01	24	-	28712
CS1_02	29	-	30223
CS1_03	25	-	28999
CS1_04	36	33007	32297
CS1_05	20	26733	27274
CS1_06	32	30929	31073
CFS1_01	25	-	28887
CFS1_02	25	-	28954
CFS1_03	24	-	28646

ID	f_c (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)*
CFS1_04	33	33105	31440
CFS1_05	25	28229	28962
CFS1_06	21	27812	27577
Media	27	29969	29420
COV	17%	8%	5%

*modulo elastico calcolato secondo normativa NTC 2018 11.2.5

Tabella Analisi e discussione dei risultati-54: Valori resistenza ultima a compressione e modulo elastico CS1 e CFS1.

ID	f_c (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)*
CS3_01	25	-	29024
CS3_02	31	-	30997
CS3_03	21	-	27439
CS3_04	33	31518	31518
CS3_05	23	28409	28089
CS3_06	34	31092	31867
CFS3_01	32	-	31241
CFS3_02	25	-	28901
CFS3_03	23	-	28087
CFS3_04	30	29057	30604
CFS3_05	25	29765	29102
CFS3_06	38	32226	32962
Media	28	30312	29986
COV	19%	4%	6%

*modulo elastico calcolato secondo normativa NTC 2018 11.2.5

Tabella Analisi e discussione dei risultati-55: Valori resistenza ultima a compressione e modulo elastico CS3 e CFS3.

In tabella non sono presenti i valori del modulo elastico dei provini CS1_01; CS1_02; CS1_03; CFS1_01; CFS1_02; CFS1_03; CS3_01; CS3_02; CS3_03; CFS3_01; CFS3_02; CFS3_03 poiché utilizzati per calcolare la resistenza a compressione usata come base per i test di determinazione del modulo elastico dei rimanenti provini.

In fig. 5-103 vengono mostrati i valori di resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali, per ogni tipo, confrontati con i valori del modulo elastico istantaneo ricavato con formula da normativa (NTC 2018 11.2.5), al fine di mostrare quanto i dati ricavati per via sperimentale discostano con quelli ideali da normativa. Le differenze risultano contenute, a conferma che il materiale, pur sottoposto a condizionamento prolungato, mantiene una buona integrità strutturale e un comportamento elastico coerente con le previsioni normative.

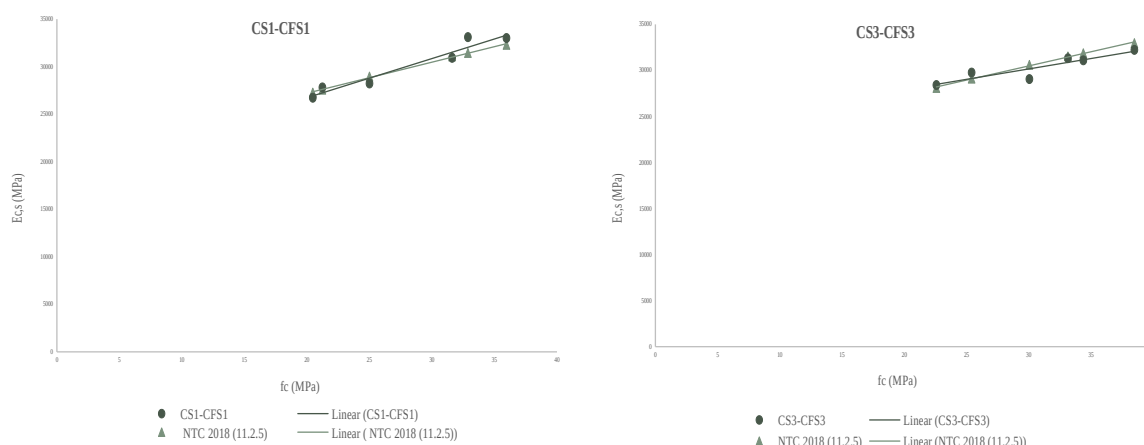


Figura Analisi e discussione dei risultati-133: Confronto resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali confrontati con modulo elastico calcolato come da normativa NTC2018 11.2.5. dei provini CS1-CFS1 e CS3-CFS3.

Le prove di compressione e modulo elastico hanno evidenziato un comportamento coerente con le osservazioni ultrasoniche. I valori sperimentali del modulo elastico risultano in linea con quelli calcolati secondo la normativa NTC 2018 (par. 11.2.5).

In fig. 5-104 vengono confrontati i valori medi di resistenza a compressione delle due tipologie di invecchiamento (1000 e 3000 ore) e dei provini non trattati. si osserva un incremento del 17% per i provini immersi per 1000 ore e del 22% per quelli immersi per 3000 ore. Questo

incremento conferma che l'immersione in soluzione salina ha indotto un effetto di densificazione superficiale e un miglioramento temporaneo della capacità resistente.

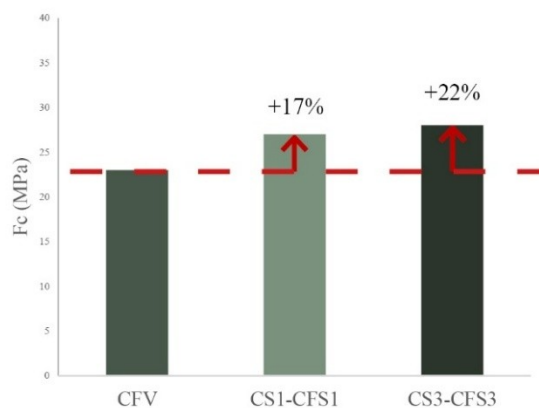


Figura Analisi e discussione dei risultati-134: Confronto valori medi resistenza a compressione CFV; CS1-CFS1 e CS3-CFS3.

In fig. 5-105 vengono messi a confronto i valori di resistenza a compressione e modulo elastico dei provini non trattati (CFV) e dei provini immersi in soluzione per 1000 e 3000 ore (CS1-CFS1; CS3-CFS3). Nel complesso, i risultati indicano che l'immersione in soluzione ASTM D1141-98 non ha comportato fenomeni di degrado significativo, ma al contrario ha determinato un moderato incremento delle prestazioni meccaniche, proporzionale al tempo di esposizione. Questo effetto è da attribuire al riempimento dei pori capillari da parte dei sali cristallizzati e al conseguente aumento della compattezza del materiale.

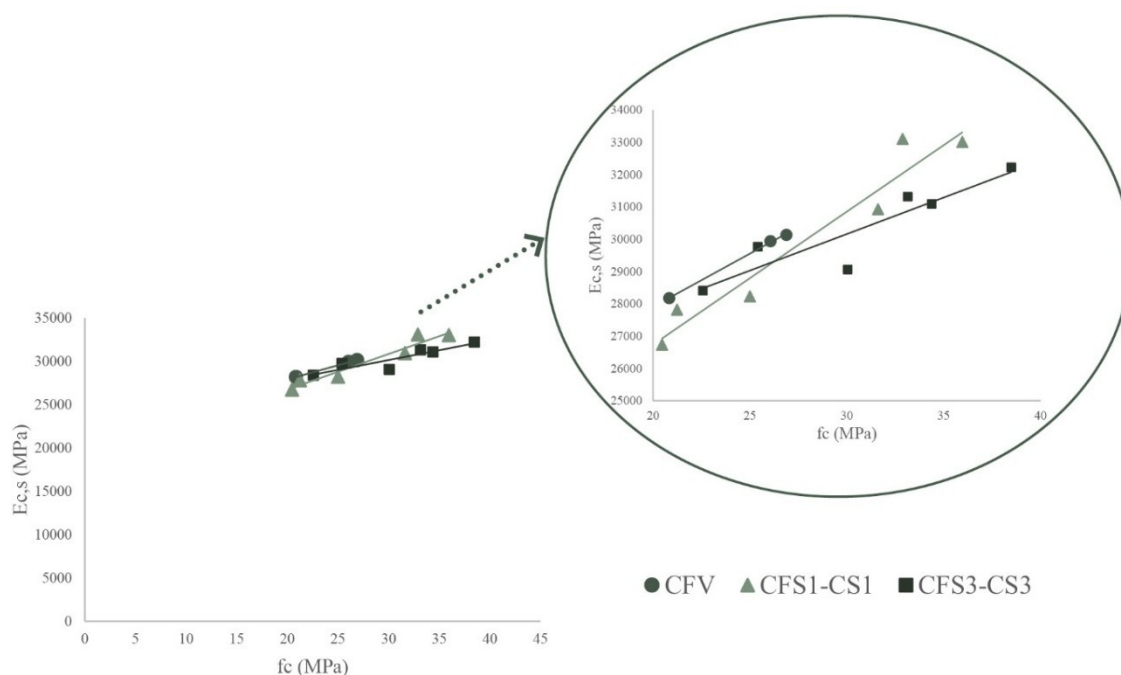


Figura Analisi e discussione dei risultati-135: Confronto valori resistenza a compressione e modulo elastico dei provini CFV; CS1-CFS1 e CS3-CFS3.

Il modulo elastico rimane vicino ai valori teorici e non evidenzia scostamenti significativi, indicando che l'esposizione studiata non induce danni microstrutturali rilevabili. Il comportamento complessivo è quindi stabile.

5.8.2 Risultati provini SolL1000 e SolL3000

Di seguito vengono riportati i risultati dei provini immersi per 1000 e 3000 ore in soluzione composta da acqua deionizzata, cloruro di sodio all'4% (NaCl) e sodio solfato decaidrato al 2% (Na₂SO₄), denominati SolL1000 (1000 ore) e SolL3000 (3000 ore).

Prima dei test meccanici sono state eseguite prove ultrasoniche, confrontate con quelle effettuate sugli stessi provini prima dell'invecchiamento, al fine di individuare eventuali variazioni nella velocità di propagazione dell'onda (V_{us}). In fig. 5-106 ed in fig. 5-107 vengono mostrati i risultati ed il confronto sopra detto. I risultati mostrano un abbassamento del -6% per i provini SolL1000 e del -5% per i provini SolL3000, segnale di una minor compattezza interna del materiale dovuta probabilmente all'aggressività della soluzione di immersione che ha danneggiato il calcestruzzo.

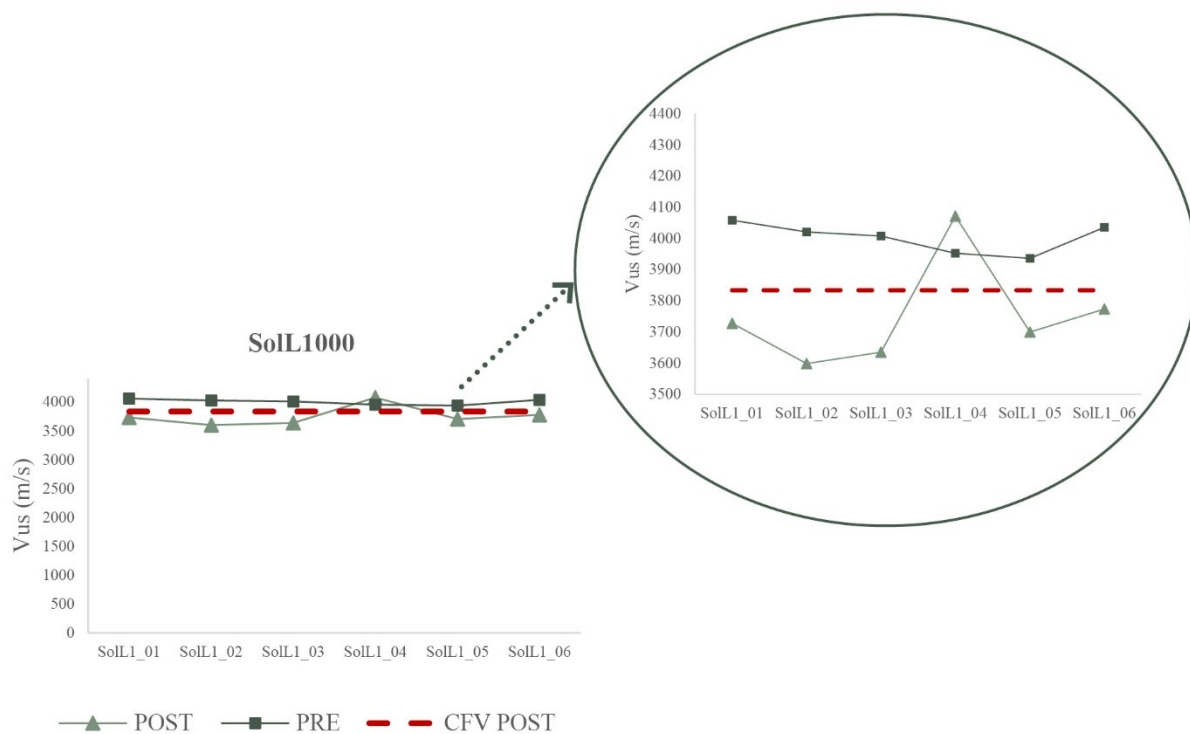


Figura Analisi e discussione dei risultati-136: Confronto test ultrasuoni provini SolL1000 prima e dopo l'invecchiamento accelerato.

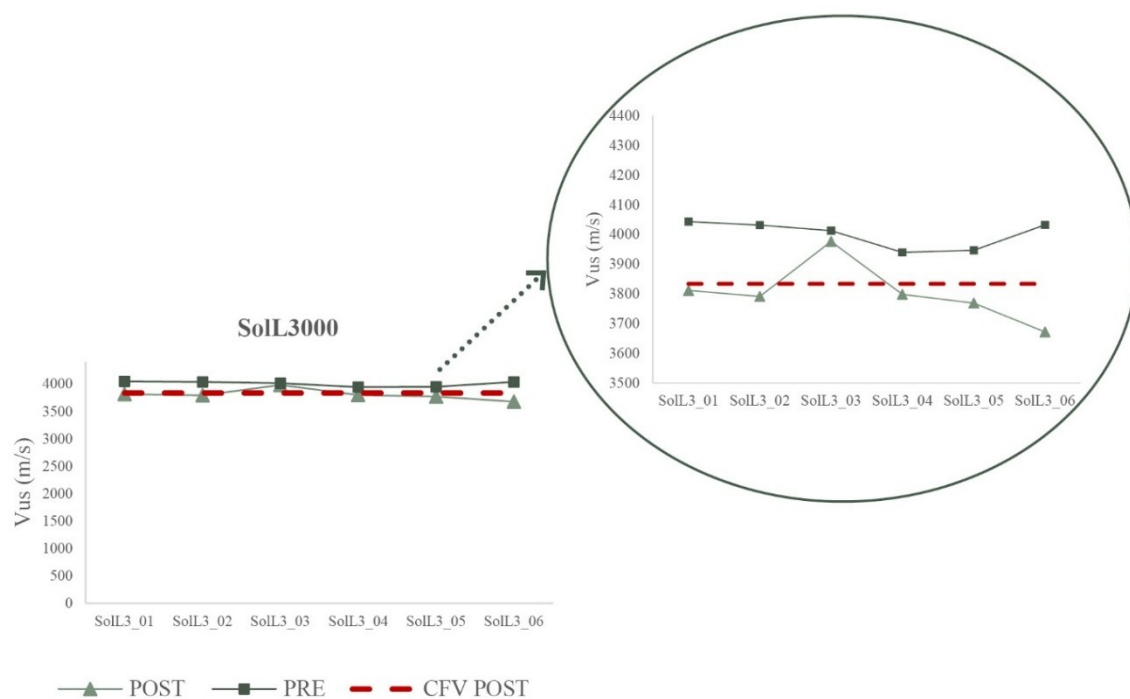


Figura Analisi e discussione dei risultati-137: Confronto test ultrasuoni provini SolL3000 prima e dopo l'invecchiamento accelerato.

In tabella 5-43 e 5-44 sono riportati i risultati per ogni provino, indicando il valore del modulo elastico e la resistenza ultima a compressione.

ID	f_c (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)*
SolL1000_01	31	31514	30969
SolL1000_02	23	-	28102
SolL1000_03	28	29801	29918
SolL1000_04	24	-	28595
SolL1000_05	22	-	27886
SolL1000_06	28	29613	29825
Media	26	-	29216
COV	13%	-	4%

*modulo elastico calcolato secondo normativa *NTC 2018 11.2.5*

Tabella Analisi e discussione dei risultati-56: Valori resistenza ultima a compressione e modulo elastico SolL1000.

ID	f_c (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)*
SolL3000_01	32	31598	31243
SolL3000_02	29	-	30341
SolL3000_03	34	30618	31718
SolL3000_04	27	29894	29725
SolL3000_05	28	-	29813
SolL3000_06	29	-	30376
Media	30	-	30536
COV	8%	-	2%

*modulo elastico calcolato secondo normativa *NTC 2018 11.2.5*

Tabella Analisi e discussione dei risultati-57: Valori resistenza ultima a compressione e modulo elastico SolL3000.

In tabella non sono presenti i valori del modulo elastico dei provini SolL1000_02; SolL1000_04; SolL1000_05; SolL3000_02; SolL3000_05; SolL3000_06; poiché utilizzati per calcolare la resistenza a compressione usata come base per i test di determinazione del modulo elastico dei rimanenti provini.

In fig. 5-108 vengono mostrati i valori di resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali, per ogni tipo, confrontati con i valori del modulo elastico istantaneo ricavato con formula da normativa (NTC 2018 11.2.5), al fine di mostrare quanto i dati ricavati per via sperimentale discostano con quelli ideali da normativa. Le differenze risultano contenute, a conferma che il materiale, pur sottoposto a condizionamento prolungato, mantiene una buona integrità strutturale e un comportamento elastico coerente con le previsioni normative.

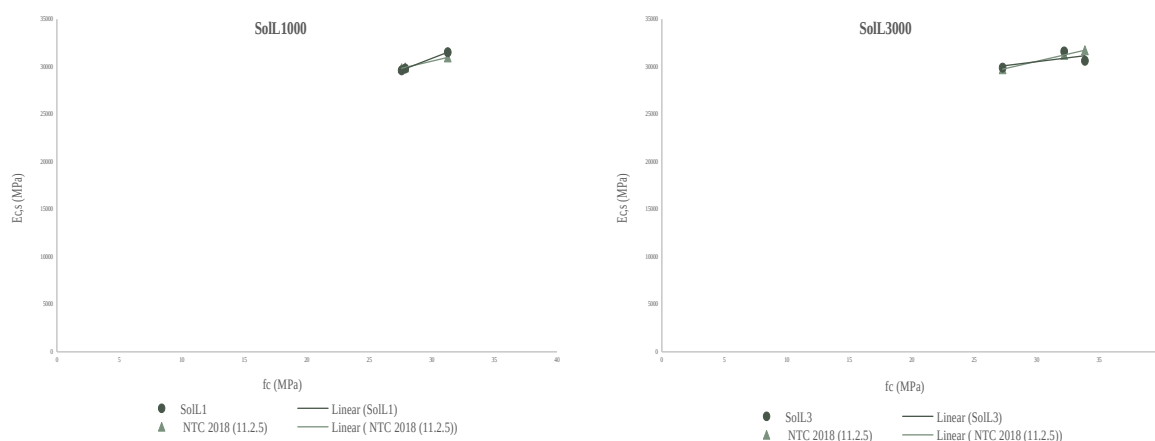


Figura Analisi e discussione dei risultati-138: Confronto resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali confrontati con modulo elastico calcolato come da normativa NTC2018 11.2.5. dei provini SolL1000 e SolL3000.

Complessivamente, i risultati evidenziano che i valori sperimentali del modulo elastico sono affini a quelli calcolati secondo normativa, quelli che presentano le maggiori differenze sono quelli dei provini soggetti a 3000 ore di invecchiamento.

In fig. 5-109 vengono confrontati i valori medi di resistenza a compressione delle due tipologie di invecchiamento (1000 e 3000 ore) e dei provini non trattati. si osserva un incremento del 13% per i provini immersi per 1000 ore e del 30% per quelli immersi per 3000 ore rispetto ai campioni non trattati. Questo incremento conferma che l'immersione in soluzione salina ha

indotto un effetto di densificazione superficiale e un miglioramento temporaneo della capacità resistente.

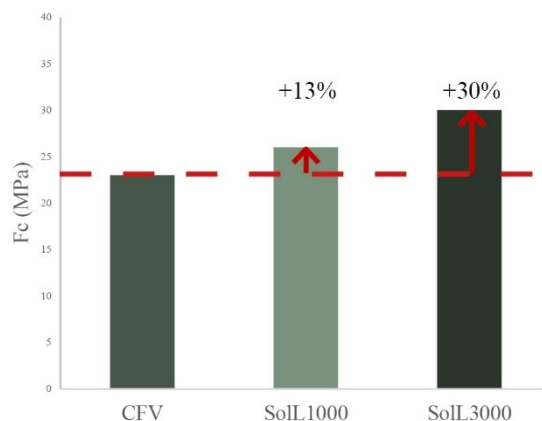


Figura Analisi e discussione dei risultati-139: Confronto valori medi resistenza a compressione CFV; SolL1000 e SolL3000.

In fig. 5-110 vengono messi a confronto i valori di resistenza a compressione e modulo elastico dei provini non trattati (CFV) e dei provini immersi in soluzione per 1000 e 3000 ore (SolL1000 e SolL3000). Nel complesso, i risultati indicano che l'immersione in soluzione non ha comportato fenomeni di degrado significativo, ma al contrario ha determinato un moderato incremento delle prestazioni meccaniche. Questo effetto è da attribuire al riempimento dei pori capillari da parte dei sali cristallizzati e al conseguente aumento della compattezza del materiale.

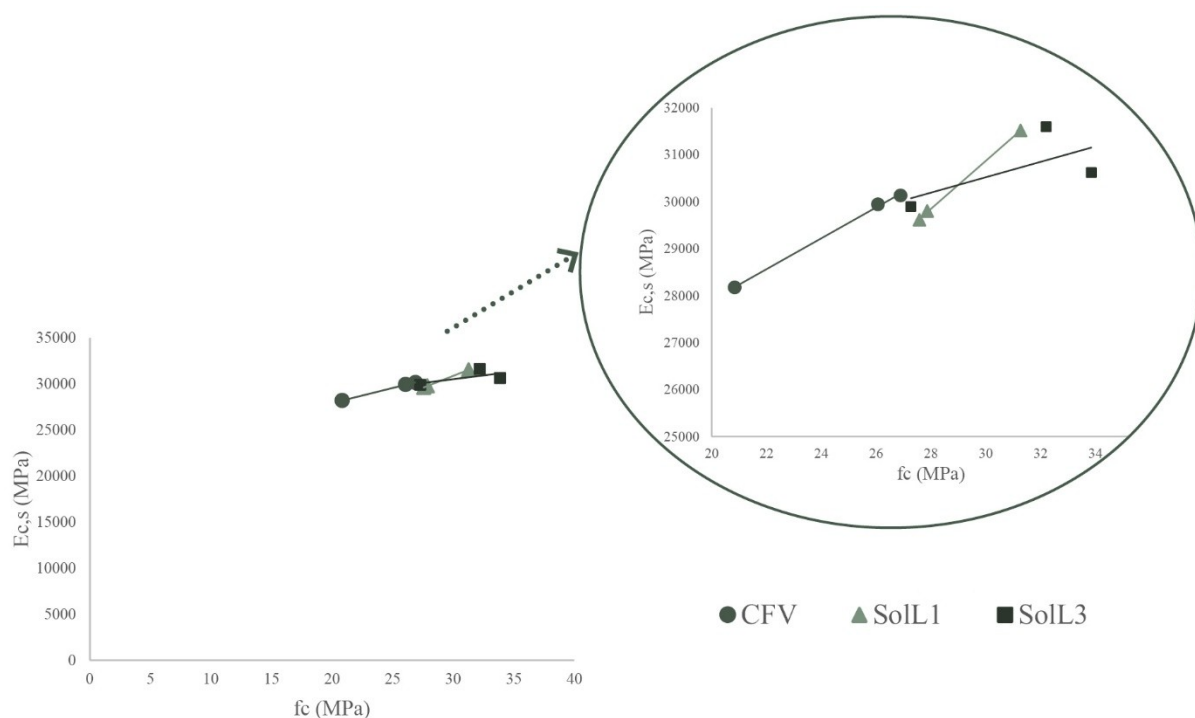


Figura Analisi e discussione dei risultati- 140: Confronto valori resistenza a compressione e modulo elastico dei provini CFV; SolL1000 e SolL3000.

