



**Università Politecnica delle Marche**

**Facoltà di Ingegneria**

**Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile e  
Ambientale**

Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Architettura - DICEA

**“Impiego di FRP nel rinforzo di strutture in muratura”**

**“Use of FRP in masonry structures”**

Relatore:

**Prof. Ing. Roberto Capozucca**

Tesi di Laurea di:

**Moschini Nicolas**

ANNO ACCADEMICO 2019/2020

# INDICE

<b>Premessa.....</b>	<b>4</b>
<b>CAP 1. – Introduzione .....</b>	<b>6</b>
<b>CAP 2. – I materiali fibrorinforzati.....</b>	<b>8</b>
2.1 Caratteristiche e proprietà.....	8
2.2 Tipologie di fibre e classificazione.....	10
2.2.1 Classificazione .....	10
2.2.2 Principali tipologie di fibra .....	11
2.3 Le lamine e i laminati .....	16
2.4 Filati e tessuti.....	19
2.4.1 Caratteristiche tecniche del filato.....	19
2.4.2 Tessuti non impregnati.....	20
2.4.3 Caratteristiche tecniche dei tessuti non impregnati .....	21
2.5 Matrici .....	21
2.5.1 Resine epossidiche .....	22
2.5.2 Resine poliestere .....	23
2.5.3 Altre tipologie di resine .....	23
<b>CAP 3. – La muratura .....</b>	<b>25</b>
3.1 Caratteristiche della muratura portante.....	25
3.2 Interventi su strutture murarie .....	26
3.3 Verifica dell'intervento.....	27
3.4 Resistenza al distacco .....	30
3.4.1 Considerazioni generali e modi di collasso .....	30
3.4.2 Distacco di estremità.....	31
3.4.3 Distacco intermedio .....	35
3.4.4 Resistenza al distacco in presenza di azione normale al piano di adesione.....	35
3.4.5 Sistemi di ancoraggio meccanico.....	36

<b>CAP 4. – Ricerche sperimentali .....</b>	<b>37</b>
4.1 Impiego di GFRP per rinforzo di parete in muratura .....	37
4.2 Impiego di intonaci fibrorinforzati su elementi murari .....	43
4.2.1 Comportamento di muratura moderna con intonaci rinforzati .....	43
4.2.2 Analisi sperimentale di murature moderne rinforzate .....	51
4.2.3 Confronto e commento delle sperimentazioni 4.2.1 e 4.2.2 .....	59
<b>Conclusioni.....</b>	<b>61</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>62</b>

# Premessa

---

Gli FRP (Fiber Reinforced Polymers) o materiali compositi fibrorinforzati trovano il loro impiego nel settore edilizio nell'ambito del consolidamento strutturale e dell'adeguamento sismico. Questi materiali possono essere impiegati in edifici di vario genere, sia residenziali che di interesse pubblico, fino alle infrastrutture, con strutture che possono essere di vari materiali come cemento armato, muratura, legno e acciaio. L'utilizzo di FRP può essere valutato anche in un'ottica di salvaguardia del patrimonio edilizio, diminuendo così i rifiuti provenienti da questo settore. Valutati in questo modo, i materiali fibrorinforzati diventano una soluzione valida anche in ottica futura e di salvaguardia dell'ambiente.

In questa tesi si andrà ad analizzare l'utilizzo di materiali compositi fibrorinforzati in strutture in muratura. Quando si parla di questa tipologia strutturale, nella maggior parte di casi, si ha a che fare con edifici antichi e, in alcuni casi, importanti a livello storico. La problematica che più comunemente è associata a questi tipi di strutture riguarda l'adeguamento sismico.

La bassa resistenza alle forze orizzontali è una caratteristica intrinseca nelle strutture in muratura e, in un paese come l'Italia con un patrimonio edilizio antico, è una materia che suscita interesse dal punto di vista dell'ingegneria civile strutturale. L'argomento viene trattato dando un'introduzione sull'impiego di questi materiali, dopodiché sarà fatta un'analisi approfondita della normativa che ne regola l'impiego, descrivendo i materiali di cui sono composti, le loro caratteristiche e le diverse tipologie disponibili sul mercato.

Sarà poi analizzata la superficie oggetto di intervento, la muratura. Con riferimento alla normativa vigente saranno elencate le caratteristiche meccaniche, per poi spiegare nel

dettaglio le verifiche richieste quando si interviene con materiali fibrorinforzati.

Ed infine saranno esaminate delle ricerche sperimentali riguardati applicazioni di fibre di vario genere e con diverse modalità di messa in opera.

# CAP 1. – Introduzione

---

L'impiego degli FRP (Fiber Reinforced Polymers) è considerata la soluzione più all'avanguardia per quanto riguarda interventi su strutture esistenti. Questi materiali possono far fronte a varie tipologie di problemi: consolidamento statico, rinforzo o riabilitazione strutturale, miglioramento ed adeguamento sismico. I materiali compositi fibrorinforzati possono essere impiegati in vari tipi di strutture come nel caso di calcestruzzo armato, muratura, acciaio e legno. In questo documento si andrà ad analizzare nel dettaglio il caso di strutture in muratura.

Negli ultimi anni i ricercatori si sono concentrati sullo studio delle strutture a muratura portante sottoposte ad azioni sismiche, con l'obiettivo di sviluppare soluzioni atte al rinforzo di queste strutture, per prevenirne il danneggiamento e il collasso. Durante un evento sismico, lo sforzo di taglio causa la formazione di fessure diagonali. Questo porta ad una perdita di resistenza della struttura che può causare il collasso dell'intero edificio. Alla luce di questo, la conoscenza del comportamento delle strutture in muratura sottoposte a sollecitazioni di taglio, è alla base della conservazione di edifici con importanza di carattere storico e non. Per questo motivo, sin dagli inizi del secolo scorso, il comportamento a taglio delle pareti in muratura è divenuto oggetto di indagini sperimentali di molti ricercatori.

A causa delle caratteristiche dei materiali che le costituiscono e dei vari metodi costruttivi impiegati nel passato, le strutture in muratura di edifici antichi presentano vari limiti per quanto riguarda l'applicazione dei metodi moderni di ristrutturazione. La prima differenza riguarda i materiali, i mattoni e le pietre impiegate nelle murature del passato sono generalmente caratterizzati da parametri meccanici diversi dai materiali da costruzione utilizzati oggi. La seconda differenza riguarda la bassa resistenza a taglio, intrinseca nelle murature non rinforzate, che è condizionata dalla malta impiegata nelle giunture.

Recentemente le ricerche si sono focalizzate sulla resistenza e sul comportamento della muratura storica sottoposta a taglio, nonostante questo, l'analisi delle strutture in muratura sottoposte a compressione e flessione ha ancora bisogno di essere studiata in maniera più approfondita.

Una delle tecniche che risulta essere più impiegata è l'incollaggio esterno (External Bonded) di FRP. Questa metodologia, molto studiata oggi, ha come obiettivo l'aumento della resistenza e della duttilità delle strutture in muratura sotto azioni sismiche. Per raggiungere questo obiettivo occorre far fronte alla bassa resistenza a trazione e non solo.

Un intervento di rinforzo mediante FRP su di una struttura può essere eseguito con diverse finalità:

- Incremento della resistenza di pannelli murari, archi o volte;
- Confinamento di colonne al fine di incrementare la resistenza a compressione e la duttilità;
- Collegamento tra elementi che collaborano a resistere all'azione esterna (catene di volte e di pareti connessioni tra pareti ortogonali, ecc.);
- Trasformazione di elementi non strutturali in elementi strutturali, mediante conferimento di rigidità e resistenza;
- Limitazione dell'apertura delle fessure.

L'utilizzo di materiali compositi fibrorinforzati presenta diversi vantaggi comparato con metodi di intervento tradizionali. Gli FRP grazie alla loro leggerezza non aggiungono nuovi carichi alla struttura, ma apportano un'alta resistenza alla trazione e presentano un'ottima resistenza agli agenti aggressivi che si trovano nell'ambiente circostante.

Molti aspetti di questo metodo di rinforzo sono ancora oggi non ben definiti, in particolare, un punto debole è rappresentato dall'incollaggio delle strisce di FRP sulla superficie. Più nel particolare quello che si è visto è che quando le strutture in muratura sono investite da un sisma, vengono sottoposte a sollecitazioni alternate di trazione e compressione. Questi movimenti, in molti casi, possono causare il distacco delle strisce sia a causa della formazione di fratture nella superficie delle murature sia a causa di una perdita di aderenza dell'incollaggio stesso.

In Italia gli FRP trovano un grande impiego nella conservazione di edifici storici. Come ben si sa il patrimonio edilizio italiano è molto antico, per questo motivo troviamo molti edifici con strutture in muratura e la conservazione di questi edifici è responsabilità degli ingegneri civili strutturali. Questo è divenuto un oggetto di grande discussione anche a seguito dei terremoti avvenuti negli ultimi decenni come Umbria-Marche (1997-98), L'Aquila (2009), Emilia (2012) e Lazio, Marche e Umbria (2016-2017).

# CAP 2. – I materiali fibrorinforzati

---

## 2.1 Caratteristiche e proprietà

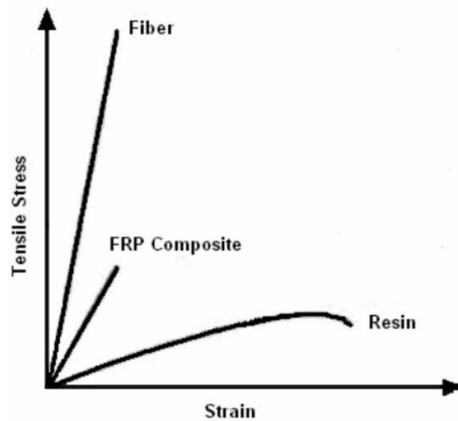
Gli FRP sono materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica a fibre continue, sono eterogenei e caratterizzati da caratteristiche anisotrope. In opera, forniscono un incremento notevole della resistenza a trazione, ma forniscono un incremento di resistenza da considerarsi nullo se impiegati a compressione. I principali vantaggi che presentano questi materiali sono: la leggerezza, elevate proprietà meccaniche e caratteristiche anticorrosive. Esistono varie tipologie in funzione dell'intervento che si andrà ad eseguire. Si va dalle lamine pultruse, utilizzate prevalentemente su superfici regolari, ai tessuti bidirezionali, questa tipologia presenta altri vantaggi legati all'impiego degli FRP. I tessuti possono essere adattati alla forma dell'elemento da rinforzare prima della fase di impregnazione, questo ne favorisce l'impiego in situazioni dove è necessario preservare le caratteristiche estetiche della struttura originaria, come in edifici di interesse storico o artistico, e ne permette l'applicazione anche in situazioni in cui lo spazio a disposizione è limitato.

Un materiale composito deve soddisfare le seguenti caratteristiche: essere costituito da due o più materiali (fasi) di natura diversa e “macroscopicamente” distinguibili, e almeno due delle fasi devono presentare proprietà fisiche e meccaniche “sufficientemente” diverse tra loro. Negli FRP troviamo una matrice polimerica di natura organica e le fibre di rinforzo. La matrice può essere considerata come un continuo isotropo, che analizzeremo in seguito. Le fibre che costituiscono la fase di rinforzo (Tabella 2.1) sono considerate un materiale anisotropo, cioè presentano proprietà diverse nelle diverse direzioni, fatta eccezione per le fibre di vetro. Le loro caratteristiche in esercizio sono funzione della:

- Geometria: forma, dimensioni e distribuzione delle dimensioni.
- Disposizione: orientazione rispetto agli assi di simmetria del materiale; se essa è casuale nelle tre direzioni, il composito è da considerarsi isotropo o (“quasi-isotropo”); in tutti gli altri casi è anisotropo.
- Concentrazione: frazione di volume, distribuzione della concentrazione (dispersione).

In generale il ruolo di elemento portante è svolto dalle fibre, mentre la matrice ha il compito di proteggere le fibre e trasferire gli sforzi delle stesse sull'elemento rinforzato.





**Figura 2.1** – Diagramma sforzo-deformazione degli FRP e delle sue componenti

Le fibre più utilizzate per la produzione di materiali compositi sono le fibre di carbonio, di vetro e le fibre aramidiche. La particolare geometria filiforme si presenta molto versatile per la realizzazione dei composti, e conferisce ai materiali caratteristiche di rigidità e di resistenza molto più elevate di quelle possedute dagli stessi materiali quando sono utilizzati in configurazione tridimensionale, questo perché c'è una minore densità di difetti.

	Modulo di elasticità normale $E$ [Gpa]	Resistenza a trazione $\sigma_r$ [Mpa]	Deformazione a rottura $\epsilon_r$ [%]	Coefficiente di dilatazione termica $\alpha$ [ $10^{-6}^{\circ}\text{C}$ ]	Densità $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
Fibre di vetro E	70 - 80	2000 - 3500	3.5 - 4.5	5-5.4	2.5 - 2.6
Fibre di vetro S	85 - 90	3500 - 4800	4.5 - 5.5	1.6 -2.9	2.46 - 2.49
Fibre di carbonio (alto modulo)	390 - 760	2400 - 3400	0.5 - 0.8	-1.4	1.85 - 1.9
Fibre di carbonio (alta resistenza)	240 - 280	4100 - 5100	1.6 - 1.73	-0.6 - -0.9	1.75
Fibre aramidiche	2.7 - 3.6	3600 - 3800	1.9 - 5.5	-2	1.44 - 1.47
Matrice polimerica	62 - 180	40 - 82	1.4 - 5.2	30 - 54	1.10 - 1.25
Acciaio da costruzione	206	250 - 400 (snervamento) 350 - 600 (rottura)	20 - 30	10.4	7.8

**Tabella 2.1** – Confronto tra e proprietà delle fibre di rinforzo e delle matrici più comuni e dell'acciaio da costruzione (valori indicativi).

## 2.2 Tipologie di fibre e classificazione

### 2.2.1 Classificazione

Le fibre sono costituite da filamenti continui molto sottili e quindi difficili da manipolare singolarmente. Per questo motivo in commercio si possono trovare in varie forme:

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

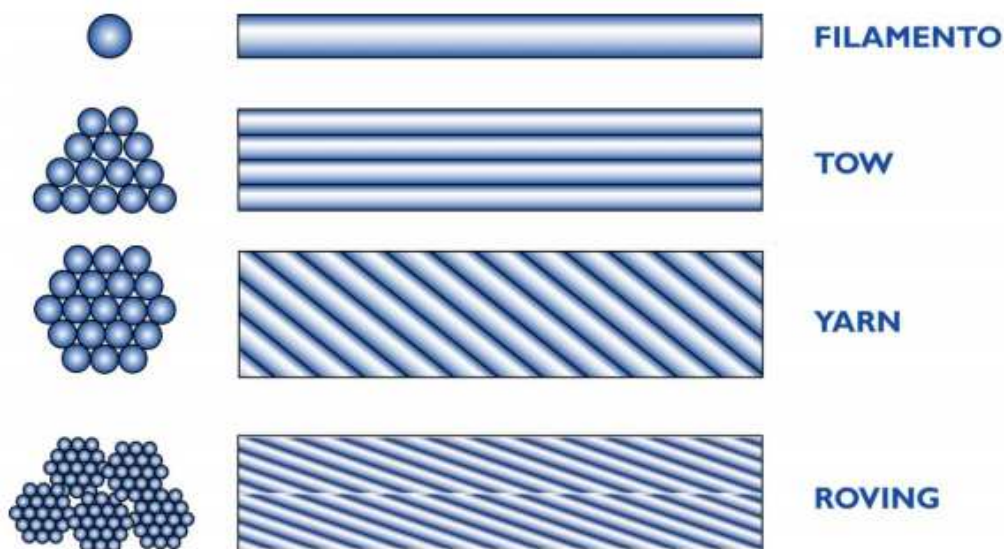


Figura 2.2 – Tipologie di fibre

Il tape è un'altra tipologia, questa è ottenuta affiancando o cucendo o fissando su un supporto alcune centinaia di *towns* o *yarns*. La classificazione delle fibre deriva direttamente da quella utilizzata dalle fibre tessili.

Oltre che in forma di *yarn* o *roving*, le fibre sono anche disponibili sul mercato in composizioni già opportunamente assemblate in modo da fornire una grande varietà di tessuti (*fabric*). In questo caso la disposizione delle fibre può conferire delle caratteristiche isotrope nel piano. Nei tessuti si distingue una direzione principale, detta ordito (*warp*), ed una trasversale ortogonale alla prima, detta trama (*weft*).

I filamenti costituenti i filati sono caratterizzati essenzialmente dalla composizione chimica e dalla massa per unità di lunghezza. Dalla norma ISO 2974:2000(E) otteniamo l'unità di misura della massa lineare o titolo (massa per unità di lunghezza), il "Tex", che equivale a 1g per km di fibra.

La designazione tecnica delle fibre di vetro viene effettuata secondo le norme ISO 1139:1973(E) e ISO 2078:1993(E). Alcuni filati (*yarn*), comunemente usati per i compositi strutturali, corrispondono alla sigla EC5 10 x 2, a base di vetro E, oppure alla sigla SC5 10 x 2, a base di vetro S. Quindi gli elementi descritti nella designazione sono:

- la prima lettera che indica il tipo di vetro utilizzato (E, S);
- una seconda lettera che indica il tipo di fibra utilizzato (C = filamenti continui, D = fibre discontinue);
- un numero che indica il diametro nominale del filamento in  $\mu\text{m}$ ;
- un numerato separato da uno spazio, che indica la massa lineare della fibra in Tex;
- il senso e il valore di torsione, espresso in giri/m (S = torsione negativa, Z = torsione positiva) (opzionale);
- il numero di fili costituenti i ritorti (opzionale);
- un codice del produttore contenente tutte quelle informazioni, non codificate, indispensabili per caratterizzare il prodotto (opzionale)

Per le fibre di carbonio la classificazione si basa invece sul numero di filamenti. Con "k" il simbolo che indica "migliaia di filamenti", ad esempio: 1k= costituito da 1000 filamenti (66.6 Tex). Valori tipici sono: 0.5k, 1k, 3k,6k, 12k, 18k, 24k, 48k.

## **2.2.2 Principali tipologie di fibra**

### *Fibre di carbonio*

Gli FRP a base di fibra di carbonio sono comunemente denominati con l'acronimo CFRP.

Le fibre di carbonio si distinguono per il loro alto modulo di elasticità normale e per la loro elevata resistenza. Il comportamento a rottura è di tipo fragile con un assorbimento di energia relativamente basso, anche se le tensioni di rottura sono elevate.