Il confronto tra modulo elastico teorico e sperimentale mostra scostamenti più marcati rispetto al caso precedente, soprattutto a 3000 ore: ciò indica che, pur aumentando la resistenza ultima, la rigidezza interna risulta compromessa.

5.8.3 Risultati provini SolS1000 e SolS3000

Di seguito vengono riportati i risultati dei provini immersi per 1000 e 3000 ore in soluzione composta da acqua deionizzata, cloruro di sodio all'8% (NaCl) e sodio solfato decaidrato al 4% (Na_2SO_4), denominati SolS1000 (1000 ore) e SolS3000 (3000 ore).

Prima dei test meccanici sono state eseguite prove ultrasoniche, confrontate con quelle effettuate sugli stessi provini prima dell'invecchiamento, al fine di individuare eventuali variazioni nella velocità di propagazione dell'onda (V_{us}). In fig. 5-111 ed in fig. 5-112 vengono mostrati i risultati ed il confronto sopra detto. I risultati mostrano un abbassamento del -6% per i

provini SolS1000 e del -3% per i provini SolS3000, segnale di una minor compattezza interna del materiale dovuta probabilmente all'aggressività della soluzione di immersione che ha danneggiato il calcestruzzo.

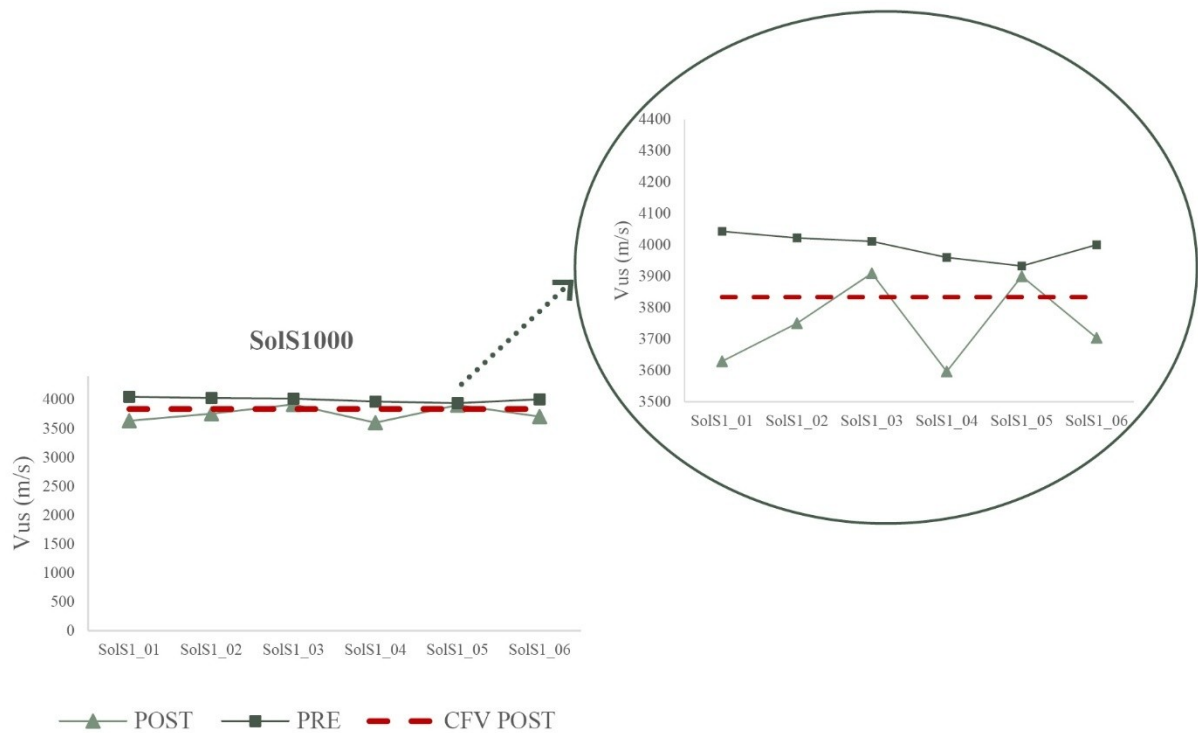


Figura Analisi e discussione dei risultati-141: Confronto test ultrasuoni provini SolS1000 prima e dopo l'invecchiamento accelerato.

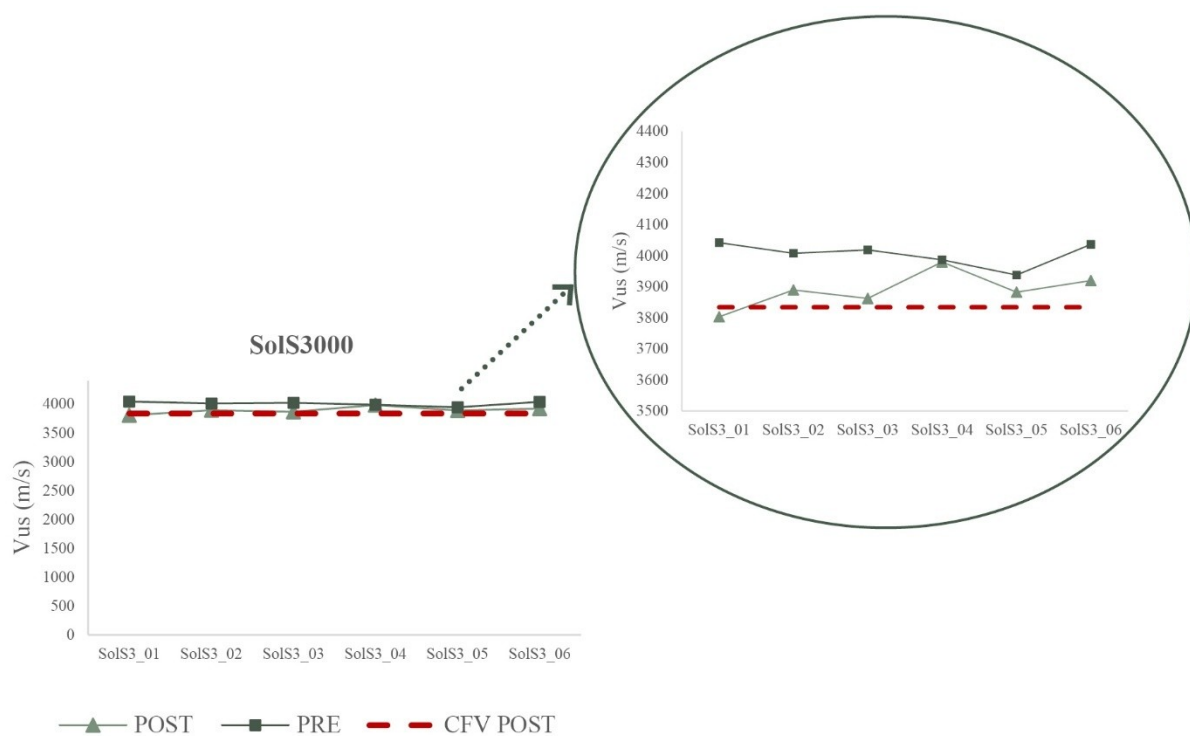


Figura Analisi e discussione dei risultati-142: Confronto test ultrasuoni provini SolS3000 prima e dopo l'invecchiamento accelerato.

In tabella 5-45 e 5-46 sono riportati i risultati per ogni provino, indicando il valore del modulo elastico e la resistenza ultima a compressione.

ID	f_c (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)*
SolS1_01	28	-	29816
SolS1_02	28	31004	29861
SolS1_03	27	-	29771
SolS1_04	24	-	28437
SolS1_05	23	28471	28362
SolS1_06	25	29613	28913
Media	26	-	29192
COV	7%	-	2%

*modulo elastico calcolato secondo normativa *NTC 2018 11.2.5*

Tabella Analisi e discussione dei risultati-58: Valori resistenza ultima a compressione e modulo elastico SolS1000.

ID	f_c (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)*
SolS3_01	26	-	29317
SolS3_02	34	30466	31657
SolS3_03	30	30045	30569
SolS3_04	27	-	29776
SolS3_05	31	30767	30986
SolS3_06	29	-	30240
Media	30	-	30424
COV	8%	-	3%

*modulo elastico calcolato secondo normativa NTC 2018 11.2.5

Tabella Analisi e discussione dei risultati-59: Valori resistenza ultima a compressione e modulo elastico SolS3000.

In tabella non sono presenti i valori del modulo elastico dei provini SolS1_01; SolS1_03; SolS1_04; SolS3_01; SolS3_04; SolS3_06 poiché utilizzati per calcolare la resistenza a compressione usata come base per i test di determinazione del modulo elastico dei rimanenti provini.

In fig. 5-113 vengono mostrati i valori di resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali, per ogni tipo, confrontati con i valori del modulo elastico istantaneo ricavato con formula da normativa (NTC 2018 11.2.5), al fine di mostrare quanto i dati ricavati per via sperimentale discostano con quelli ideali da normativa. Le differenze risultano aumentare rispetto ai casi precedenti rimanendo però sempre abbastanza contenute, il materiale, sottoposto a condizionamento prolungato più aggressivo, inizia a mostrare segni di poca coerenza tra modulo elastico effettivo e modulo da normativa, pur continuando a mantenere una buona integrità strutturale. Questi scostamenti del modulo elastico sperimentale rispetto a quello teorico, soprattutto per SolS3000, segnalano un progressivo degrado microstrutturale, anche quando la resistenza appare ancora elevata.

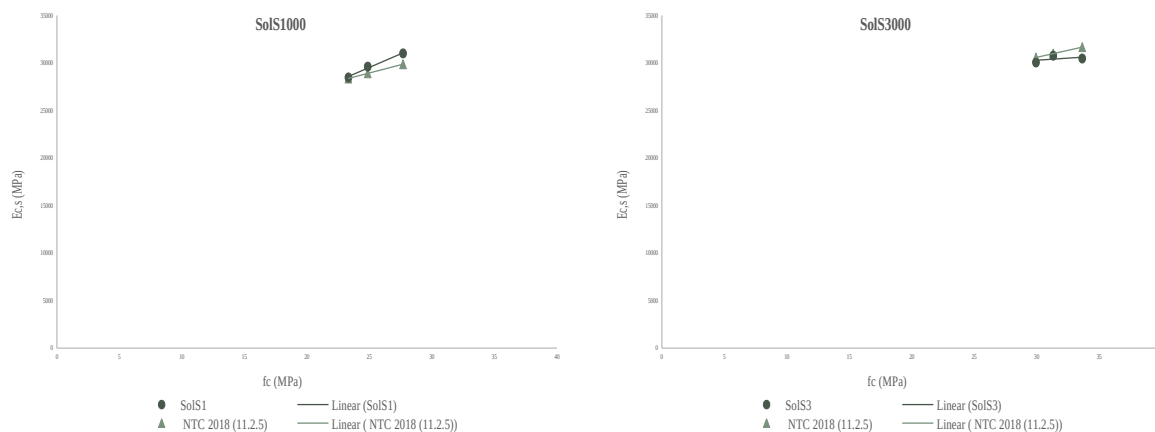


Figura Analisi e discussione dei risultati-143: Confronto resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali confrontati con modulo elastico calcolato come da normativa NTC2018 11.2.5. dei provini SolS1000 e SolS3000.

In fig. 5-114 vengono confrontati i valori medi di resistenza a compressione delle due tipologie di invecchiamento (1000 e 3000 ore) e dei provini non trattati. Si osserva un incremento del 17% per i provini immersi per 1000 ore e del 22% per quelli immersi per 3000 ore rispetto ai campioni non trattati. Questo incremento conferma che l'immersione in soluzione salina ha indotto un effetto di densificazione superficiale e un miglioramento temporaneo della capacità resistente.

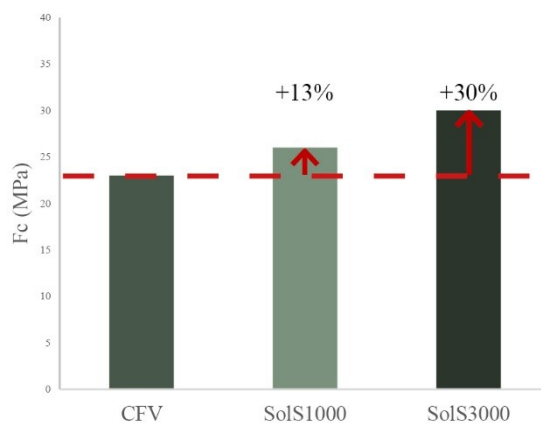


Figura Analisi e discussione dei risultati-144: Confronto valori medi resistenza a compressione CFV; SolS1000 e SolS3000.

In fig. 5-115 vengono messi a confronto i valori di resistenza a compressione e modulo elastico dei provini non trattati (CFV) e dei provini immersi in soluzione per 1000 e 3000 ore (SolS1000; SolS3000). Qui i valori di modulo elastico risultano più bassi e più dispersi rispetto alle altre serie. Questo comportamento indica che, sebbene la resistenza a compressione possa risultare elevata, la rigidezza interna del materiale è compromessa, segnale di un possibile degrado microstrutturale. Le alte concentrazioni saline favoriscono espansioni durante la cristallizzazione e producono una perdita progressiva di coesione all'interno della matrice cementizia. L'aumento di resistenza, infatti, non deve essere interpretato come miglioramento reale: è un effetto temporaneo dovuto al blocco dei pori da parte dei cristalli salini, che maschera la degradazione interna della rigidezza.

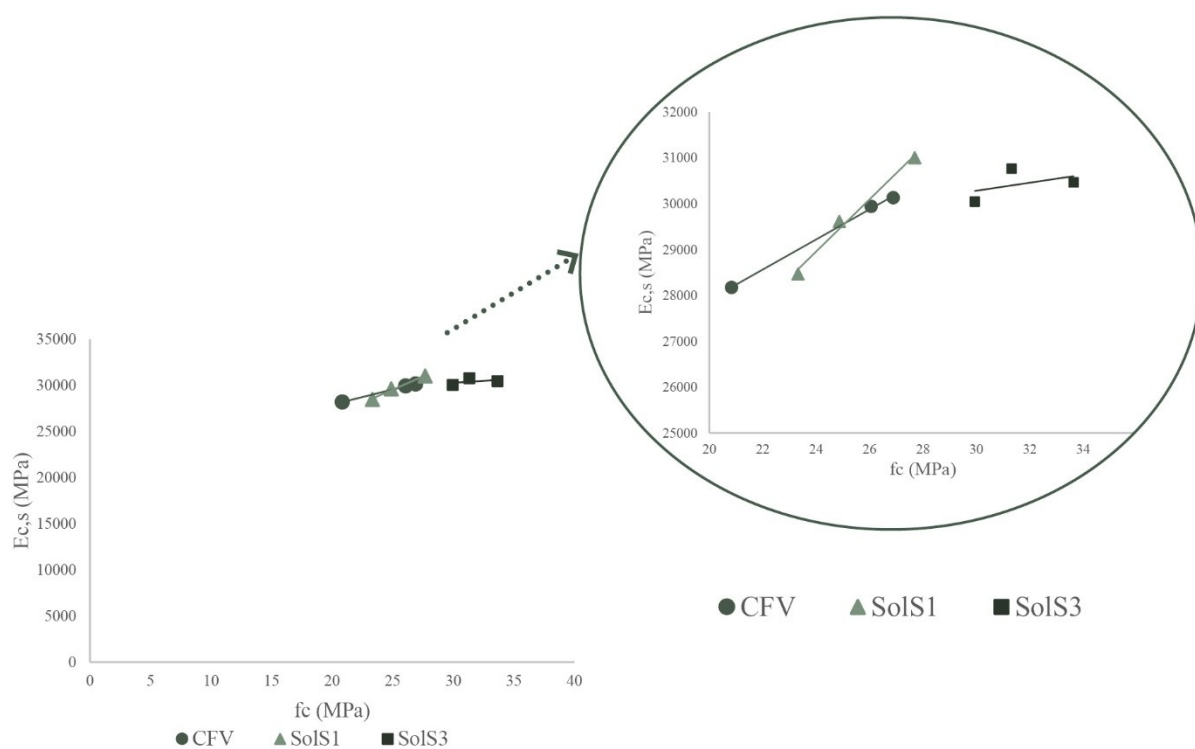


Figura Analisi e discussione dei risultati- 145: Confronto valori resistenza a compressione e modulo elastico dei provini CFV; SolS1000 e SolS3000.

5.8.4 Confronto tra i risultati delle varie tipologie di invecchiamento (ambiente salino)

In fig. 5-116 vengono confrontati i risultati di tutti i tipi di invecchiamento accelerato fino ad ora analizzati. In particolare, vengono mostrate le medie di resistenza ultima a compressione.

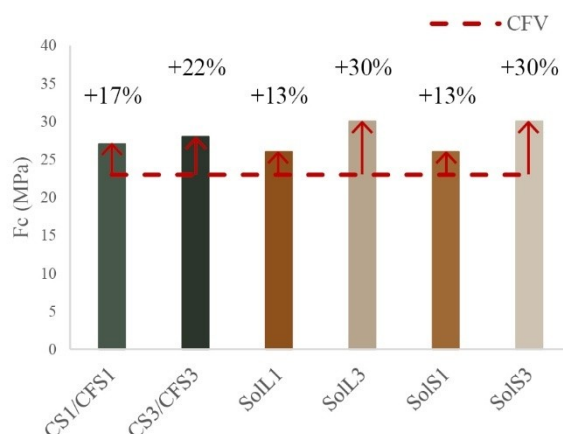


Figura Analisi e discussione dei risultati-146: Confronto valori medi resistenza a compressione ambiente salino.

Dall'analisi complessiva dei grafici emerge che tutte le tipologie di invecchiamento accelerato considerate determinano, in generale, un incremento della resistenza a compressione rispetto ai provini non trattati (CFV). Questo comportamento, già osservato nelle singole analisi, diventa particolarmente evidente nel confronto globale, in particolare si può affermare che gli incrementi maggiori si riscontrano nei provini SolL e SolS, soprattutto per esposizioni prolungate (3000 ore), dove la resistenza aumenta anche del +30%. I provini esposti a soluzione ASTM D1141-98 mostrano incrementi più contenuti, ma comunque significativi (+17/22%), confermando l'effetto di densificazione indotto dalla cristallizzazione nei pori. Nel complesso, il confronto fra tutti i tipi di invecchiamento suggerisce che, per quanto riguarda la sola resistenza a compressione, gli ambienti salini producono generalmente un effetto migliorativo, probabilmente associato al riempimento dei pori capillari. È importante, tuttavia, sottolineare che si tratta di un miglioramento potenzialmente non duraturo, poiché associato a fenomeni che, nel lungo periodo, possono evolvere in microfessurazione diffusa e perdita di integrità.

In fig. 5-117, vengono confrontati tutti i risultati dei test di questa macrocategoria delle prove di determinazione del modulo elastico, confrontate con il valore medio dei provini non trattati.

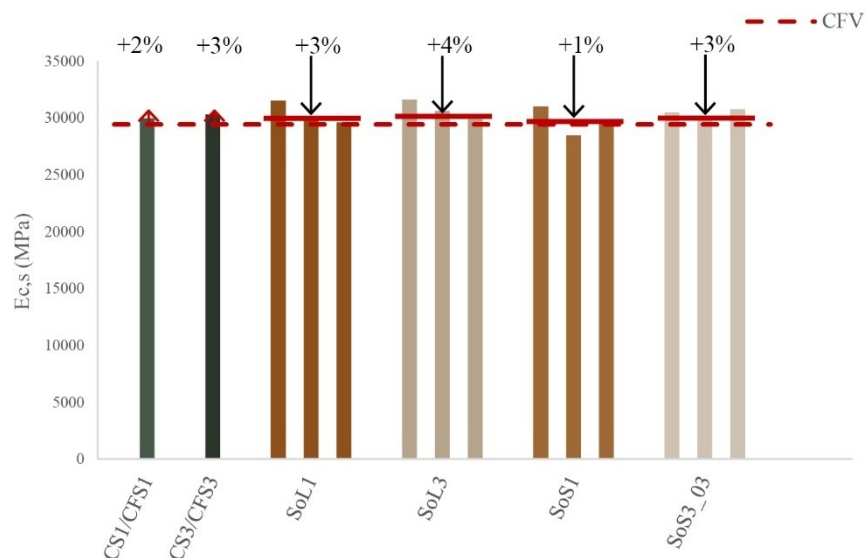


Figura Analisi e discussione dei risultati- 147: Confronto valori del modulo elastico ambiente salino.

Il comportamento del modulo elastico offre un quadro più articolato rispetto alla resistenza a compressione, permettendo di cogliere meglio gli effetti microstrutturali dei diversi invecchiamenti. Dal grafico emerge che tutti i tipi di invecchiamento accelerato mostrano valori prossimi al valore medio dei provini non trattati (+1/3%), indicando che le immersioni saline non hanno modificato in modo significativo la rigidità interna del calcestruzzo. Questo comportamento contrasta con l'aumento più marcato della resistenza a compressione, suggerendo che quest'ultimo sia principalmente legato a fenomeni di densificazione superficiale e cristallizzazione salina nei pori, mentre la struttura interna del materiale rimane sostanzialmente invariata. Di conseguenza, il modulo elastico si conferma un parametro più sensibile e affidabile nel rilevare l'assenza di reali miglioramenti microstrutturali, nonostante gli incrementi apparenti osservati nella resistenza a compressione. Questi risultati sottolineano la necessità di valutare sempre resistenza e modulo in maniera congiunta, poiché solo l'analisi combinata permette di comprendere i reali effetti degli invecchiamenti accelerati sulle proprietà meccaniche del calcestruzzo.