Questa tipologia è caratterizzata da un comportamento anisotropo a causa della struttura atomica e alle forze intermolecolari. Per questo motivo il modulo di elasticità normale e la loro resistenza sono estremamente più elevate rispetto alla direzione trasversale delle fibre.

A confronto con le fibre di vetro e quelle aramidiche, le fibre di carbonio risultano essere meno sensibili ai fenomeni di scorrimento viscoso (*creep*) e di fatica, nonostante questo si contraddistinguono per una modesta riduzione della resistenza a lungo termine.

La struttura delle fibre di carbonio non è completamente cristallina come quella della grafite. Le “fibre di grafite” sono caratterizzate da un contenuto di carbonio del 99%, il termine “fibre di carbonio” indica invece fibre con un contenuto di carbonio variabile tra l’80 ed il 95%.

Il numero di filamenti contenuti nel cavo di filatura (*tow*) può variare da 400 a 160000.

Per la produzione delle fibre di carbonio oggi si utilizza una tecnologia basata sulla pirolisi, cioè la decomposizione termica in assenza di ossigeno di sostanze organiche, dette precursori. Le fibre più utilizzate sono quelle di poliacrilonitrile (PAN). Nel processo di produzione queste fibre vengono sottoposte ad un trattamento termico a 200-240°C per 24h in aria, affinché la loro struttura molecolare subisca un’orientazione preferenziale nella direzione del carico applicato. Dopodiché vengono sottoposte a carbonizzazione, questo è considerato come un trattamento di purificazione, dove, ad una temperatura di 1500°C in atmosfera inerte, vengono eliminati dal precursore o la maggior parte degli elementi chimici diversi dal carbonio. Le fibre carbonizzate vengono poi sottoposte ad un trattamento di grafitizzazione in atmosfera inerte a 3000°C, durante il quale la struttura cristallina delle fibre può svilupparsi completamente, diventando comparabile con quella della grafite pura.



*Figura 2.3 – Nastro in fibra di carbonio monodirezionale*

### *Fibre di vetro*

Gli FRP base di fibre di vetro sono definiti normalmente con l’acronimo GFRP.

Questa tipologia di fibre è comunemente utilizzata in campo navale e industriale per la fabbricazione di compositi con prestazioni medio-alte. Le fibre di vetro si caratterizzano in particolare per la loro elevata resistenza.

Normalmente presentano un modulo di elasticità normale inferiore a quello delle fibre di carbonio e delle fibre aramidiche, intorno ai 70 Gpa per le fibre di vetro E, ed offrono una resistenza all'abrasione relativamente bassa; per questo motivo è richiesta cautela nelle operazioni di manipolazione prima dell'impregnazione. Due caratteristiche carenti in questa tipologia di fibre sono inoltre la resistenza a fatica e la resistenza allo scorrimento viscoso. Per proteggere le fibre dall'azione degli agenti alcalini e dell'umidità e per aumentare l'adesione con la matrice, le fibre sono sottoposte a trattamento di ensimaggio (*sizing*). Questo trattamento incrementando la compatibilità tra le fibre e la matrice, aumenta la durabilità e la resistenza a fatica del materiale composito.

Il vetro è composto principalmente di silice ( $\text{SiO}_2$ ) in struttura tetraedrica ( $\text{SiO}_4$ ). Vengono talvolta aggiunte varie quantità di ossidi di alluminio ed altri ioni metallici per facilitare le operazioni di lavorazione o per modificare alcune proprietà. Gli ossidi più utilizzati sono per esempio quello di ferro, di calcio, di magnesio, di sodio e di boro. Grazie alle diverse composizioni le fibre di vetro S possiedono una resistenza a trazione più elevata rispetto alle fibre di tipo E, come mostrato in Tabella 2.1.

La produzione di fibre di vetro si basa sulla filatura di una miscela (*batch*) costituita principalmente da sabbia, allumina e calcare. I componenti sono miscelati a secco e portati a fusione (circa  $1260^\circ\text{C}$ ) in una fornace a refrattari (*tank*). Dopodiché vengono prodotti i filamenti, raggruppati e viene eventualmente esercitata una leggera torsione per formare trecce o fibra (*strand* o *end*), tipicamente costituita da 204 filamenti. I singoli filamenti possiedono un diametro medio dell'ordine di  $10\ \mu\text{m}$  e sono ricoperti da un legame o bozzima (*binder* o *size*). I filati sono così raccolti in *roving*, che, nel caso di applicazioni nel settore civile, hanno massa lineare superiore a 200 Tex.

Le fibre di vetro si trovano anche sottoforma di fogli sottili, denominati *mat*. Un *mat* può essere costituito sia da fibre lunghe continue sia da fibre corte discontinue disposte casualmente nel piano e tenute insieme da un legante chimico (Figura 2.4). Le dimensioni di questo fogli ha una larghezza che varia tra i 5 e i 2 cm e la loro densità di massa è dell'ordine di  $0,5\ \text{kg/m}^2$ .

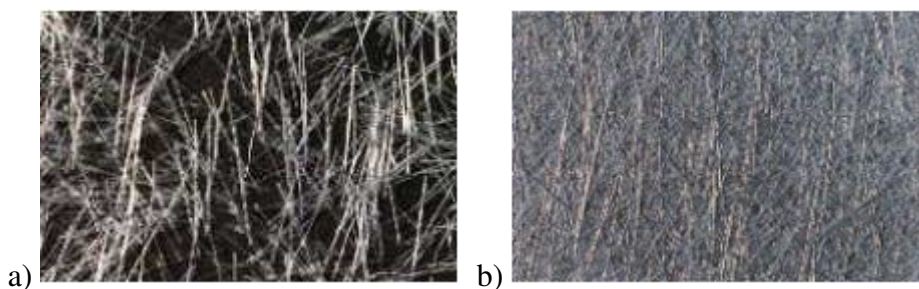


Figura 2.4 – a) Fibre di vetro discontinue b) “Mat” in fibra di vetro

### *Fibre aramidiche*

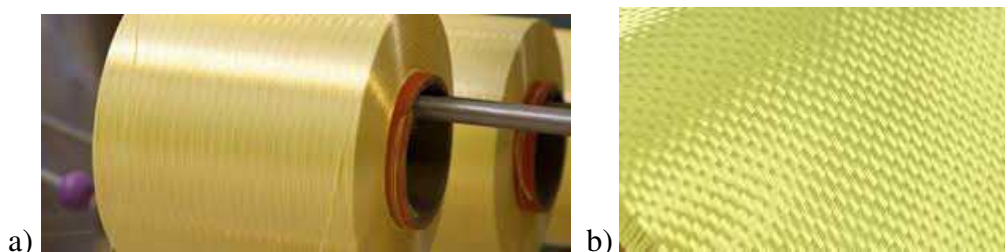
Gli FRP realizzati impiegando questa tipologia di fibre sono detti AFRP.

Le fibre aramidiche, o aramidiche, sono fibre di natura organica costituite da poliammidi aromatiche in forma estremamente orientata. Introdotte nel 1971, esse si caratterizzano per l'elevata tenacità e per la loro resistenza alle operazioni di manipolazione. Il modulo di elasticità normale e la resistenza a trazione sono intermedi tra quelli delle fibre di vetro e quelli delle fibre di carbonio (Figura 2.6 e Figura 2.7). Le fibre aramidiche presentano un comportamento anisotropo, la loro resistenza a compressione è di norma pari a circa 1/8 di quella a trazione. L'anisotropia della fibra favorisce lo snervamento localizzato della fibra sotto cariche di compressione, con conseguente instabilità e formazione di piegature (*kinks*).

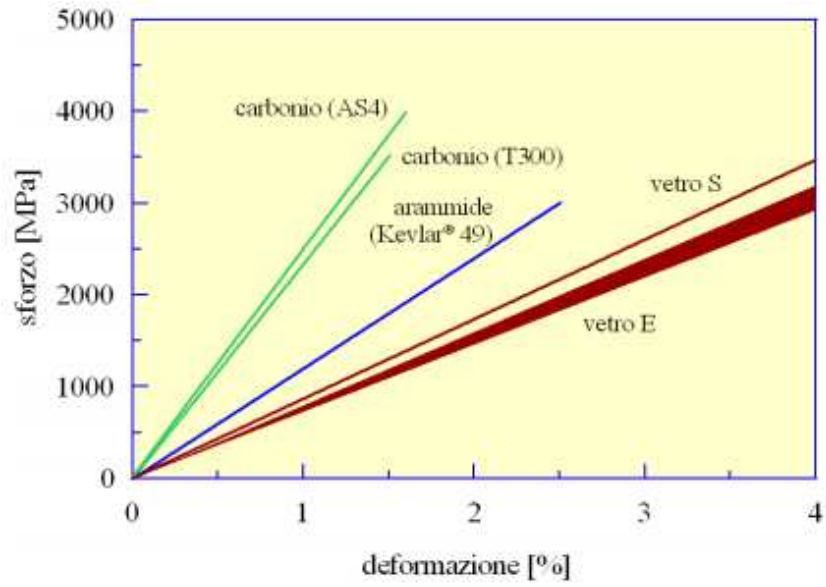
Questa tipologia di fibra può degradarsi se esposta in maniera prolungata alla luce del sole, causando una perdita di resistenza a trazione fino al 50%, inoltre possono risultare sensibili all'umidità. Messe a confronto con le fibre di vetro, le fibre aramidiche possiedono un comportamento viscoso (*creep*) simile, ma presentano una resistenza a rottura e una resistenza a fatica flessionale più elevata rispetto alle fibre di vetro.

La tecnologia di produzione delle fibre aramidiche si basa sull'estrusione ad alta temperatura ed alta velocità del polimero in soluzione, con successivo raffreddamento veloce (*quenching*) ed essiccamento. La sintesi del polimero viene effettuata a monte dell'apparecchiatura di estrusione con l'impiego di soluzioni fortemente acide. È possibile sottoporre le fibre così prodotte ad un trattamento di orientazione a caldo nel quale le fibre vengono avvolte su bobine rotanti ad alta velocità (*post-spinning*) allo scopo di migliorarne le caratteristiche meccaniche (Figura 2.5 a).

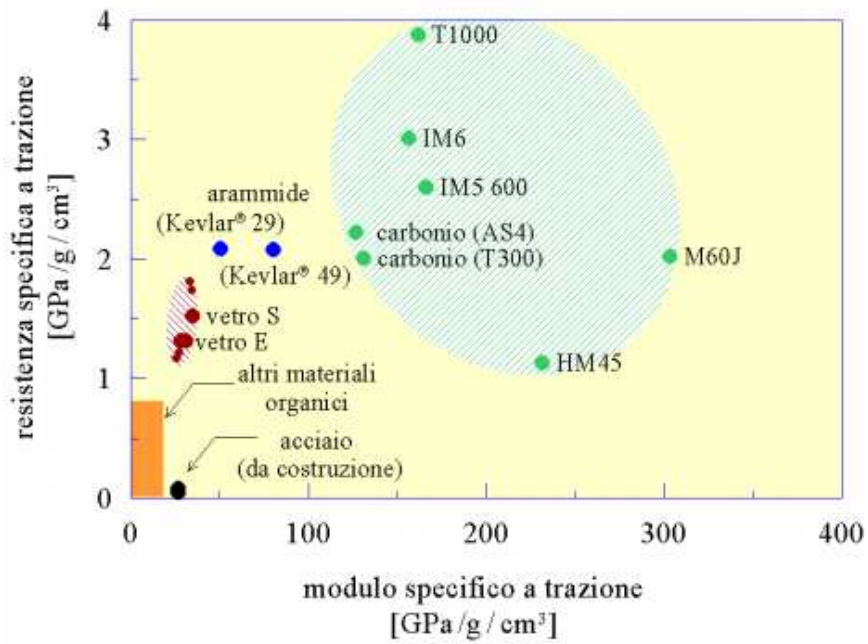
Le fibre aramidiche sono disponibili in commercio sottoforma di *yarn*, *roving* e di tessuti (Figura 2.5 b).



**Figura 2.5** – a) Bobina di fibre aramidiche b) Tessuto di fibre aramidiche (kevlar)



*Figura 2.6 – Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo: comportamento a trazione monoassiale.*



*Figura 2.7 – Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo: i valori del modulo e della resistenza sono rapportati alla densità (valori “specifici”).*

### Atre tipologie di fibre

Le tre tipologie descritte sopra ed analizzate nel dettaglio sono ad oggi le più utilizzate nel campo dell'edilizia. Esistono però altre tipologie che vale la pena di citare le cui caratteristiche meccaniche sono esposte in Tabella 2.2.

- Le fibre di boro presentano caratteristiche simili a quelle delle fibre di carbonio, possiedono un elevato modulo di elasticità normale e un'elevata resistenza, in particolare a compressione. Sono però caratterizzate da una densità di massa maggiore.
- Le fibre ceramiche, come fibre di allumina e fibre di carburo di silicio, sono invece utilizzate in situazioni in cui le temperature di esercizio sono più elevate.

		Fibre di boro	Fibre ceramiche		
			Allumina (CFP) *	SiC (CVD)**	SiC (pirolisi)
Diametro	µm	16.5	20 ± 5	140	10 - 20
Densità	g/cm <sup>3</sup>	2.63	3.95	3.3	2.6
Sforzo di rottura	Mpa	2800	1380	3500	2000
Modulo di elasticità normale	Gpa	385	379	430	180

**Tabella 2.2** – Proprietà delle fibre di boro e delle fibre ceramiche.

(\*) *Chemically Formed Processes*

(\*\*) *Chemical Vapour Deposition*

## 2.3 Le lamine e i laminati

I compositi fibrorinforzati si possono distinguere in due categorie:

- Monostrato (*lamina*)
- Multistrato (*laminati*)

Alla luce di questo si possono distinguere due casi. Nel caso più semplice le fibre sono contenute solo in un piano, non ci sono fibre disposte in direzione perpendicolare a quest'ultimo, e questa tipologia è detta "lamina". Quando invece le lamine sono sovrapposte l'una sull'altra formando degli strati, si formano i "laminati".

Il principale vantaggio dei laminati è rappresentato dalla massima libertà nella disposizione delle fibre, anche se è richiesto un controllo sistematico sulle scelte operate e quindi sulle



proprietà finali del materiale composito. Le dimensioni dei laminati sono intermedie tra quelle delle fibre di rinforzo e quelle delle strutture di interesse ingegneristico (Tabella 2.2). Una particolare tipologia di compositi multistrato, è quella in cui le lamine che compongono il laminato sono di natura differente o di materiali differenti, con l'obiettivo di ottenere un materiale finale con le prestazioni ottimizzate, ad esempio i compositi a matrice epossidica costituiti da fibre di carbonio e fibre aramidiche per ottenere un materiale rigido e tenace.

	Dimensioni rappresentative							
	pm	nm	µm	mm	m	km		
Atomo	*	*						
Molecole polimeriche		*	*					
Polimeri biologici		*	*					
Cristalli			*	*				
Sferuliti			*	*				
Diametro delle fibre				*				
Spessore lamine				*	*	*		
Spessore laminati					*	*		
Lunghezza laminati					*	*	*	
Strutture						*	*	*

**Tabella 2.3** – Scala di grandezza dei compositi fibrosi a matrice polimerica.

Le lamine sono in genere dei materiali anisotropi, per questo la descrizione delle loro proprietà meccaniche dipende dalla scelta del sistema di riferimento. Di solito gli assi di riferimento vengono fatti coincidere con quelli di simmetria del materiale. Il rapporto tra i valori delle proprietà di un materiale è detto grado di anisotropia.

Nel caso di laminati unidirezionali in Tabella 2.4 sono riportati alcuni valori che rappresentano il grado di anisotropia delle principali proprietà che ci interessano per la progettazione.

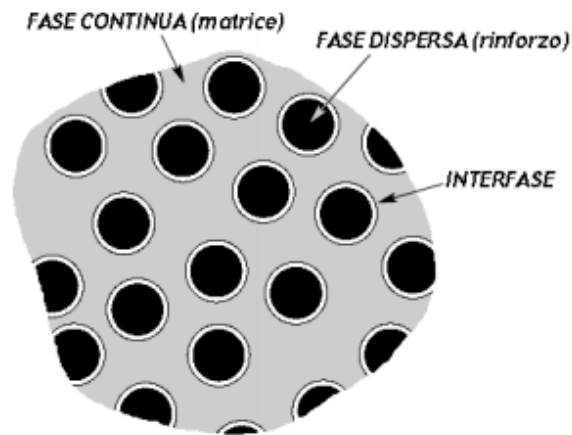
I materiali compositi possono essere più resistenti dei materiali da costruzione tradizionali e, come nel caso della fibra di carbonio, più rigidi. Per questo motivo quando in uno specifico intervento il peso è una caratteristica rilevante, i materiali compositi possono risultare un'ottima soluzione. La resistenza specifica (resistenza/densità) degli FRP può raggiungere valori fino a quattro volte superiori rispetto ai materiali tradizionali, ed il loro modulo di elasticità normale specifico (modulo/densità) può essere il doppio. Questo significa che un intervento realizzato

mediante materiali compositi può arrivare a pesare circa la metà apportando lo stesso grado di rigidità.

	$E_1/E_2$	$E_1/G_{12}$	$\sigma_{r1}/\sigma_{r2}$	$\alpha_1/\alpha_2$
Carburo di silicio/ceramica	1.09	2.35	17.8	0.93
Boro/alluminio	1.71	5.01	11.6	0.30
Carburo di silicio/alluminio	1.73	5.02	17.0	0.52
Vetro-S/epossidica	2.44	5.06	28.0	0.23
Vetro-E/epossidica	4.42	8.76	17.7	0.13
Boro/epossidica	9.27	37.40	24.6	0.20
Carbonio/epossidica	13.60	19.10	41.4	-0.07
Arammide/epossidica	15.30	27.80	26.0	-0.07

**Tabella 2.4** – Grado di anisotropia di laminati unidirezionali fibrorinforzati (valori indicativi).  
 $E_i$ =modulo di elasticità normale;  $G_{ij}$ = modulo di elasticità tangenziale  
 $\sigma_{r1}$ = sforzo di rottura;  $\alpha_1$ = coefficiente di dilatazione termica

Un aspetto da tenere in considerazione è l'adesione tra la matrice e il rinforzo, in questo caso la fibra. Questo viene migliorato mediante l'utilizzo di un terzo componente detto "interfase" o "interfaccia" (Figura 2.8). Questa sostanza che normalmente viene applicata sulla superficie delle fibre e creando uno strato sottile le rende compatibili con la matrice organica. L'interfase ha uno spessore spesso monoatomico e non contribuisce ad un miglioramento delle proprietà meccaniche del composito, ma è fondamentale per evitare la perdita di adesione tra matrice e fibra che può portare al collasso dell'intero sistema.



**Figura 2.8** – Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito

## 2.4 Filati e tessuti

### 2.4.1 Caratteristiche tecniche del filato

I filati sono venduti come materiali per il rinforzo strutturale, in quanto costituiscono la materia prima per la fabbricazione dei tessuti. Il filato è sempre accompagnato da una scheda tecnica fornita dall'azienda produttrice. La normativa internazionale riguardante le informazioni che una scheda tecnica deve contenere è la ISO 2113:1996(E).

Nel caso in cui non si abbia la scheda tecnica del filato e si vuole conoscere o verificare il titolo del filato si fa riferimento alla normativa ISO 1889:1997(E). Si preleva un campione di filato di lunghezza definita e si pesa; il valore del titolo è pari a:

$$T_x = \frac{P \cdot 1000}{L} \quad (2.1)$$

Dove:  $T_x$  = titolo del filato Tex [g/km]

$P$  = massa del campione [g]

$L$  = lunghezza del campione [m]

L'area "A", in mm<sup>2</sup>, della sezione trasversale di un filo o di una matassa (*yarn, tow* o *roving*) è determinabile con:

$$A = \frac{T_x}{1000 \cdot \rho} \quad (2.2)$$

Dove:  $A$  = area [ $\text{mm}^2$ ]

$T_x$  = titolo del filato Tex [ $\text{g}/\text{km}$ ]

$\rho$  = densità di massa del filato [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

## 2.4.2 Tessuti non impregnati

Il tessuto non impregnato di resina è comunemente definito come “secco”. Il tessuto più semplice è ottenuto a partire dal *roving* ed è detto stuoia (*woven roving*). Questa tipologia è adatta a realizzare manufatti di grandi dimensioni ed elevato spessore. Per applicazioni più specifiche, richiedenti un’ottimizzazione del peso strutturale, i tessuti impiegati sono ottenuti direttamente dalla tessitura dei fili (*yarn*), così da ottenere un materiale più leggero e compatto. C’è da notare che un composito ricavato da tessuti presenta sempre una frazione volumetrica di fibre inferiore rispetto a quella di un laminato composto da lamine di fibre unidirezionali, questo a causa dell’ondulazione (*crimp*) imposta dalla tessitura.

Le tipologie di tessuto più comuni sono la tela, il batavia ed il raso:

- La tela (*plain*), grazie alla trama molto fitta, è caratterizzata dalla struttura più rigida e stabile. I principali svantaggi sono la difficoltà di impregnazione con la resina e il fatto che trama e ordito si presentano molto ondulati. L’ondulazione di questo tipo di tessuto è pari a circa il 10%. A causa di quest’ultima caratteristica l’efficienza del rinforzo nel piano del laminato è minore.
- Il batavia (*twill*), ordito con 2 fili sopra e 2 fili sotto, si caratterizza per la sua flessibilità, ma allo stesso tempo si danneggia più facilmente in fase di manipolazione
- Il tessuto raso (*satın*) è ancora più flessibile del precedente e presenta sempre fragilità nella manipolazione. Questo tessuto è il più rigido nel piano di laminazione e presenta la minore ondulazione delle fibre in entrambe le direzioni.

Oltre a queste tre tipologie elencate sopra ne esistono altre come, ad esempio, il *crowfoot*, il *basket* e il leno.

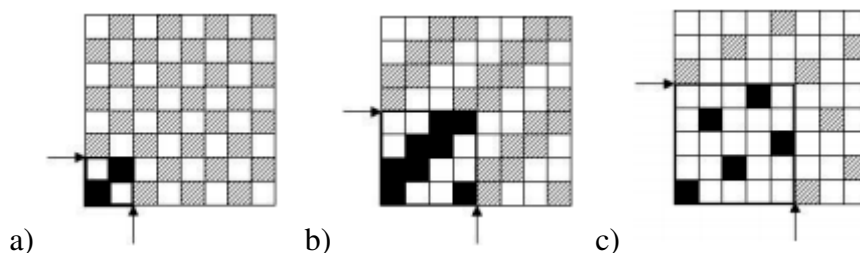


Figura 2.9 – Esempi di tessuti

a) Tela o tessuto semplice b) Twill (batavia) c) Satin (raso da 5)

*casella nera o tratteggiata = filo di trama sopra il filo di ordito*  
*casella bianca = filo di trama sotto il filo di ordito*

### 2.4.3 Caratteristiche tecniche dei tessuti non impregnati

I tessuti sono comunemente distribuiti allo stato secco ed in rotoli. Per essere messi in opera in cantiere devono poi essere impregnati con apposite resine. I tessuti possono avere le fibre disposte in diversi modi e da questo si distinguono i tessuti:

- Unidirezionali: le fibre sono orientate nella direzione della lunghezza e tenute insieme da una trama leggera di tipo non strutturale.
- Bidirezionali: costituiti da una tessitura trama-ordito ortogonale e di solito bilanciata, cioè con la stessa quantità di fibre nelle due direzioni.
- Multiassiali: con fibre orientate in diverse direzioni.

La normativa di riferimento per la caratterizzazione dei tessuti è la UNI 8099:1980.

Per tessuti multi assiali, oltre alle indicazioni di base, riguardanti il tipo di filato e le caratteristiche del tessuto, è necessario riportare anche l'orientazione di ciascuno strato di fibre. Nel caso in cui sia necessario conoscere la massa per unità di superficie delle fibre in una determinata direzione, si può ottenere partendo da titolo e dalla geometria:

$$p_x = \frac{T_x \cdot N_f}{10} \quad (2.3)$$

Dove:  $p_x$  = massa del tessuto o della componente del tessuto nella direzione interessata [g/m<sup>2</sup>]

$T_x$  = titolo del filato riferito alla direzione in esame in Tex [g/km]

$N_f$  = numero di fili per unità di lunghezza riferita alla direzione in esame [n°/cm]

Se non è noto il numero di fili disposti in un'assegnata direzione per unità di lunghezza nella direzione ortogonale, si può operare secondo la norma ISO 4602:1997(E), si contano i fili in direzione ortogonale in una striscia di larghezza definita, ad esempio 10 cm, e si proporziona tale numero all'unità di lunghezza utilizzata come base.

## 2.5 Matrici

Le matrici utilizzate nel caso di FRP sono matrici polimeriche a base di resine termoindurenti. Le resine si trovano in commercio in forma parzialmente polimerizzata, si presentano liquide o pastose quando trattate a temperatura ambiente. Una volta miscelate con un opportuno reagente

si ha la polimerizzazione (reticolano) e divengono un materiale solido vetroso. Essendo materiali termoindurenti, agendo sulla temperatura si può accelerare la reazione.

I vantaggi che le caratterizzano sono molteplici, i più peculiari sono per esempio che: presentano un'ottima resistenza agli agenti chimici; allo stato fluido possiedono una bassa viscosità, quindi hanno facilità nell'impregnazione delle fibre; possiedono ottime proprietà adesive; hanno la possibilità di formare reticolazioni a temperatura ambiente.

I principali svantaggi sono invece rappresentati dall'ampiezza del campo di temperature di esercizio. Questo è limitato ad alte temperature dalla temperatura di transizione vetrosa, dalla modesta tenacità a frattura e dalla sensibilità all'umidità in fase di applicazione sulla struttura.

Le resine termoindurenti più diffuse nel settore civile sono le epossidiche. Altre tipologie comunemente impiegate sono le resine poliestere o vinilestere. Per il trattamento di queste resine è richiesto del personale specializzato, questo perché le diverse componenti vengono miscelate in cantiere e il rendimento ottimale è funzione del corretto risultato della reazione chimica. Questo aspetto vale per la maggior parte delle tipologie di materiali compositi, ma fanno eccezione alcune tipologie oggi definite ancora sperimentali, come le barre di composito con matrice termoplastica, le quali, rispetto all'analogo prodotto con matrice termoindurente, possono essere piegate in qualsiasi momento mediante un opportuno trattamento termico.

### **2.5.1 Resine epossidiche**

Le resine epossidiche si contraddistinguono per buone proprietà adesive ed una buona resistenza all'umidità e agli agenti chimici. Grazie a queste caratteristiche sono particolarmente indicate per l'impiego nel settore civile.

La temperatura massima di esercizio dipende dalla formulazione e dalla temperatura di reticolazione. Quando si hanno temperature di esercizio superiori a 60°C, le caratteristiche meccaniche della resina subiscono delle variazioni, quindi la resina deve essere scelta in maniera opportuna. Non si presentano invece limiti significativi per quanto riguarda la temperatura minima di esercizio.

Il termine epossidiche è dovuto al reagente principale. Questo è costituito da liquidi organici a basso peso molecolare che contengono un certo numero di gruppi epossidici, anelli composti da un atomo di ossigeno e due di carbonio.

Il prepolimero epossidico è solitamente un fluido viscoso, la cui viscosità dipende dal grado di polimerizzazione. A quest'ultima miscela, che ha il ruolo di reagente principale, viene poi aggiunto un agente reticolante. La reazione è solitamente esotermica e non forma prodotti

secondari. Può essere eseguita sia a temperatura ambiente che ad elevata temperatura, a seconda delle necessità tecniche e delle proprietà finali desiderate.

La struttura chimica della resina può essere variata a piacere in base alla composizione chimica del polimero epossidico. La resina epossidica più comunemente utilizzata quando si parla di materiali compositi è il “diglicidil etero del bisfenolo A” (DGEBA).

### **2.5.2 Resine poliestere**

Le resine di poliestere sono caratterizzate da una viscosità inferiore rispetto a quelle epossidiche, per questo possiedono un’ampia versatilità ed un’elevata reattività. Presentano però una resistenza meccanica e proprietà adesive inferiori rispetto alle resine epossidiche.

Le poliestere insature sono polimeri lineari ad alto peso molecolare, che contengono doppi legami C=C in grado di reagire chimicamente. Il grado di polimerizzazione, e quindi la lunghezza della molecola, può essere variato. A temperatura ambiente la resina si presenta solida, per essere messa in opera deve essere disciolta in un opportuno solvente. Di solito il solvente è rappresentato da un monomero reattivo, che riduce la viscosità della resina, così da rendere agevole il processo di impregnazione delle fibre. Il monomero in questione solitamente è lo stirene, ma il requisito fondamentale che deve contenere il monomero sono i doppi legami C=C, che consentono di creare dei ponti di reticolazione tra le molecole di poliestere.

La reazione, come nel caso delle resine epossidiche, è esotermica e non porta alla formazione di prodotti secondari. Può essere condotta sia a temperatura ambiente che ad elevata temperatura.

Per quanto riguarda la struttura chimica di questa tipologia di resine, essa può essere variata mediante l’utilizzo di un altro acido o di un altro glicole durante la sintesi del polimero, oppure impiegando un monomero reattivo diverso.

La famiglia delle resine poliestere per materiali compositi è costituita da isoftaliche, ortoftliche e bisfenoliche.

### **2.5.3 Altre tipologie di resine**

Le resine termoindurenti di cui si è parlato sopra presentano alcuni limiti come: la modesta tenacità, basse temperature di esercizio e tendono ad assorbire umidità dall’ambiente. Per questo negli ultimi anni si è cercato di sviluppare tipologie di resine che possano migliorare questi aspetti.

Una tipologia studiata recentemente sono le resine a matrice termoplastica. Queste resine sono caratterizzate dalla capacità di fondere a temperature sufficientemente elevate. Nel caso di

materiali amorfi, la temperatura deve essere maggiore a quella di transizione vetrosa  $T_g$ , e nel caso di materiali semicristallini deve essere superiore a alla temperatura di fusione  $T_m$ . Questa peculiarità permette che la forma dei componenti possa essere modificata a piacere con un processo, detto, di formatura a caldo, cioè riscaldando il materiale ad un'opportuna temperatura e deformandolo.

In questo momento questa tipologia non è molto impiegata in campo civile, ma sono allo studio applicazioni che presentano un potenziale notevole, come la possibilità di utilizzarle come barre di rinforzo per conglomerato cementizio armato.

L'obiettivo iniziale con cui si è studiata questa tipologia di resina fu appunto quello di far fronte ai difetti delle resine termoindurenti. Dai risultati infatti è emerso che queste resine sono mediamente più tenaci, presentano temperature di esercizio più elevate e sono inoltre caratterizzate da una migliore resistenza nei confronti dei fattori ambientali. L'aumento della viscosità presenta invece un fattore negativo di questa tipologia di fibre, poiché rende difficoltosa l'impregnazione delle fibre e richiede l'utilizzo di lavorazioni complesse e costose. Per impieghi ad elevata temperatura in ambienti chimicamente aggressivi è stata sviluppata un'altra tipologia, le resine vinilestere. Dal punto di vista della messa in opera queste resine rappresentano un compromesso tra le prestazioni delle resine poliestere e quelle delle resine epossidiche.

Tutte le matrici trattate finora sono matrici di tipo organico. Esistono inoltre matrici di natura inorganica come le cementizie, metalliche, ceramiche, ecc..., il cui impiego per la realizzazione di compositi fibrorinforzati in campo civile sta progressivamente diffondendosi, in particolare l'utilizzo di quelle cementizie.



# CAP 3. – La muratura

## 3.1 Caratteristiche della muratura portante

Le murature sono caratterizzate da un comportamento anisotropo e non lineare anche quando si considerano piccole deformazioni. Il diagramma tensione-deformazione varia in funzione a diversi fattori quali: la tessitura, il tipo di elementi resistenti (mattoni) e la tipologia di malta. La muratura presenta una resistenza a trazione monoassiale da considerarsi nulla e un comportamento a compressione monoassiale caratterizzato da tre diverse fasi. Un primo tratto lineare, che si ha per basse deformazioni, seguito da tratto caratterizzato da un andamento non lineare crescente, fino al massimo valore di compressione, e infine l'ultimo tratto, quello non lineare decrescente (softening), che si ha per valori elevati di deformazione (Figura 3.1). La resistenza a taglio dipende anche dalla compressione che si ha sulla muratura, poiché questa favorisce la coesione interna del materiale e aumenta l'attrito. Allo stesso modo il comportamento a compressione dipende anche dal confinamento trasversale della muratura, mediante un incremento della compressione laterale si ottiene un miglioramento della resistenza e della duttilità.

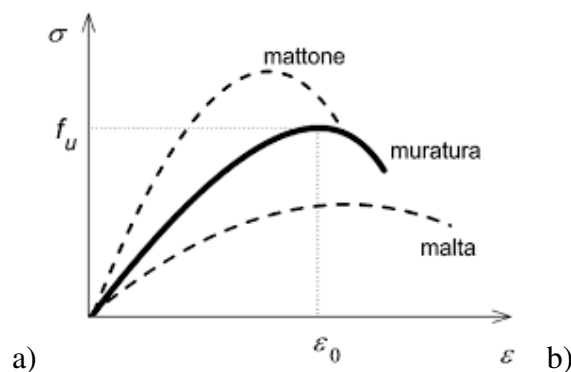


Figura 3.1 – Diagramma tensione-deformazione di una muratura e delle sue componenti

La muratura in situ è caratterizzata dai valori medi delle proprietà meccaniche. Nel caso di murature con corsi di malta, si deve far riferimento alle seguenti proprietà meccaniche:

- $f_{mm}$ : resistenza a compressione in direzione ortogonale ai corsi di malta;
- $f_{mm}^h$ : resistenza a compressione in direzione parallela ai corsi di malta;
- $f_{vm}$ : resistenza a taglio

Come valore approssimato della  $f_{mm}^h$  si può assumere il 50% della  $f_{mm}$ .

## 3.2 Interventi su strutture murarie

Un intervento di rinforzo su di una struttura muraria ha come obiettivo principale quello di incrementare la resistenza alle azioni sollecitanti e, quando possibile, aumentare il valore degli spostamenti esibiti all'atto del collasso.

Con particolare attenzione alle strutture murarie, le principali ragioni di intervento solitamente sono:

- Trasmissione di sforzi di trazione all'interno di singoli elementi strutturali o tra elementi congiunti (rinforzi a flessione, taglio, ecc.).
- Collegamento tra elementi che collaborano a resistere all'azione esterna (catene di volte e di pareti, connessioni tra paramenti murari ortogonali, ecc.).
- Confinamento di colonne al fine di incrementare la resistenza del materiale
- Irrigidimento di solai nel proprio piano per conseguire un funzionamento a diaframma rigido.
- Limitazione dell'apertura di fessure.

La progettazione degli interventi di rinforzo deve essere generalmente mirata ad assicurare uno stato di trazione nei rinforzi di FRP. Come è stato detto in precedenza, i materiali compositi non incrementano le prestazioni della muratura se impiegati a compressione.

In strutture murarie soggette a sollecitazioni cicliche di trazione e compressione, per esempio quelle dovute ad un sisma e a variazioni termiche, l'adesione muratura-FRP potrebbe deteriorarsi nel corso della vita della struttura. In queste situazioni potrebbe essere necessario pensare di inserire il rinforzo in intagli così da prevenire instabilità locale.

Un altro aspetto molto importante quando si effettua un intervento con materiali fibrorinforzati, è la valutazione delle proprietà meccaniche degli elementi strutturali sul quale si andranno ad applicare, in questo caso la muratura. Se quest'ultima si dovesse presentare danneggiata, disomogenea o presentasse qualsiasi difetto, occorre procedere con un intervento di preconsolidamento, così da assicurare la corretta trasmissione degli sforzi conferiti dal FRP. Inoltre, vista la varietà di tipologie di rinforzo disponibili sul mercato (fibre di vetro, di carbonio, aramidiche), la scelta del sistema a base di FRP deve tener conto delle proprietà fisiche e chimiche della muratura, allo scopo di adottare la soluzione ottimale.

Quando si applicano tessuti o lamine di FRP su superfici murarie, si deve tener presente che questi interventi tolgono traspirabilità della struttura. Da questo, gli interventi di rinforzo

eseguiti con tali tipologie non devono, di norma, interessare estese superfici del paramento murario, al fine di preservare un'adeguata traspirabilità al sistema.

In conclusione elenchiamo le modalità di intervento che differiscono leggermente dalle ragioni elencate sopra. Il consolidamento, sia esso adeguamento o miglioramento, può essere realizzato:

- Incrementando la resistenza di pannelli, archi o volte.
- Cerchiando colonne allo scopo di incrementarne la resistenza a compressione e la duttilità.
- Riducendo la spinta di strutture spingenti
- Trasformando elementi non strutturali in elementi strutturali, mediante conferimento di rigidità e capacità resistente.
- Rafforzando e irrigidendo le strutture orizzontali non spingenti
- Incatenando o fasciando lateralmente l'edificio all'altezza degli impalcati o della copertura.