5.9 Risultati Cicli Caldo-Umido

5.9.1 Risultati provini T e T70

Di seguito vengono mostrati i risultati delle prove effettuate sui provini soggetti a cicli caldo umido con immersione in acqua normale ed essiccazione a 70°C, denominati T e T70. Prima dei test meccanici sono state eseguite prove ultrasoniche, confrontate con quelle effettuate sugli stessi provini prima dell'invecchiamento, al fine di individuare eventuali variazioni nella velocità di propagazione dell'onda (V_{us}). In fig. 5-118 vengono mostrati i risultati ed il confronto sopra detto. I risultati mostrano un incremento del 5% per i provini T/T70. Questo aumento della velocità di propagazione dell'onda indica un maggiore grado di saturazione e una parziale densificazione dei pori, dovuta ai cicli di immersione in soluzione. Il dato suggerisce che, almeno nelle prime fasi, i cicli caldo-umido non producono un deterioramento immediato della continuità interna del materiale.

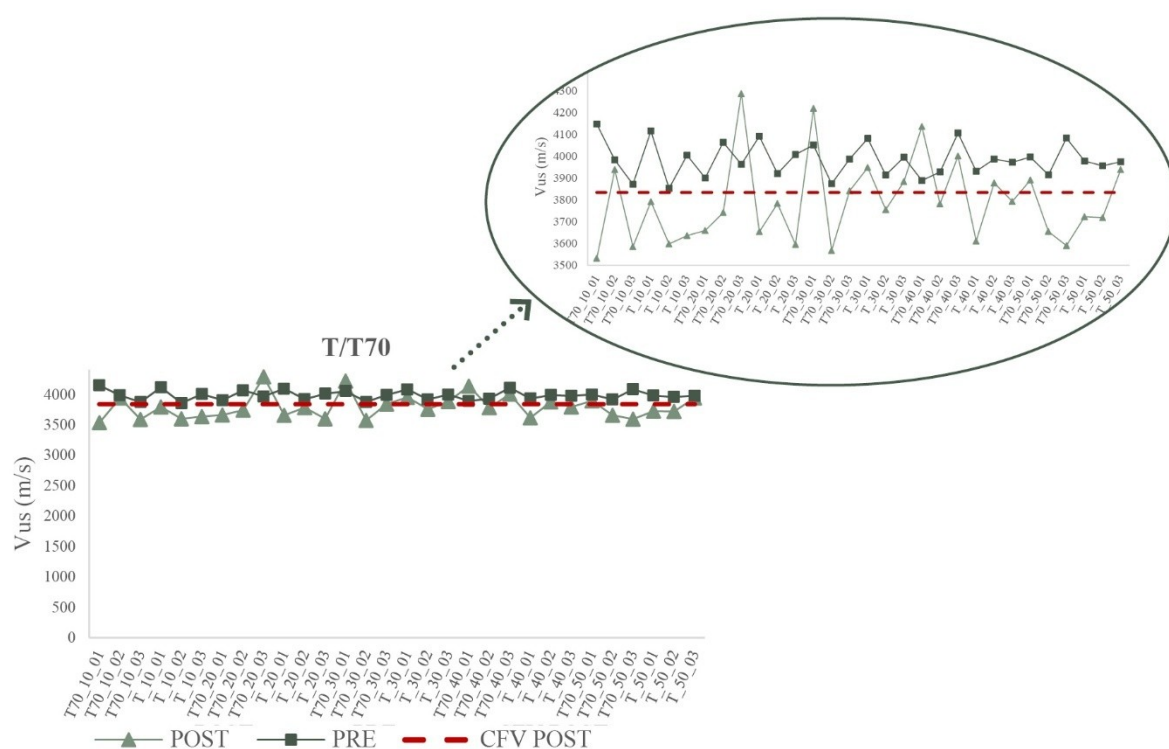


Figura Analisi e discussione dei risultati-148: Confronto test ultrasuoni provini T e T70 prima e dopo l'invecchiamento accelerato.

In tabella 5-47 sono riportati i risultati per ogni provino, indicando il valore del modulo elastico sperimentale e da normativa e la resistenza ultima a compressione.

ID	f_c (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)*
T70_10_01	23	-	28369
T70_10_02	24	28052	28610
T70_10_03	17	25409	26001
T_10_01	19	27503	26515
T_10_02	19	-	26674
T_10_03	25	-	28860
T70_20_01	22	27894	27847
T70_20_02	27	-	29672
T70_20_03	22	-	28049
T_20_01	18	26883	26352
T_20_02	25	-	29108
T_20_03	24	28002	28735
T70_30_01	27	-	29672
T70_30_02	19	27581	26835
T70_30_03	22	-	27991
T_30_01	16	-	25331
T_30_02	19	27135	26589
T_30_03	27	30788	29585
T70_40_01	25	28856	28900
T70_40_02	20	27495	27213
T70_40_03	22	-	27991
T_40_01	20	-	27260

ID	f_c (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)*
T_40_02	15	24071	24840
T_40_03	24	-	28480
T70_50_01	22	27199	27993
T70_50_02	17	-	25828
T70_50_03	17	25117	25878
T_50_01	25	-	29038
T_50_02	19	-	26866
T_50_03	23	28384	28164

*modulo elastico calcolato secondo normativa NTC 2018 11.2.5

Tabella Analisi e discussione dei risultati-60: Valori resistenza ultima a compressione e modulo elastico T e T70.

In tabella non sono presenti i valori del modulo elastico dei provini T70_10_01; T_10_02; T_10_03; T70_20_02; T70_20_03; T_20_02; T70_30_01, T70_30_03; T_30_01; T70_40_03; T_40_01; T_40_03; T70_50_02; T_50_01 e T_50_03 poiché utilizzati per calcolare la resistenza a compressione usata come base per i test di determinazione del modulo elastico dei rimanenti provini.

In fig. 5-119 vengono mostrati i valori di resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali, per ogni tipo, confrontati con i valori del modulo elastico istantaneo ricavato con formula da normativa (NTC 2018 11.2.5), al fine di mostrare quanto i dati ricavati per via sperimentale discostano con quelli ideali da normativa. Le differenze risultano contenute, a conferma che il materiale, pur sottoposto a condizionamento prolungato, mantiene una buona integrità strutturale e un comportamento elastico coerente con le previsioni normative. I cicli caldo-umido non hanno provocato danni microstrutturali tali da alterare in modo significativo la risposta elastica; le differenze maggiori si osservano solo per alcuni provini sottoposti a un numero elevato di cicli, indicando l'inizio di effetti di degradazione. Nel complesso, il modulo elastico sperimentale conferma che il calcestruzzo mantiene una buona integrità interna, anche dopo condizionamenti prolungati.

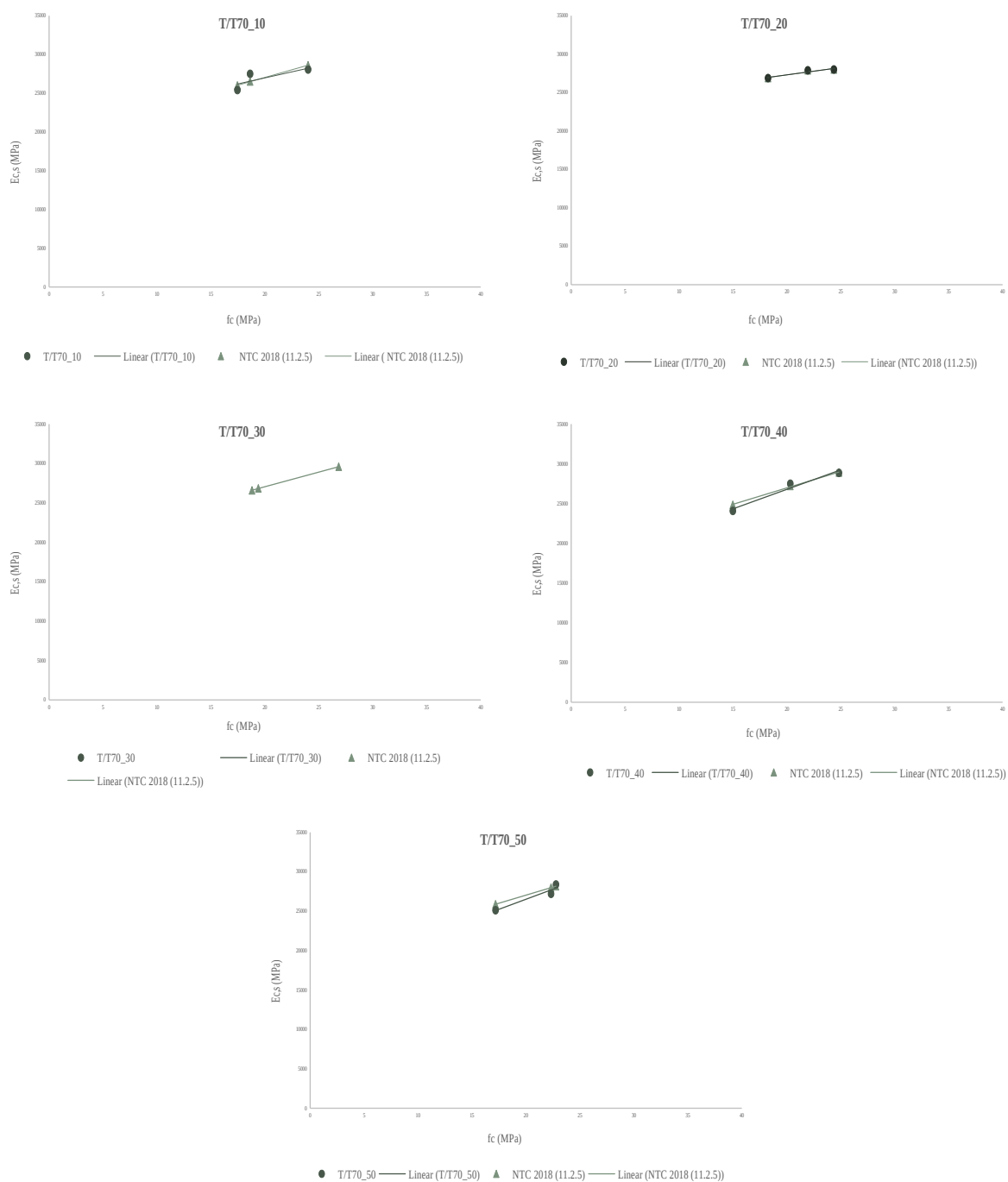


Figura Analisi e discussione dei risultati-149: Confronto resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali confrontati con modulo elastico calcolato come da normativa NTC2018 11.2.5. dei provini T e T70.

In fig. 5-120 vengono confrontati i valori medi di resistenza a compressione, divisi per numero di cicli, con il valore medio dei provini non trattati. In linea generale si osserva un decremento

della resistenza ad eccezione dei provini sottoposti a 20 cicli che mostrano un lieve incremento (circa +1%). Per i provini soggetti a 30, 40 e 50 cicli si registra invece un progressivo decadimento delle prestazioni, coerente con gli effetti ripetuti di immersione-essiccamento. Il comportamento suggerisce che, superata una soglia di cicli, il processo diventa più aggressivo e prevalgono i meccanismi di microfessurazione termica e degradazione per cicli igrometrici.

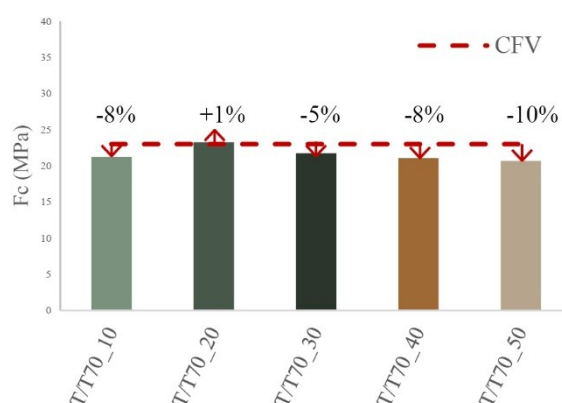


Figura Analisi e discussione dei risultati-150: Confronto valori medi resistenza a compressione CFV; T e T70.

In fig. 5-121 vengono messi a confronto i valori di resistenza a compressione e modulo elastico dei provini non trattati (CFV) e dei provini soggetti ai cicli di caldo-umido. Nel complesso i risultati mostrano in generale segni di degradazione, segnale che l'essiccamento a 70 °C produce effetti intensi sulla microstruttura cementizia. Il modulo elastico, pur variando meno della resistenza, tende anch'esso a diminuire per numeri di cicli elevati, indicando che la degradazione non è solo superficiale ma interessa anche la rigidità interna del materiale. Nel complesso, il comportamento di questa tipologia di provini indica che i cicli caldo-umido rappresentano un meccanismo di invecchiamento più degradante rispetto alle immersioni saline: mentre queste ultime producono incrementi apparenti della resistenza, i cicli caldo-umido provocano una perdita progressiva e reale delle proprietà meccaniche.

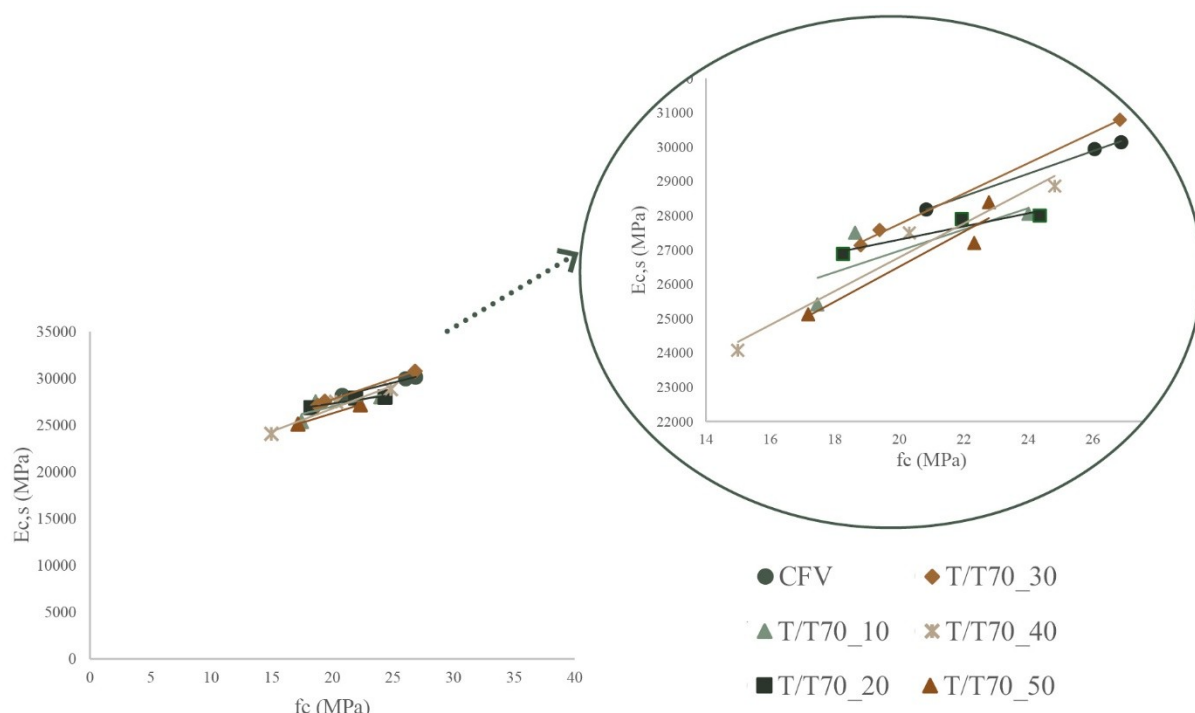


Figura Analisi e discussione dei risultati- 151: Confronto valori resistenza a compressione e modulo elastico dei provini CFV; T e T70.

5.9.2 Risultati provini T50

Di seguito vengono mostrati i risultati delle prove effettuate sui provini soggetti a cicli caldo umido con immersione in acqua normale ed essiccazione a 50°C, denominati T50. Prima dei test meccanici sono state eseguite prove ultrasoniche, confrontate con quelle effettuate sugli stessi provini prima dell'invecchiamento, al fine di individuare eventuali variazioni nella velocità di propagazione dell'onda (V_{us}). In fig. 5-122 vengono mostrati i risultati ed il confronto sopra detto. I risultati mostrano un decremento dell-1%, segno che i cicli non hanno alterato in modo marcato la continuità interna del materiale, Questo risultato è coerente con l'atteso comportamento del calcestruzzo sottoposto a temperature relativamente contenute, per cui i danni microstrutturali rimangono limitati.

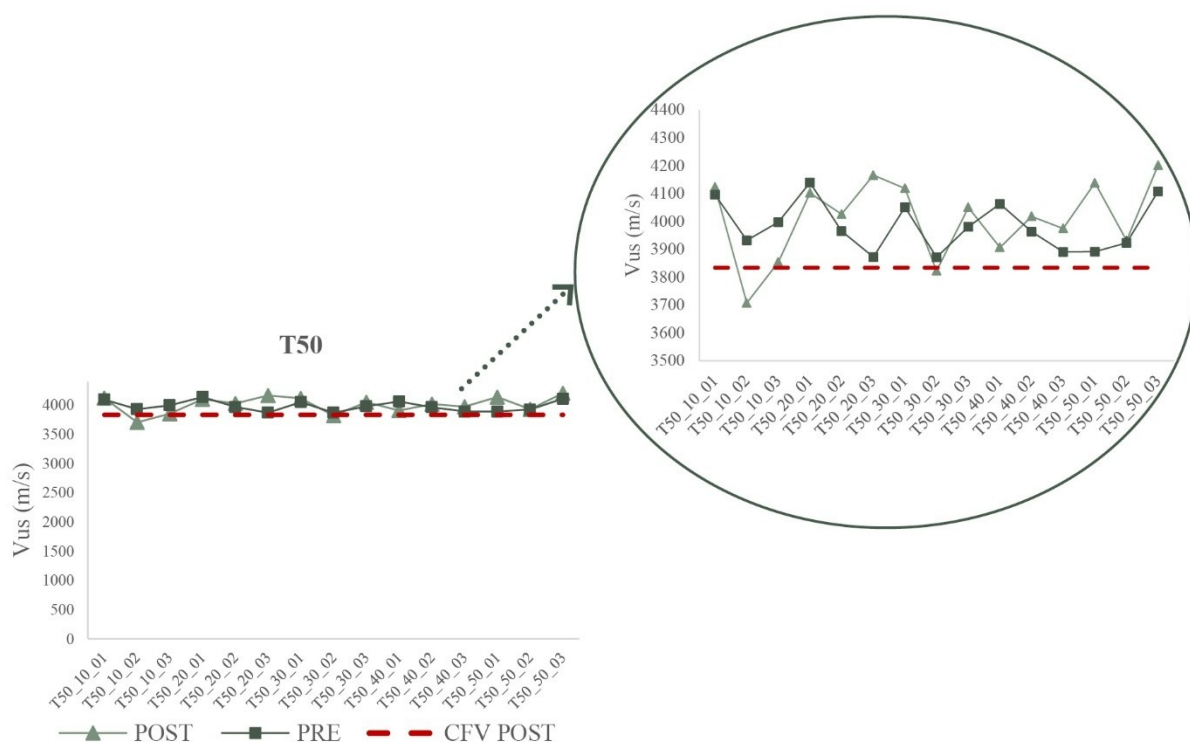


Figura Analisi e discussione dei risultati-152: Confronto test ultrasuoni provini T50 prima e dopo l'invecchiamento accelerato.

In tabella 5-48 sono riportati i risultati per ogni provino, indicando il valore del modulo elastico sperimentale e da normativa e la resistenza ultima a compressione.

ID	f_c (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)*
T50_10_01	28	28264	29875
T50_10_02	24	28533	28581
T50_10_03	31	29447	30808
T50_20_01	26	29576	29290
T50_20_02	21	27123	27653
T50_20_03	28	30483	30081
T50_30_01	32	30336	31086
T50_30_02	25	29833	29050
T50_30_03	29	30079	30185

ID	f_c (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)*
T50_40_01	23	28635	28392
T50_40_02	31	29646	30793
T50_40_03	25	28332	28949
T50_50_01	26	30995	29461
T50_50_02	25	28307	29068
T50_50_03	23	28880	28120

*modulo elastico calcolato secondo normativa NTC 2018 11.2.5

Tabella Analisi e discussione dei risultati-61: Valori resistenza ultima a compressione e modulo elastico T50.

Poiché erano disponibili soltanto tre provini per ciascun gruppo, non è stato possibile eseguire prove distruttive preliminari per la stima diretta della resistenza ultima, e pertanto il modulo elastico è stato determinato utilizzando un valore di f_c dedotto sulla base delle prove precedenti, dei risultati degli altri invecchiamenti e dei riferimenti disponibili in letteratura. In fig. 5-123 vengono mostrati i valori di resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali, per ogni tipo, confrontati con i valori del modulo elastico istantaneo ricavato con formula da normativa (NTC 2018 11.2.5), al fine di mostrare quanto i dati ricavati per via sperimentale discostano con quelli ideali da normativa. Emerge una lieve dispersione dei dati rispetto agli altri tipi di condizionamento. Le differenze diventano più marcate nei provini con 50 cicli, per i quali si osserva la maggiore deviazione dal comportamento elastico ideale previsto normativamente, indicando che l'alternanza prolungata tra immersione e asciugatura ha introdotto microvariazioni nella rigidità del materiale.