### 3.3 Verifica dell'intervento

Le modalità di crisi che possono interessare la struttura muraria rinforzata con FRP sono:

- Fessurazione per trazione della muratura
- Schiacciamento della muratura
- Taglio-scorrimento della muratura
- Rottura del composito fibrorinforzato
- Distacco del rinforzo di FRP dal supporto murario

Il collasso della struttura rinforzata avviene, generalmente, con il verificarsi di più d'una delle sopracitate modalità di crisi.

Le verifiche di sicurezza devono essere eseguite allo stato limite ultimo (SLU). Si possono distinguere due possibili casi, in funzione del tipo di analisi strutturale effettuata.

Nel primo, quando si utilizzano modelli non lineari, e si impiegano legami costitutivi completi e tecniche risolutive numeriche, si deve verificare che la capacità della struttura non risulti minore della domanda. Quest'ultima deve essere valutata utilizzando le combinazioni di carico prescritte dalla Normativa vigente. Un altro aspetto importante da tenere in considerazione è la dimostrazione che la soluzione utilizzata sia obiettiva, ossia che non dipende dalla particolare discretizzazione adottata.

Nel secondo caso, la modellazione della struttura è eseguita in campo elastico lineare. Qui ci si avvale di schemi semplificati per le distribuzioni delle tensioni e vengono assunte equilibrate. La verifica in questo caso deve essere effettuata con riferimento alle sollecitazioni che competono ogni singolo elemento strutturale. In pratica, la verifica deve assicurare che i tagli ed i momenti sollecitanti di progetto siano minori dei corrispondenti valori resistenti. Le sollecitazioni resistenti devono essere valutate in funzione dello sforzo normale agente, tenendo conto del comportamento non lineare dei materiali costituenti la struttura, secondo il modello costitutivo adottato.

Nella maggior parte delle applicazioni ingegneristiche il legame costitutivo  $\sigma$ - $\varepsilon$  della muratura, per stati di tensione monoassiali, può essere schematizzato come segue:

- Trazione: resistenza nulla
- Compressione: comportamento lineare fino alla resistenza di progetto,  $f_d$ , dove si trova il valore  $\varepsilon_{m,o}$  della deformazione; dopodiché la tensione è costante fino alla deformazione ultima  $\varepsilon_{m,u}$ . (Figura 3.2).

In assenza di dati sperimentali la deformazione ultima di progetto,  $\varepsilon_{m,u}$ , è da assumersi pari al 3,5%.

Per quanto riguarda gli FRP il legame costitutivo è analizzato a trazione. Questa tipologia di materiali come detto in precedenza non apporta miglioramenti sotto sforzi di compressione. Il comportamento a trazione è di tipo lineare fino a rottura dove si misura la massima deformazione  $\varepsilon_{f,d}$ . (Figura 3.2)

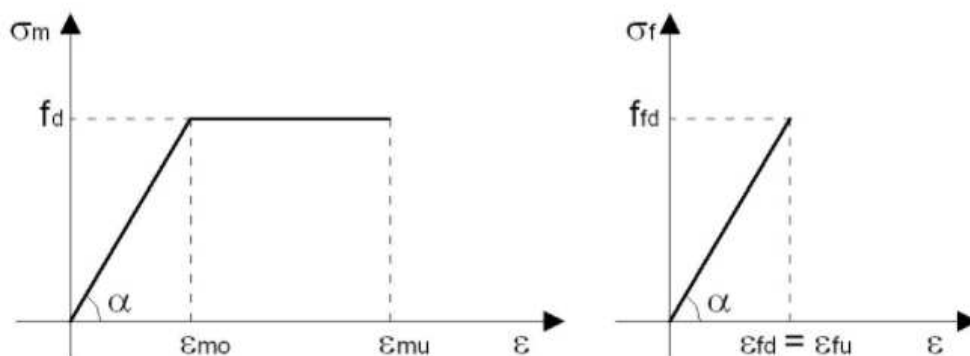


Figura 3.2 - Legame costitutivo della muratura (destra) e degli FRP (sinistra)

$$\begin{cases} \sigma_m = E_m \cdot \varepsilon, & \text{per } \varepsilon \leq \varepsilon_{m,o} \\ \sigma_m = f_d, & \text{per } \varepsilon_{m,o} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{m,u} \end{cases}$$

Con:  $E_m$  = Modulo di elasticità normale della muratura

Materiale composito FRP:

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon, \quad \text{per } \varepsilon \leq \varepsilon_{f,d}$$

Con:  $E_f$  = Modulo di elasticità degli FRP

La deformazione massima attribuibile al rinforzo FRP in sede di progettazione è:

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f} ; \varepsilon_{fdd} \right\} \quad (3.1)$$

Dove:  $\varepsilon_{fk}$  = deformazione caratteristica a rottura

$\varepsilon_{fdd}$  = deformazione massima del sistema di rinforzo all'atto del distacco intermedio incipiente sul supporto murario

$\eta_a$  = fattore di conversione ambientale

$\gamma_f$  = coefficiente parziale

Il valore da assumere per il coefficiente parziale  $\gamma_m = \gamma_f$  nell'ambito degli Stati limite Ultimi per quanto riguarda i materiali FRP è pari a 1.1.0. Quando si va trattare lo Stato Limite Ultimo di distacco dal supporto, il valore da assumere cambia  $\gamma_m = \gamma_{f,d}$ , il Progettista valuta il valore da assumere in un range che varia da 1.20 a 1.50. La scelta di questo valore è in funzione della maggiore o minore possibilità di prevedere, per la specifica applicazione, l'effettivo comportamento del composito per quanto riguarda il distacco dal supporto.

I valori da assumere per il fattore di conversione ambientale  $\eta_a$  sono descritti in Tabella 3.1. Essi rappresentano delle stime sufficientemente cautelative alle quali il Progettista può far riferimento in mancanza di valutazioni più precise. I valori riportati in tabella possono essere aumentati del 10% quando si impiegano rivestimenti protettivi, in ogni caso il valore deve risultare  $\eta_a \leq 1$ . Questa correzione può essere assunta nel caso in cui le proprietà di mitigazione degli effetti, dovuti ai rivestimenti impiegati, risulti sperimentalmente comprovata e che siano mantenuti per tutta la durata della vita utile del FRP.

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	$\eta_a$
Interna	Vetro / Epossidica	0.75
	Arammidica / Epossidica	0.85
	Carbonio / Epossidica	0.95
Esterna	Vetro / Epossidica	0.65
	Arammidica / Epossidica	0.75
	Carbonio / Epossidica	0.85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0.50
	Arammidica / Epossidica	0.70
	Carbonio / Epossidica	0.85

**Tabella 3.1** – Fattore di conversione ambientale  $\eta_a$  per varie condizioni di esposizione e vari sistemi di FRP.

## 3.4 Resistenza al distacco

### 3.4.1 Considerazioni generali e modi di collasso

Nel rinforzo di paramenti murari mediante l'impiego di tessuti o lamine in materiale composito, il ruolo dell'aderenza tra muratura e composito assume grande importanza perché, come detto in precedenza, il meccanismo di rottura dovuto al distacco dal supporto è di tipo fragile e, dunque, indesiderabile. In termini di gerarchia delle resistenze, tale meccanismo di crisi non deve precedere lo schiacciamento anelastico della muratura.

Tenendo conto della notevole varietà di composizione murarie esistenti, l'applicazione avviene su una superficie che solitamente si presenta disomogenea. Nel caso in cui il paramento murario sia particolarmente irregolare si procede, di norma, con la posa di uno strato di malta, allo scopo di realizzare una superficie adatta all'incollaggio del rinforzo (Figura 3.3). Per concludere, uno stesso rinforzo lungo il suo sviluppo può risultare connesso a materiali differenti, caratterizzati da diverse proprietà di interfaccia.

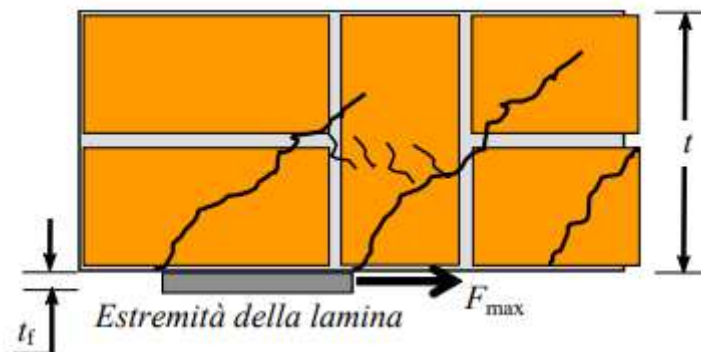


*Figura 3.3 – Posa di uno strato di malta atto a regolarizzare la superficie di posa.*

<https://www.kimia.it/it/content/landing-compositi>

Qualora l'adesivo utilizzato per l'applicazione del rinforzo dovesse presentare una resistenza più elevata rispetto a quella del materiale su cui è incollato, si può verificare una perdita di aderenza con conseguente asportazione di parte della superficie. Quest'ultima può avvenire per diversi motivi, come per esempio, per distaccamento di uno strato superficiale del mattone o, nel caso di murature più antiche, di una porzione di pietra, oppure, nel caso in cui la superficie sia stata regolarizzata, di uno strato di malta.

Studiamo ora nel dettaglio il collasso dovuto al distacco dell'FRP dalla superficie. Le cause del distacco possono essere prevalentemente due: il distacco di un'estremità del rinforzo (end debonding), che può portare all'asportazione di un sottile strato di muratura, e il distacco intermedio (intermediate debonding), che si verifica principalmente nei giunti di malta o quando si ha la formazione di fessure. In queste zone, nei giunti tra mattone e mattone e quando si formano delle fessure, gli FRP sono sottoposti a forti sforzi su lunghezze molto ridotte.



**Figura 3.4** – Schema di rottura per estrazione del mattone di ancoraggio.

La forza di distacco dal supporto si riduce nei casi di sollecitazione composta, cioè il sistema di rinforzo è sollecitato anche ortogonalmente al proprio asse. Nei casi in cui il sistema di rinforzo è applicato a superfici concave o quando la rigidezza flessionale della lamina è elevata, si registrano notevoli sforzi di trazione in direzione normale all'interfaccia (*peeling*) che contribuiscono a ridurre la suddetta forza di distacco. Un esempio di questo accade per esempio nell'applicazione agli intradossi di archi o volte.

Il contrasto che gli FRP esercitano nei confronti dell'allargamento e della propagazione di lesioni già presenti nella muratura, risulta essere massimo quando la direzione delle fibre è ortogonale a quelle delle fessure.

### 3.4.2 Distacco di estremità

Facendo riferimento ad una tipica prova di aderenza, come quella schematizzata in Figura 3.5, il valore ultimo della forza sopportabile dal rinforzo di FRP, prima che si verifichi il distacco dal supporto, dipende, a parità di tutte le altre condizioni dalla lunghezza della zona incollata  $l_b$ .

Questo valore cresce con  $l_b$  fino a raggiungere il massimo ad una lunghezza ben definita  $l_c$ . Ulteriori allungamenti della zona di incollaggio non comportano incrementi della forza trasmessa.

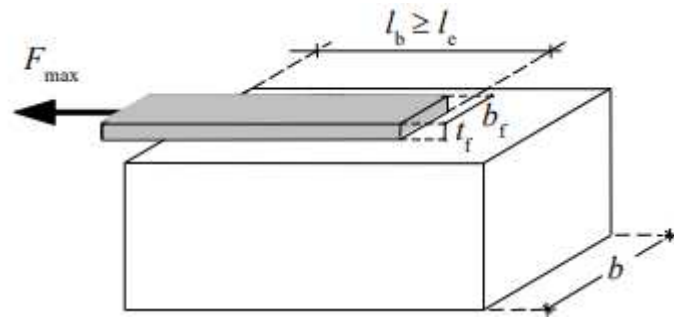


Figura 3.5 – Forza massima trasmissibile da un rinforzo di FRP.

La lunghezza ottimale di ancoraggio di progetto,  $l_{ed}$ , può essere stimata secondo la seguente formula:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}; 150 \text{ mm} \right\} \quad (3.2)$$

Dove:

$t_f$  = spessore del composito fibrorinforzato.

$E_f$  = modulo di elasticità normale nella direzione della forza.

$\gamma_{Rd}$  = coefficiente correttivo, pari a: 1.50 per murature in laterizio  
1.25 per murature di calcareniti e di pietra leccese.

$f_{bd}$  = è il valore di progetto della massima tensione tangenziale di aderenza che può essere definito mediante la relazione 3.3.

$$f_{bd} = \frac{2 \cdot \Gamma_{Fd}}{s_u} \quad (3.3)$$

Dove:  $s_u$  = valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto.

In assenza di dati sperimentali può essere assunto pari a:

- 0.4 per murature di laterizio o tufo
- 0.3 per murature di calcarenite e pietra leccese

$\Gamma_{Fd}$  = valore di progetto dell'energia specifica di frattura

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{bm} \cdot f_{btm}} \quad (3.4)$$

Dove:  $k_b$  = coefficiente correttivo di tipo geometrico

$k_G$  = coefficiente correttivo tarato sulla base di risultati di prove sperimentali [mm].

Dipende dal tipo di muratura e nel caso di rinforzi impregnati in *situ* vale:

- 0.031 mm per muratura in laterizio
- 0.048 mm per muratura in tufo
- 0.012 mm per muratura di calcarenite o pietra leccese

$FC$  = è un opportuno fattore di confidenza

$f_{bm}$  = valore medio della resistenza a compressione dei blocchi della muratura

$f_{btm}$  = valore medio della resistenza a trazione dei blocchi della muratura.

In mancanza di dati sperimentali questo valore può essere assunto pari a  $0.10f_{bm}$ .



Quando si ha a che fare con rinforzi pultrusi i valori di  $k_G$ , indicati in precedenza nell'equazione 3.4, vanno ridotti almeno del 40%.

Per quanto riguarda il coefficiente correttivo di tipo di geometrico  $k_b$  occorre invece eseguire un'analisi più approfondita. In assenza di dati sperimentali il coefficiente può essere valutato come segue:

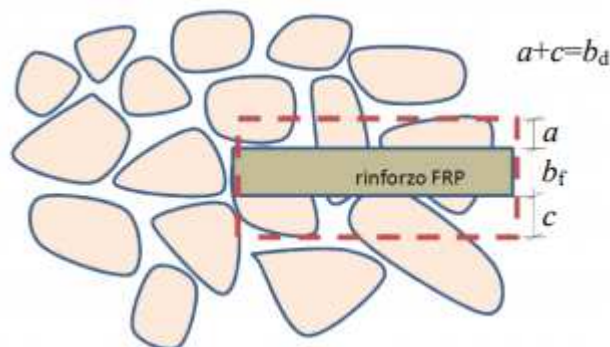
$$k_b = \sqrt{\frac{3 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{b}}} \quad (3.5)$$

Dove:  $b$  = larghezza dell'elemento rinforzato

$b_f$  = larghezza del rinforzo

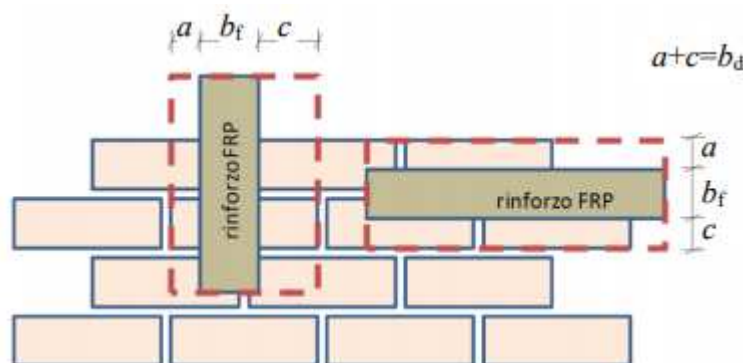
Il valore di calcolo di  $b$  può essere determinato sommando la quantità di  $b_f$  con la larghezza della zona di diffusione della tensione di aderenza,  $b_d$ .

In prima approssimazione, nel caso di muratura irregolare, la dimensione  $b_d$  può essere assunta pari al diametro medio delle pietre (Figura 3.7).



**Figura 3.6** – Diffusione delle tensioni di aderenza.

Nel caso di muratura regolare, la dimensione  $b_d$  può porsi pari alla dimensione del blocco costituente il supporto in direzione ortogonale all'asse del rinforzo (Figura 3.8).



**Figura 3.7** – Diffusione delle tensioni di aderenza nel caso di muratura regolare.

Le formule trattate finora hanno validità in presenza di resine caratterizzate da viscosità sufficientemente bassa da assicurare la loro penetrazione nei pori superficiali dei blocchi del substrato. Quando ci trova in situazioni con resine ad elevata viscosità e supporti con ridotta porosità devono essere trattati con cautela.

Con riferimento ad un distacco di estremità dal supporto che coinvolge lo strato superficiale della muratura, per determinare la tensione di progetto del rinforzo occorre distinguere due casi:

La lunghezza di ancoraggio è maggiore o uguale a quella ottimale:  $l_b \geq l_{ed}$

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (3.6)$$

Essendo i valori di  $\gamma_{f,d}$  assunti come descritto sotto l'equazione 3.1.

Nel caso in cui, la muratura su cui si va ad eseguire il rinforzo presenti la distanza tra i giunti di malta minore rispetto a quella ottimale di incollaggio, la tensione di progetto nel rinforzo, che risulta dell'equazione 5.6, deve essere ridotta del 85%.

La lunghezza di ancoraggio è minore di quella ottimale:  $l_b < l_{ed}$

La tensione di progetto deve essere opportunamente ridotta in accordo la relazione:

$$f_{fdd,rid} = f_{fdd} \cdot \frac{l_b}{l_{ed}} \cdot \left(2 - \frac{l_b}{l_{ed}}\right) \quad (3.7)$$

Nel caso in cui il rinforzo non venga direttamente applicato sulla muratura, ma su uno strato di regolarizzazione della superficie di incollaggio, il supporto deve essere realizzato con malta epossidica. La verifica al distacco va effettuata all'interfaccia tra lo strato di regolarizzazione e la muratura sottostante, purché sia garantita la contemporanea reticolazione della resina epossidica della malta e della resina utilizzata per impiegare il tessuto di rinforzo. Per tali verifiche è ancora possibile avvalersi delle formule (3.2)-(3.7).

Occorre però determinare le caratteristiche intermedie. Queste sono il risultato delle relazioni seguenti in cui si tiene conto dell'unione del rinforzo con lo strato di regolarizzazione.

$$t_h = t_f + t_r \quad (3.8 a)$$

Dove:  $t_h$  = spessore del sistema omogeneizzato

$t_f$  = spessore del rinforzo di FRP

$t_r$  = spessore medio dello stato di regolarizzazione

$$E_h = \frac{E_f \cdot t_f + E_r \cdot t_r}{t_h} \quad (3.8 \text{ b})$$

Dove:  $E_h$  = modulo elastico del sistema omogeneizzato

$E_f$  = modulo elastico del FRP

$E_r$  = modulo elastico dello strato di regolarizzazione

Lo spessore  $t_r$  dello strato di regolarizzazione può essere stimato a partire dal volume di materiale applicato, approssimando la forma dello strato ad un solido cilindrico.

La resistenza limite al distacco si determina utilizzando le formule (3.2)-(3.7), attribuendo alla larghezza del sistema omogeneizzato,  $b_h$ , il valore:

$$b_h = b_f + 2 \cdot t_r \quad (3.9)$$

### 3.4.3 Distacco intermedio

Trattando in particolare il distacco di estremità, in assenza di determinazioni più precise, la verifica di questa tipologia di distacco va eseguita limitando il valore della tensione nel rinforzo di FRP mediante la seguente relazione:

$$f_{\text{fdd},2} = \alpha \cdot f_{\text{fdd}} \quad (\text{con } 1.0 \leq \alpha \leq 2.0) \quad (3.10)$$

In particolare, se la distanza di estremità libera è minore di  $3 \cdot l_c$ , si può assumere  $\alpha = 1.5$ .

Avendo assunto nella 3.1:

$$\varepsilon_{\text{fdd}} = \frac{f_{\text{fdd},2}}{E_f} \quad (3.11)$$

Dove:  $E_f$  = modulo di elasticità normale del compositore di FRP nella direzione delle fibre.

La verifica nei confronti del distacco intermedio è implicitamente soddisfatta. Una volta eseguita è comunque necessario eseguire la verifica nei confronti del distacco di estremità, come descritto nel §3.4.2.

### 3.4.4 Resistenza al distacco in presenza di azione normale al piano di adesione

La forza di distacco per azione normale al piano di adesione è difficile da quantificare e dovrebbe essere ottenuta da prove sperimentali condotte sul paramento sul quale sono previsti gli interventi di rinforzo.

Se l'intervento verrà eseguito su di una superficie caratterizzata da una modesta curvatura, si possono utilizzare le formule predittive dei rinforzi piani.

### **3.4.5 Sistemi di ancoraggio meccanico**

Mediante l'impiego di sistemi meccanici di ancoraggio la forza di distacco può essere incrementata fino al raggiungimento della crisi per trazione del composito fibrorinforzato. L'efficacia di questi sistemi di ancoraggio deve essere comprovata mediante opportune prove sperimentali, in grado di simulare l'effettivo meccanismo di funzionamento del sistema adottato in fase progettuale.

Le principali soluzioni adottate sono:

- Serraggio del rinforzo mediante piastre metalliche ancorate alla muratura con tirafondi.
- Inserimento di perni ortogonali all'asse del rinforzo, che possono essere barre, corde e sfocchi, oppure fibre di un altro materiale.
- Inserimento di una barra trasversale di ancoraggio in un intaglio ortogonale all'asse del rinforzo.
- Applicazione di una striscia di fasciatura dell'elemento strutturale, ortogonale all'asse del rinforzo.

In alcuni casi, l'impiego di ancoraggi meccanici con lamine pultruse permettono di esercitare un'azione di pretensione su quest'ultime. In queste situazioni, ai fini delle verifiche di resistenza, deve essere tenuto in considerazione lo stato di presollecitazione presente nelle lamine.

## CAP 4. – Ricerche sperimentali

---

*Si fa riferimento nel seguito ad alcune ricerche sperimentali del Prof R. Capozucca condotte nell'ambito dell'impiego di FRP nel rinforzo di strutture in muratura.*

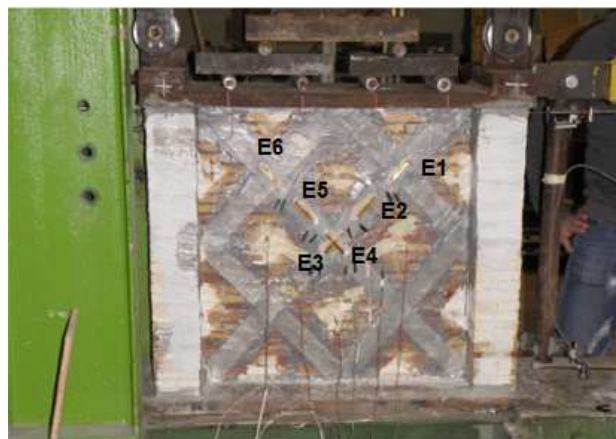
### 4.1 Impiego di GFRP per rinforzo di parete in muratura

#### *Introduzione*

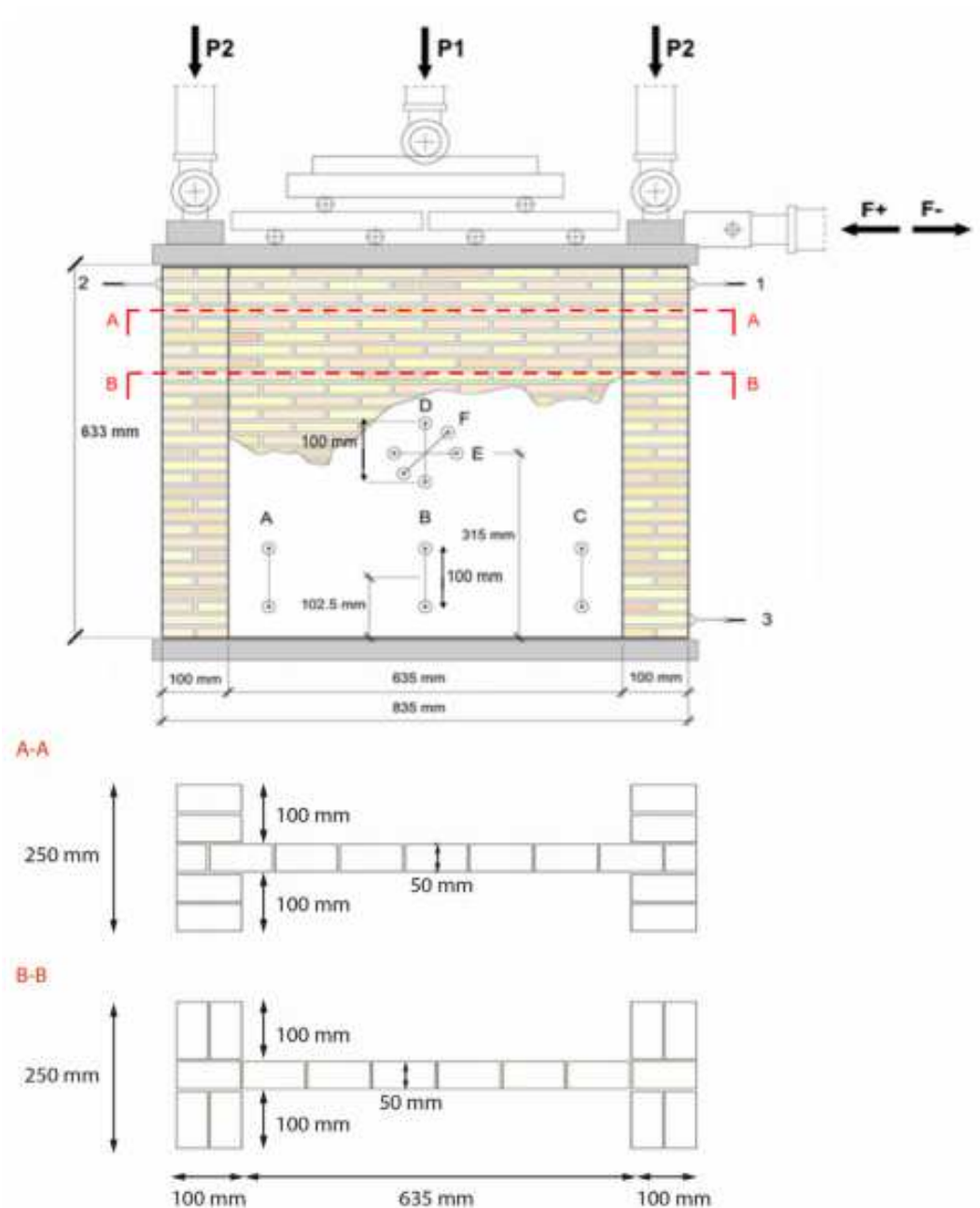
Un primo esempio, tratto da un articolo pubblicato dal professore, riguarda il comportamento di un pannello in muratura storica rinforzato solo su di un lato con materiali compositi in fibre di vetro GFRP. Le prove sono state eseguite su due muri di dimensione ridotta appositamente costruiti mediante mattoni di argilla in scala 1/3. I muri sono stati sottoposti a compressione per tutta la durata dell'esperimento  $\sigma_v = 1.2 \text{ N/mm}^2$ , per simulare le reali condizioni di carico in esercizio, e a cicli di forza di taglio ( $\pm 5 \text{ kN}$ ) (Figura 4.1). Le situazioni analizzate sono state diverse per i due provini, uno è stato sottoposto alle sollecitazioni senza essere rinforzato, una volta fessurato è stato rinforzato e poi sottoposto nuovamente alle stesse sollecitazioni fino a rottura, il secondo provino è stato invece rinforzato e poi sottoposto ai carichi.



**Figura 4.1** – Configurazione delle prove eseguite in laboratorio



**Figura 4.2** – Provino con estensimetri E1,...,E6 sulle strisce in GFRP applicati sulle diagonali principali;



*Figura 4.3 – Dimensioni geometriche dei provini, caratterizzati da forma a “doppio T” e strumentazioni di prova*

### *I materiali utilizzati*

Il GFRP impiegato è composto da fibre di vetro costituite principalmente da fibre di silice ( $\text{SiO}_2$ ) in struttura tetraedrica ( $\text{SiO}_4$ ) con ossidi di alluminio e ioni metallici. La matrice adottata è una resina epossidica con una resistenza a trazione pari a  $f = 30 \text{ N/mm}^2$  e modulo di Young  $E = 1760 \text{ N/mm}^2$ . Le fibre sono state anche imbevute di resina epossidica come una matrice polimerica così da ottenere un'elevata adesione (Kimitex EP-IN).

### *Prove eseguite*

Il primo provino non rinforzato (U-W1) ha presentato le prime fessure a una forza  $F^+ = 30,66$  kN. Le crepe diagonali, caratterizzate da un'inclinazione di  $\pi/4$ , si sono verificate dopo il 6° ciclo, quando la forza orizzontale ha raggiunto un'intensità pari a  $F^+ = 55$  kN. La prova è stata interrotta a un valore di  $F_u^+ = 62,1$  kN.

Il provino è stato quindi rinforzato (DR-W1) mediante incollaggio esterno di 6 strisce con inclinazione diagonale di  $\pm\pi/4$ , caratterizzate da una larghezza di 50 mm, spessore 1,2mm e modulo di Young  $E_{GFRP} = 64$  GPa. Dopo il rinforzo il muro ha presentato un comportamento elastico e non ha presentato nuove fessure fino al 9° ciclo quando la forza ha raggiunto un valore di  $F = 40$  kN e ha iniziato a fessurarsi. Il provino è arrivato a rottura al 16° ciclo, dove è stato registrato un valore di forza orizzontale  $F = 92,2$  kN.

La seconda muratura non danneggiata (W2) è stata rinforzata nello stesso modo di DR-W1. Il provino rinforzato (R-W2) non ha presentato fessure fino al 10° ciclo, in cui la forza orizzontale registrata è stata  $F^+ \approx 37,0$  kN. Dopodiché le fessure hanno incominciato a diffondersi e hanno causato il distacco delle strisce di FRP nella parte inferiore della muratura. La prova è stata interrotta ad una sollecitazione  $F^- = 55$  kN, a causa del distaccamento delle strisce.



**Figura 4.4** – Distaccamento delle strisce in basso nel provino R-W2

### *Analisi dei dati sperimentali ottenuti*

Per prima cosa è stata valutata l'energia dissipata nelle varie prove eseguite sulle murature rinforzate. Per fare questo sono utilizzati i diagrammi sperimentali riportati di seguito che rappresentano la correlazione tra la forza laterale  $F$  e lo spostamento laterale  $\delta$ . (Figura 4.5, 4.6, 4.7).

Questi ci permettono di quantificare l'energia dissipata durante la prova ciclica di taglio eseguita su tutti e tre i provini. L'energia è stata valutata integrando i diagrammi sperimentali ai cicli finali mediante la seguente formula:

$$E = \int_{\delta_{min}^-}^{\delta_{max}^+} F(\delta) d\delta \quad (4.1)$$

I valori sono stati:

- $E_U$  = energia del provino U-W1, calcolata al 8° ciclo
- $E_{DR}$  = energia del provino DR-W1
- $E_R$  = energia del provino R-W2

I rapporti tra i valori di energia,  $E_{DR}/E_U$  e  $E_R/E_U$ , risultano essere simili, circa 3.0. Questo rapporto ci permette di dire che è possibile ottenere un buon incremento di energia dissipata rinforzando la muratura con strisce di GFRP.

Le prime fessure sui provini rinforzati DR-W1 e R-W2 sono apparse ad un valore di forza di taglio simile compresa tra  $F = 37.0 \text{ kN} \div 40 \text{ kN}$ . Il valore della forza registrata sulle strisce di GFRP ha avuto un aumento rapido. In questa situazione, la capacità di resistenza alle forze di taglio, è soprattutto funzione della resistenza a taglio che possiedono i nastri di GFRP, che sono anche in grado di limitare lo spessore delle fessure.

Inoltre, i risultati ottenuti dalle prove sui paramenti murari DR-W1 e R-W2, permettono di osservare che il rinforzo eseguito fa cambiare la risposta meccanica e i meccanismi di collasso della muratura. In particolare, il rinforzo ha conferito una maggiore capacità di subire ampi spostamenti orizzontali e, anche, di dissipare energia attraverso la formazione di fessure diffuse. Infatti ciò che si osserva principalmente in entrambi i casi oggetto di analisi è un forte aumento degli spostamenti e della duttilità.

Mettendo a confronto gli spostamenti al collasso sperimentali, otteniamo un aumento nelle murature rinforzate pari a  $\delta_{u,DR}/\delta_{u,U} = 1.80$ , per il provino fratturato e poi rinforzato, e un aumento del  $\delta_{u,UR}/\delta_{u,U} = 2.50$  per il provino rinforzato.

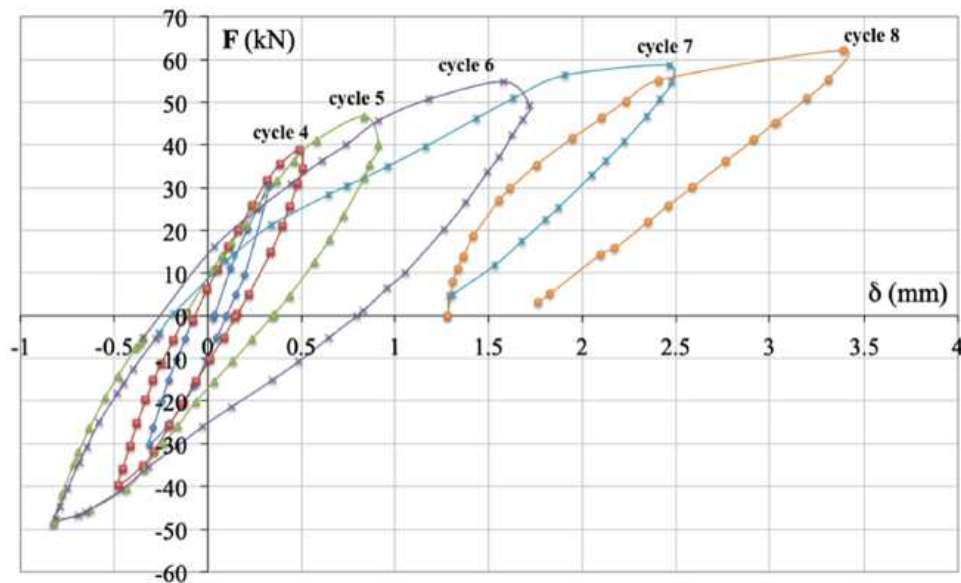
### *Conclusioni*

Questa analisi presenta un'indagine sperimentale su murature storiche, con e senza rinforzo. Le prove sono state eseguite su diverse tipologie di situazioni per analizzare la risposta della muratura a carico combinato di compressione e taglio. Sono stati adottati modelli rinforzati solo su di un lato perché, di solito, in ambito storico e monumentale, non è sempre possibile intervenire su entrambi i lati.