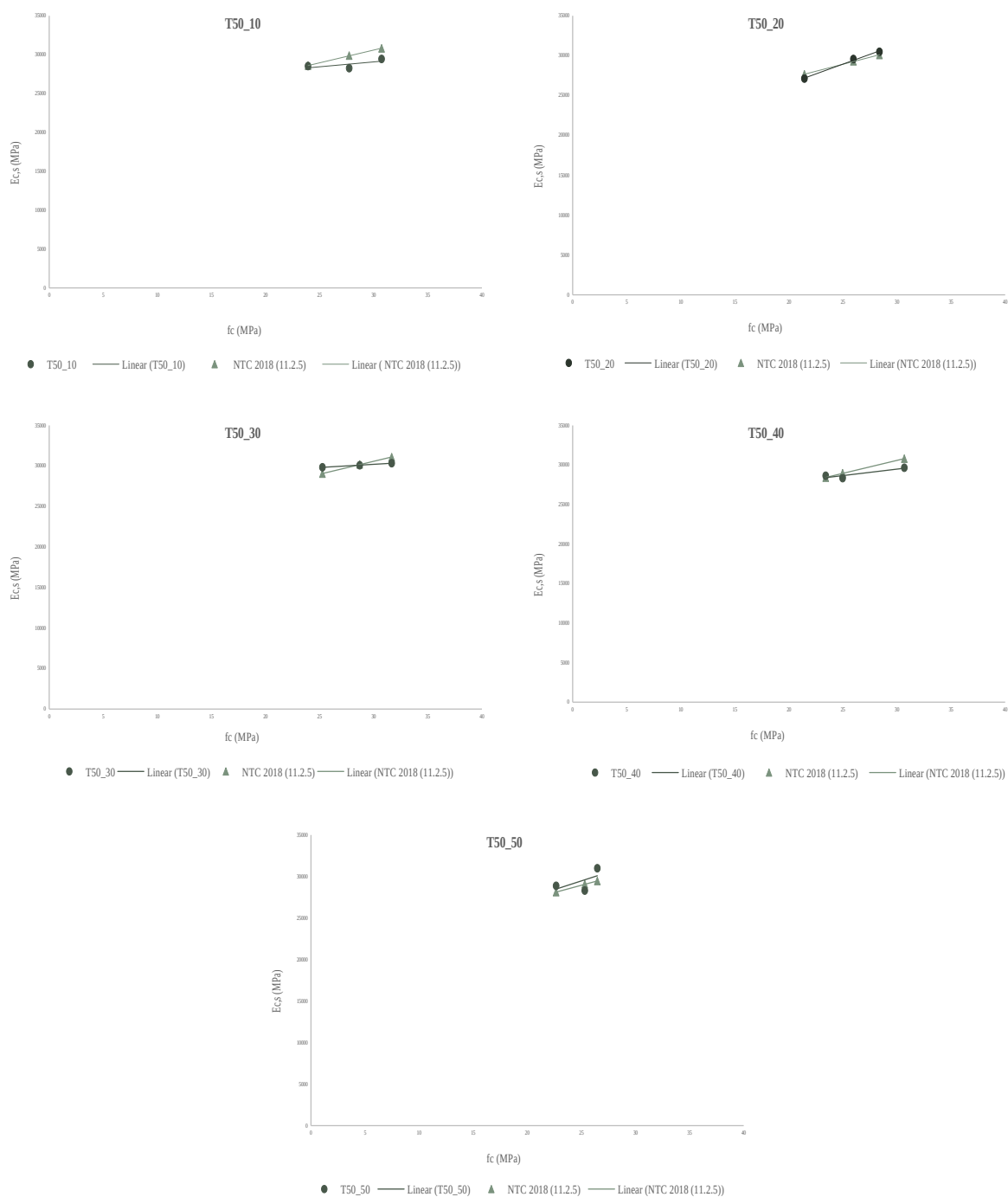


Figura Analisi e discussione dei risultati-153: Confronto resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali confrontati con modulo elastico calcolato come da normativa NTC2018 11.2.5. dei provini T50.

In fig. 5-124 vengono confrontati i valori medi di resistenza a compressione confrontate con il valore medio dei provini non trattati. Si osserva un incremento costante per tutte le tipologie con valori compresi tra il +24% e il +8% rispetto ai campioni non trattati. Questo incremento conferma che l'immersione in soluzione salina ha indotto un effetto di densificazione

superficiale e un miglioramento della capacità resistente. La ripetuta immersione in soluzione consente un riempimento dei pori capillari, seguito da essiccazione a temperatura non elevata, che può favorire un progressivo processo di densificazione superficiale. L'effetto complessivo è un aumento della compattezza e, di conseguenza, della capacità resistente del materiale.

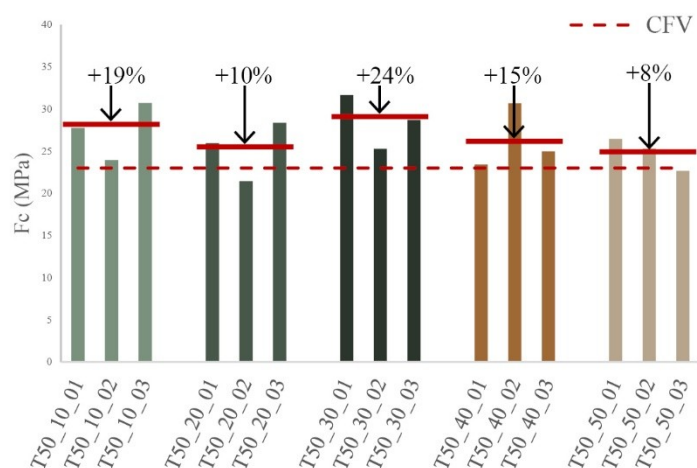


Figura Analisi e discussione dei risultati-154: Confronto valori medi resistenza a compressione CFV; T50.

In fig. 5-125 vengono messi a confronto i valori di resistenza a compressione e modulo elastico dei provini non trattati (CFV) e dei provini T50 suddivisi in funzione del numero di cicli. L'analisi mette in evidenza che fino a circa 30 cicli, l'incremento della resistenza a compressione risulta più marcato; mentre tra 40 e 50 cicli, pur mantenendo valori superiori ai CFV, iniziano ad apparire i primi segnali di stabilizzazione o lieve riduzione del modulo elastico, suggerendo che l'alternanza prolungata dei cicli possa iniziare a generare i primi effetti sulla rigidezza del materiale. Nel complesso, i dati confermano che il condizionamento T50 rappresenta una forma di invecchiamento poco aggressiva, in cui prevalgono fenomeni di tipo fisico legati alla saturazione e al parziale riempimento dei pori, più che processi di degradazione chimica.

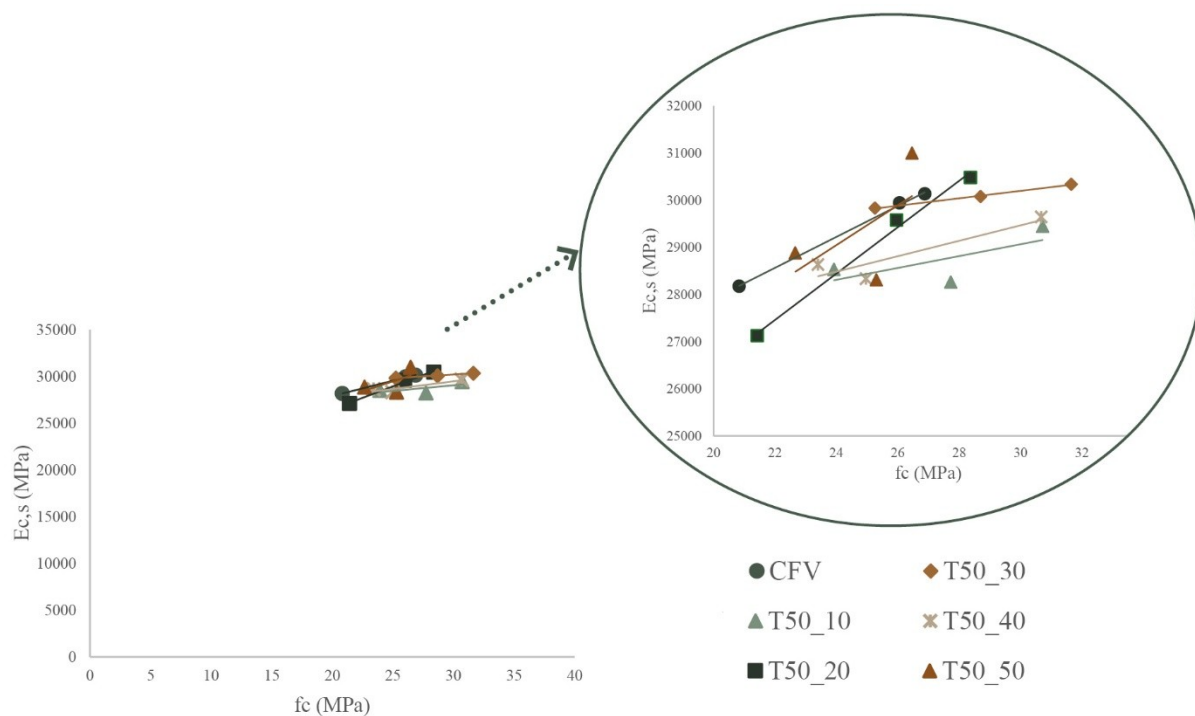


Figura Analisi e discussione dei risultati-155: Confronto valori resistenza a compressione e modulo elastico dei provini CFV; T50.

5.9.3 Risultati provini TS1

Di seguito vengono mostrati i risultati delle prove effettuate sui provini soggetti a cicli di caldo umido, con essiccazione in forno a 50°C per 18 ore e successiva immersione, per 6 ore, in soluzione composta da acqua deionizzata, cloruro di sodio all'4% (NaCl) e sodio solfato decaidrato al 2% (Na₂SO₄), denominati TS1. Prima dei test meccanici sono state eseguite prove ultrasoniche, confrontate con quelle effettuate sugli stessi provini prima dell'invecchiamento, al fine di individuare eventuali variazioni nella velocità di propagazione dell'onda (Vus). In fig. 5-126 vengono mostrati i risultati ed il confronto sopra detto. I risultati mostrano un incremento del +2%, segno che nelle prime fasi i cicli caldo-umidi possono indurre un parziale riempimento dei pori o una riduzione temporanea della porosità aperta. L'assenza di riduzioni della Vus conferma che, per questa combinazione di temperatura e composizione della soluzione, non si generano microfessurazioni rilevanti.

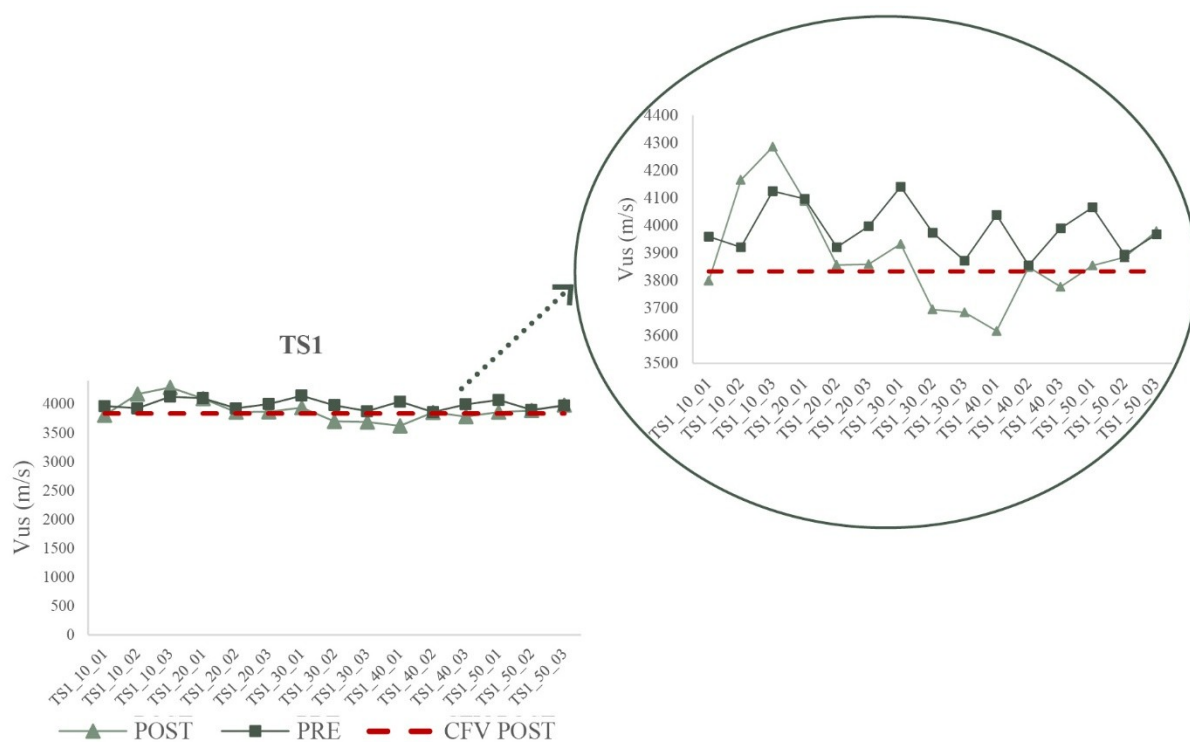


Figura Analisi e discussione dei risultati-156: Confronto test ultrasuoni provini TS1 prima e dopo l'invecchiamento accelerato.

In tabella 5-49 sono riportati i risultati per ogni provino, indicando il valore del modulo elastico sperimentale e da normativa e la resistenza ultima a compressione.

ID	f _c (MPa)	E _{c,s} (MPa)	E _{c,s} (MPa)*
TS1_10_01	23	27977	28315
TS1_10_02	26	29074	29442
TS1_10_03	31	30458	30886
TS1_20_01	35	31936	32016
TS1_20_02	27	29892	29483
TS1_20_03	26	28992	29168
TS1_30_01	29	30716	30232
TS1_30_02	22	27515	27981
TS1_30_03	23	28887	28197

ID	f_c (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)*
TS1_40_01	25	29755	29117
TS1_40_02	22	28038	27696
TS1_40_03	25	28824	28858
TS1_50_01	28	29041	29886
TS1_50_02	27	28765	29495
TS1_50_03	24	27336	28483

*modulo elastico calcolato secondo normativa NTC 2018 11.2.5

Tabella Analisi e discussione dei risultati-62: Valori resistenza ultima a compressione e modulo elastico TS1.

Poiché erano disponibili soltanto tre provini per ciascun gruppo, non è stato possibile eseguire prove distruttive preliminari per la stima diretta della resistenza ultima, e pertanto il modulo elastico è stato determinato utilizzando un valore di f_c dedotto sulla base delle prove precedenti, dei risultati degli altri invecchiamenti e dei riferimenti disponibili in letteratura. In fig. 5-127 vengono mostrati i valori di resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali, per ogni tipo, confrontati con i valori del modulo elastico istantaneo ricavato con formula da normativa (NTC 2018 11.2.5), al fine di mostrare quanto i dati ricavati per via sperimentale discostano con quelli ideali da normativa. I valori riportati in tabella mostrano una variabilità contenuta sia per la resistenza a compressione (f_c) sia per il modulo elastico. Il confronto tra modulo elastico sperimentale e modulo elastico calcolato tramite NTC 2018, mostra lievi differenze che tendono ad aumentare leggermente con il numero di cicli.

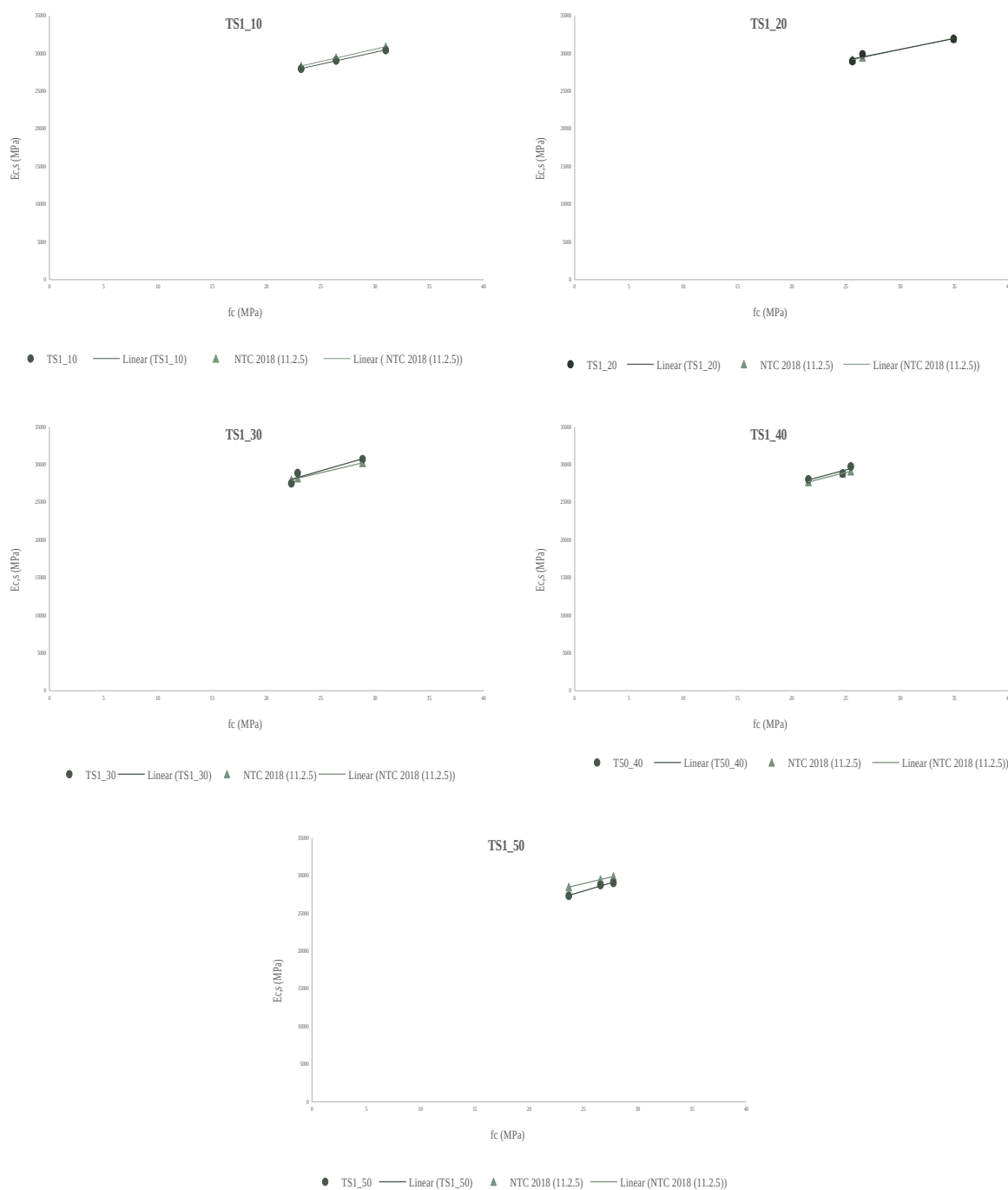


Figura Analisi e discussione dei risultati-157: Confronto resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali confrontati con modulo elastico calcolato come da normativa NTC2018 11.2.5. dei provini TS1.

In fig. 5-128 vengono confrontati i valori medi di resistenza a compressione confrontate con il valore medio dei provini non trattati. Si osserva un incremento costante per tutte le tipologie con valori compresi tra il +4% e il +26% rispetto ai campioni non trattati. Questo incremento non va interpretato come un reale miglioramento strutturale è più probabilmente attribuibile al

riempimento dei pori da parte dell'acqua durante i cicli di immersione ed alla cristallizzazione salina superficiale, che può localmente densificare la microstruttura. Si tratta quindi di un effetto di natura fisica e non di un miglioramento delle proprietà intrinseche del materiale.

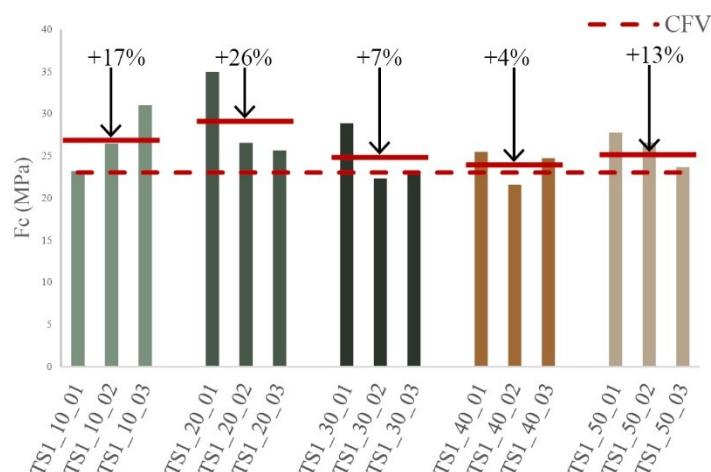


Figura Analisi e discussione dei risultati-158: Confronto valori medi resistenza a compressione CFV; TS1.

In fig. 5-129 vengono messi a confronto i valori di resistenza a compressione e modulo elastico dei provini non trattati (CFV) e dei provini TS1 suddivisi in funzione del numero di cicli. L'analisi mette in evidenza che fino a circa 30 cicli, l'incremento della resistenza a compressione risulta più marcato; questa divergenza indica che il materiale acquisisce temporaneamente maggiore capacità portante, ma non sviluppa una maggiore rigidità, segnale che i cambiamenti avvengono soprattutto nella porosità e non nella struttura interna. Tra 40 e 50 cicli, pur mantenendo valori superiori ai CFV, iniziano ad apparire i primi segnali di stabilizzazione o lieve riduzione del modulo elastico, suggerendo che l'alternanza prolungata dei cicli possa iniziare a generare i primi effetti sulla rigidità del materiale. Ciò suggerisce che l'esposizione prolungata ai cicli può indurre i primi fenomeni di danneggiamento interno.

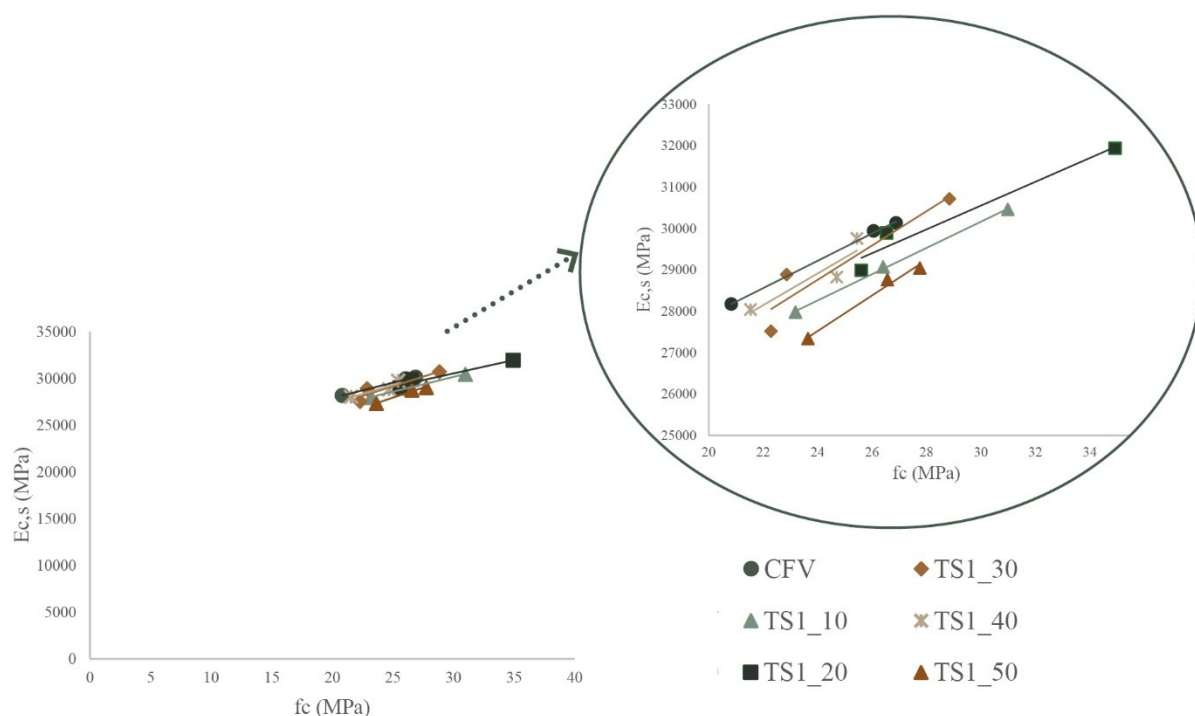


Figura Analisi e discussione dei risultati- 159: Confronto valori resistenza a compressione e modulo elastico dei provini CFV; TS1.