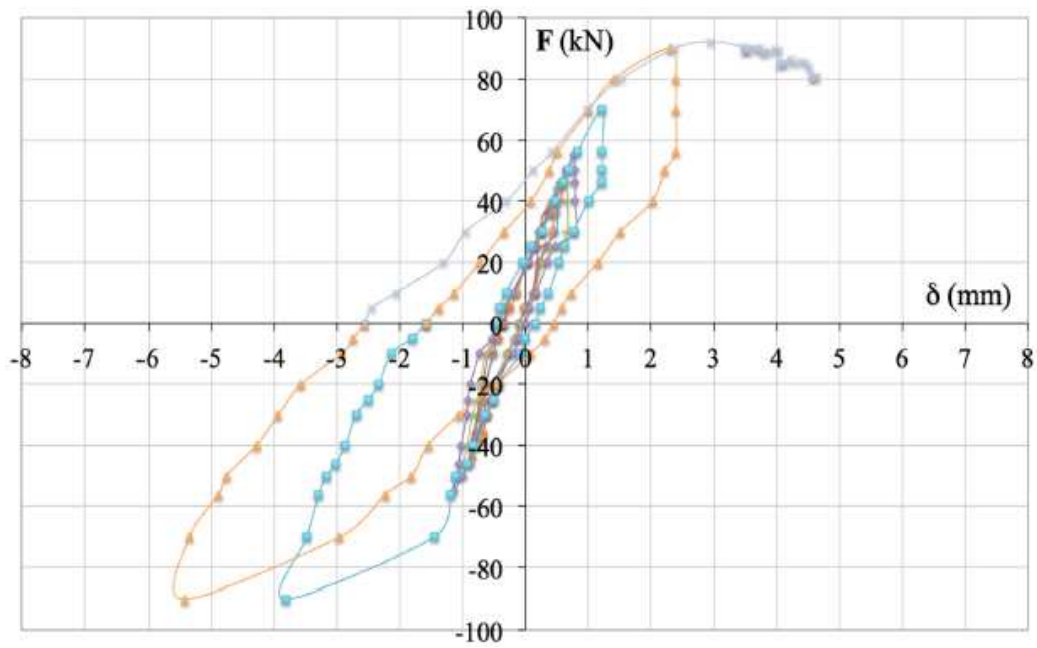


I principali risultati sono:

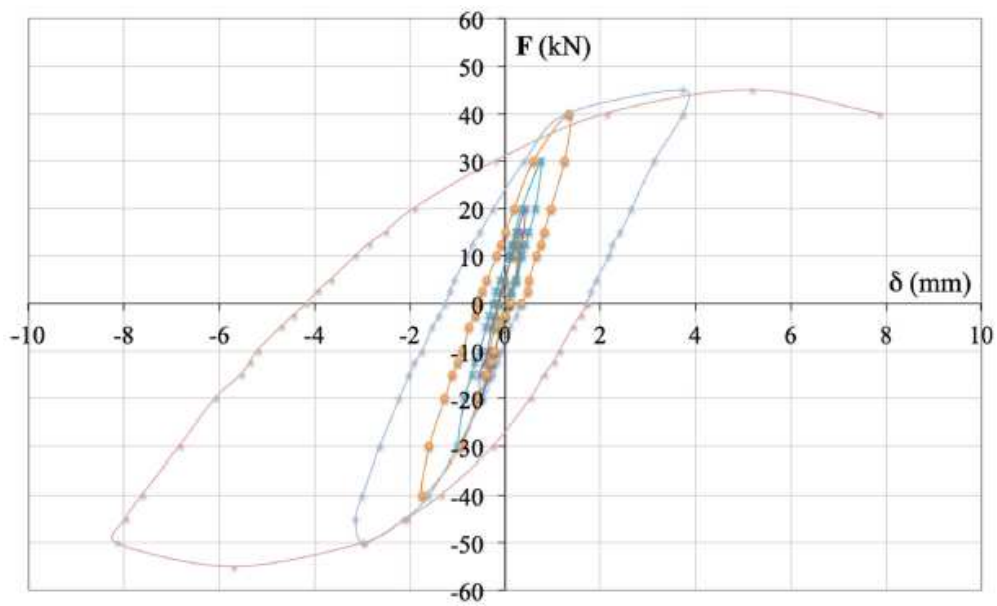
- Il rinforzo con strisce di GFRP ha portato ad un aumento di resistenza solo per uno dei modelli esaminati DR-W1, mentre nel caso del pannello R-W2, a causa del distacco delle strisce si è registrata una riduzione della resistenza finale. Tuttavia per entrambi i campioni ciò che è principalmente osservato è un aumento delle deviazioni laterali e della duttilità.
- Il collasso delle pareti rinforzate con strisce in fibra di vetro si è verificato a causa: della fessurazione della muratura e il distacco delle strisce di GFRP dopo una locale perdita di aderenza.
- Il rinforzo mediante strisce di GFRP ha conseguito con un aumento della energia di deformazione, dovuta ai cicli di carico sempre crescenti.
- Analizzando il provino R-W2 si può evidenziare come il distacco delle strisce di rinforzo risulta essere un meccanismo di collasso che incide molto sulla resistenza finale delle murature.



*Figura 4.5 – Diagramma sperimentale della forza ciclica  $F$  – spostamento laterale  $\delta$  del muro non rinforzato U-W1*



*Figura 4.6 – Diagramma sperimentale della forza ciclica  $F$  – spostamento laterale  $\delta$  del muro danneggiato e rinforzato DR-W1*



*Figura 4.7 – Diagramma sperimentale della forza ciclica  $F$  – spostamento laterale  $\delta$  del muro rinforzato R-W2*

## 4.2 Impiego di intonaci fibrorinforzati su elementi murari

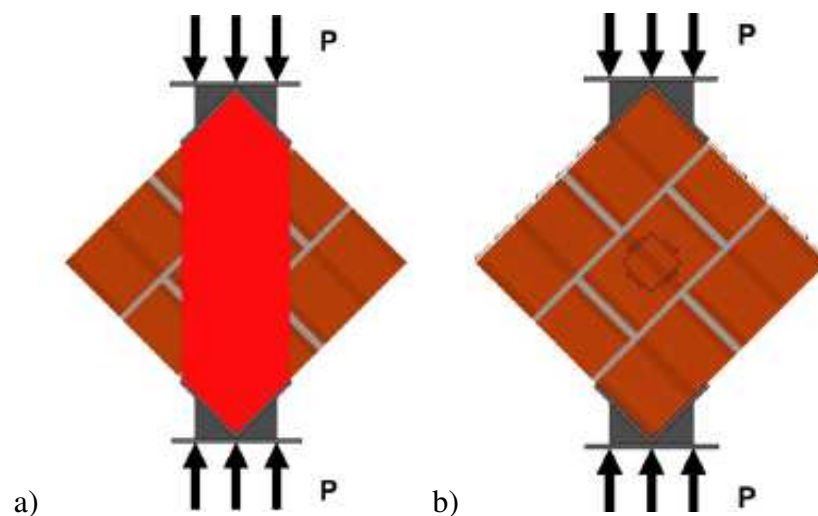
### 4.2.1 Comportamento di muratura moderna con intonaci rinforzati

#### *Introduzione*

In questa tesi è stata analizzata la resistenza a taglio di pannelli in muratura mediante prove di compressione diagonale facendo sempre riferimento ad attività sperimentali condotte presso il Laboratorio Prove Materiali e Strutture del Dipartimento DICEA da parte del Prof. R. Capozucca.

L'obiettivo è stato quello di confrontare la risposta di provini rinforzati con intonaci differenti, ma che alla base erano stati confezionati con le stesse dimensioni e con gli stessi materiali. La normativa di riferimento sulla quale si è basata la prova è la ASTM E 519 "Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages". Questa norma si basa sull'ipotesi che durante la prova di compressione diagonale, nel baricentro del pannello murario, si produca uno stato tensionale di taglio.

Questa configurazione di prova fa sì che nella porzione solida del pannello, compresa nella fascia delle impronte di carico, sia presente uno stato di tensione quasi uniforme. Ciò permette di valutare la resistenza a taglio media ( $\tau_{av}$ ) correlata alla resistenza a trazione ( $\sigma_T$ ) del materiale muratura in assenza del carico di precompressione. Nel piano di Mohr si delinea uno stato tensionale al pari di una prova di taglio puro e, lo stato di tensione quasi uniforme, fa sì che i valori delle tensioni a trazione e di quelle a compressione siano all'incirca identici. Il cerchio di Mohr risulta centrato nell'origine del piano e la tensione tangenziale media ha valore pari a quello delle tensioni normali principali.



**Figura 4.8** – a) Striscia con impronta di carico quasi uniforme

b) Tensioni tangenziali medie prodotte nei pannelli

### *Materiali impiegati*

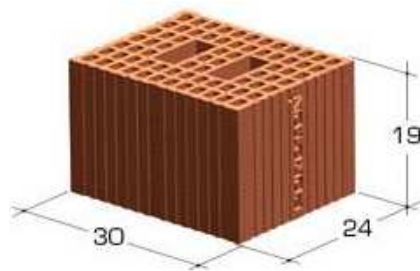
#### Tipologia di malta impiegata nella prova:

- Malta bastarda: costituita da cemento, calce idraulica e sabbia, con il seguente rapporto 1:1:5.

#### Tipologie di laterizi impiegati nella prova:

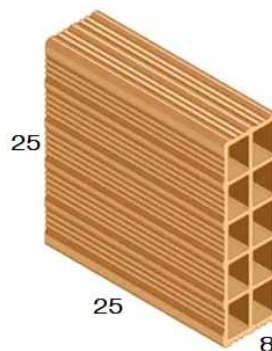
Occorre precisare che, prima della preparazione dei provini, i laterizi di seguito descritti sono stati testati in laboratorio con prove di compressione semplice, i risultati possono essere trovati nel documento di riferimento.

- Blocco POROTON: 30x24x19 cm, peso  $\pm 12,8$  kg, percentuali di foratura  $\leq 55\%$  e resistenza caratteristica  $f_{ck} > 5,0$  N/mm<sup>2</sup>.



**Figura 4.9** – Blocco PROTON con dimensioni

- Forato da 25x25x8: dimensioni 25x25x8 cm, peso  $\pm 3,0$  kg, percentuali di foratura  $\leq 65\%$  e resistenza caratteristica  $f_{ck} > 5,0$  N/mm<sup>2</sup>.



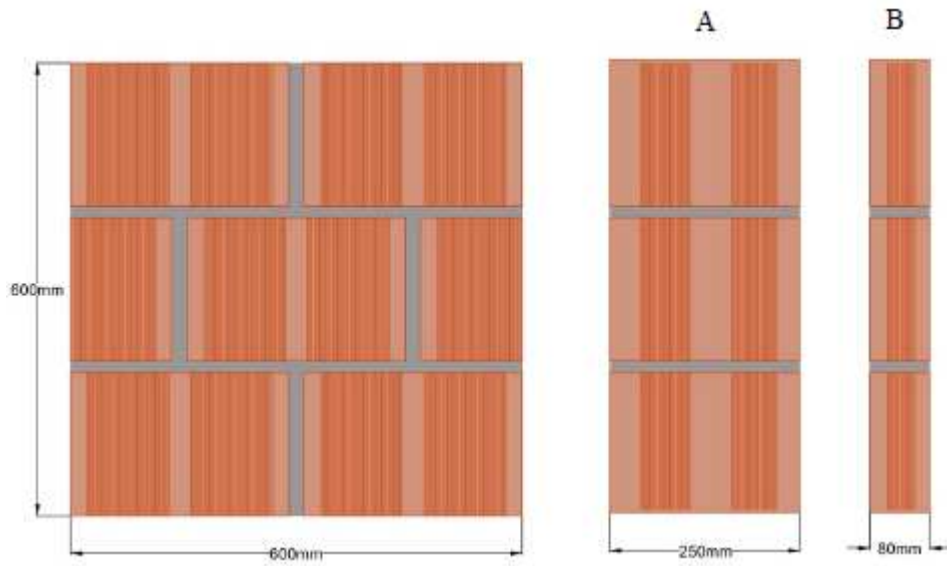
**Figura 4.10** – Forato 25x25x8 con dimensioni

### *Preparazione dei provini e strumentazione utilizzata*

I provini sono stati confezionati manualmente, la geometria e le dimensioni sono state fissate ad una larghezza ed un'altezza di 600x600mm con spessore variabile a seconda del laterizio utilizzato. (Figura 4.11)

Le prove sono state eseguite mediante una macchina prova materiali, sulla quale è stato posizionato un trasduttore di pressione, caratterizzato da una forma a V, che aveva il compito di trasmettere la forza applicata sul provino. Il macchinario utilizzato aveva le seguenti

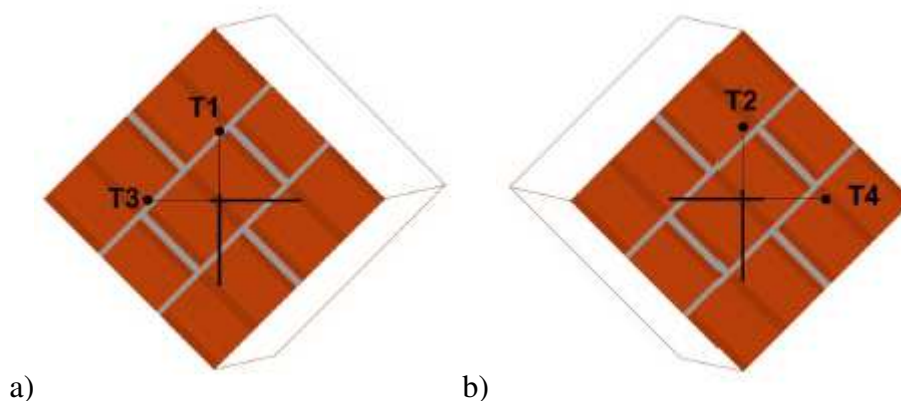
specifiche tecniche: classe 1, errore massimo 1% e scala di applicazione del carico 600 kN - 1500 kN – 3000 kN; della ditta Metrocom. Per la prova è stata adottata la scala da 600 kN.



**Figura 4.11** – Geometria di base dei modelli sperimentali

Gli spostamenti venivano controllati attraverso sensori di spostamento induttivi a trasformatore differenziale, Linear Variable Trasformer di tipo elettromagnetico (LVDT). Le caratteristiche dei dispositivi adottati erano: classe 0.4, sensibilità  $80 \pm 1\%$  mV/V, errore di linearità  $\leq \pm 0.4\%$ , spostamento nominale 50mm e alimentazione  $2,5 \pm 5\%$  V; marca HBM modello W50.

I trasduttori sono stati posizionati su entrambi i lati dei pannelli, in corrispondenza delle diagonali, una volta che il provino è stato posizionato all'interno della pressa. In questa fase si è dovuta prestare particolare attenzione alla complanarità e al parallelismo delle superfici sulle quali è trasmesso il carico, che dovevano risultare centrate rispetto alle piastre di trasmissione della forza. Dopodiché i trasduttori sono stati posizionati in corrispondenza delle diagonali, T1 e T2 in verticale, mentre T3 e T4 in orizzontale.



**Figura 4.12** – Disposizione della strumentazione: a) fronte, b) retro

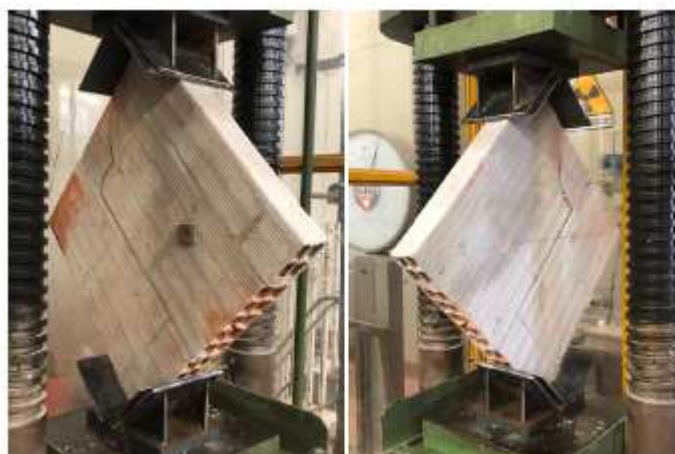
### *Sperimentazione su forato da 8 cm non rinforzato (Provino B0)*

La prima prova è stata eseguita sul provino confezionato con forati da 8 cm. Il provino aveva la diagonale maggiore, considerata nella direzione verticale, lunga 891mm e uno spessore di 80 mm, dato dallo spessore del laterizio.

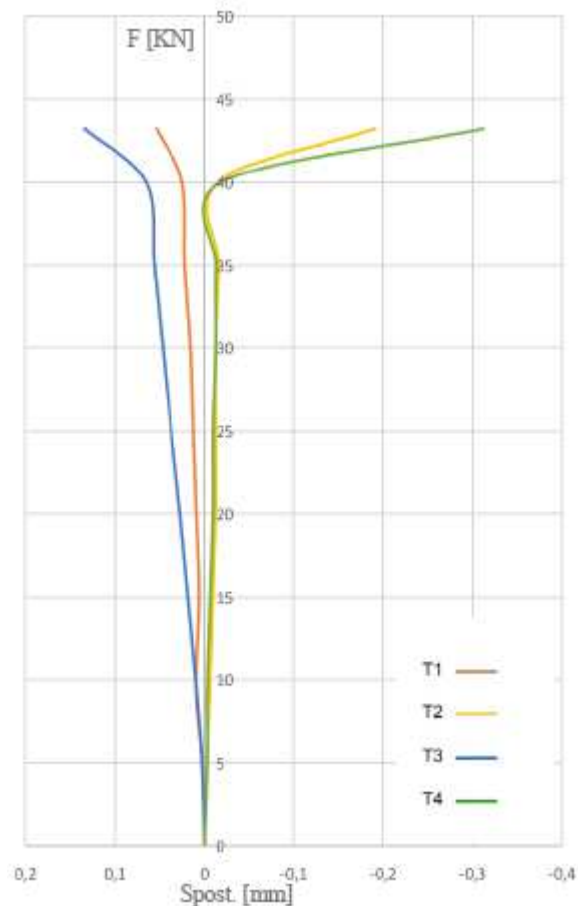


*Figura 4.13 – Configurazione della prova con forato 25x25x8 cm.*

Una volta posizionati i trasduttori la prova ad avuto inizio. La forza è stata applicata partendo da 0 kN con un incremento fissato di 5kN e ad ogni incremento venivano registrati gli spostamenti. Ad una forza pari da 20 kN il provino ha iniziato a presentare le prime fessure. Il collasso avvenuto ad una forza di circa 43 kN, corrispondente ad una resistenza a taglio di 0,61 N/mm<sup>2</sup> (Figura 4.15). La causa principale di collasso è stata la fessurazione del provino che ha attraversato un elemento per poi proseguire lungo il giunto di malta centrale (Figura 4.14).



*Figura 4.14 – Provino fessurato dopo la prova*



*Figura 4.15 – Grafico forza-spostamento di ciascuno dei trasduttori.*

*Sperimentazione su laterizio POROTON non rinforzato (Provino A0)*

In questa seconda prova è stato analizzato il comportamento del pannello confezionato con blocco POROTON. Il provino presentava un diagonale maggiore nella direzione verticale di 855 mm e uno spessore di 250 mm.

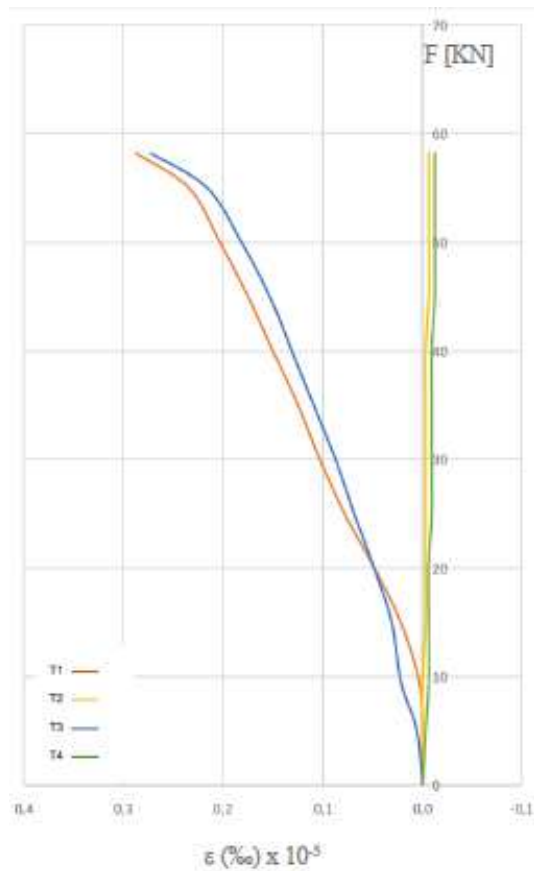


*Figura 4.16 – Configurazione di prova per laterizio POROTON.*

Come nel caso precedente, una volta posizionati i trasduttori la prova ha avuto inizio. La forza di partenza è stata 0kN e l'incremento pari a 5kN. In questa prova le prime fessurazioni sono state registrate ad una forza di 15kN, leggermente inferiore a quella precedente. Il collasso del provino è stato però raggiunto ad una forza maggiore, 58 kN, corrispondente a una resistenza a taglio di  $0,27 \text{ N/mm}^2$  (Figura 4.18). La causa del collasso è stata lo scorrimento lungo il giunto di malta (Figura 4.17).