5.9.4 Risultati provini TS2

Di seguito vengono mostrati i risultati delle prove effettuate sui provini soggetti a cicli di caldo umido, con essiccazione in forno a 50°C per 18 ore e successiva immersione, per 6 ore, in soluzione composta da acqua deionizzata, cloruro di sodio all'8% (NaCl) e sodio solfato decaidrato al 4% (Na₂SO₄), denominati TS2. Prima dei test meccanici sono state eseguite prove ultrasoniche, confrontate con quelle effettuate sugli stessi provini prima dell'invecchiamento, al fine di individuare eventuali variazioni nella velocità di propagazione dell'onda (V_{us}). In fig. 5-130 vengono mostrati i risultati ed il confronto sopra detto. I risultati indicano una perdita del -4% che, seppur contenuta, è indicativa di una possibile presenza di microfessurazioni dovute a cicli di asciugatura e bagnatura ed effetti di cristallizzazione salina localizzata nei pori più fini. Poiché i cicli TS2 prevedono una soluzione molto aggressiva, il calo della V_{us} rappresenta un primo segnale della degradazione del materiale.

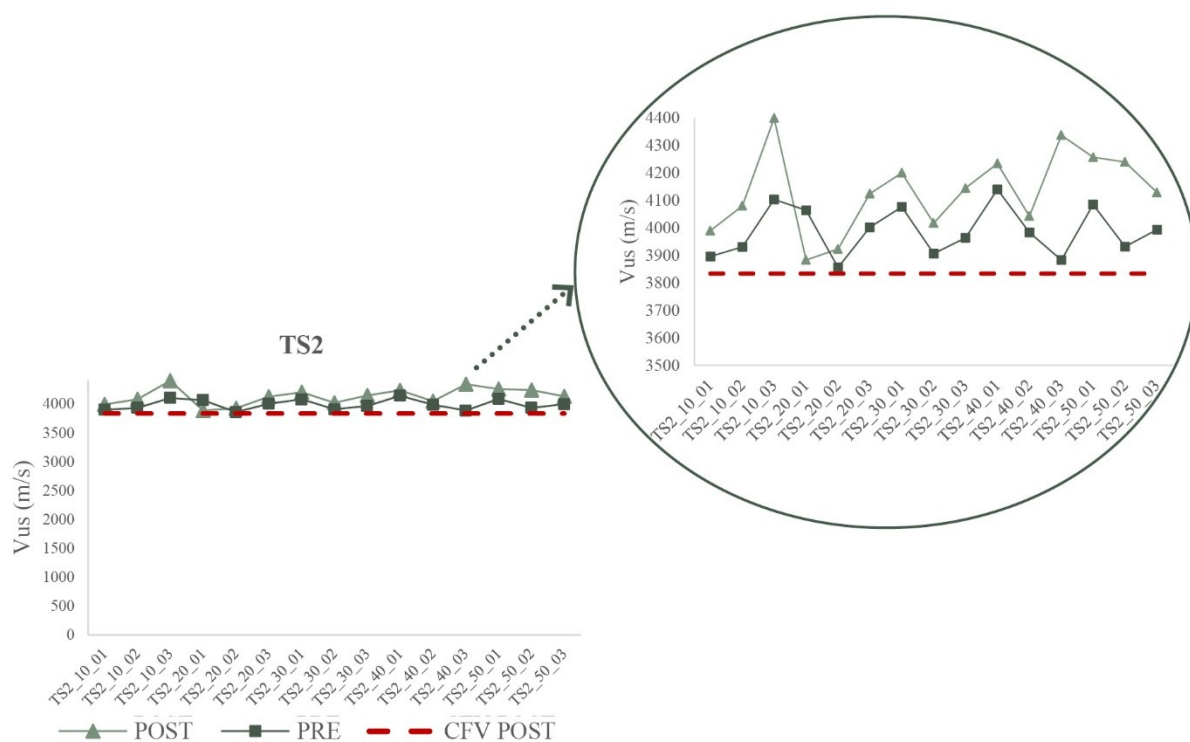


Figura Analisi e discussione dei risultati-160: Confronto test ultrasuoni provini TS2 prima e dopo l'invecchiamento accelerato.

In tabella 5-50 sono riportati i risultati per ogni provino, indicando il valore del modulo elastico e la resistenza ultima a compressione.

ID	f_c (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)*
TS2_10_01	27	30149	29603
TS2_10_02	29	30208	30428
TS2_10_03	27	30290	29479
TS2_20_01	26	29268	29315
TS2_20_02	28	30160	29855
TS2_20_03	30	31328	30605
TS2_30_01	32	31787	31310
TS2_30_02	28	30222	29852
TS2_30_03	22	28728	28059

ID	f_c (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)	$E_{c,s}$ (MPa)*
TS2_40_01	23	28532	28099
TS2_40_02	26	28782	29295
TS2_40_03	24	28539	28768
TS2_50_01	22	28118	27701
TS2_50_02	25	29522	28860
TS2_50_03	24	28131	28488

*modulo elastico calcolato secondo normativa NTC 2018 11.2.5

Tabella Analisi e discussione dei risultati-63: Valori resistenza ultima a compressione e modulo elastico TS2.

Poiché erano disponibili soltanto tre provini per ciascun gruppo, non è stato possibile eseguire prove distruttive preliminari per la stima diretta della resistenza ultima, e pertanto il modulo elastico è stato determinato utilizzando un valore di f_c dedotto sulla base delle prove precedenti, dei risultati degli altri invecchiamenti e dei riferimenti disponibili in letteratura. In fig. 5-131 vengono mostrati i valori di resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali, per ogni tipo, confrontati con i valori del modulo elastico istantaneo ricavato con formula da normativa (NTC 2018 11.2.5), al fine di mostrare quanto i dati ricavati per via sperimentale discostano con quelli ideali da normativa. Emerge una maggiore dispersione dei dati rispetto agli altri tipi di condizionamento. Questa variabilità rispecchia la forte eterogeneità dei danni indotti dall'alternanza bagnatura-asciugatura combinata con la presenza di sali altamente concentrati, che non agiscono in modo uniforme all'interno del campione. Il confronto con i moduli calcolati da normativa evidenzia che, per i primi 20-30 cicli, i valori siano relativamente coerenti, mentre, oltre i 30 cicli, gli scostamenti aumentano sensibilmente, segno che la degradazione microstrutturale diventa più marcata. I provini TS2_30 mostrano le differenze più evidenti, sia per modulo che per resistenza, questo suggerisce che, intorno ai 30 cicli, possa esistere una soglia oltre la quale i fenomeni di danneggiamento superano quelli di semplice densificazione.

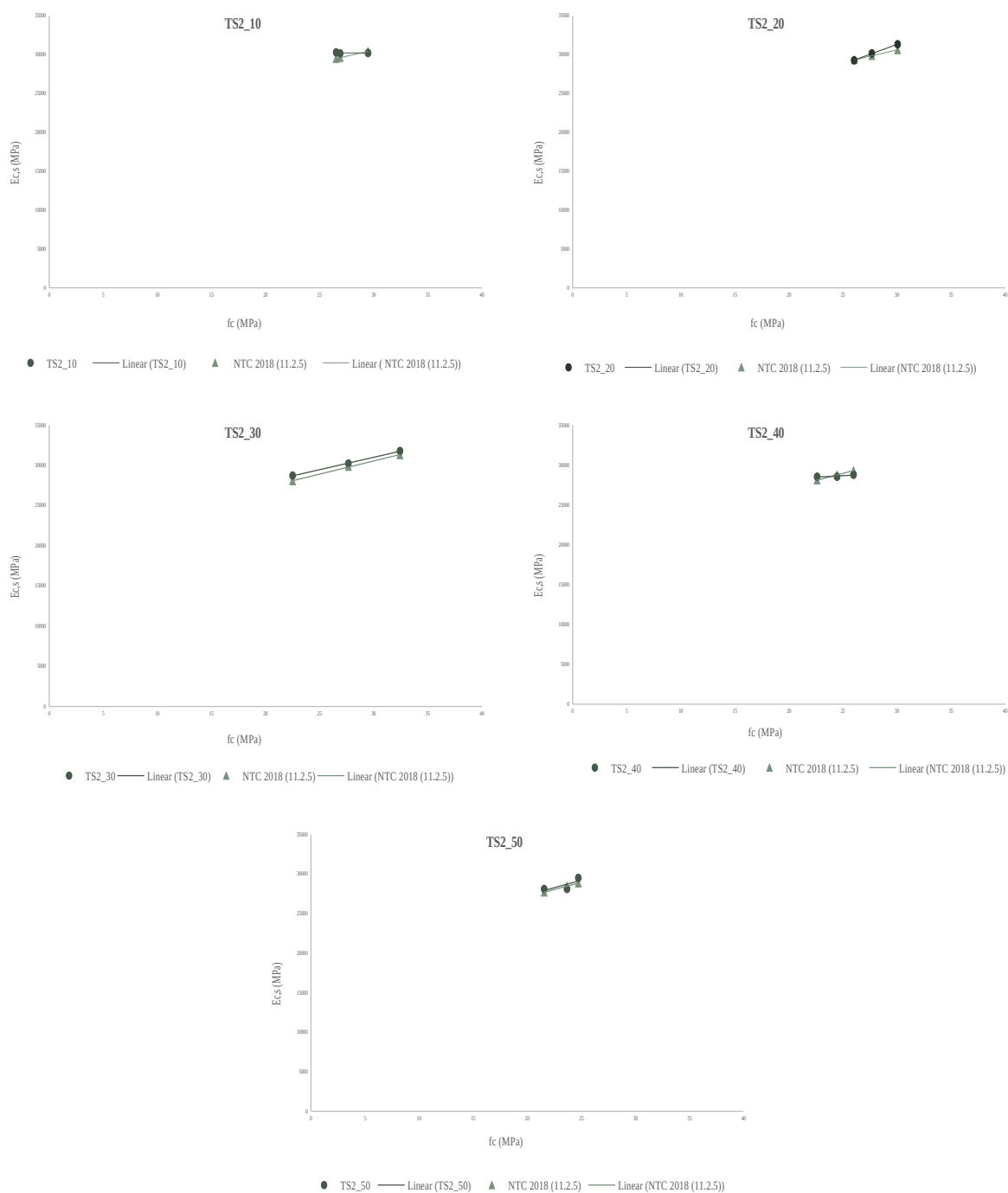


Figura Analisi e discussione dei risultati-161: Confronto resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali confrontati con modulo elastico calcolato come da normativa NTC2018 11.2.5. dei provini TS2.

In fig. 5-132 vengono confrontati i valori medi di resistenza a compressione confrontate con il valore medio dei provini non trattati. Si osserva un incremento costante per tutte le tipologie con valori compresi tra il +1% e il +20% rispetto ai campioni non trattati. L'incremento maggiore si ha per i provini che hanno subito solo 10-20-30 cicli di invecchiamento mentre questo

incremento cala al 6% e poi 1% dopo 40 e 50 cicli. Questi dati indicano che, nelle prime fasi, prevalgono fenomeni di riempimento dei pori dovuti alla cristallizzazione dei sali (effetto pseudo-rinforzante) mentre, superata una certa soglia di cicli, l'accumulo di stress igrometrici e termici induce microfessurazioni che neutralizzano l'effetto positivo iniziale, provocando una perdita progressiva delle prestazioni. Pertanto, l'incremento iniziale di resistenza non deve essere interpretato come un reale miglioramento: rappresenta un fenomeno transitorio dovuto alla densificazione superficiale, che lascia spazio al degrado strutturale nel lungo termine.

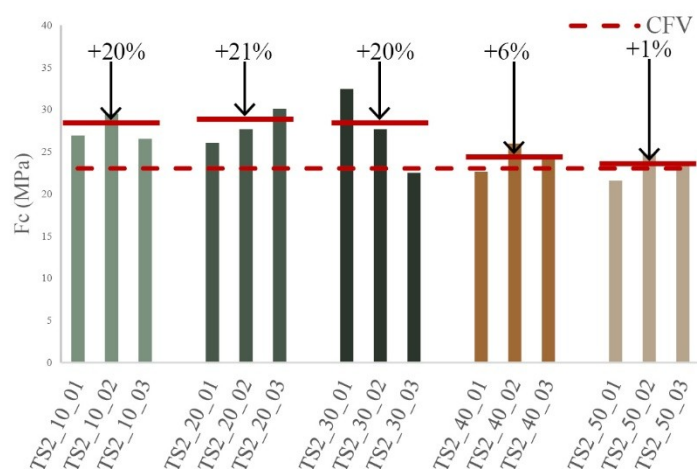


Figura Analisi e discussione dei risultati-162: Confronto valori medi resistenza a compressione CFV; TS2.

In fig. 5-133 vengono messi a confronto i valori di resistenza a compressione e modulo elastico dei provini non trattati (CFV) e dei provini TS2 suddivisi in funzione del numero di cicli. Si deduce che, mentre la resistenza presenta incrementi iniziali, il modulo elastico tende a diminuire, soprattutto oltre 30 cicli. Il fatto che il modulo elastico mostri variazioni meno evidenti nelle prime fasi, ma cali progressivamente verso i 40-50 cicli, conferma che il condizionamento TS2 induce un deterioramento interno progressivo, inizialmente compensato da fenomeni fisici superficiali (cristallizzazione), ma crescente nel tempo.

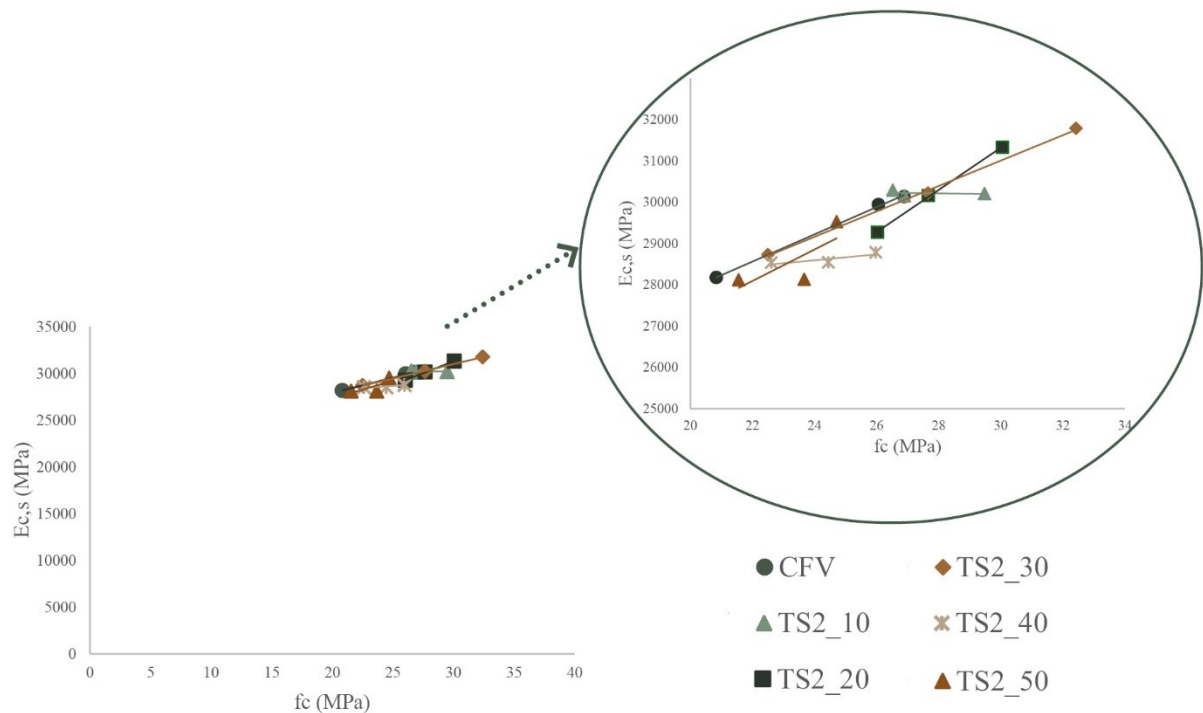


Figura Analisi e discussione dei risultati-163: Confronto valori resistenza a compressione e modulo elastico dei provini CFV; TS2.

5.9.5 Confronto tra i risultati delle varie tipologie di invecchiamento (cicli caldo umido)

In fig. 5-134 vengono confrontati i risultati di tutti i tipi di invecchiamento accelerato per cicli caldo-umido. In particolare, vengono mostrate le medie di resistenza ultima a compressione.

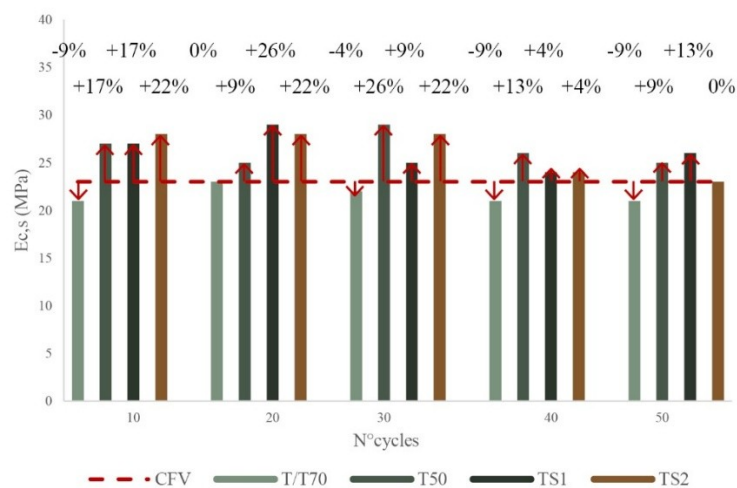


Figura Analisi e discussione dei risultati- 164: *Confronto valori medi resistenza a compressione cicli caldo-umido.*

L'analisi mostra chiaramente come il comportamento dei materiali vari ampiamente in funzione della severità dell'invecchiamento. I provini T/T70, sottoposti a cicli con temperature più severe (70 °C), registrano un deterioramento, con valori che convergono verso quelli del materiale non trattato o mostrano lievi riduzioni. Ciò indica che le alte temperature danneggiano il materiale già dopo pochi cicli. I provini T50 rappresentano la condizione meno aggressiva. In questo caso, la resistenza a compressione risulta spesso superiore ai valori CFV, grazie all'effetto di saturazione e riempimento dei pori che caratterizza cicli moderati. Il materiale beneficia temporaneamente dell'azione dell'acqua, con un comportamento coerente con la microstruttura relativamente poco danneggiata. I provini TS1 rappresentano una condizione più aggressiva rispetto ai soli cicli T/T70. Nonostante ciò, anche in questo caso si osservano incrementi iniziali, legati alla cristallizzazione dei Sali nei pori, ma tali incrementi sono più contenuti e meno stabili rispetto ai cicli non salini. Progressivamente le prestazioni tendono a ridursi con l'aumentare dei cicli, segno che la microstruttura inizia a subire fenomeni di danneggiamento più marcati. I provini TS2, sottoposti ai cicli più severi (immersione in soluzione ancora più concentrata), evidenziano il comportamento più instabile: dopo iniziali incrementi della resistenza, i valori tendono progressivamente a ridursi, fino ad annullare quasi completamente l'effetto positivo iniziale oltre i 40-50 cicli. Tale evoluzione conferma che il danneggiamento diventa dominante già nei cicli intermedi. Nel complesso, la resistenza a compressione risulta dunque fortemente influenzata dalla severità dell'invecchiamento, con forti diminuzioni nel caso di immersioni in soluzioni ad alto concentrato di Sali, ma soprattutto nel caso di cicli con alte temperature.

In fig. 5-135, vengono confrontati tutti i risultati dei test di questa macrocategoria delle prove di determinazione del modulo elastico, confrontate con il valore medio dei provini non trattati.

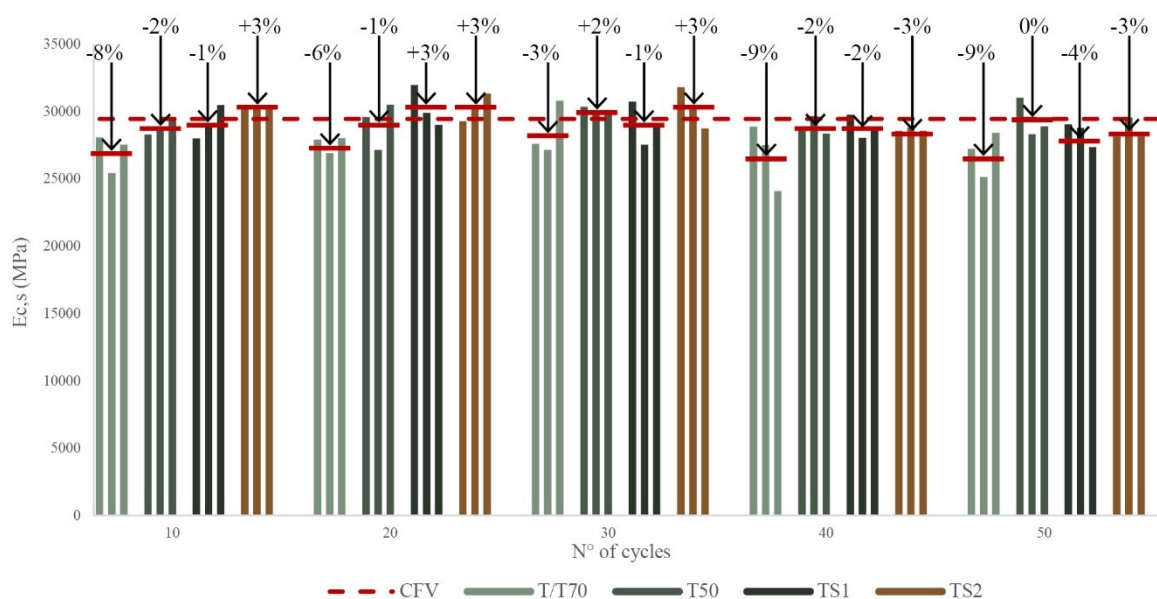


Figura Analisi e discussione dei risultati-165: Confronto valori del modulo elastico cicli caldo-umido.

Il comportamento del modulo elastico fornisce un quadro complementare ma più sensibile della risposta del materiale. I provini T/T70 mostrano le riduzioni più marcate, a conferma dell'avvio di un reale danneggiamento interno, non più compensabile dai fenomeni di saturazione. I T50 mostrano variazioni molto contenute, spesso comprese tra $\pm 2\%$ rispetto ai provini CFV. Questo dato evidenzia come, nelle fasi iniziali, il materiale non subisca modifiche significative della rigidità, pur mostrando incrementi di resistenza a compressione. Gli invecchiamenti TS1 e TS2 rivelano la maggiore sensibilità del modulo elastico alla degradazione in quanto i valori risultano più dispersi, ciò probabilmente dovuto alla formazione di microfessurazioni dovute agli shock termo-igrometrici e alla cristallizzazione dei sali.

6 Conclusioni

La presente ricerca ha affrontato il tema della durabilità dei materiali e dei sistemi di rinforzo applicati alle strutture in calcestruzzo armato esistenti, con particolare riferimento agli edifici di valore storico-architettonico, nei quali le esigenze di sicurezza strutturale devono necessariamente confrontarsi con i principi di conservazione del linguaggio architettonico e dell'espressività materica originaria. In questo contesto, l'adozione di materiali compositi a matrice inorganica (FRCM), rappresenta una soluzione potenzialmente compatibile, reversibile e rispettosa del costruito esistente, purché supportata da una conoscenza approfondita delle prestazioni meccaniche e della loro evoluzione nel tempo.

6.1 Coupon PBO_FRCM

L'analisi complessiva delle prove a trazione sui coupon evidenzia come i diversi scenari di invecchiamento accelerato incidano in maniera differente sulle varie fasi del comportamento meccanico dei sistemi PBO-FRCM, influenzando in particolare la risposta post-fessurativa e i meccanismi di interazione all'interfaccia fibra-matrice. In particolare, pur osservandosi valori di resistenza a trazione comparabili tra campioni trattati e non trattati, si riscontrano variazioni significative in termini di rigidità nella fase fessurata e deformazione ultima. I provini non trattati mostrano una resistenza ultima media pari a circa 1608 MPa, con un rapporto σ_{III}/f_{ft} intorno a 0,53, coerente con un meccanismo di crisi governato dall'interfaccia e con un parziale sfruttamento della resistenza nominale della fibra.

Nel caso delle immersioni saline, l'invecchiamento non produce una riduzione significativa della resistenza ultima nemmeno per esposizioni prolungate. Dopo 1000 ore di immersione si osserva un lieve incremento della resistenza e del rapporto σ_{III}/f_{ft} , mentre a 3000 ore i valori risultano sostanzialmente comparabili a quelli dei provini non trattati, confermando una buona stabilità della fibra di PBO anche in ambienti aggressivi. Gli effetti più rilevanti dell'invecchiamento emergono invece analizzando la deformazione ultima e la rigidità nella fase completamente fessurata: l'aumento progressivo della deformabilità e la riduzione del modulo elastico E_3 , dell'ordine del 25–30%, indicano una modifica dei meccanismi di trasferimento degli sforzi tra fibra e matrice. In particolare, una riduzione della rigidità nella fase completamente fessurata è coerente con una minore efficacia dell'azione di bridging delle

fibre, dovuta a un indebolimento del legame interfacciale e a una maggiore attivazione di fenomeni di scorrimento locale tra fibra e matrice. Ciò comporta una risposta più deformabile del composito a parità di livello tensionale, pur senza una riduzione significativa del carico massimo raggiunto, che risulta influenzato anche dalla lunghezza efficace di trasferimento e dal contributo resistente della fibra nella configurazione di prova adottata.

Un comportamento più complesso e generalmente più penalizzante si osserva nei cicli caldo-umido, dove l'alternanza di immersione e essiccazione introduce fenomeni di espansione e ritiro che accelerano il degrado del sistema. I cicli con acqua normale ed essiccazione a 70 °C e 50 °C determinano un calo marcato delle prestazioni meccaniche rispetto ai provini non trattati, con una tendenza al peggioramento all'aumentare del numero di cicli. Al contrario, nei coupon sottoposti a cicli con immersione in soluzione salina ed essiccazione a 50 °C si osserva un calo iniziale delle prestazioni nei primi cicli, seguito da un recupero progressivo, soprattutto per il comportamento a fessurazione e per la resistenza ultima, che in alcuni casi torna su valori comparabili a quelli dei provini NT. Tale andamento suggerisce che, per cicli prolungati, la presenza dei sali possa indurre fenomeni transitori di densificazione della matrice, legati alla cristallizzazione dei sali nei pori e alla conseguente riduzione della porosità. Questi effetti possono determinare, nel breve termine, un incremento della resistenza della matrice e un ritardo nell'innescio della fessurazione. Tuttavia, tali miglioramenti devono essere interpretati come temporanei, in quanto la cristallizzazione e ricristallizzazione ciclica dei sali può generare tensioni interne e micro-danneggiamenti progressivi, compromettendo nel lungo periodo l'integrità del materiale.

L'analisi della tensione di prima fessurazione conferma tale interpretazione: dopo pochi cicli tutte le tipologie mostrano una fessurazione anticipata rispetto ai provini non trattati, mentre per un numero maggiore di cicli, in particolare nei coupon immersi in soluzione salina, la matrice tende a fessurarsi a livelli di tensione più elevati. La resistenza ultima a trazione risulta invece il parametro meno sensibile all'invecchiamento, mostrando variazioni contenute e una generale tendenza al recupero per cicli elevati nelle soluzioni saline. La deformazione ultima e il modulo elastico E_3 presentano invece una maggiore variabilità e una tendenza alla riduzione all'aumentare dei cicli, evidenziando una perdita di stabilità del comportamento post-fessurativo.

Nel complesso, i risultati evidenziano come gli invecchiamenti accelerati influenzino principalmente la risposta deformativa e i meccanismi di trasferimento degli sforzi nella fase fessurata, governati dall'evoluzione dell'interfaccia fibra-matrice, mentre la capacità resistente

ultima del sistema risulta meno sensibile, almeno nel range di condizioni investigate. Dal punto di vista applicativo, i risultati ottenuti evidenziano alcune implicazioni rilevanti per il dimensionamento degli interventi di rinforzo con sistemi FRCM. In particolare, la significativa riduzione della rigidità post-fessurativa (E_3), suggerisce che l'impiego dei valori nominali di resistenza della fibra può risultare non sempre rappresentativo del comportamento reale del sistema nel tempo.

In condizioni di esercizio caratterizzate da esposizioni aggressive, risulta pertanto opportuno adottare approcci progettuali cautelativi, basati non solo sulla resistenza ultima, ma anche sulla capacità deformativa e sull'efficacia del trasferimento degli sforzi all'interfaccia fibra-matrice. In questo senso, i risultati evidenziano la necessità di considerare coefficienti di riduzione o fattori di sicurezza specifici per tener conto del degrado della risposta post-fessurativa, soprattutto in ambienti caldo-umidi o ad elevata salinità.

Inoltre, la forte influenza dell'interfaccia sul comportamento globale del composito suggerisce che, in fase di progetto, particolare attenzione debba essere posta alla scelta della matrice e alle condizioni di applicazione, al fine di garantire un'adeguata durabilità del sistema nel lungo periodo.

6.2 Cubetti con PBO-FRCM

Le prove di pull-off hanno fornito un quadro complessivo chiaro sull'influenza dei diversi invecchiamenti accelerati sulla durabilità del legame tra sistema FRCM e substrato in calcestruzzo, evidenziando come la resistenza allo strappo sia fortemente dipendente sia dal tipo di esposizione ambientale sia dalle condizioni superficiali del supporto. In generale, rispetto ai campioni di riferimento (CFV), la presenza del composito comporta nella maggior parte dei casi una riduzione della capacità di adesione, con intensità variabile in funzione della severità dell'invecchiamento. Nel caso delle immersioni in ambiente salino, il comportamento risulta fortemente influenzato dalla composizione della soluzione. L'immersione in soluzione ASTM mostra un andamento relativamente omogeneo, con variazioni contenute della resistenza allo strappo (da -11% a +23%), mentre le soluzioni a base di NaCl e Na₂SO₄, soprattutto alle concentrazioni più elevate e per esposizioni prolungate, determinano una drastica riduzione della capacità di adesione, fino a valori prossimi all'annullamento della resistenza. Tale fenomeno è attribuibile alla penetrazione degli ioni salini nella matrice, che favorisce la

dissoluzione dei leganti e l'indebolimento progressivo dell'interfaccia fibra-malta. Al contrario, nei campioni costituiti dal solo substrato in calcestruzzo si osserva spesso un incremento della resistenza, fino al +49%, indicando che il degrado è prevalentemente localizzato nel sistema di rinforzo, mentre il supporto beneficia di fenomeni di densificazione superficiale. I cicli caldo-umido producono un comportamento più articolato e generalmente più penalizzante. L'alternanza di immersione e asciugatura induce fenomeni di espansione e ritiro differenti tra matrice e substrato, con conseguente progressivo deterioramento dell'adesione. Nel complesso, le perdite di resistenza rispetto ai CFV risultano significative (da -3% fino a -100%). Fanno eccezione i provini T50, che mostrano le migliori prestazioni, con incrementi anche rilevanti, attribuibili alla minore aggressività del ciclo e al predominio di fenomeni di saturazione e temporaneo riempimento dei pori. Nei cicli più severi (T/T70), si osserva invece un iniziale incremento fino a circa 20 cicli, seguito da una progressiva riduzione della resistenza allo strappo, quando i meccanismi di microfessurazione e danneggiamento termico diventano dominanti. Un ruolo determinante è svolto dalla preparazione superficiale del substrato. Le superfici a bassa rugosità mostrano le perdite più marcate e una maggiore dispersione dei risultati, soprattutto nei provini "PRE", confermando una maggiore sensibilità dell'adesione ai fenomeni di microfessurazione e alla presenza di umidità all'interfaccia. Al contrario, le superfici ad alta rugosità garantiscono un migliore ancoraggio meccanico, limitando la propagazione dei distacchi sia in ambiente salino sia nei cicli caldo-umido. Anche in questo caso, i provini di solo calcestruzzo evidenziano un comportamento complessivamente migliorativo, coerente con quanto osservato nelle prove meccaniche sulle carote.

Nel complesso, le prove di pull-off confermano che la resistenza di adesione dei sistemi FRCM è un parametro estremamente sensibile ai meccanismi di degrado ambientale e alle condizioni di interfaccia, e che gli eventuali incrementi osservati in condizioni moderate devono essere interpretati come effetti temporanei, non rappresentativi di un reale miglioramento della durabilità del sistema nel lungo periodo. Dal punto di vista progettuale, i risultati delle prove di pull-off evidenziano come la resistenza di adesione non possa essere considerata un parametro costante nel tempo, ma debba essere valutata in funzione delle condizioni ambientali e delle caratteristiche del supporto. In particolare, la marcata riduzione delle prestazioni in presenza di ambienti salini o cicli termo-igrometrici suggerisce la necessità di adottare criteri di verifica dell'aderenza più cautelativi rispetto a quelli basati su condizioni iniziali.

I risultati sottolineano inoltre l'importanza della preparazione superficiale del substrato, che si conferma un parametro progettuale chiave per garantire la durabilità del rinforzo. Superfici ad

elevata rugosità risultano infatti più efficaci nel mantenere le prestazioni nel tempo, contribuendo a limitare i fenomeni di distacco e degradazione dell'interfaccia.

6.3 Carote ricavate dai provini

Le prove di compressione e di determinazione del modulo elastico sulle carote di calcestruzzo sottoposte a diversi invecchiamenti accelerati hanno evidenziato una risposta meccanica fortemente dipendente sia dalla tipologia di esposizione sia dal parametro considerato. Il confronto tra resistenza a compressione e modulo elastico ha permesso di distinguere tra effetti apparentemente migliorativi e reali modifiche microstrutturali del materiale. Per quanto riguarda la resistenza a compressione, tutte le tipologie di immersione in ambiente salino mostrano, in generale, valori superiori rispetto ai provini non trattati (CFV). Gli incrementi risultano particolarmente marcati per i provini SolL e SolS, soprattutto per esposizioni prolungate (3000 ore), con aumenti fino a circa il +30%, mentre la soluzione ASTM D1141-98 evidenzia incrementi più contenuti (+17-22%). Tali risultati suggeriscono un effetto di densificazione dovuto alla saturazione e alla cristallizzazione dei sali nei pori, che tuttavia deve essere interpretato come potenzialmente temporaneo e non necessariamente indicativo di un reale miglioramento strutturale nel lungo periodo. L'analisi del modulo elastico restituisce un quadro più conservativo: per tutte le immersioni saline i valori risultano prossimi a quelli dei CFV (variazioni dell'ordine di $\pm 1-3\%$), indicando che la rigidità interna del calcestruzzo non subisce modifiche significative. Ciò conferma che gli incrementi di resistenza osservati sono prevalentemente legati a fenomeni superficiali, mentre la struttura interna del materiale rimane sostanzialmente invariata. Nei provini sottoposti a cicli caldo-umido, la risposta è fortemente influenzata dalla severità del ciclo. I provini T/T70 mostrano un rapido deterioramento già dopo pochi cicli, evidenziando l'effetto dannoso delle alte temperature. Al contrario, i cicli T50 rappresentano la condizione meno aggressiva, con valori di resistenza spesso superiori ai CFV, attribuibili a un temporaneo effetto benefico di saturazione dei pori. L'introduzione della componente salina nei cicli (TS1 e TS2) porta a comportamenti più instabili: incrementi iniziali di resistenza, seguiti da una progressiva riduzione con l'aumentare dei cicli, fino all'annullamento quasi completo dell'effetto positivo nelle condizioni più severe (TS2). Anche in questo caso, il modulo elastico si dimostra un indicatore più sensibile del danneggiamento: forti riduzioni per i T/T70, variazioni limitate per i T50 e maggiore dispersione nei TS1 e TS2,

attribuibile alla formazione di microfessurazioni indotte dagli shock termo-igrometrici e dalla cristallizzazione dei sali.

Nel complesso, i risultati confermano che l'aumento della resistenza a compressione osservato in alcune condizioni di invecchiamento non corrisponde necessariamente a un miglioramento reale delle prestazioni meccaniche del calcestruzzo. La valutazione congiunta di resistenza e modulo elastico si rivela quindi fondamentale per una corretta interpretazione degli effetti degli invecchiamenti accelerati e per una stima affidabile dello stato di degrado del materiale.

6.4 Risultati sperimentali e applicazioni su edifici esistenti - l'edificio "A" di Sorgane"

I risultati sperimentali ottenuti nel presente lavoro assumono un significato particolarmente rilevante se letti alla luce del caso studio dell'edificio "A. Savioli" di Sorgane. In questo contesto, la presenza di calcestruzzo a vista, elemento identitario dell'opera, impone l'adozione di soluzioni di rinforzo compatibili con il mantenimento dell'espressività materica originaria, escludendo di fatto interventi invasivi o completamente coprenti.

In tale scenario, l'impiego di sistemi FRCM rappresenta una soluzione potenzialmente idonea; tuttavia, i risultati della campagna sperimentale evidenziano come la progettazione di tali interventi non possa basarsi unicamente sulle prestazioni meccaniche iniziali. In particolare, la marcata sensibilità dell'interfaccia fibra-matrice ai cicli termo-igrometrici e agli ambienti aggressivi suggerisce che, nel caso specifico di Sorgane, caratterizzato da fenomeni diffusi di umidità e infiltrazioni, la durabilità del sistema di rinforzo debba essere considerata un parametro progettuale primario.

Le evidenze sperimentali indicano inoltre che, a fronte di una sostanziale stabilità della resistenza ultima, si registrano variazioni significative della rigidità post-fessurativa e della capacità di trasferimento degli sforzi. Ciò implica che, nel dimensionamento degli interventi, particolare attenzione debba essere posta non solo alla verifica della resistenza, ma anche al comportamento deformativo del sistema e all'efficacia dell'aderenza nel tempo.

Un ulteriore aspetto rilevante riguarda la preparazione del supporto: i risultati delle prove di pull-off mostrano chiaramente come superfici caratterizzate da maggiore rugosità garantiscano prestazioni più stabili anche in condizioni di degrado ambientale. Nel caso dell'edificio di

Sorgane, ciò si traduce nella necessità di progettare con attenzione le modalità di intervento sul substrato, compatibilmente con i vincoli di conservazione del calcestruzzo a vista.

Nel complesso, il caso studio evidenzia come i risultati sperimentali ottenuti possano essere direttamente tradotti in criteri progettuali, orientando la scelta dei materiali, delle tecniche applicative e dei parametri di verifica, in un'ottica di durabilità e compatibilità con il costruito esistente

6.5 Prospettive e sviluppi futuri della ricerca

I risultati ottenuti nel presente lavoro aprono diverse prospettive di sviluppo, sia sul piano sperimentale sia su quello modellistico, che potrebbero contribuire in modo significativo all'avanzamento delle conoscenze sulla durabilità dei sistemi FRCM applicati al patrimonio esistente in calcestruzzo armato.

Un primo ambito di approfondimento riguarda l'estensione della sperimentazione a un numero più ampio di miscele di calcestruzzo, rappresentative di differenti epoche costruttive, classi di resistenza e contesti ambientali. Considerata la forte dipendenza dei meccanismi di degrado dalla composizione del cls e dalla sua microstruttura, la costruzione di un database più esteso consentirebbe di migliorare la significatività statistica dei risultati e di supportare in modo più robusto la calibrazione dei modelli di durabilità.

Un ulteriore sviluppo rilevante consiste nell'implementazione di protocolli di invecchiamento accelerato con azioni ambientali combinate, in grado di riprodurre in modo più realistico le condizioni di esercizio delle strutture reali. L'interazione tra carbonatazione, attacco salino, cicli termo-igrometrici e azioni meccaniche rappresenta infatti uno degli aspetti meno esplorati nella letteratura attuale, ma al contempo uno dei più critici per la previsione della vita utile dei sistemi di rinforzo.

Dal punto di vista del materiale composito, risulta di particolare interesse approfondire il ruolo della matrice nei sistemi FRCM-PBO, sia in termini di composizione sia di modifiche mirate (additivi pozzolanici, formulazioni a bassa permeabilità, trattamenti protettivi superficiali), con l'obiettivo di migliorare la durabilità dell'interfaccia fibra-matrice, che dai risultati di questa ricerca emerge come l'elemento più vulnerabile ai meccanismi di degrado ambientale.

Un ulteriore filone di ricerca potrebbe riguardare la correlazione tra prove su coupon, prove di adesione (pull-off) e comportamento strutturale su elementi rinforzati a scala maggiore, al fine di colmare il divario tra caratterizzazione di laboratorio e risposta globale degli elementi strutturali. In quest'ottica, l'integrazione dei risultati sperimentali con modelli meccanici e di danno progressivo rappresenta un passaggio chiave per l'impiego affidabile dei sistemi FRCM nella pratica progettuale.

Infine, in relazione alla conservazione del patrimonio storico in c.a., appare fondamentale sviluppare linee guida specifiche per la scelta e la progettazione dei sistemi di rinforzo, che tengano conto non solo delle prestazioni meccaniche iniziali, ma anche della loro evoluzione nel tempo e della compatibilità con il linguaggio architettonico dell'edificio.

7 Simboli

Simbolo	Definizione
A_f	Area della sezione trasversale del tessuto nudo.
σ_I	Sforzo nel punto di transizione Fase I-II della curva caratteristica FRCM
σ_{II}	Sforzo nel punto di transizione Fase II-III della curva caratteristica FRCM
σ_{III}	Sforzo massimo alla Fase III della curva caratteristica FRCM
ϵ_I	Deformazione nel punto di transizione Fase I-II della curva caratteristica FRCM.
ϵ_{II}	Deformazione nel punto di transizione Fase II-III della curva caratteristica FRCM
ϵ_{III}	Deformazione massima alla Fase III della curva caratteristica FRCM
E_1	Modulo elastico Fase I della curva caratteristica FRCM.
E_2	Modulo elastico Fase II della curva caratteristica FRCM.
E_3	Modulo elastico Fase III della curva caratteristica FRCM
f_{ft}	Resistenza ultima a trazione della fibra
f_c	Resistenza a compressione (Prove sul calcestruzzo)
σ_p	Sforzo nominale corrispondente al precarico ($0,5 \text{ MPa} \leq \sigma_p \leq \sigma_a$), prova determinazione del modulo elastico stabilizzato (Prove sul calcestruzzo)
σ_a	Sforzo nominale massimo applicato corrispondente a ($f_c/3$), Prova determinazione del modulo elastico stabilizzato (Prove sul calcestruzzo)
σ_b	Sforzo nominale ($0,10 \leq \sigma_b \leq 0,2 \times f_c$), Prova determinazione del modulo elastico stabilizzato (Prove sul calcestruzzo)
σ_a^m	Sforzo misurato corrispondente allo sforzo nominale superiore

Simbolo	Definizione
	(Prove sul calcestruzzo)
σ_b^m	Sforzo misurato corrispondente allo sforzo nominale inferiore σ_b , Prova determinazione del modulo elastico stabilizzato (Prove sul calcestruzzo)
$\varepsilon_{a,3}$	Deformazione media allo sforzo superiore al terzo ciclo di applicazione del carico; Prova determinazione del modulo elastico stabilizzato (Prove sul calcestruzzo)
$\varepsilon_{b,2}$	Deformazione media allo sforzo inferiore al secondo ciclo di applicazione del carico, Prova determinazione del modulo elastico stabilizzato (Prove sul calcestruzzo)
A_c	Area della sezione trasversale del provino su cui agisce la forza di compressione, Prova determinazione Resistenza ultima a compressione (Prove sul calcestruzzo)
$E_{c,s}$	Modulo elastico secante stabilizzato (Prove sul calcestruzzo)
V_{us}	Velocità di propagazione dell'onda longitudinale ultrasonica