**Figura 4.17** – Particolare dello scorrimento lungo il giunto di malta lato 1 e lato 2.



**Figura 4.18** – Grafico sforzo-spostamento dei quattro trasduttori.



### *Sperimentazioni con pannelli rinforzati*

In questa fase della sperimentazione, al fine di studiare il comportamento delle murature soggette a forze orizzontali, sono stati realizzati 18 provini con i due laterizi utilizzati in precedenza. Questi pannelli sono stati rinforzati con tecniche di intonaco innovative in grado di garantire un miglioramento sismico. I provini così confezionati sono stati sottoposti alle prove di compressione diagonale, con lo scopo di analizzare l'efficacia dell'intervento di rinforzo.

La tecnica di rinforzo utilizzata sui provini è stata appunto quella dell'applicazione di un intonaco di spessore di circa 2,5 cm. Le configurazioni che sono state studiate erano differenti:

- Intonaco ESICEM 500
- Intonaco ARMAMRO
- Intonaco BETONCINO BS15 + RETE 40x40
- Intonaco BETONCINO CALCEPURA + RETE 40x40

Il sistema FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix) è stato impiegato negli intonaci Armamuro, Betoncino BS15 e Calcepura. Negli ultimi due casi è stata prevista in aggiunta una rete a maglia quadrata in PVC.

L'Esicem 500 è un intonaco classico adatto per la formazione di intonaci interni ed esterni; e conforme alla UNI EN 998-1.

L'Amamuro è un betoncino strutturale fibrato cementizio ad elevate caratteristiche meccaniche, frutto delle fibre di cromo disperse al suo interno. Questo intonaco è particolarmente adatto per intonaci atti al rinforzo di murature soggette ad azioni di taglio.

L'Esicem betoncino fibrato BS15 è un prodotto a base di cemento, inerte calcareo ed additivi. Il prodotto, mediante la scelta di specifici additivi, può arrivare ad essere altamente resistente e ottimo dal punto di vista della posa in opera per quanto riguarda lavorabilità e adesione. Grazie alle elevate caratteristiche di resistenza può essere impiegato su pareti strutturali sia interne che esterne. Questo prodotto risulta essere conforme alla UNI EN 998-2.

La Calcepura restaura è una malta strutturale fibrata di classe M15 a base di: calce idraulica naturale NHL5.0, inerti calcarei con granulometria controllata, fibre e additivi specifici. Il prodotto risulta essere ideale per la realizzazione di murature storiche o nel settore della bioedilizia. Caratterizzata da un'alta permeabilità al vapore acqueo e una limitata reattività ai sali contenuti nelle murature, contribuisce ad un migliore benessere abitativo. Risulta quindi una soluzione valida per il restauro di strutture murarie antiche. Come il prodotto precedente, è conforme alla normativa UNI EN 998-2.

## Risultati e conclusioni

Codice	Laterizio	Tipo di intonaco	$P_{rottura}$ [kN]	$\tau_{media}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
A0	Blocco Poroton	-	58	0.27
A1	Blocco Poroton	Esicem 500	124	0.58
A2	Blocco Poroton	Armamuro	168	0.81
D1	Blocco Poroton	Betoncino BS15 + rete 40x40	168	0.81
D3	Blocco Poroton	Betoncino Calcepura + rete 40x40	167	0.91

**Tabella 4.1** – Risultati dei vari provini confezionati con blocchi Poroton.

Codice	Laterizio	Tipo di intonaco	$P_{rottura}$ [kN]	$\tau_{media}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
B0	Forato da 8cm	-	43	0.61
B1	Forato da 8cm	Esicem 500	50	0.57
B2	Forato da 8cm	Armamuro	90	1.00

**Tabella 4.2** – Risultati dei vari provini confezionati con forati 25x25x8.

Nelle tabelle soprariportate, Tabella 4.1 e 4.2, sono riportati i risultati delle prove fatte sui vari provini. Per ogni configurazione di rinforzo sono stati preparati 3 provini per un totale di 18 provini.

Analizzando Tabella 4.1, riguardante i blocchi Poroton, possiamo subito dire che l'impiego di qualsiasi delle quattro tipologie di intonaco porta ad un aumento della resistenza a taglio. C'è però da sottolineare che la migliore soluzione è quella presentata nel provino E1, in cui è stato impiegato l'intonaco Betoncino Clacepura con la rete in PVC 40x40. In questo caso la resistenza media  $\tau_{media}$  è stata pari a 0.91 N/mm<sup>2</sup>. La rete in PVC in questo caso ha funzione di armatura, il suo compito è quello di contrastare la formazione di fessure e quello di contenere eventuali cedimenti o distacchi dell'intonaco dalla superficie rinforzata.

I risultati che fanno riferimento al forato da 8 cm sono riportati in Tabella 4.2. Qui i provini sono stati rinforzati solo con due tipologie di intonaco: l'Esicem 500 e l'Armamuro. In questo caso c'è da evidenziare il fatto che nonostante il provino non rinforzato, B0, presenti un carico a rottura  $P_{rottura}$  minore rispetto al provino rinforzato con intonaco Esicem 500, B1, la resistenza a taglio media del provino B0 risulta superiore rispetto a quella del provino B1. Questo perché l'impiego di questa tipologia di intonaco è fortemente sconsigliato su forati da 8cm, a causa del loro comportamento a rottura. In conclusione, ciò che è da sottolineare, è il notevole incremento della resistenza a taglio e del carico massimo a rottura nel provino B2.

## 4.2.2 Analisi sperimentale di murature moderne rinforzate

### Introduzione

La tesi che si andrà a analizzare di seguito rappresenta una sperimentazione basata sugli stessi principi dell'analisi precedente §4.2.1. La resistenza a taglio di pannelli in muratura è stata nuovamente analizzata mediante prove di compressione diagonale facendo sempre riferimento ad attività sperimentali condotte presso il Laboratorio Prove Materiali e Strutture del Dipartimento DICEA da parte del Prof R. Capozucca. Come nel caso precedente le modalità di prova impiegate sono conformi alla ASTM E 519 - 02. Una differenza sta nel fatto che, per collocare il provino nella macchina prova materiali, è stata tagliata la porzione superiore ed inferiore del pannello in corrispondenza di una delle diagonali (Figura 4.19).

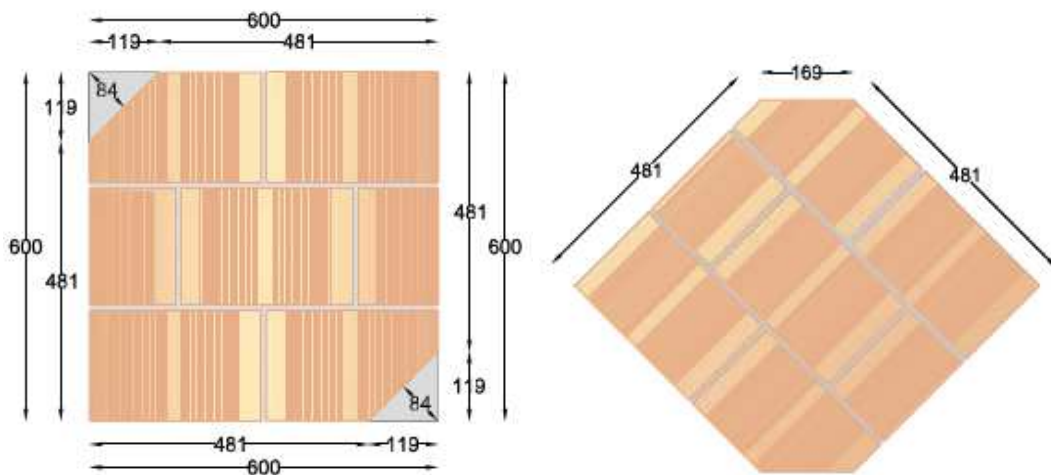


Figura 4.19 – Geometria taglio modelli sperimentali per compressione diagonale

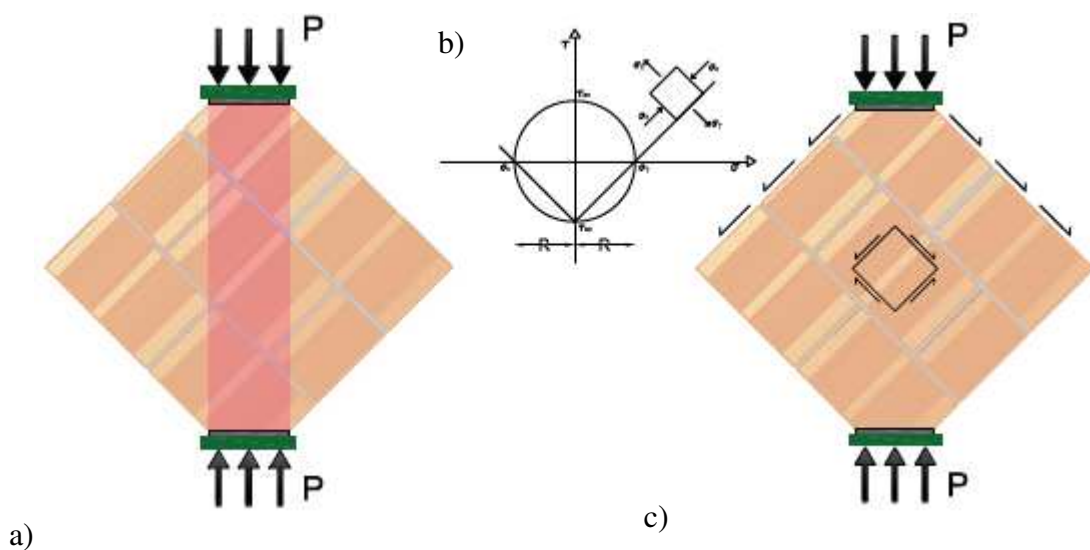


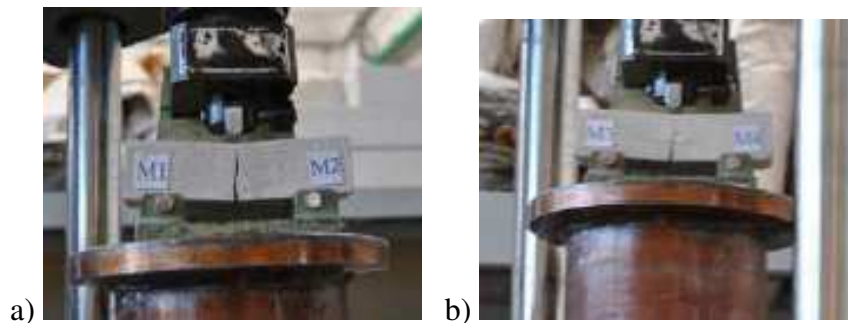
Figura 4.20 – a) Striscia impronta di carico con stato tensionale quasi uniforme  
b) Tensioni principali e tangenziali medie rappresentate nel piano di Mohr  
c) Tensioni tangenziali medie prodotte nei pannelli sperimentali

## *Materiali impiegati*

### Tipologia di malta impiegata:

La tipologia di malta impiegata è una malta Bastarda con rapporto cemento, calce idraulica e sabbia di 1:1:5. Questa tipologia di malta è definita di categoria M5 dalla normativa italiana NTC2018, corrispondete ad una resistenza a compressione di 5 N/mm<sup>2</sup>.

In questa sperimentazione anche la malta è stata testata in laboratorio. Sono stati preparati dei provini (Figura 4.21) e sottoposti a prove di flessione a carico concentrato e prove a compressione (Figura 4.22)



*Figura 4.21 – I due provini M1-M2 e M3-M4 sottoposti a prova di flessione fino a rottura.*



*Figura 4.22 – Esempio di come si è svolta la prova di compressione sui provini dopo la prova di flessione, provino M1.*

### Tipologie di laterizio:

Le prove sono state eseguite sulle seguenti tipologie di laterizio, che come nel caso precedente, sono state testate in laboratorio prima del confezionamento dei provini:

- **Blocco POROTON:** dimensioni 30x24x19 cm, peso  $\pm 11,6$  kg\*, percentuale di foratura  $\leq 55\%$  e resistenza caratteristica in direzione dei carichi verticali  $> 5,0$  N/mm<sup>2</sup>.

(\*) Tengo a sottolineare che tra la sperimentazione 4.2.1 e 4.2.2 c'è una differenza nel peso del blocco POROTON, nonostante abbiano le stesse caratteristiche, questo potrebbe essere dovuto ad un errore accidentale.

- **Forato da 25x25x8:** dimensioni 25x25x8 cm, peso  $\pm 3,0$  kg, percentuali di foratura  $\leq 65\%$  e resistenza caratteristica  $f_{ck} > 5,0$  N/mm<sup>2</sup>.

- Blocco in Cemento: dimensioni 50x20x25 cm, peso  $\pm 28,0$  kg, percentuali di foratura 45% e resistenza caratteristica a compressione  $f_{bk} \geq 5,0$  N/mm<sup>2</sup>,  $f'_{bk} \geq 1,5$  N/mm<sup>2</sup>.



*Figura 4.23 –Dimesioni forato 50x20x25 cm.*

### *Rinforzo dei pannelli*

Per le prove sono stati confezionati 24 provini in muratura con le diverse tipologie di laterizio. La tecnica di rinforzo applicata era composta da un intonaco, con spesso di circa 2,5 cm, su entrambi i lati. Le tipologie di rinforzo impiegate sono state le seguenti:

- Intonaco ESICEM 500
- Intonaco ARMAMRO
- Intonaco BETONCINO BS15 + RETE 40x40
- Intonaco BETONCINO CALCEPURA + RETE 40x40

In questa sperimentazione il sistema FRCM è stato utilizzato nell'intonaco Armamuro, Betoncino Bs15 e Calcepura. Nel primo è stata inserita una fibra di carbonio (Figura 4.24) mentre negli altri due intonaci sono presenti delle reti a maglia quadrata in PVC (Figura 4.25).



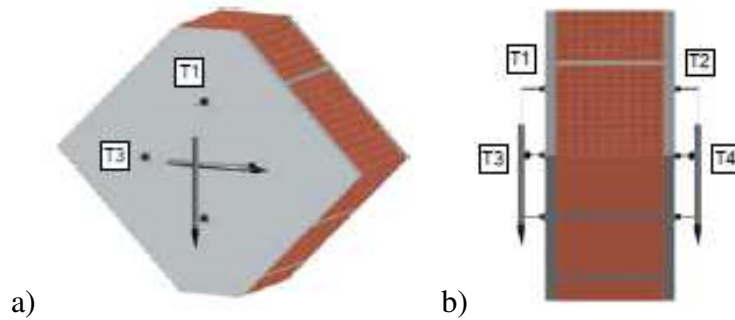
*Figura 4.24 –Fibre di carbonio inserite nell'intonaco Armamuro*



*Figura 4.25 – Rete in PVC a maglie quadrate.*

### *Metodi di esecuzione della prova*

Le prove sono state eseguite sui provini già rinforzati. Sui pannelli sono stati applicati dei trasduttori su entrambe le facce, due in verticale (T1 e T2) e due in orizzontale (T3 e T4) (Figura 4.26). Come per il caso precedente i traduttori avevano il compito di misurare gli spostamenti di allungamento e accorciamento del provino.



**Figura 4.26** – *Disposizione della strumentazione:*

a) *Vista del fronte/reto*

b) *Vista dal lato*

I cicli di carico sono stati eseguiti nella seguente modalità

- Ciclo 1: 0 – 5 kN
- Ciclo 2: 0 – 10 kN
- Ciclo 3: 0 – 20 kN
- Ciclo 4: 0 – rottura

I primi tre cicli sono stati eseguiti come assestamento e per uniformare le superfici di contatto tra macchinario e muratura.

Per quanto riguarda gli strumenti utilizzati per la prova, macchina prova materiali e trasduttori, questi sono stati gli stessi della sperimentazione §4.2.1 e vengono descritti al paragrafo “Preparazione dei provini e strumentazione utilizzata”.

### *Risultati delle prove*

I provini sono stati confezionati come descritto in tabella 4.3. Possiamo notare che solo il blocco Proton è stato rinforzato con tutte e quattro le metodologie, mentre, per gli altri due casi, è stato scelto di sperimentare solo l'intonaco Escicem 500 e l'Armamuro.

Codice	Laterizio	n° Provini	Tipo di intonaco
A1	Blocco Proton	3	Escicem 500
A2	Blocco Proton	3	Armamuro
D1	Blocco Proton	3	Betoncino Bs15 + rete 40x40
E1	Blocco Proton	3	Betoncino Calcepura + rete 40x40
B1	Forato da 8 cm	3	Escicem 500
B2	Forato da 8 cm	3	Armamuro
C1	Blocco Cemento	3	Escicem 500
C2	Blocco Cemento	3	Armamuro

*Tabella 4.3 – Elenco dei provini confezionati.*

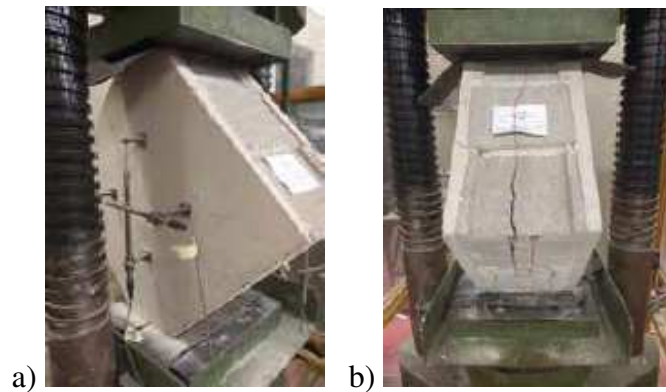
#### Provini con Escicem 500

**A1:** Dopo aver testato i tre provini la resistenza a compressione diagonale media è di 123,5 kN, in questa sperimentazione il valore finale della resistenza media è stato ottenuto solo dai risultati dei primi due provini. Il terzo non è stato considerato poiché il risultato, essendo molto più basso rispetto agli altri potrebbe essere frutto di un'errata messa in opera o dalla scarsa resistenza del laterizio. Le prime fessure, sempre basandosi sui primi due provini, sono emerse ad una forza di 83,5 kN.

**B1:** La resistenza di questa configurazione risulta essere molto bassa. Le prime fessure si sono iniziate a formare ad una forza di 25 kN, in tutti e tre i casi. La resistenza media a compressione diagonale a rottura è stata di 48 kN, c'è da segnalare che la muratura ha presentato sgretolamento nei punti di contatto con le piastre della macchina. Alla luce delle varie prove ciò che si è concluso è che l'intonaco Escicem 500 non risulta essere un buon rinforzo antisismico se impiegato con forati da 8 cm.

**C1:** I blocchi di cemento rinforzati con Escicem 500 sono quelli che hanno registrato la maggiore resistenza a compressione diagonale media, 140 kN, anche se, per quanto riguarda la formazione delle prime fessure si ha un valore medio relativamente basso di 68,7 kN, in due delle tre prove la muratura ha riportato fessurazioni nell'intonaco e nei blocchi evidenti.

Nonostante questo, l'intonaco Esicem 500 rappresenta una buona soluzione antisismica quando si deve intervenire su strutture con blocchi in cemento.

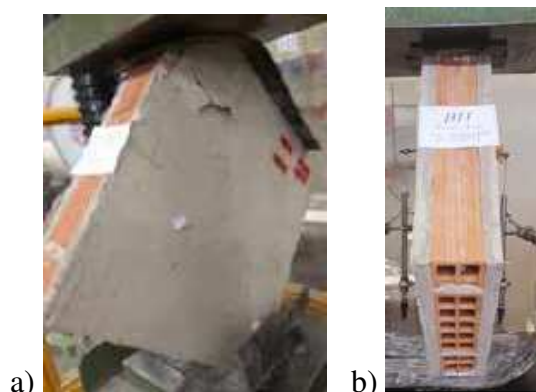


**Figura 4.27** – a) Posizionamento del provino C1.  
b) Provino C1 fratturato (sperimentazione 3)

### Provini con Armamuro

**A2:** L'unione dei blocchi Poroton con l'intonaco Armamuro ha portato ad una resistenza media alla rottura diagonale di 140 kN. Le prime fessure si sono registrate ad una forza di 85 kN paragonabile con i provini A1. Questa soluzione rappresenta un buon rinforzo antisismico.

**B2:** Il provino ha riportato sgretolamento del rinforzo e anche dei forati, come nel caso dei provini B1, ma in questo caso i risultati sono quasi raddoppiati. La forza esercita alla formazione delle prime fessure è stata uguale per tutti e tre i provini, 45 kN, e la resistenza a compressione diagonale media è risultata pari a 78 kN. In questo caso l'impiego di intonaco Armamuro su forati da 8cm presenta una buona soluzione antisismica.



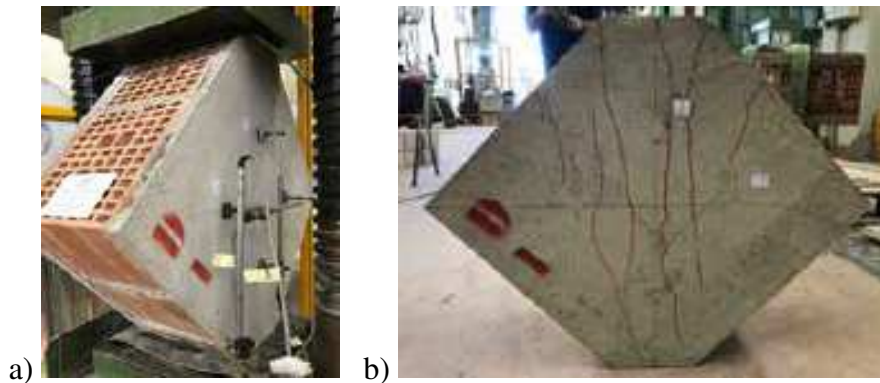
**Figura 4.28** – a) Sgretolamento dell'intonaco (sperimentazione 3)  
b) Posizionamento del provino B2.

**C2:** Questa tipologia di intonaco unita ai blocchi cementizi ha restituito una resistenza a compressione diagonale media di 175 kN, un risultato davvero notevole.



### Provini **D1**: Proton + Betoncino BS15

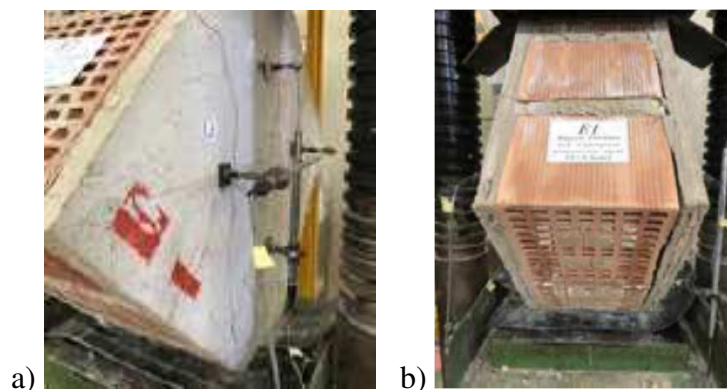
La resistenza a compressione diagonale media presentata da questa soluzione è stata pari a 143 kN, la formazione delle fessure è in linea con i risultati ottenuti nei provini A1 e A2, pari a 84 kN. L'impiego del Betoncino BS15 rappresenta un buon rinforzo sismico per questa tipologia di muratura in termini di resistenza, ma nel caso di un evento sismico, il meccanismo di fessurazione comporterà lo sgretolamento dell'intonaco con probabile distacco dalla superficie rinforzata.



**Figura 4.29** – a) Posizionamento del provino D1.  
b) Fessurazione del blocco D1 (sperimentazione 2)

### Provini **E1**: Proton + Calcepurea

La configurazione studiata nel provino E1 ha riportato lesioni evidenti in tutti e tre i provini, in alcuni casi anche perpendicolari al carico applicato, e sgretolamento dell'intonaco nelle superfici di contatto. Nel terzo provino la sollecitazione indotta ha causato un distacco di 1 cm dell'intonaco dai blocchi (Figura 4.30 b), nonostante questo è stato quello che ha registrato una resistenza a trazione maggiore. In conclusione, la resistenza media a compressione diagonale è stata di 153 kN e le prime fessure si sono formate ad una forza di 91kN, indicando quindi questa soluzione come un buon rinforzo sismico.



**Figura 4.30** – a) Provino E1 fessurato (sperimentazione 2)  
b) Provino E1 con intonaco distaccato (sperimentazione 3)

### Conclusioni

Le analisi finali sono state eseguite paragonando la medesima tipologia di laterizio rinforzata con le diverse tipologie di intonaco:

Codice	Laterizio	Tipo di intonaco	$P_{\text{ultima rottura}}$ [kN]	$\tau_{\text{media}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
A1	Blocco Proton	Esicem 500	124	0.58
A2	Blocco Proton	Armamuro	168	0.81
D1	Blocco Proton	Betoncino Bs15 + rete 40x40	168	0.81
E1	Blocco Proton	Betoncino Calcepura + rete 40x40	167	0.91

**Tabella 4.4** – Risultati delle prove sperimentali in cui è stato impiegato il blocco Poroton

Per quanto riguarda i blocchi Poroton si può eseguire un'ottima analisi visto l'impiego di tutte e 4 le tipologie di intonaco di rinforzo. I campioni A1 e D1 hanno presentato lesioni e fratture vistose, mentre nel campione A2 c'ho che è da sottolineare è il quasi distacco dell'intonaco dal laterizio. Per questa tipologia si può quindi concludere che tutte e quattro le soluzioni sono buoni rinforzi antisismici, ma nel caso si debba eseguire un intervento su una parete composta da blocchi Poroton, la migliore soluzione sarebbe quella di impiegare l'intonaco Betoncino Calcepura con la rete in PVC a maglie quadrate, come nell'esempio E1.

Codice	Laterizio	Tipo di intonaco	$P_{\text{ultima rottura}}$ [kN]	$\tau_{\text{media}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
B1	Forato da 8 cm	Esicem 500	50	0.57
B2	Forato da 8 cm	Armamuro	90	1.00

**Tabella 4.5** – Risultati delle prove sperimentali in cui è stato impiegato il forato da 25x25x8 cm

I risultati dell'applicazione di intonaci rinforzanti applicati su forati da 25x25x8 sono riportati in tabella 4.5. Dai dati emersi possiamo immediatamente concludere che la prima soluzione B1 non presenta una configurazione adatta al miglioramento sismico. Oltre alla bassa resistenza, presenta lesioni simili alla croce di Sant'Andrea, le quali sono preludio di collasso strutturale. Nel caso in cui si debba intervenire su una parete costituita da forati di 8cm sarebbe bene scegliere l'intonaco Armamuro. I motivi per i quali si consiglia questa scelta sono: la buona resistenza e il fatto che, nel caso di sisma, le fessure potrebbero sorgere saranno poche ma decise.

Codice	Laterizio	Tipo di intonaco	$P_{\text{ultima rottura}}$ [kN]	$\tau_{\text{media}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
C1	Blocco Cemento	Esicem 500	153	0.75
C2	Blocco Cemento	Armamuro	197	1.01

*Tabella 4.6 – Risultati delle prove sperimentali in cui è stato impiegato il blocco in cemento.*

Quest'ultima tipologia di laterizio presenta le resistenze più elevate tra le tre tipologie. Osservando nel dettaglio la tabella però si può notare che tra i due provini, C1 e C2, quello che garantisce una resistenza a taglio maggiore è quello rinforzato con Armamuro. Anche confrontando le configurazioni dal punto di vista fessurativo il provino C2 rimane la configurazione più consigliata, poiché si sono riscontrate fessure solo su di un lato. Concludendo, quando si interviene su di una struttura composta da blocchi di cemento l'applicazione di intonaco Armamuro presenta un'ottima soluzione antisismica.

### **4.2.3 Confronto e commento delle sperimentazioni 4.2.1 e 4.2.2**

Le sperimentazioni analizzate in precedenza, se pur condotte con alcune differenze in termini di configurazione di prova e metodi di sollecitazione, hanno portato a risultati sperimentali paragonabili.

Indipendentemente dalla tipologia di laterizio che componeva muratura, il rinforzo eseguito con l'intonaco FRCM è risultato essere il migliore dal punto di vista prestazionale. L'intonaco che è stato testato in tutte le tipologie di laterizio è l'Armamuro. Questa tipologia è un betoncino strutturale fibrato cementizio, al cui interno sono disperse fibre di cromo che gli conferiscono elevate caratteristiche meccaniche. L'Armamuro rappresenta un'ottima soluzione per il rinforzo antisismico, e questo è evidente anche dai risultati ottenuti.

Le altre due tipologie di FRCM impiegate in queste sperimentazioni sono state eseguite solo su blocchi Poroton, qui oltre alla malta è stata applicata una rete in PVC a maglie quadrate 40x40. Come si può evincere dalle Tabelle 4.1 e 4.4, l'unione del Betoncino Calceputa con la rete in PVC è la soluzione che ha portato l'incremento di resistenza maggiore.

Alla luce di tutti questi risultati l'impiego di questi intonaci risulta essere una soluzione accattivante quando si va ad intervenire in murature storiche. Queste soluzioni riescono a generare incrementi di resistenza a taglio nelle murature notevoli, insieme ad un ingombro limitato e un'invasività da considerarsi nulla.

Per quanto riguarda il restauro di strutture murature storiche la soluzione più indicata è quella con intonaco Betoncino Calceputa con eventuale rete in PVC, come messa in opera nei casi

precedenti. Poiché questa tipologia di malta è caratterizzata da un'alta permeabilità al vapore acqueo e una limitata reattività ai sali contenuti nelle murature. Tutto questo contribuisce senza dubbio ad un migliore benessere abitativo, per questo il Betoncino Calcepurea rappresenta un'ottima soluzione anche per l'impiego in bioedilizia.

# Conclusioni

---

Il rinforzo di una struttura in muratura ha come obiettivo principale quello di incrementare la resistenza alle azioni sollecitanti e, quando possibile, aumentare il valore degli spostamenti esibiti all'atto del collasso. In questo documento si sono analizzati in particolare i rinforzi di strutture in muratura sollecitate ad azioni di taglio, che possono sollecitare la struttura durante un evento sismico.

Come visto nelle applicazioni sperimentali un intervento con FRP garantisce un elevato aumento della resistenza a taglio, insieme con tutti i vantaggi che presentano questi materiali: leggerezza, resistenza agli agenti aggressivi che si trovano nell'ambiente e, in molti casi, reversibilità dell'intervento. Grazie alle diverse tipologie di configurazioni che si possono trovare sul mercato, gli FRP si prestano bene ad interventi di varia natura e anche lì dove i metodi tradizionali non potrebbero essere impiegati.

Ad oggi l'impiego di questi materiali è molto studiato poiché ci sono ancora caratteristiche che possono essere migliorate, come per esempio, il fatto che l'applicazione di alcune tipologie di resine non permette alla muratura sottostante di respirare.

Ciò a cui bisogna prestare particolare attenzione è la messa in opera. Come è stato ribadito nel capitolo che riguarda i materiali fibrorinforzati il distaccamento del materiale dalla superficie è una delle cause più frequenti di collasso dell'intero intervento e, in alcuni casi, dell'intera struttura. Questo perché il collasso dovuto al distacco può portare a rotture di tipo fragile. Tutto questo è stato evidenziato anche dalle prove sperimentali. Nella prima, 4.1, il collasso del provino rinforzato R-W2 è pervenuto dopo il distaccamento delle strisce di rinforzo nella parte bassa del provino. Nelle altre due, il distaccamento degli intonaci rinforzati dai laterizi aveva come causa più attendibile la non corretta posa in opera degli stessi. Quando si ha a che fare con le murature, e in particolare quelle antiche, ci si può trovare a dover intervenire su superfici non uniformi o non consone ad un intervento di rinforzo, in questi casi è consigliato un intervento di preconsolidamento della muratura.

In conclusione ciò che tengo a ribadire è che questa soluzione può essere interessante anche sotto un'ottica futura per quanto riguarda la diminuzione dei rifiuti e salvaguardia dell'ambiente. Poiché, grazie all'impiego di questi materiali sul patrimonio edilizio esistente si può registrare una diminuzione dei rifiuti provenienti dal settore dell'edilizia.

# Bibliografia

---

## Articoli accademici:

- [1].R. Capozucca, E. Magagnini, (2020), “*Experimental response of masonry walls in-plane loading strengthened with GFRP strips*”, Composite Structures Volume 235, 111735, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111735>
- [2].R. Capozucca, E. Magagnini, (2020), “*Modelling of historic brickwork walls strengthened with GFRP strips. Brick and Block Masonry*”, From Historical to Sustainable Masonry - Proceedings of the 17th International Brick/Block Masonry Conference, 624 - 631, <http://hdl.handle.net/11566/283657>
- [3].R. Capozucca, E. Magagnini, M. V. Vecchiotti, (2020), “*Analysis of Damaged RC beams strengthened with NSM FRP*”, <http://hdl.handle.net/11566/283658>
- [4].R. Capozucca, E. Magagnini, M. V. Vecchiotti, (2019), “*Experimental behaviour of historic masonry walls under compression and shear loading*”, 24th Conference of the Italian Association of Theoretical and Applied Mechanics, AIMETA 2019; Rome; Italy; Code 238859, 2104 - 2113, <http://hdl.handle.net/11566/281507>
- [5].R. Capozucca, E. Grande, G. Milani, (2019), “*Fiber reinforced polymer strengthened masonry: delamination, experimental and numerical issues, Part III, Chapter 15*”, Numerical Modelling of Masonry Structures and Historical Structures, 537 - 583, <http://hdl.handle.net/11566/256927>
- [6].R. Capozucca, E. Magagnini, Pace G., (2018), “*Experimental and modelling of masonry walls under diagonal compression loading*”, <http://hdl.handle.net/11566/259469>
- [7].R. Capozucca, E. Magagnini, Pace G., (2017), “*Bond of FRP strips in the strengthening of brickwork masonry*”, International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics 2016, <http://hdl.handle.net/11566/250560>
- [8].R. Capozucca, V. Ricci, (2016), “*Bond of GFRP strips on modern and historic brickwork masonry*”, From COMPOSITE STRUCTURES, Volume 140, (pp. 540-555), <http://hdl.handle.net/11566/230112>
- [9].R. Capozucca, (2014), “*Teoria e Tecnica delle Strutture in Muratura*”, Pitagora Editrice S.r.l. (eds.), <http://hdl.handle.net/11566/193302>

- [10].R. Capozucca, (2013), “*Effects of mortar layers in the delamination of GFRP bonded to historic masonry*”, From COMPOSITES. PART B, ENGINEERING, Volume 44, (pp. 639 – 649), <http://hdl.handle.net/11566/65305>
- [11].R. Capozucca, (2011), “*Shear strength of historic masonry*”, Proc. CIB-W023 48th Commission Meeting, <http://hdl.handle.net/11566/69665>
- [12].R. Capozucca, S. P. Santos, C. Modena, E. Vientzileou, M. Tomazevic, P. Lourenco, S.Chidiac, W. Jaeger, (2010) “*Guide for the structural rehabilitation of heritage buildings*”, CIB – Netherlands (eds.), Volume 335, <http://hdl.handle.net/11566/68840>
- [13].Corradini M., Osofero A. I., Borri A., Castori G., (2015), Handbook of Research on Seismic Assessment and Rehabilitation of Historic Structures. In Asteris Panagiotis G. and Vagelis Plevris (eds.). *Strengthening of Historic Masonry Structures with Composite Materials* (pp. 257-292). DOI: <https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.4018%2F978-1-4666-8286-3.ch008>

Normative:

- [14].Consiglio Nazionale delle Ricerche, (2020), “*Normative tecniche relative alle costruzioni*”, <https://www.cnr.it/it/norme-tecniche-costruzioni>
- [15].Consiglio Nazionale delle Ricerche, (2013), “*Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati. Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie*”, CNR-DT 200 R1/2013, <https://www.cnr.it/it/node/2620>
- [16].Consiglio Nazionale delle Ricerche, (2004), “*Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati. Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie.*”, CNR-DT 200/2004, <https://www.cnr.it/it/node/2619>