8 Indice figure

Figura 2-1: Mappa delle parole chiave generata utilizzando VOS-viewer, che fornisce una rappresentazione visiva dei principali temi di ricerca e delle loro interconnessioni su invecchiamento accelerato di sistemi FRCM.	8
Figura 2-2: Tipologie invecchiamento accelerato ad alte temperature in letteratura.	9
Figura 2-3: Grafico distribuzione dei pori, Franzoni et al. (2017).	25
Figura 2-4: Risultati Shear tests provini con malte differenti, Franzoni et al. (2019).	26
Figura 2-5: Resistenza di adesione di provini soggetti a differenti cicli di caldo-umido, Yin et al. (2022).	27
Figura 3-1: Distribuzione delle ricerche per anno di pubblicazione (G. Boccacci et al. 2023).	37
Figura 3-2: Percentuale del tipo di analisi (chimica, fisica, meccanica o elettrochimica) effettuata in letteratura con approccio sperimentale (G. Boccacci et al. 2023).	38
Figura 3-3: Tipologia di danneggiamento per ogni territorio studiato in G.P. Redondo et al. (2021).	39
Figura 3-4: Distribuzione degli edifici in c.a. ora in zona sismica, con riferimento ai requisiti normativi all'epoca di costruzione, (M. A. Parisi et al, 2013).	42
Figura 3-5: Vista esterna edificio "A. Savioli", Sorgane, (https://censimentoarchitetturecontemporanee.cultura.gov.it).	46
Figura 3-6: Dettaglio segni di degrado su alcuni pilastri (Castellini M. 2024).	47
Figura 4-1: Dettaglio rete in PBO.	53
Figura 4-2: Dettaglio malta.	53
Figura 4-3: Realizzazione coupon.	54
Figura 4-4: Dimensioni dei coupon (mm).	55
Figura 4-5: Realizzazione cubetti.	57
Figura 4-6: Prima e Seconda serie test ultrasuoni, la nomenclatura in legenda fa riferimento alla suddivisione in base al tipo di invecchiamento, spiegata in dettaglio nei capitoli seguenti.	58
Figura 4-7: Esempio del trattamento subito su due facce laterali di ogni cubetto.	59
Figura 4-8: Applicazione del composito sui cubetti.	60
Figura 4-9: Dimensioni cubetti (mm).	60
Figura 4-10: Tipologie ambiente salino.	63
Figura 4-11: Tipologie cicli caldo-umido.	65
Figura 4-12: Misure e applicazione piastrine con punto applicazione trasduttori sui coupon (mm).	67
Figura 4-13: Tipico grafico sforzo-deformazione di una prova a trazione su un provino in FRCM.	68
Figura 4-14: Tipi di rottura di un coupon in FRCM.	69
Figura 4-15: Misure e applicazione piastra (mm).	70
Figura 4-16: Tipi di rottura, pull-off.	70
Figura 4-17: a) dimensioni provino (mm) e posizionamento estensimetri, b) posizionamento provino nella macchina di prova.	71
Figura 4-18: Ciclo per la determinazione del modulo di elasticità secante stabilizzato (UNI EN 12390-13, Metodo B).	72
Figura 4-19: Esempio test di compressione, provino CFS1_01.	73
Figura 5-1: Curve carico-spostamento provini NT.	76

Figura 5-2: Provini NT_02 ed NT_03, nei quali è ben visibile il tipo di rottura intercorso e il manifestarsi di fessure lungo tutta la lunghezza libera.	76
Figura 5-3: Curve sforzo-deformazione coupon NT.	77
Figura 5-4: a) provino prima e dopo l'invecchiamento (1000 ore), b) provino prima e dopo l'invecchiamento (3000 ore).	81
Figura 5-5: Curve carico-spostamento provini S1 e S3.	82
Figura 5-6: Provini S1_06 ed S3_05, nei quali è ben visibile il tipo di rottura intercorso e il manifestarsi di fessure lungo tutta la lunghezza libera.	82
Figura 5-7: Provino S1_02 dove è ben visibile il distacco della piastra inferiore.	83
Figura 5-8: Curve sforzo-deformazione coupon S1.	83
Figura 5-9: Curve sforzo-deformazione coupon S3.	85
Figura 5-10: Confronto risultati sforzo-deformazione delle medie dei provini NT-S1 ed S3.	88
Figura 5-11: a) provino prima e dopo l'invecchiamento (1000 ore), b) provino prima e dopo l'invecchiamento (3000 ore).	89
Figura 5-12: Curve carico-spostamento provini SolL1000 e SolL3000.	90
Figura 5-13: Provini SolL3000_05 ed SolL1000_05, esempio prove interrotte.	90
Figura 5-14: Provino SolL1000_01, rottura matrice parte inferiore.	91
Figura 5-15: Curve sforzo-deformazione coupon SolL1000.	91
Figura 5-16: Curve sforzo-deformazione coupon SolL3000.	93
Figura 5-17: Confronto risultati sforzo-deformazione delle medie dei provini NT-SolL1000 ed SolL3000.	95
Figura 5-18: a) provino prima e dopo l'invecchiamento (1000 ore), b) provino prima e dopo l'invecchiamento (3000 ore).	98
Figura 5-19: Curve carico-spostamento provini SolS1000 e SolS3000.	99
Figura 5-20: Provini SolS1000_05 ed SolL3000_04, prove interrotte.	100
Figura 5-21: Provino SolS1000_01; SolS1000_03 e SolS1000_04, rottura matrice.	100
Figura 5-22: a) Provino SolS3000_3; b) Provino SolS1000_02; c) Provino SolS3000_01; d) Provino SolS3000_06.	100
Figura 5-23: Curve sforzo-deformazione coupon SolS1000.	101
Figura 5-24: Curve sforzo-deformazione coupon SolS3000.	103
Figura 5-25: Confronto risultati sforzo-deformazione delle medie dei provini NT-SolS1000 ed SolS3000.	105
Figura 5-26: Proprietà Meccaniche dei differenti tipi di invecchiamento (ambiente salino).	109
Figura 5-27: a) provino prima e dopo 10 cicli, b) provino prima e dopo 20 cicli, c) provino prima e dopo 30 cicli, d) provino prima e dopo 40 cicli, e) provino prima e dopo 50 cicli.	111
Figura 5-28: Risultati carico-spostamento dei provini CU10-CU20-CU30-CU40 e CU50.	112
Figura 5-29: Provini CU_50_01; CU_40_03 e CU_50_02, nei quali è ben visibile il tipo di rottura intercorso e il manifestarsi di fessure lungo tutta la lunghezza libera.	113
Figura 5-30: Curve sforzo-deformazione coupon CU10-CU20-CU30-CU40-CU50.	115
Figura 5-31: a) provino prima e dopo 10 cicli, b) provino prima e dopo 20 cicli, c) provino prima e dopo 30 cicli, d) provino prima e dopo 40 cicli, e) provino prima e dopo 50 cicli.	118
Figura 5-32: Risultati carico-spostamento dei provini CU50_10-CU50_20-CU50_30-CU50_40 e CU50_50.	119
Figura 5-33: Provini CU50_20_03; CU50_40_03, nei quali è ben visibile il tipo di rottura intercorso e il manifestarsi di fessure lungo tutta la lunghezza libera.	120
Figura 5-34: Curve sforzo-deformazione coupon CU50_10-CU50_20-CU50_30-CU50_40-CU50_50.	121

Figura 5-35: a) provino prima e dopo 10 cicli, b) provino prima e dopo 20 cicli, c) provino prima e dopo 30 cicli, d) provino prima e dopo 40 cicli, e) provino prima e dopo 50 cicli.-----	124
Figura 5-36: Dettaglio comparsa fessurazioni longitudinali, WDL_30_01 e WDL_50_01.-----	124
Figura 5-37: Risultati carico-spostamento dei provini WDL_10-WDL_20-WDL_30-WDL_40 e WDL_50.-----	125
Figura 5-38: Provini WDL_30_02; WDL_10_02, nei quali è ben visibile il tipo di rottura intercorso e il manifestarsi di fessure lungo tutta la lunghezza libera.-----	126
Figura 5-39: Provini WDL_30_01; WDL_30_02; WDL_50_02, nei quali la rottura è avvenuta nella zona centrale della lunghezza libera.-----	126
Figura 5-40: Curve Sforzo-Deformazione provini WDL_10-WDL_20-WDL_30-WDL_40 e WDL_50.-----	128
Figura 5-41: a) provino prima e dopo 10 cicli, b) provino prima e dopo 20 cicli, c) provino prima e dopo 30 cicli, d) provino prima e dopo 40 cicli, e) provino prima e dopo 50 cicli.-----	131
Figura 5-42: Dettaglio comparsa fessurazioni longitudinali, WDS_50_02.-----	132
Figura 5-43: Risultati carico-spostamento dei provini WDS_10-WDS_20-WDS_30-WDS_40 e WDS_50.-----	133
Figura 5-44: Provini WDS_30_01; WDS_10_03, nei quali è ben visibile il tipo di rottura intercorso e il manifestarsi di fessure lungo tutta la lunghezza libera.-----	133
Figura 5-45: Curve Sforzo-Deformazione provini WDS_10-WDS_20-WDS_30-WDS_40 e WDS_50.-----	135
Figura 5-46: Proprietà Meccaniche dei differenti tipi di invecchiamento (cicli caldo umido).---	139
Figura 5-47: tipi di rotture: a) CFV_02_A; b) CFV_01_B; c) CFV_03_B; d) CFV_04_A.-----	143
Figura 5-48: tipi di rotture: Low (faccia con livello di rugosità basso), High (faccia con livello di rugosità alto).-----	143
Figura 5-49: a) provino prima dell'invecchiamento faccia calcestruzzo, b) provino dopo 1000 ore faccia calcestruzzo, c) provino prima dell'invecchiamento faccia composito, d) provino dopo 1000 ore faccia composito.-----	147
Figura 5-50: Risultati resistenza provini CS1 e CFS1 confrontati con quelli non condizionati (CFV).-----	150
Figura 5-51: tipi di rotture: a) CFS1_04_A; b) CS1_03_A; c) CS1_03_B; d) CFS1_05_A.-----	151
Figura 5-52: Tipi di rotture: Low (faccia con livello di rugosità basso), High (faccia con livello di rugosità alto).-----	152
Figura 5-53: a) provino prima dell'invecchiamento faccia calcestruzzo, b) provino dopo 3000 ore faccia calcestruzzo, c) provino prima dell'invecchiamento faccia composito, d) provino dopo 3000 ore faccia composito.-----	153
Figura 5-54: Risultati resistenza provini CS3 e CFS3 confrontati con quelli non condizionati (CFV).-----	157
Figura 5-55: Tipi di rotture: a) CS3_03_B; b) CS3_04_B; c) CFS3_03_A; d) CFS3_05_B.-----	158
Figura 5-56: Tipi di rotture: Low (faccia con livello di rugosità basso), High (faccia con livello di rugosità alto).-----	159
Figura 5-57: Risultati confronto resistenza provini CS1/CS3 e CFS1/CFS3 e CFV.-----	160
Figura 5-58: a) provino prima dell'invecchiamento faccia calcestruzzo, b) provino dopo 1000 ore faccia calcestruzzo, c) provino prima dell'invecchiamento faccia composito, d) provino dopo 1000 ore faccia composito.-----	161
Figura 5-59: Risultati resistenza provini SolL1 confrontati con quelli non condizionati (CFV).-----	164
Figura 5-60: Tipi di rotture: a) SolL1_01_A; b) SolL1_05_B; c) SolL1_04_B; d) SolL1_04_B'.-----	165

Figura 5-61: Tipi di rotture: Low (faccia con livello di rugosità basso) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), High (faccia con livello di rugosità alto) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), provini SolL1.	166
Figura 5-62: a) provino prima dell'invecchiamento faccia calcestruzzo, b) provino dopo 3000 ore faccia calcestruzzo, c) provino prima dell'invecchiamento faccia composito, d) provino dopo 3000 ore faccia composito.	167
Figura 5-63: Risultati resistenza provini SolL3 confrontati con quelli non condizionati (CFV).	170
Figura 5-64: Tipi di rotture: a) SolL3_02_B; b) SolL3_01_B; c) SolL3_06_A; d) SolL3_04_B'.	171
Figura 5-65: Tipi di rotture: Low (faccia con livello di rugosità basso) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), High (faccia con livello di rugosità alto) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), provini SolL3.	172
Figura 5-66: Risultati confronto resistenza provini SolL1, SolL3 e CFV.	173
Figura 5-67: a) provino prima dell'invecchiamento faccia calcestruzzo, b) provino dopo 1000 ore faccia calcestruzzo, c) provino prima dell'invecchiamento faccia composito, d) provino dopo 1000 ore faccia composito.	174
Figura 5-68: Risultati resistenza provini SolS1 confrontati con quelli non condizionati (CFV).	177
Figura 5-69: Tipi di rotture: a) SolS1_04_B; b) SolS1_02_A; c) SolS1_06_A'; d) SolS1_03_B'.	178
Figura 5-70: Tipi di rotture: Low (faccia con livello di rugosità basso) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), High (faccia con livello di rugosità alto) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), provini SolS1.	179
Figura 5-71: a) provino prima dell'invecchiamento faccia calcestruzzo, b) provino dopo 1000 ore faccia calcestruzzo, c) provino prima dell'invecchiamento faccia composito, d) provino dopo 1000 ore faccia composito.	180
Figura 5-72: Risultati resistenza provini SolS3 confrontati con quelli non condizionati (CFV).	183
Figura 5-73: Tipi di rotture: a) SolS3_01_B; b) SolS3_04_B; c) SolS3_02_A; d) SolS3_05_A.	184
Figura 5-74: Tipi di rotture: Low (faccia con livello di rugosità basso) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), High (faccia con livello di rugosità alto) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), provini SolS3.	185
Figura 5-75: Risultati confronto resistenza provini SolL1, SolL3 e CFV.	186
Figura 5-76: Proprietà Meccaniche dei differenti tipi di invecchiamento (ambiente salino).	188
Figura 5-77: a) provino prima dell'invecchiamento b) provino dopo 10 cicli, c) provino dopo 20 cicli, d) provino dopo 30 cicli, e) provino dopo 40 cicli, f) provino dopo 50 cicli.	190
Figura 5-78: Dettaglio fessurazione T20_03 e T30_03.	191
Figura 5-79: Risultati resistenza provini T\T70_10, T\T70_20, T\T70_30, T\T70_40 e T\T70_50 confrontati con quelli non condizionati (CFV).	197
Figura 5-80: Tipi di rotture: a) T40_01_A; b) T10_02_A; c) T50_03_B; d) T10_01_B.	199
Figura 5-81: Tipi di rotture: Low (faccia con livello di rugosità basso) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), High (faccia con livello di rugosità alto) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), provini T e T70.	200
Figura 5-82: a) provino prima dell'invecchiamento b) provino dopo 10 cicli, c) provino dopo 20 cicli, d) provino dopo 30 cicli, e) provino dopo 40 cicli, f) provino dopo 50 cicli.	201
Figura 5-83: Dettaglio fessurazione T50_50_01.	202

Figura 5-84: Risultati resistenza provini T50_10, T50_20, T50_30, T50_40 e T50_50 confrontati con quelli non condizionati (CFV).-----	207
Figura 5-85: Tipi di rotture: a) T50_10_03_A'; b) T50_50_01_B'; c) T50_30_03_B'; d) T50_40_01_A'..-----	208
Figura 5-86: Tipi di rotture: Low (faccia con livello di rugosità basso) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), High (faccia con livello di rugosità alto) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), provini T50.-----	209
Figura 5-87: a) provino prima dell'invecchiamento b) provino dopo 10 cicli, c) provino dopo 20 cicli, d) provino dopo 30 cicli, e) provino dopo 40 cicli, f) provino dopo 50 cicli.-----	210
Figura 5-88: Comparsa di lesioni lungo l'interfaccia composito substrato.-----	211
Figura 5-89: Risultati resistenza provini TS1_10, TS1_20, TS1_30, TS1_40 e TS1_50 confrontati con quelli non condizionati (CFV).-----	216
Figura 5-90: Tipi di rotture: a) TS1_40_03_B; b) TS1_50_01_A; c) TS1_20_01_A; d) TS1_10_01_B'.-----	217
Figura 5-91: Tipi di rotture: Low (faccia con livello di rugosità basso) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), High (faccia con livello di rugosità alto) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), provini TS1-----	218
Figura 5-92: a) provino prima dell'invecchiamento b) provino dopo 10 cicli, c) provino dopo 20 cicli, d) provino dopo 30 cicli, e) provino dopo 40 cicli, f) provino dopo 50 cicli-----	219
Figura 5-93: Comparsa di lesioni lungo l'interfaccia composito substrato.-----	220
Figura 5-94: Lesioni lungo l'interfaccia composito substrato e completo distacco del composito dopo 24cicli.-----	220
Figura 5-95: Risultati resistenza provini TS2_10, TS2_20, TS2_30, TS2_40 e TS2_50 confrontati con quelli non condizionati (CFV).-----	225
Figura 5-96: Tipi di rotture: a) TS2_20_02_A'; b) TS2_10_03_A; c) TS2_50_01_B'; d) TS2_10_02_B.-----	227
Figura 5-97: Tipi di rotture: Low (faccia con livello di rugosità basso) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), High (faccia con livello di rugosità alto) pre (fibra applicata prima dell'invecchiamento) e post (fibra applicata dopo l'invecchiamento), provini TS2.-----	228
Figura 5-98: Proprietà Meccaniche dei differenti tipi di invecchiamento (cicli caldo umido).-----	230
Figura 5-99: Confronto test ultrasuoni provini CFV su cubetti (PRE) e su carote (POST).-----	233
Figura 5-100: Confronto resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali confrontati con modulo elastico calcolato come da normativa NTC2018 11.2.5. dei provini CFV.-----	234
Figura 5-101: Confronto test ultrasuoni provini CS1-CFS1 prima e dopo l'invecchiamento accelerato.-----	235
Figura 5-102: Confronto test ultrasuoni provini CS3-CFS3 prima e dopo l'invecchiamento accelerato.-----	236
Figura 5-103: Confronto resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali confrontati con modulo elastico calcolato come da normativa NTC2018 11.2.5. dei provini CS1-CFS1 e CS3-CFS3.-----	238
Figura 5-104: Confronto valori medi resistenza a compressione CFV; CS1-CFS1 e CS3-CFS3.---	239
Figura 5-105: Confronto valori resistenza a compressione e modulo elastico dei provini CFV; CS1-CFS1 e CS3-CFS3.-----	239

Figura 5-106: Confronto test ultrasuoni provini SolL1000 prima e dopo l'invecchiamento accelerato.	240
Figura 5-107: Confronto test ultrasuoni provini SolL3000 prima e dopo l'invecchiamento accelerato.	241
Figura 5-108: Confronto resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali confrontati con modulo elastico calcolato come da normativa NTC2018 11.2.5. dei provini SolL1000 e SolL3000.	243
Figura 5-109: Confronto valori medi resistenza a compressione CFV; SolL1000 e SolL3000.	243
Figura 5-110: Confronto valori resistenza a compressione e modulo elastico dei provini CFV; SolL1000 e SolL3000.	244
Figura 5-111: Confronto test ultrasuoni provini SolS1000 prima e dopo l'invecchiamento accelerato.	245
Figura 5-112: Confronto test ultrasuoni provini SolS3000 prima e dopo l'invecchiamento accelerato.	246
Figura 5-113: Confronto resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali confrontati con modulo elastico calcolato come da normativa NTC2018 11.2.5. dei provini SolS1000 e SolS3000.	248
Figura 5-114: Confronto valori medi resistenza a compressione CFV; SolS1000 e SolS3000.	248
Figura 5-115: Confronto valori resistenza a compressione e modulo elastico dei provini CFV; SolS1000 e SolS3000.	249
Figura 5-116: Confronto valori medi resistenza a compressione ambiente salino.	250
Figura 5-117: Confronto valori del modulo elastico ambiente salino.	251
Figura 5-118: Confronto test ultrasuoni provini T e T70 prima e dopo l'invecchiamento accelerato.	252
Figura 5-119: Confronto resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali confrontati con modulo elastico calcolato come da normativa NTC2018 11.2.5. dei provini T e T70.	255
Figura 5-120: Confronto valori medi resistenza a compressione CFV; T e T70.	256
Figura 5-121: Confronto valori resistenza a compressione e modulo elastico dei provini CFV; T e T70.	257
Figura 5-122: Confronto test ultrasuoni provini T50 prima e dopo l'invecchiamento accelerato.	258
Figura 5-123: Confronto resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali confrontati con modulo elastico calcolato come da normativa NTC2018 11.2.5. dei provini T50.	260
Figura 5-124: Confronto valori medi resistenza a compressione CFV; T50.	261
Figura 5-125: Confronto valori resistenza a compressione e modulo elastico dei provini CFV; T50.	262
Figura 5-126: Confronto test ultrasuoni provini TS1 prima e dopo l'invecchiamento accelerato.	263
Figura 5-127: Confronto resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali confrontati con modulo elastico calcolato come da normativa NTC2018 11.2.5. dei provini TS1.	265
Figura 5-128: Confronto valori medi resistenza a compressione CFV; TS1.	266
Figura 5-129: Confronto valori resistenza a compressione e modulo elastico dei provini CFV; TS1.	267
Figura 5-130: Confronto test ultrasuoni provini TS2 prima e dopo l'invecchiamento accelerato.	268
Figura 5-131: Confronto resistenza a compressione e modulo elastico sperimentali confrontati con modulo elastico calcolato come da normativa NTC2018 11.2.5. dei provini TS2.	270

Figura 5-132: Confronto valori medi resistenza a compressione CFV; TS2.	271
Figura 5-133: Confronto valori resistenza a compressione e modulo elastico dei provini CFV; TS2.	272
Figura 5-134: Confronto valori medi resistenza a compressione cicli caldo-umido.	272
Figura 5-135: Confronto valori del modulo elastico cicli caldo-umido.	274

9 Indice tabelle

Tabella 2-1: Prove di invecchiamento artificiale AC 434, 2018.....	4
Tabella 2-2: Tipologia di invecchiamento, tipo di prove AC 434,2018.....	4
Tabella 2-3: Prove di invecchiamento artificiale CSLLPP, 2019.....	7
Tabella 2-4: Effetto della temperatura sulle proprietà meccaniche del FRCM in letteratura.....	14
Tabella 2-5: Effetto dell'invecchiamento alcalino sulle proprietà meccaniche del FRCM in letteratura.....	20
Tabella 2-6: Effetto dell'invecchiamento salino sulle proprietà meccaniche del FRCM in letteratura.....	29
Tabella 2-7: Effetto dei cicli gelo/disgelo sulle proprietà meccaniche del FRCM in letteratura.....	33
Tabella 4-1: Composizione della miscela (Castellini M., 2024).....	52
Tabella 4-2: Proprietà meccaniche, fornite dal produttore, della fibra in PBO.....	53
Tabella 4-3: Fasi di preparazione dei coupon.....	55
Tabella 4-4: ID provini.....	56
Tabella 4-5: Fasi di preparazione dei provini.....	57
Tabella 4-6: ID provini.....	61
Tabella 5-1: Risultati coupon NT.....	77
Tabella 5-2: Media e COV coupon NT.....	78
Tabella 5-3: Confronto risultati sperimentali dei provini non trattati con risultati di letteratura (Caggegi et al. 2017 ed Arboleda et al. 2016).....	79
Tabella 5-4: Risultati coupon S1.....	84
Tabella 5-5: Risultati coupon S3.....	86
Tabella 5-6: Confronto valori medi e COV coupon NT, S1 ed S3.....	88
Tabella 5-7: Risultati coupon SolL1000.....	92
Tabella 5-8: Risultati coupon SolL3000.....	94
Tabella 5-9: Confronto valori medi e COV coupon NT, SolL1000 ed SolL3000.....	96
Tabella 5-10: Risultati coupon SolS1000.....	101
Tabella 5-11: Risultati coupon SolS3000.....	103
Tabella 5-12: Confronto valori medi e COV coupon NT, SolS1000 ed SolS3000.....	105
Tabella 5-13: Confronto valori medi e COV coupon NT, SolL1000, SolL3000, SolS1000 ed SolS3000.....	107
Tabella 5-14: Risultati coupon CU10-CU20-CU30-CU40-CU50 con confronto NT.....	115
Tabella 5-15: Risultati coupon CU50_10-CU50_20-CU50_30-CU50_40-CU50_50, con confronto NT.....	122
Tabella 5-16: Risultati coupon WDL_10-WDL_20-WDL_30-WDL_40-WDL_50 e confronto con NT.....	129
Tabella 5-17: Risultati coupon WDS_10-WDS_20-WDS_30-WDS_40-WDS_50 e confronto con NT.....	136
Tabella 5-18: Risultati CFV.....	142
Tabella 5-19: Risultati valori medi CFV.....	142
Tabella 5-20: Confronto risultati sperimentali dei provini non trattati con risultati di letteratura (Ebeada e Younis, 2019).....	145
Tabella 5-21: Risultati CS1.....	148
Tabella 5-22: Risultati CFS1.....	149
Tabella 5-23: Risultati valori medi CS1, CFS1 e confronto con CFV.....	150

Tabella 5-24: Risultati CS3.....	154
Tabella 5-25: Risultati CFS3.....	155
Tabella 5-26: Risultati valori medi CS3, CFS3 e confronto con CFV.....	156
Tabella 5-27: Risultati SolL1.....	163
Tabella 5-28: Risultati valori medi CS3, CFS3 e confronto con CFV.....	163
Tabella 5-29: Risultati SolL3.....	168
Tabella 5-30: Risultati valori medi SolL3 e confronto con CFV.....	169
Tabella 5-31: Risultati SolS1.....	176
Tabella 5-32: Risultati valori medi SolS1 e confronto con CFV.....	176
Tabella 5-33: Risultati SolS3.....	181
Tabella 5-34: Risultati valori medi SolS3 e confronto con CFV.....	182
Tabella 5-35: Risultati T.....	193
Tabella 5-36: Risultati T70.....	195
Tabella 5-37: Risultati T50.....	205
Tabella 5-38: Risultati TS1.....	214
Tabella 5-39: Risultati TS2.....	223
Tabella 5-40: Valori resistenza ultima a compressione e modulo elastico CFV.....	233
Tabella 5-41: Valori resistenza ultima a compressione e modulo elastico CS1 e CFS1.....	237
Tabella 5-42: Valori resistenza ultima a compressione e modulo elastico CS3 e CFS3.....	237
Tabella 5-43: Valori resistenza ultima a compressione e modulo elastico SolL1000.....	241
Tabella 5-44: Valori resistenza ultima a compressione e modulo elastico SolL3000.....	242
Tabella 5-45: Valori resistenza ultima a compressione e modulo elastico SolS1000.....	246
Tabella 5-46: Valori resistenza ultima a compressione e modulo elastico SolS3000.....	247
Tabella 5-47: Valori resistenza ultima a compressione e modulo elastico T e T70.....	254
Tabella 5-48: Valori resistenza ultima a compressione e modulo elastico T50.....	259
Tabella 5-49: Valori resistenza ultima a compressione e modulo elastico TS1.....	264
Tabella 5-50: Valori resistenza ultima a compressione e modulo elastico TS2.....	269

Bibliografia

AC 434. 2018. Acceptance criteria for masonry and concrete strengthening using fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM) composite systems. International Code Council Evaluation Service (ICC_ES).

Italian Standard "Linee Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCM) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti". 2019. Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (CSLLPP)

Trapko, T., 2013. The effect of high temperature on the performance of CFRP and FRCM confined concrete elements. *Composites Part B: Engineering* 54, 138–145.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.05.016>

Al-Salloum, Y.A., Almusallam, T.H., Elsanadedy, H.M., Iqbal, R.A., 2016. Effect of elevated temperature environments on the residual axial capacity of RC columns strengthened with different techniques. *Construction and Building Materials* 115, 345–361.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.041>

Cerniauskas, G., Tetta, Z., Bournas, D.A., Bisby, L.A., 2020. Concrete confinement with TRM versus FRP jackets at elevated temperatures. *Mater Struct* 53, 58.
<https://doi.org/10.1617/s11527-020-01492-x>

Ferretti, F., Canestri, M., Mazzotti, C., 2022. Effect of temperature variations on the bond behavior of FRCM applied to masonry. *Mater Struct* 55, 166. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-02002-x>

Yang, P., Krevaiakas, T., 2024. Experimental and analytical investigation of the tensile mechanism of textile-reinforced mortar (TRM) composites and fabric grids in elevated temperatures. *Construction and Building Materials* 431, 136495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136495>

Canestri, M., Ferretti, F., Mazzotti, C., 2025. Glass fibre-based FRCM systems under mild temperature exposures. *Journal of Building Engineering* 103, 112072. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112072>

Ombres, L., Mazzuca, P., Verre, S., 2022a. Durability Under Thermal Actions of Concrete Elements Confined with an Inorganic Matrix Fiber-Reinforced Composites, in: Sena-Cruz, J., Correia, L., Azenha, M. (Eds.), *Proceedings of the 3rd RILEM Spring Convention and Conference (RSCC 2020)*, RILEM Bookseries. Springer International Publishing, Cham, pp. 99–108. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76465-4_9

Estevan, L., Baeza, F.J., Varona, F.B., Pereiro, J., 2023. Effect of high temperature on textile reinforced Mortar-to-masonry bond. *Construction and Building Materials* 393, 132123. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132123>

Mazzuca, P., Ombres, L., Guglielmi, M., Verre, S., 2023. Residual Mechanical Properties of PBO FRCM Composites after Elevated Temperature Exposure: Experimental and Comparative Analysis. *J. Mater. Civ. Eng.* 35, 04023383. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-15917>

Bertolli, V., Signorini, C., Nobili, A., D'Antino, T., 2023. Influence of severe thermal preconditioning on the bond between carbon FRCM and masonry substrate: Effect of textile pre-impregnation. *Construction and Building Materials* 409, 134028. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134028>

Ombres, L., 2017. Structural performances of thermally conditioned PBO FRCM confined concrete cylinders. *Composite Structures* 176, 1096–1106. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.026>

Donnini, J., De Caso Y Basalo, F., Corinaldesi, V., Lancioni, G., Nanni, A., 2017. Fabric-reinforced cementitious matrix behavior at high-temperature: Experimental and numerical results. *Composites Part B: Engineering* 108, 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.10.004>

Ombres, L., Mazzuca, P., Verre, S., 2022b. Effects of the Thermal Conditioning on the Mechanical Properties of an FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix) Strengthening System, in: Sena-Cruz, J., Correia, L., Azenha, M. (Eds.), *Proceedings of the 3rd RILEM Spring Convention and Conference (RSCC 2020)*, RILEM Bookseries. Springer International Publishing, Cham, pp. 89–98. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76465-4_8

Raoof, S.M., Bournas, D.A., 2017. Bond between TRM versus FRP composites and concrete at high temperatures. *Composites Part B: Engineering* 127, 150–165. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.064>

Tran, M.T., Vu, X.H., Ferrier, E., 2019. Mesoscale experimental investigation of thermomechanical behaviour of the carbon textile reinforced refractory concrete under simultaneous mechanical loading and elevated temperature. *Construction and Building Materials* 217, 156–171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.067>

Tlaji, T., Vu, X.H., Michel, M., Ferrier, E., Larbi, A.S., 2020. Physical, chemical and thermomechanical characterisation of glass textile-reinforced concretes (TRC): Effect of elevated temperature and of cementitious matrix nature on properties of TRC. *Materials Today Communications* 25, 101580. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101580>

Micelli, F., 2019. Residual tensile strength of dry and impregnated reinforcement fibres after exposure to alkaline environments. *Composites Part B*.

Williams Portal, N., Flansbjerg, M., Johannesson, P., Malaga, K., Lundgren, K., 2016. Tensile behaviour of textile reinforcement under accelerated ageing conditions. *Journal of Building Engineering* 5, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.11.006>

Paul, S., Gettu, R., Naidu Arnepalli, D., Samanthula, R., 2023. Experimental evaluation of the durability of glass Textile-Reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 406, 133390. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133390>

Fares, S., De Santis, S., Moretti, G., De Felice, G., 2025. Long-Term Durability of Basalt FRCM in Alkaline Environment, in: Milani, G., Ghiassi, B. (Eds.), 18th International Brick and Block Masonry Conference, Lecture Notes in Civil Engineering. Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 587–597. https://doi.org/10.1007/978-3-031-73310-9_41

Azimi, N., Schollbach, K., Oliveira, D.V., Lourenço, P.B., 2025. Effect of exposure to alkaline environment on the mechanical properties of TRM composites. *Journal of Building Engineering* 105, 12468. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112468>

Butler, M., Mechtcherine, V., Hempel, S., 2009. Experimental investigations on the durability of fibre–matrix interfaces in textile-reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites* 31, 221–231. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.02.005>

Butler, M., Mechtcherine, V., Hempel, S., 2010. Durability of textile reinforced concrete made with AR glass fibre: effect of the matrix composition. *Mater Struct* 43, 1351–1368. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9586-8>

Donnini, J., Bompadre, F., Corinaldesi, V., 2020. Tensile Behavior of a Glass FRCM System after Different Environmental Exposures. Processes 8, 1074. <https://doi.org/10.3390/pr8091074>

Bompadre, F., Donnini, J., 2022. Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Carbon Yarns with Different Surface Treatments Embedded in a Cementitious Mortar: Mechanical and Durability Studies. Materials 15, 3927. <https://doi.org/10.3390/ma15113927>

Arboleda, D., Babaeidarabad, S., Hays, C.D., Nanni, A., n.d. 2014. DURABILITY OF FABRIC REINFORCED CEMENTITIOUS MATRIX (FRCM) COMPOSITES.

Calabrese, A.S., D'Antino, T., Colombi, P., Poggi, C., 2022. Long-Term Behavior of PBO FRCM and Comparison with Other Inorganic-Matrix Composites. Materials 15, 3281. <https://doi.org/10.3390/ma15093281>

Fares, S., Fugger, R., De Santis, S., De Felice, G., 2022. Saltwater and Alkali Resistance of Steel Reinforced Grout Composites with Stainless Steel, in: Calabrò, F., Della Spina, L., Piñeira Mantiñán, M.J. (Eds.), New Metropolitan Perspectives, Lecture Notes in Networks and Systems. Springer International Publishing, Cham, pp. 2183–2191. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06825-6_210

Donnini, J., Mobili, A., Maracchini, G., Chiappini, G., Tittarelli, F., Corinaldesi, V., 2024. A multiperformance comparison between lime, cementitious and alkali-activated TRM systems: Mechanical, environmental and energy perspectives. Construction and Building Materials 440, 137396. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137396>

Alexander, A.E., Shashikala, A.P., 2023. Studies on the mechanical and durability performance of textile reinforced geopolymer concrete beams. Materials Today Communications 35, 105837. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105837>

Donnini, J., 2019. Durability of glass FRCM systems: Effects of different environments on mechanical properties. *Composites Part B: Engineering* 174, 107047. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107047>

Fares, S., Meriggi, P., De Santis, S., De Felice, G., 2025. Insight on the Durability of Steel Reinforced Grout (SRG) Systems for the Strengthening of Historical Constructions, in: Mazzolani, F.M., Landolfo, R., Faggiano, B. (Eds.), *Protection of Historical Constructions, Lecture Notes in Civil Engineering*. Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 431–439. https://doi.org/10.1007/978-3-031-87312-6_53

Alatawna, A., Nahum, L., Sripada, R., Birenboim, M., Regev, O., Peled, A., 2022. Textile-reinforced mortar: Durability in salty environment. *Cement and Concrete Composites* 130, 104534. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104534>

Franzoni, E., Gentilini, C., Santandrea, M., Zanutto, S., Carloni, C., 2017. Durability of steel FRCM-masonry joints: effect of water and salt crystallization. *Mater Struct* 50, 201. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1070-2>

Franzoni, E., Gentilini, C., Santandrea, M., Carloni, C., 2018. Effects of rising damp and salt crystallization cycles in FRCM-masonry interfacial debonding: Towards an accelerated laboratory test method. *Construction and Building Materials* 175, 225–238. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.164>

Franzoni, E., Santandrea, M., Gentilini, C., Fregni, A., Carloni, C., 2019. The role of mortar matrix in the bond behavior and salt crystallization resistance of FRCM applied to masonry. *Construction and Building Materials* 209, 592–605. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.059>

Yin, S., Wang, F., Zhang, C., Liu, S., 2022. Research on the interface bonding performance between FRCM and masonry under salt erosion environment. *Journal of Building Engineering* 46, 103755. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103755>

Wang, L., Yin, S., Wang, F., 2023. Interfacial bonding performance of textile reinforced ECC and seawater sea-sand concrete under a dry-wet environment. *Construction and Building Materials* 368,130384. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130384>

Yin, S.-P., Peng, C., Jin, Z.-Y., 2016. Research on Mechanical Properties of Axial-Compressive Concrete Columns Strengthened with TRC under a Conventional and Chloride Wet-Dry Cycle Environment. *J. Compos. Constr.* 21, 04016061. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000725](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000725)

Yin, S., Hua, Y., Yu, Y., 2020. Flexural Durability and Chloride Diffusion Equation of TRC-Strengthened Beams under a Chloride Environment. *KSCE Journal of Civil Engineering* 24, 1868–1880. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-1640-7>

Li, S., Yin, S., Wang, L., Hu, X., 2021. Mechanical properties of eccentrically compressed columns strengthened with textile-reinforced concrete under the coupled action of chloride salt corrosion and loading. *Applied Ocean Research* 116, 102884. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102884>

Sheng, J., Wang, L., Yin, S., 2021. Study on the mechanical performance of TRC-strengthened RC beams under a salt freeze–thaw environment. *Cold Regions Science and Technology* 192, 103384. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103384>

Colombo, I.G., Colombo, M., Di Prisco, M., 2015. Tensile behavior of textile reinforced concrete subjected to freezing–thawing cycles in un-cracked and cracked regimes. *Cement and Concrete Research* 73, 169–183. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.001>

Nobili, A., Signorini, C., 2017. On the effect of curing time and environmental exposure on impregnated Carbon Fabric Reinforced Cementitious Matrix (CFRCM) composite with design considerations. *Composites Part B: Engineering* 112, 300–313. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.022>

De Munck, M., El Kadi, M., Tsangouri, E., Vervloet, J., Verbruggen, S., Wastiels, J., Tysmans, T., Remy, O., 2018. Influence of environmental loading on the tensile and cracking behaviour of textile reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials* 181, 325–334. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.045>

Dalalbashi, A., Ghiassi, B., Oliveira, D.V., 2021. Influence of freeze–thaw cycles on the pull-out response of lime-based TRM composites. *Construction and Building Materials* 313, 125473. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125473>

Dalalbashi, A., Ghiassi, B., Oliveira, D.V., 2022. Freeze-thaw effects on the performance of TRMstrengthened masonry. *Journal of Building Engineering* 59, 105077. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105077>

Canziani, A., Quist, W., 2025. CONCRETO Code Book – Study on Historic Concrete Conservation. DOCOMOMO International. <https://doi.org/10.52200/docomomo.books.02>

ICOMOS, Madrid-New Deli 2017. Approaches to the Conservation of Twentieth - Century Cultural Heritage.

Figenschau, I. (2019). The Heritage of War and the Discourse of Sustainability. *Norwegian Archaeological Review*, 52(2), 89–108. <https://doi.org/10.1080/00293652.2019.1691253>

Boccacci, G., Frasca, F., Bartolucci, B., Vergelli, L., Bertolin, C., Siani, A.M., 2023. CLIMATE INDUCED CONSERVATION RISKS OF HISTORIC REINFORCED CONCRETE BUILDINGS: PRELIMINARY RESULTS FROM LITERATURE REVIEW. *Int. Arch.*

Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XLVIII-M-2-2023, 227–234.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-227-2023>

ICOMOS, Madrid 2011. Approaches for the conservation of twentieth-century architectural heritage, MADRID DOCUMENT 2011.

ICOMOS, Cadiz 2022. The Cádiz Document. InnovaConcrete Guidelines for the Conservation of Concrete Heritage.

Bertolini, L., Carsana, M., Redaelli, E., 2008. Conservation of historical reinforced concrete structures damaged by carbonation induced corrosion by means of electrochemical realkalisation. Journal of Cultural Heritage 9, 376–385.
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2008.01.006>

Heinemann H., 2008. Why historic concrete buildings heed holistic surveys. Tailor Made Concrete Structures – Walraven & Stoelhorst (eds) Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-47535-8.

Li, S., Lv, H., Huang, T., Zhang, Z., Yao, J., Ni, X., 2022. Degradation of Reinforced Concrete Beams Subjected to Sustained Loading and Multi-Environmental Factors. Buildings 12, 1382.
<https://doi.org/10.3390/buildings12091382>

Pardo Redondo, G., Franco, G., Georgiou, A., Ioannou, I., Lubelli, B., Musso, S.F., Naldini, S., Nunes, C., Vecchiattini, R., 2021. State of Conservation of Concrete Heritage Buildings: A European Screening. Infrastructures 6, 109. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6080109>

Escadeillas, G., Bertron, A., Ringot, E., Blanc, P.J., Dubosc, A., 2009. Accelerated testing of biological stain growth on external concrete walls. Part 2: Quantification of growths. Mater Struct 42, 937–945. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9433-3>

Monteiro, I., Branco, F.A., Brito, J.D., Neves, R., 2012. Statistical analysis of the carbonation coefficient in open air concrete structures. *Construction and Building Materials* 29, 263–269. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.028>

Emilio Bastidas-Arteaga, Mark G. Stewart. Economic Assessment of Climate Adaptation Strategies for Existing RC Structures Subjected to Chloride-Induced Corrosion. *Structure and Infrastructure Engineering*, Taylor & Francis (Routledge): STM, Behavioural Science and Public Health Titles, 2015, In press, pp.11. <10.1080/15732479.2015.1020499>

De Risi, M.T., Scala, S.A., Del Gaudio, C., Verderame, G.M., 2023. Seismic retrofit of Italian pre-'70 case-study RC buildings by solving shear failures: code-compliant assessment and economic effort. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 97, 104007. <https://doi.org/10.1016>

Maria Adelaide Parisi, Elisa Maggio, Carlo Marini, 2013. Edifici storici in calcestruzzo armato in zona sismica: valutazione delle risorse. XV Convegno ANIDIS. L'ingegneria sismica in Italia, June 30th-July 4 th, 2013. 978-88-97385-59-2. <https://hdl.handle.net/11311/760675>

Dolce, M., Speranza, E., De Martino, G., Conte, C., Giordano, F., 2021. The implementation of the Italian National Seismic Prevention Plan: A focus on the seismic upgrading of critical buildings. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 62, 102391. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102391>

Gentile, R., Pampanin, S., Galasso, C., 2022. A computational framework for selecting the optimal combination of seismic retrofit and insurance coverage. *Computer aided Civil Eng* 37, 956–975. <https://doi.org/10.1111/mice.12778>

Cardone, D., Gesualdi, G., Perrone, G., 2019. Cost-Benefit Analysis of Alternative Retrofit Strategies for RC Frame Buildings. *Journal of Earthquake Engineering* 23, 208–241. <https://doi.org/10.1080/13632469.2017.1323041>

Gkournelos, P.D., Triantafillou, T.C., Bournas, D.A., 2021. Seismic upgrading of existing reinforced concrete buildings: A state-of-the-art review. *Engineering Structures* 240, 112273. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112273>

Harrington, C.C., Liel, A.B., 2020. Evaluation of Seismic Performance of Reinforced Concrete Frame Buildings with Retrofitted Columns. *J. Struct. Eng.* 146, 04020237. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002801](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002801)

Liel, A.B., Deierlein, G.G., 2013. Cost-Benefit Evaluation of Seismic Risk Mitigation Alternatives for Older Concrete Frame Buildings. *Earthquake Spectra* 29, 1391–1411. <https://doi.org/10.1193/030911EQS040M>

Caruso, M., Pinho, R., Bianchi, F., Cavalieri, F., Lemmo, M.T., 2021. Integrated economic and environmental building classification and optimal seismic vulnerability/energy efficiency retrofitting. *Bull Earthquake Eng* 19, 3627–3670. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01101-4>

Pohoryles, D.A., Bournas, D.A., Da Porto, F., Santarsiero, G., Triantafillou, T., 2022. Overview of combined seismic and energy upgrading technologies for existing buildings, EUR. Publications Office of the European Union, Luxembourg. <https://doi.org/10.2760/63090>

Castellini M., 2024. Gli effetti delle azioni ambientali sulla durabilità del calcestruzzo. Considerazioni sul deterioramento di strutture in c.a. di interesse culturale esposte ad agenti ambientali.

ASTM D 1141-98. 2021. Standard Practice for Preparation of Substitute Ocean Water. ASTM: West Conshohocken, PA, USA.

UNI EN 12390-1: 2021. Prova sul calcestruzzo indurito - Parte 1: Forma, dimensioni ed altri requisiti per provini e per casseforme.

UNI EN 12390-2: 2019. Prova sul calcestruzzo indurito - Parte 2: Confezione e stagionatura dei provini per prove di resistenza.

UNI EN 12390-4: 2019. Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 4: Resistenza alla compressione - Specifiche per macchine di prova.

UNI EN 14066: 2013. Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della resistenza all'invecchiamento accelerato tramite shock termico.

Caggegi, C., Carozzi, F.G., De Santis, S., Fabbrocino, F., Focacci, F., Hojdys, Ł., Lanoye, E., Zuccarino, L., 2017. Experimental analysis on tensile and bond properties of PBO and aramid fabric reinforced cementitious matrix for strengthening masonry structures. *Composites Part B: Engineering* 127, 175–195. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.048>

D'Antino, T., Carloni, C., Sneed, L.H., Pellegrino, C., 2014. Matrix–fiber bond behavior in PBO FRCM composites: A fracture mechanics approach. *Engineering Fracture Mechanics* 117, 94–111. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.01.011>

ASTM C1583/C1583M-20 Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method)

Donnini, J., Corinaldesi, V., Nanni, A., 2016. Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different coating treatments. *Composites Part B: Engineering* 88, 220–228. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.11.012>

Ebead, U., Younis, A., 2019. Pull-off characterization of FRCM/Concrete interface. *Composites Part B: Engineering* 165, 545–553. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.025>

UNI EN 12390-13: 2021. Prova sul calcestruzzo indurito - Parte 13: Determinazione del modulo di elasticità secante in compressione.

UNI EN 12390-3: 2019. Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 3: Resistenza alla compressione dei provini.

Arboleda, D., Babaeidarabad, S., Hays, C.D., Nanni, A., n.d.2016 Durability of fabric reinforced cementitious matrix (frcm) composites.

Carozzi, F.G., Poggi, C., 2015. Mechanical properties and debonding strength of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for masonry strengthening. *Composites Part B: Engineering* 70, 215–230. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.056>

Sokołowski, P., Bąk-Patyna, P., Bysiec, D., Maleska, T., 2022. Experimental Test of Reinforced Timber of FRCM-PBO with Pull-Off Adhesion Method. *Materials* 15, 7702. <https://doi.org/10.3390/ma15217702>

NTC 2018. Decreto 17 Gennaio 2018. Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni».