

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE LM**

*DICAM*

**TESI DI LAUREA**

in

Diagnostica e Sperimentazione delle Strutture M

***Attività sperimentale su materiali ecosostenibili fibrorinforzati  
con tessuti a base di fibre di basalto per applicazioni civili***

CANDIDATA  
Alessandra Pirri

RELATORE:  
Chiar.mo Prof. Ing. Giovanni Pascale

CORRELATORE  
Ing. Alessandro Largo  
Dr. Arch. Camilla Colla

Anno Accademico 2010/11

Sessione III



# INDICE

Introduzione .....	8
1 La muratura .....	12
1.1 Introduzione .....	12
1.2 Definizione e classificazione delle murature .....	12
1.3 Tecnologia dei vari tipi di murature.....	15
1.3.1 Murature in pietrame a secco .....	15
1.3.2 Murature in pietra.....	16
1.3.3 Murature di mattoni in laterizio.....	21
1.4 Malte .....	22
1.5 Cause dei dissesti .....	24
1.5.1 Dissesti dovuti a schiacciamento.....	26
1.5.2 Dissesti dovuti a instabilità.....	27
1.5.3 Dissesti dovuti a sforzo normale e a flessione .....	28
1.5.4 Dissesti dovuti al taglio .....	29
1.6 Tecniche di intervento nelle murature.....	30
1.6.1 Tecnologie per dare nuova consistenza alle strutture.....	31
1.6.1.1 Le iniezioni.....	32
1.6.1.2 Intonaci armati.....	35
1.6.1.3 Le iniezioni armate .....	37
1.6.2 Tecnologie che aumentano la capacità portante dell'esistente murario.....	40
1.6.2.1 Collari metallici .....	40
1.6.2.2 Tiranti metallici .....	41
1.6.2.3 Fasciature di tessuti a base di fibra di carbonio.....	42

2	I materiali compositi fibrorinforzati .....	49
2.1	Introduzione .....	49
2.2	Definizioni.....	49
2.3	Materiali compositi fibrorinforzati a fibre lunghe .....	51
2.3.1	Tipologia e classificazione delle fibre.....	51
2.3.2	Le fibre di vetro.....	53
2.3.3	Le fibre di carbonio .....	55
2.3.4	Le fibre aramidiche .....	57
2.4	Le matrici .....	59
2.4.1	Le matrici organiche.....	59
2.4.1.1	Le matrici termoindurenti.....	60
2.4.1.2	Le matrici termoplastiche.....	62
2.4.2	Le resine in edilizia .....	64
2.4.2.1	Le resine epossidiche.....	64
2.4.3	Le matrici inorganiche.....	66
2.5	I materiali compositi in edilizia.....	70
3	Materiali compositi a base di fibre di basalto.....	74
3.1	Introduzione .....	74
3.2	Stato dell'arte sulle fibre di basalto.....	75
3.2.1	Natura e composizione chimica .....	75
3.2.2	Processo produttivo .....	77
3.2.3	Proprietà meccaniche .....	80
3.2.4	Comportamento alle alte temperature .....	81
3.2.5	Resistenza chimica: comportamento in ambiente acido e alcalino .	82
3.2.6	Tipologie di prodotti commerciali.....	87

3.3	Attività sperimentale: caratterizzazione meccanica laminati in fibre di basalto.....	92
3.3.1	Materiali .....	92
3.3.1.1	Le matrici .....	93
3.3.1.2	I tessuti .....	95
3.3.2	Preparazione dei provini: metodo Hand Lay-up .....	96
3.3.3	Esecuzione della prova .....	99
3.3.4	Risultati .....	102
3.3.4.1	Provini a matrice organica: EBU e EFU .....	102
3.3.4.2	Provini a matrice inorganica .....	107
3.3.4.3	Confronto risultati .....	114
4	Indagine sperimentale sull'aderenza substrato murario – composito con fibre di basalto.....	116
4.1	Introduzione .....	116
4.2	L'aderenza tra rinforzo e supporto .....	117
4.3	Parametri che influenzano il legame di aderenza.....	119
4.3.1	Tipologia di muratura.....	119
4.3.2	Lati rinforzati.....	120
4.3.3	Lunghezza di aderenza .....	120
4.3.4	Posizione della zona aderente.....	121
4.3.5	Rigidezza del rinforzo .....	122
4.4	Campagna sperimentale .....	122
4.4.1	Materiali .....	123
4.4.1.1	Primo sistema BFRG: Basalt Fiber Reinforced Grout .....	126
4.4.1.2	Secondo sistema BFRP: Basalt Fiber Reinforced Polymers ..	128
4.5	Test di aderenza tangenziale: prove di strappo a taglio DSS .....	130
4.5.1	Preparazione dei provini.....	130

4.5.2	Esecuzione della prova.....	135
4.5.3	Risultati .....	136
4.5.3.1	Risultati DSS del sistema BFRP .....	137
4.5.3.2	Risultati DSS del sistema BFRG.....	141
4.6	Test di aderenza normale: Pull-off test .....	148
4.6.1	Preparazione dei provini.....	149
4.6.2	Esecuzione della prova.....	151
4.6.3	Risultati .....	153
4.6.3.1	Risultati Pull-Off del sistema BFRP .....	154
4.6.3.2	Risultati Pull-Off del sistema BFRG.....	159
4.7	Confronto risultati .....	161
5	Conclusioni.....	163
5.1	Introduzione .....	163
5.2	Le fibre di basalto e il loro futuro .....	163
5.3	Applicazione di materiali compositi su supporti in muratura .....	165
6	Bibliografia.....	166



# INTRODUZIONE

L'attività sperimentale effettuata nel corso di questo lavoro di tesi si inserisce all'interno di un progetto di ricerca nazionale P.O.N., Programma Operativo Nazionale, sviluppato in collaborazione con il centro di ricerca Cetma di Brindisi. Il progetto, denominato P.R.O.V.A.C.I., "Tecnologie per la PROtezione sismica e la VALorizzazione di Complessi di Interesse culturale", ha come scopo principale lo studio di tecniche sostenibili e valide metodologie per la protezione sismica, la valorizzazione e la fruizione delle strutture in muratura e dei siti archeologici appartenenti al patrimonio culturale.

Oggi, infatti, in Italia, le tematiche connesse alla conservazione, al consolidamento e alla mitigazione della vulnerabilità sismica del patrimonio edilizio storico-monumentale sono oggetto di grande interesse presso la comunità scientifica.

A tal proposito, una delle linee di ricerca del Progetto riguarda lo studio di tecniche di miglioramento delle performance strutturali attraverso lo sviluppo di sistemi di rinforzo basati su materiali innovativi, che siano chimicamente, fisicamente e meccanicamente compatibili con le strutture esistenti, oltre che conformi con i criteri guida quali reversibilità, durabilità, basso impatto sulla configurazione geometrica e strutturale esistente.

In questo contesto si inserisce l'argomento sviluppato nel corso della tesi: materiali compositi fibrorinforzati a base di fibre continue di basalto, ossia fibre minerali ottenute dalla fusione e successiva filatura di rocce vulcaniche.

Negli ultimi anni, infatti, crescente è stato l'interesse nei confronti di queste fibre in quanto si è visto che sono in grado di fornire buone prestazioni meccaniche, sia in termini di rigidità che in termini di resistenza, esibiscono un buon comportamento nei confronti delle alte temperature, sono ottimi isolanti termici e acustici, e hanno un'elevata stabilità termica, resistenza alle vibrazioni e durabilità. Infine, mostrano un buon comportamento in ambiente acido e soprattutto basico e per questo sono idonee per applicazioni con il calcestruzzo.

Le fibre di basalto offrono, quindi, una valida alternativa a fibre più diffuse come quelle di vetro e carbonio, e per questo si è scelto di valutarne l'efficacia in sistemi compositi destinati al rinforzo di supporti in muratura.

Oltre agli ormai noti FRP, Fiber Reinforced Polymers, sono stati analizzati i più recenti FRG, Fiber Reinforced Grout, ossia sistemi compositi con fibre immerse in matrice inorganica. Sebbene, infatti, l'uso di interventi con sistemi FRP ormai sia consolidato, questi presentano ancora importanti limiti, legati soprattutto alle prestazioni delle resine epossidiche.

Queste resine, infatti, presentano un degrado delle performance già a partire dai 30° e hanno una resistenza al fuoco praticamente nulla che le porta, non solo a bruciare, ma anche ad emettere fumi tossici. Inoltre, non polimerizzano in ambienti umidi e non sono permeabili al vapore e presentano il problema che, se applicati a supporti in muratura, esibiscono quasi sempre un comportamento fragile al raggiungimento del carico di rottura a causa della grande differenza di rigidità. Infine, il rinforzo presenta il problema dell'irreversibilità dell'intervento in quanto l'adesione delle resine organiche, che impregnano in profondità il supporto, rende impossibile la rimozione completa della matrice dalla struttura.

La sostituzione della matrice organica con una matrice inorganica porterebbe al superamento di molte di queste problematiche: l'applicabilità su supporti umidi, la resistenza al fuoco, l'atossicità, la permeabilità al vapore e anche la reversibilità del sistema sono solo alcuni esempi dei vantaggi correlati all'uso di questa matrice.

Altro aspetto importante, è che attraverso la combinazione di fibre di basalto, ossia fibre naturali, e matrici inorganiche, si sviluppa un sistema di rinforzo ecosostenibile. Oggi, infatti, l'attenzione nei confronti delle questioni ambientali sta portando la comunità scientifica ad indagare sistemi che abbiano un basso impatto ambientale e che non necessitino trattamenti particolari per lo smaltimento.

L'efficacia delle tecniche e delle metodologie sviluppate nel corso della tesi è stata validata tramite test sperimentali. Sono state eseguite prove di trazione per la valutazione della resistenza ultima e del modulo di provini realizzati con tessuti unidirezionali di basalto impregnati con differenti tipologie di matrici.

Inoltre, sono state condotte delle prove volte alla definizione delle caratteristiche di aderenza con due diverse tipologie di pietra naturale. Il problema dell'aderenza con il

supporto è, infatti, una delle questione più complesse e delicate in quanto da essa dipende l'effettiva efficacia del rinforzo.

Tutti questi argomenti sono stati affrontati in quattro capitoli, organizzati nel seguente modo.

Nel primo capitolo sono state sintetizzate alcune delle nozioni fondamentali sulle strutture in murature. Questo capitolo si è rivelato necessario per comprendere tutti quegli aspetti che sono alla base della progettazione di un intervento di recupero. Quando si ha a che fare con una struttura in muratura da sottoporre a rinforzo, le fasi più complesse sono proprio quelle che precedono la mera progettazione. La definizione dello stato dei materiali e dei principi costruttivi di una struttura, così come la chiara individuazione delle cause che hanno provocato il dissesto e delle varie soluzioni che si possono adottare, sono degli aspetti da non trascurare da cui dipende la bontà del futuro intervento.

Nel secondo capitolo, invece, sono state fornite le definizioni e i concetti basilari legati al campo dei materiali compositi. In questo capitolo sono state fornite le conoscenze imprescindibili che un ricercatore, che si accinge a programmare e a svolgere una campagna sperimentale sui materiali compositi, deve possedere. Fondamentale è, infatti, la conoscenza dei diversi prodotti e delle loro diverse caratteristiche, per una migliore comprensione delle proprietà e modalità di impiego degli stessi.

Il terzo capitolo è dedicato essenzialmente allo studio dei materiali compositi con fibre di basalto. In una prima parte viene riportata una sintesi delle conoscenze e dei risultati acquisiti in seguito ad un'accurata attività di ricerca letteraria volta alla definizione dello stato dell'arte in merito alle caratteristiche e prestazioni delle fibre continue di basalto. Essendo quella delle fibre di basalto una tecnologia abbastanza recente, emerge la necessità di definire meglio alcuni aspetti e che quindi la ricerca sul basalto deve compiere ancora passi importanti.

Nella seconda parte del capitolo vengono riportati i risultati della campagna sperimentale volta alla valutazione delle caratteristiche meccaniche dei compositi realizzati con fibre di basalto. In particolare, sono stati analizzati e messi a confronto sistemi in cui le fibre sono state accoppiate a matrici epossidiche e sistemi con matrici inorganiche polimeromodificate.

Infine, nel capitolo quattro è stato affrontato l'importante studio dell'aderenza di suddetti sistemi con supporti in muratura. Dopo una breve introduzione al problema dell'aderenza, vengono riportati i risultati ottenuti da prove di DSS, Direct Shear Strength Test, e Pull-Off, ossia, rispettivamente, prove per la valutazione dell'aderenza tangenziale e normale rinforzo-supporto.

Sono stati sperimentati due diversi sistemi di rinforzo: il primo BFRP, Basalt Fiber Reinforced Polymers, è un tessuto unidirezionale di basalto associato ad una matrice epossidica, e il secondo BFRG, Basalt Fiber Reinforced Grout, è una griglia in fibre di basalto accoppiata ad una malta di calce. Tutti i materiali testati in questa fase sono stati forniti da Fidia, un'azienda che da anni si occupa di sistemi fibrorinforzati.

Le prove sono state condotte su dei blocchi di pietra naturale di carparo e tufo, due pietre largamente diffuse nell'architettura della regione Puglia, entrambe molto porose e dalle caratteristiche meccaniche non elevate.

I test condotti hanno portato ovviamente a risultati molto diversi, data la sostanziale differenza dei materiali utilizzati. In generale, comunque, probabilmente in virtù dell'elevata porosità di entrambe le pietre, l'aderenza sviluppata con i supporti è stata buona e in condizioni di crisi la rottura è avvenuta sempre per motivi diversi dalla delaminazione supporto-rinforzo.

In ultimo, un capitolo conclusivo in cui vengono riportate le riflessioni scaturite dall'attività svolta e alcuni propositi per future campagne di ricerca.

# **1 LA MURATURA**

## **1.1 Introduzione**

La muratura è il materiale maggiormente impiegato nelle costruzioni del passato, ma si propone per impieghi strutturali anche nel presente e nel futuro essendo le sue qualità sempre più affidabili in relazione all'evoluzione tecnologica, sempre meglio supportata dallo sviluppo delle normative.

La conoscenza delle caratteristiche costruttive e meccaniche delle costruzioni in muratura, non è solo, però, presupposto essenziale alla progettazione di nuovi edifici, ma costituisce bagaglio imprescindibile per chi debba intervenire sul patrimonio edilizio esistente con interventi di manutenzione, consolidamento, miglioramento o adeguamento.

Vengono di seguito presentati e descritti alcuni aspetti essenziali della costruzioni in muratura, sia in termini di materiali che di tecniche progettuali e costruttive.

Parte del capitolo sarà, poi, dedicata all'analisi delle principali cause di dissesto che interessano le costruzioni in muratura, requisito di conoscenza fondamentale al fine di poter poi individuare soluzioni di intervento idonee ed efficaci.

Quest'ultime verranno, infine, brevemente illustrate negli ultimi paragrafi con lo scopo di fornire un'idea del vasto panorama di tecniche di intervento edilizio oggi a disposizione di ingegnere.

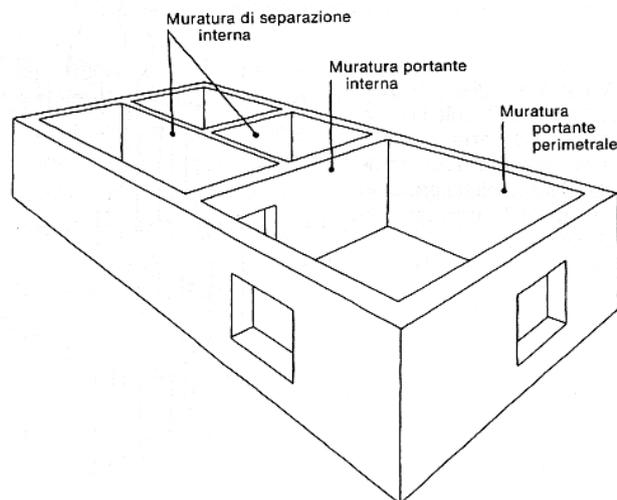
## **1.2 Definizione e classificazione delle murature**

In architettura ed in edilizia la muratura è la tecnica per costruire una parete in pietre naturali o artificiali, i mattoni. Questi elementi, generalmente di forma parallelepipedica, vengono accostati gli uni agli altri e uniti da leganti di varia natura al fine di comporre elementi di geometria predefinita (esistono anche esempi di murature di pietrame a secco).

La muratura viene utilizzata per fini o prestazioni molto varie ed assolve spesso numerose funzioni; di volta in volta può possedere una funzione prevalente ed in questo caso viene correttamente dimensionata con le caratteristiche necessarie ed eseguita con gli elementi dalle forme e prestazioni più idonei.

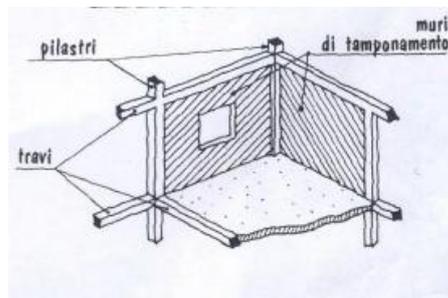
A questo proposito, una prima classificazione della muratura può essere effettuata in base alla funzione svolta dall'elemento architettonico che si intende ottenere:

- Muratura portante: assolve il compito primario di “elemento portante dell'edificio”;



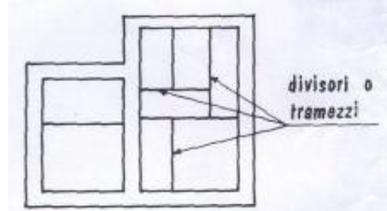
**Figura 1 Muratura portante**

- Muratura di tamponamento: generalmente utilizzata quale separazione tra l'ambiente abitato e l'esterno di edifici concepiti a struttura portante intelaiata (in cemento armato o acciaio);



**Figura 2 Muratura di tamponamento**

- Muratura di suddivisione o parete divisoria: assolve il compito di suddividere spazi interni delimitando i singoli ambienti;



**Figura 3 Pareti divisorie**

Altre classificazioni possono essere effettuate a seconda della loro posizione, dei materiali impiegati o della tecnica di esecuzione.

In base ai materiali costituenti si hanno:

- muri di pietra da taglio;
- muri di pietrame in conci irregolari;
- muri di blocchi di tufo;
- muri di laterizi;
- muri misti di pietrame, di calcestruzzo e laterizi;
- muri di calcestruzzo semplice o armato;
- muri di elementi vari prefabbricati.

In base alla posizione, i muri si possono distinguere in:

- muri in fondazione, quelli posti sotto il piano di campagna;
- muri in elevazione, quelli al di fuori del piano di campagna.

In base alla tecnica di esecuzione si possono avere:

- muri a secco, quando non vengono impiegate malte per cementare i vari elementi;
- muri con malte (muri propriamente detti);
- muri di getto, realizzati con conglomerati vari entro cavità del terreno o con casseforme.

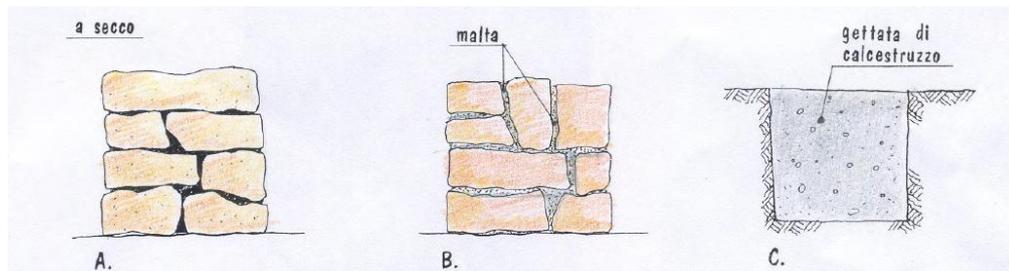


Figura 4 A. Muro a secco, B. muro con malta, C. muro di getto

## 1.3 Tecnologia dei vari tipi di murature

### 1.3.1 Murature in pietrame a secco

Sono fra le strutture più antiche create dall'uomo, attualmente sono utilizzate soprattutto per delimitare i terreni agricoli o per recinzioni e vengono usate nelle zone dove si trova pietrame in abbondanza, come ad esempio in Puglia, Liguria o Sardegna (Figura 5).

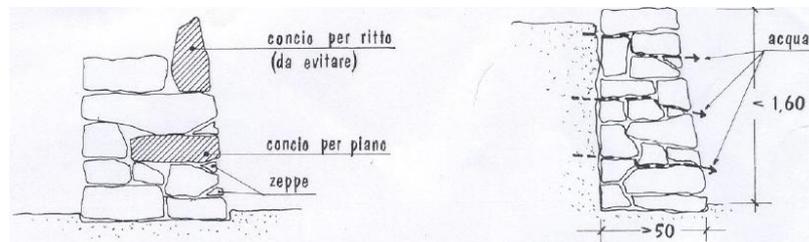


Figura 5 Tecnica di esecuzione delle murature a secco con pietrame.

Esempi di edifici costruiti con questa tecnica sono i trulli e le pajare pugliesi o le nuraghe sarde (Figura 6).



Figura 6 Nuraghe di Losa Abbasanta (Cagliari).

### 1.3.2 Murature in pietra

Le murature di pietra, molto usate in passato quando i costi della manodopera erano irrilevanti, si possono raggruppare nelle tipologie seguenti:

- murature di pietra squadrata: di grandissima resistenza utilizzate soprattutto dall'antichità classica fino ad i primi del 900, erano formate da conci disposti uno accanto all'altro, collegati con zanche o perni metallici (Figura 7);

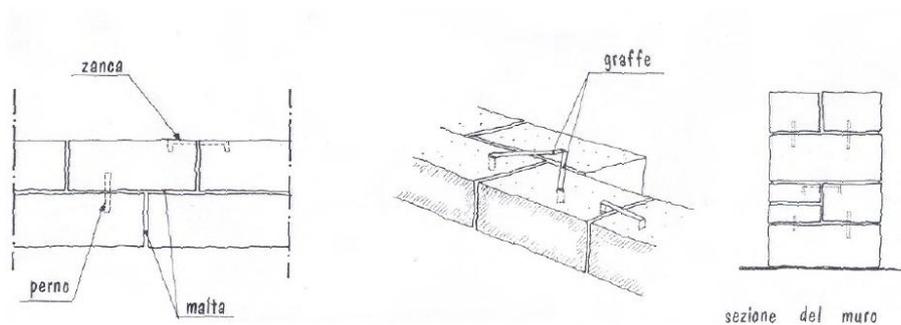


Figura 7 Tecnica esecutiva della muratura in pietra squadrata.

- murature con paramento di pietra squadrata: esteriormente nell'aspetto molto simili alle murature di pietra squadrata, ma con l'impiego dei conci squadrati limitato solo alla parte esterna visibile, mentre la parte interna era realizzata con materiali meno pregiati (pietrame grossolanamente squadrato, mattoni o calcestruzzo) (Figura 8).

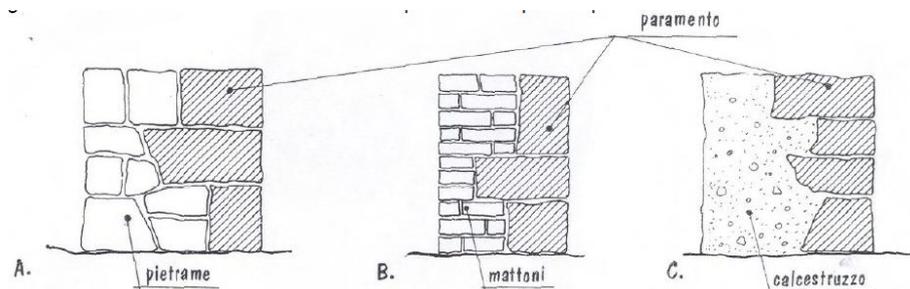
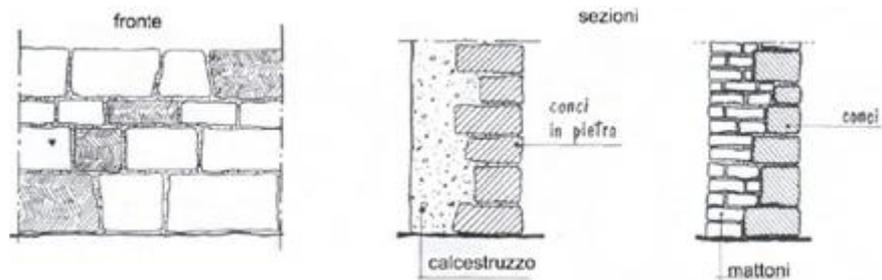


Figura 8 Tecnica esecutiva della muratura con paramento di pietra squadrata

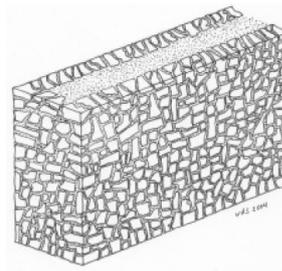
- muratura di pietrame a faccia vista: utilizzata nelle zone di produzione di buon pietrame può essere eseguita sia a:
  - o *corsi regolari o filaretto*: si può realizzare con facilità con conci calcarei di forma quasi regolare e di altezza uniforme, lo spessore

minimo della muratura è di 40 cm) sia a paramento, disponendo le pietre nella parte a vista, con ossatura interna di mattoni pieni o di calcestruzzo (Figura 9);



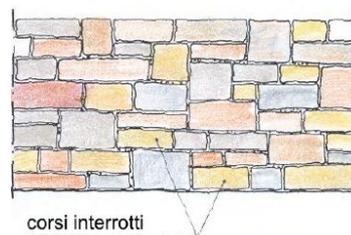
**Figura 9 Muratura a corsi regolari o filaretto.**

- *Ad opus incertum*: possono essere impiegati scapoli di pietra anche irregolari fatti combaciare ad arte con colpi di scalpello (Figura 10);



**Figura 10 Muratura a opus incertum**

- *A corsi interrotti*: la muratura è in tutto simile a quella a corsi regolari, ma ogni tanto conci di pietra più grandi o disposti per ritto interrompono il ritmo dei corsi, con un notevole effetto estetico (Figura 11);



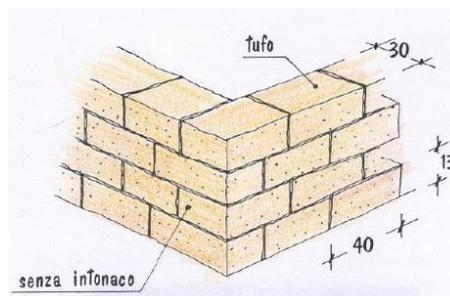
**Figura 11 Muratura a corsi interrotti**

- *Ciclopica*: si impiegano conci molto grandi di forma irregolare e i grossi vuoti sono chiusi da scaglie e scapole di pietrame (Figura 12).



**Figura 12 Mura ciclopiche**

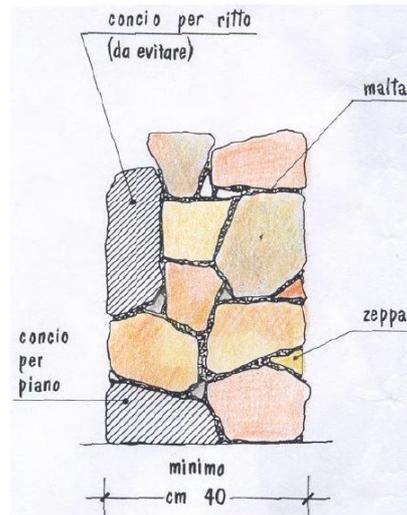
- muratura con blocchi di tufo. Pratiche ed economiche, si prestano abbastanza bene per piccoli edifici (al massimo 3 piani), oppure per gli ultimi due piani di edifici più alti o per sopraelevazioni. I blocchi hanno dimensioni commerciali di circa cm 30x40x13 e permettono, quindi, murature di 30-40 cm o loro multipli e possono essere combinati con il mattone in laterizio. All'aria induriscono perdendo l'acqua di cava, e quindi è sconsigliabile ricoprirli subito di intonaco.



**Figura 13 Muratura con blocchi di tufo**

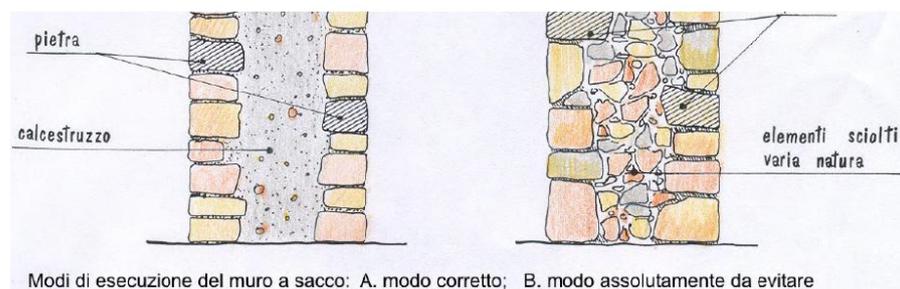
- murature ordinarie di pietrame. Sono quelle eseguite con scapoli irregolari o scheggioni di pietra, senza particolare cura dal punto di vista estetico e destinate ad essere intonacate sui due lati. Di spessore non inferiore ai 40 cm., per non perdere la resistenza, esse si realizzano con conci di pietra posizionati per piano evitando il posizionamento per ritto. Si deve aver cura di ridurre al minimo degli spazi vuoti fra concio e concio, e quando presenti, i grossi vuoti debbono essere riempiti di scaglie di pietra (zeppe) in modo che la tessitura del muro sia ben serrata. I conci opportunamente ripuliti da

terra e polvere, ben bagnati devono essere allettati su malta (idraulica o idraulico-cementizia).



**Figura 14 Muratura ordinaria di pietrame**

Sono da considerarsi difetti della muratura l'impiego di tipi diversi di pietrame (quelli poco resistenti devono essere scartati) o di pezzi di mattoni l'esecuzione a piramide del muro (invece che a ricorsi paralleli e orizzontali) e l'esecuzione del muro a sacco. Quest'ultima pratica risulta estremamente pericolosa per la stabilità del muro nel caso lo stesso venga mal eseguito mediante riempimento della parte centrale con avanzi e residui di lavorazione piuttosto che con malta o calcestruzzo. La muratura a sacco può essere una tecnica ammissibile solo per spessori superiori o uguali a 80-100 cm.



**Figura 15 Muratura a sacco**

- muratura ordinaria mista di pietrame e mattoni. In questo tipo di muratura i mattoni possono essere impiegati per chiudere i vuoti fra gli elementi di pietra o di aggiustaggio dei piani della muratura o per la costruzione dei ricorsi orizzontali, da interporre alla muratura di pietrame.

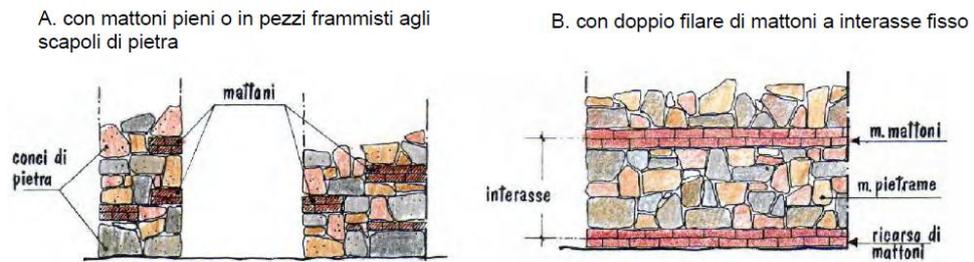


Figura 16 Muratura mista di pietrame e mattoni

- muri e pareti di calcestruzzo. Questa tecnica costruttiva, economica e versatile, si basa sull'uso del conglomerato cementizio, che può essere utilizzato oltre che per pilastri e travi anche per muri, sia portanti che divisorii o di tamponamento. Nella realizzazione dei muri bisogna tener presenti le particolari caratteristiche del materiale e principalmente: la notevole dilatazione, il ritiro e la permeabilità. Il calcestruzzo è ottimo e soprattutto economico per i muri di sostegno, di grandi spessori, potendosi gettare con casseforme modulari recuperabili in lamiera di acciaio e per le murature in fondazione. Nell'uso del calcestruzzo è sempre opportuna la posa in opera di una armatura di ferri di piccolo diametro. Più difficile risulta realizzazioni di pareti sottili a faccia vista, le quali sono più soggette a fessurazioni dovute al ritiro e alla dilatazione, e necessitano quindi di una adeguata armatura (tipo rete elettrosaldata).

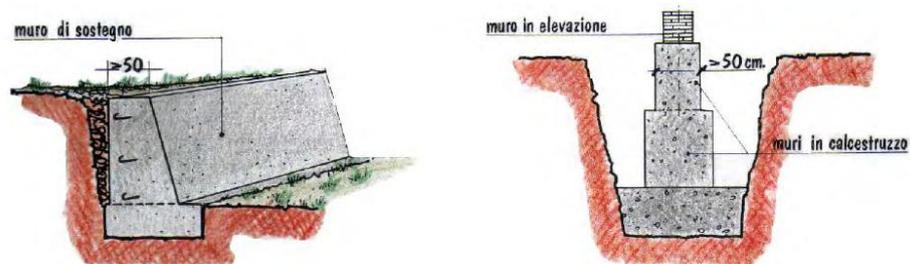


Figura 17 Impiego del calcestruzzo per muri di sostegno e murature di fondazione

- murature di blocchi di laterizio e di calcestruzzi leggeri. Sono murature adatte a tamponamenti o divisori interni, in quanto leggere, coibenti ma poco resistenti dal punto di vista statico. Tuttavia con blocchi di spessore di almeno 25 cm vengono eseguiti muri portanti di piccoli edifici (2 piani) o di sopraelevazioni.



Figura 18 Elementi da costruzione in calcestruzzo di argilla espansa (Lecablocco)

Per le murature con blocchi di laterizio (foratoni) gli angoli e gli stipiti di porte e finestre sono realizzati con mattoni pieni, mentre nel caso di blocchi di cemento, si possono usare indistintamente mattoni o parti dei blocchi stessi. Gli spessori variano da 15 cm per i tramezzi a 30 cm per muri portanti di edifici industriali ed abitazioni

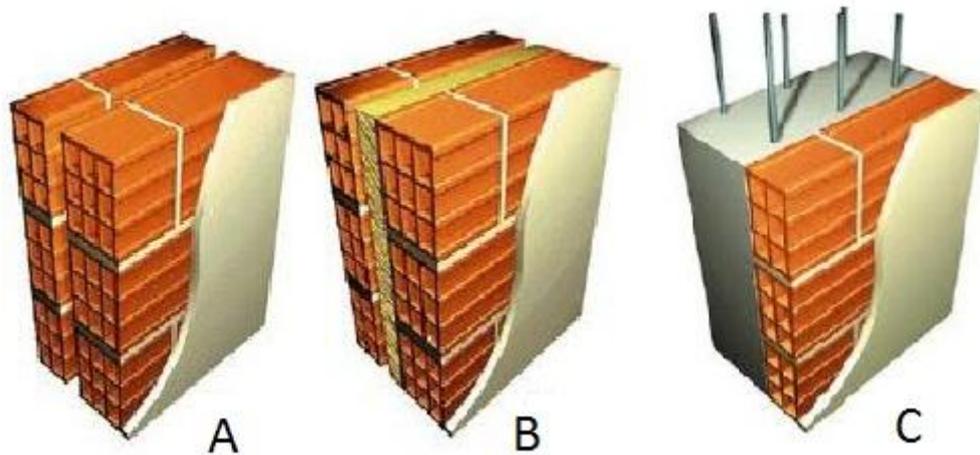


Figura 19 A. Controparete in elementi forati per murature portanti o setti in c.a.; B-C. Pareti doppie per tamponamenti esterni con il tavolato interno in elementi forati.

### 1.3.3 Murature di mattoni in laterizio

Questo tipo di murature possono essere impiegate nei cantieri edili dall'inizio dei lavori fino alla loro ultimazione passando per tutte le fasi costruttive. I mattoni in

laterizio possono essere quindi utilizzati per le fondamenta, muri portanti, tramezzi, muretti di recinzione e per sistemazioni esterne.

Ciò in considerazione:

- dell'estrema versatilità del mattone, che permette di risolvere problemi strutturali sia semplici che complessi;
- dell'ottima resistenza statica;
- della buona coibenza termica e acustica;
- dei notevolissimi pregi estetici;
- dei costi abbastanza contenuti, dovuti anche alla facilità di trasporto e messa in opera.

In base al tipo di apparecchiature, le murature possono essere distinte secondo diversi tipi:

- murature monostrato, quando (ad esempio nel caso di blocchi di grandi dimensioni) lo spessore del muro coincide con lo spessore dell'elemento impiegato;
- murature a doppio strato o pluristrato quando lo spessore della parete è ottenuto mediante due o più strati in laterizio, contigui o distanziati fra loro;
- murature miste quando gli strati sono fra loro compenetrati in modo da formare una struttura sufficientemente collegata.

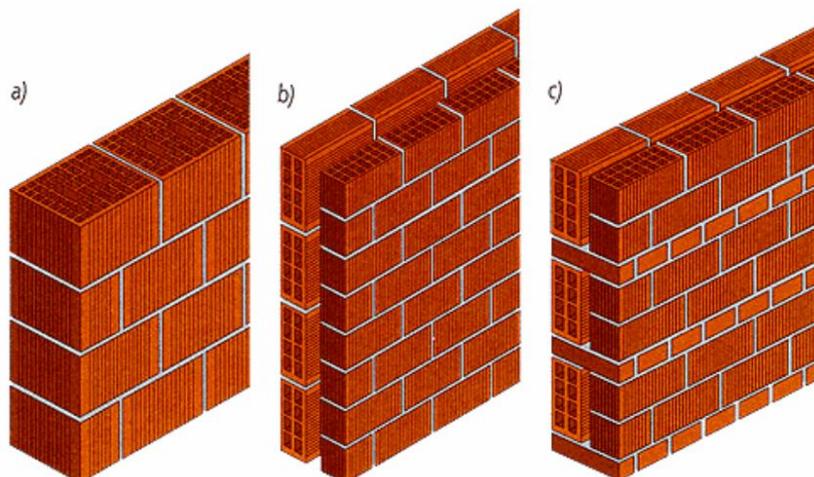


Figura 20 Esempio di murature: a) monostrato, b) doppio strato, c) mista

## 1.4 Malte

Le malte sono miscele costituite da un legante unito a sabbia e acqua: l'impasto fresco è plasmabile per un periodo più o meno lungo e indurisce in tempi variabili in funzione del legante impiegato.

La sabbia ha lo scopo di impedire un ritiro troppo marcato, che può provocare screpolature, dannose soprattutto negli intonaci; da sempre è inoltre un mezzo per aumentare il volume dell'impasto senza sminuirne le proprietà meccaniche: essa permette perciò il riempimento di giunti e cavità in modo economico ed efficace. La sabbia per malte adibite a muratura portante è a granulometria media (diametro sotto il millimetro). In passato, con presenza di giunti spessi e irregolari, vennero di norma impiegate sabbie più grossolane, con piccoli ciottoli di dimensioni di qualche millimetro. Per gli intonaci si usano invece sabbie fini (diametro variabile tra 0,2 e 0,5 millimetri).

I leganti, per reazione chimica con l'acqua d'impasto, permettono di saldare le particelle di sabbia tra loro e far aderire la malta ai componenti solidi della muratura. Le norme italiane citano il cemento, la calce aerea e la calce idraulica; ma non vanno dimenticati il gesso e i leganti additivati.

L'aggiunta di additivi alle malte tradizionali corregge le proprietà: i prodotti che si ottengono accentuano determinate caratteristiche che risultano preminenti per un certo uso (per esempio la velocità del tempo di presa, la lavorabilità, la resistenza alle basse temperature ecc.).

La correzione può essere più marcata: si passa in tal modo alle malte speciali, la cui composizione è esattamente determinata per raggiungere uno scopo prefissato; spesso il loro componente base è il cemento, coadiuvato da inerti, selezionati sia nella granulometria sia dal punto di vista mineralogico, e da additivi.

Un modo sempre più frequente di proporre le malte sia di uso tradizionale sia nuove è quello di fornirle premiscelate: si tratta in genere di prodotti secchi da aggiungere con quantità d'acqua prestabilite. Il prodotto che si ottiene raggiunge in genere ottime prestazioni, a motivo dell'accurata preparazione in stabilimento della miscela. Se la malta è fornita umida dal produttore industriale, come le malte stabilizzate, si dice "malta pronta all'uso".

La malta per muratura portante deve garantire prestazioni adeguate al suo impiego in termini di durabilità e di prestazioni meccaniche e deve essere conforme alla norma armonizzata UNI EN 998- 2 e, secondo quanto specificato al punto A del § 11.1, recare la Marcatura CE, secondo il sistema di attestazione della conformità.

Le prestazioni meccaniche di una malta sono definite mediante la sua resistenza media a compressione  $f_m$ . La categoria di una malta è definita da una sigla costituita dalla lettera M seguita da un numero che indica la resistenza  $f_m$  espressa in N/mm<sup>2</sup> secondo la tabella 1. Per l'impiego in muratura portante non è ammesso l'impiego di malte con resistenza  $f_m < 2,5$  N/mm<sup>2</sup>.

Classe	M 2,5	M 5	M 10	M 15	M 20	M d
Resistenza a compressione N/mm <sup>2</sup>	2,5	5	10	15	20	d
d è una resistenza a compressione maggiore di 25 N/mm <sup>2</sup> dichiarata dal produttore						

**Tabella 1 Classi di malte a prestazione garantita**

Le modalità per la determinazione della resistenza a compressione delle malte sono riportate nella norma UNI EN 1015-11: 2007.

## 1.5 Cause dei dissesti

L'organizzazione della vasta fenomenologia dei dissesti che interessano le strutture in muratura può essere condotta facendo riferimento alle cause elementari che li hanno determinati, pur tenendo presente che, in realtà, il problema non si manifesta come semplice rapporto causa-effetto, ma appare quasi sempre il risultato di un insieme di fattori complessi e correlati.

Tale metodologia è giustificata dal fatto che effetti simili possono essere originati da fenomeni assai diversi, per cui una errata valutazione delle cause del dissesto può portare ad inadeguate indicazioni circa i provvedimenti da adottare per il ripristino.

In generale, la classificazione dei dissesti di natura meccanica, fisico-chimica e biologica, è riportata nella Tabella 2.

Limitando lo studio del degrado delle strutture in muratura agli aspetti meccanici, appare opportuno individuare anzitutto i “modelli primitivi” al fine di evidenziare il rapporto causa-effetto che presiede ai dissesti di tipo meccanico. Infatti, solo una attenta lettura dei meccanismi di collasso e un esame di tutte le possibili concause consentono di seguire l’evoluzione nel tempo dell’assetto statico di una struttura muraria attraverso le successive configurazioni di equilibrio originate dalla progressione delle lesioni e di risalire, in un’ultima analisi, ad una sicura interpretazione del comportamento d’insieme dell’organismo murario.

<b>Cause naturali non direttamente riconducibili all’uomo</b>	<b>Cause naturali direttamente riconducibili all’uomo</b>	<b>Fattori artificiali direttamente riconducibili all’uomo</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Terremoti</li> <li>- Piene di fiumi o laghi</li> <li>- Fenomeni geologici</li> <li>- Fattori climatici e atmosferici (gelo, neve, vento, umidità)</li> <li>- Fenomeni a carattere chimico (salinità)</li> <li>- Fenomeni a carattere biologico (funghi, alghe)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interventi che hanno alterato la configurazione geologica del terreno (abbassamento ed innalzamento delle falde per estrazione di acqua dai pozzi, formazione di bacini artificiali, frane dovute a disboscamento, prelievo di materiale dal sottosuolo dovuto alla costruzione di gallerie, pozzi e trincee)</li> <li>- Interventi che hanno alterato l’ambiente (inquinamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Carenze nella progettazione iniziale dell’edificio</li> <li>- Usi che hanno comportato variazioni delle condizioni iniziali di progetto</li> <li>- Impiego di materiali non idonei</li> <li>- Mancanza di adeguata manutenzione</li> <li>- Vibrazioni</li> <li>- Fenomeni eccezionali (urti, esplosioni, incendi)</li> </ul>

**Tabella 2 Classificazione delle principali cause di dissesto nelle murature**

### 1.5.1 Dissesti dovuti a schiacciamento

Le lesioni dei prismi murari sollecitati a compressione semplice presentano un andamento verticale dovuto allo stato tensionale triassiale cui sono soggetti gli elementi per effetto della dilatazione dei giunti di malta.

Il solido murario viene scisso nelle successive fessurazioni in elementi astiformi via via più snelli e perciò sempre più soggetti alla instabilità per carico di punta (Figura 21).

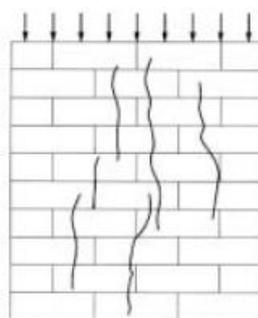


Figura 21 Fessure in elemento di muratura indotte da schiacciamento

Inoltre gli elementi iniziano a sfaldarsi in superficie e la muratura nel suo insieme tende ad appanciarsi nella parte mediana.

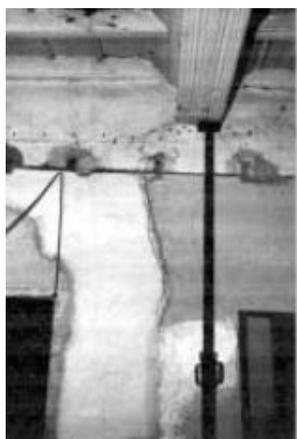
Nelle strutture murarie costituite da materiali informi il rigonfiamento si produce e cresce contemporaneamente allo schiacciamento, mentre nelle pareti composte con materiali squadrati o artificiali con spigoli vivi e regolari il fenomeno è indice di uno schiacciamento in fase avanzata.

Questo tipo di dissesto si innesca in genere quando:

- la sezione trasversale è insufficiente rispetto ai carichi,
- la capacità portante di una struttura si riduce nel tempo a causa del degrado di materiali costituenti;
- il carico aumenta in seguito a sopraelevazioni o a incremento dei sovraccarichi accidentali (per esempio, variazioni di destinazione dell'edificio);
- i cedimenti fondali o altri dissesti trasferiscono su alcune strutture il carico che competeva ad altre;
- le sezioni reagenti non sono omogenee.

Ai fini della configurazione del panorama fessurativo imputabile allo schiacciamento, occorre operare un'ulteriore distinzione fra carichi localizzati e carichi distribuiti.

Per quanto concerne i primi, l'analisi della distribuzione verticale e orizzontale delle deformazioni ha mostrato che esiste una concentrazione di tensioni, nelle vicinanze di tali carichi, che origina bulbi di pressione con valori massimi immediatamente al di sotto del punto di applicazione del carico.



**Figura 22** Effetto di carichi concentrati sulla muratura

Si hanno in genere lesioni inclinate a  $45^\circ$  nelle zone laterali dovute alle tensioni tangenziali che insorgono per effetto della diversità delle pressioni tra le zone periferiche del bulbo prossime al centro di sollecitazione. Nelle zone più lontane dal punto di applicazione del carico le lesioni progrediscono in modo parallelo.

Le lesioni di schiacciamento per carichi distribuiti si localizzano di frequente alla base di vecchi edifici le cui murature sono confezionate con malte scadenti o materiali degradati; anch'esse presentano una configurazione subverticale e si innescano nelle zone di minore resistenza a trazione.

### **1.5.2 Dissesti dovuti a instabilità**

Nelle vecchie murature dotate di forti spessori raramente si hanno manifestazioni di instabilità per snellezza degli elementi strutturali; frequenti sono,

invece, gli episodi di instabilità locale o innescata da cause esterne che alterano l'assetto statico dell'edificio.

Le situazioni ricorrenti che stanno a monte di questo tipo di dissesto sono la non corretta concezione strutturale del progetto iniziale e la disomogeneità nella tessitura delle murature.

Un esempio del primo caso è fornito dalle pareti portanti con molte aperture: queste interrompono la continuità della muratura isolando dei setti pieni che vengono ad assumere la funzione di colonne con relativo pericolo di instabilità quando non esiste una buona connessione con i solai.

Circa il secondo caso occorre tenere presente come, nei muri di pietrame, vengano spesso eseguiti con cura solo i paramenti esterni, mentre il nucleo interno viene riempito con pezzi informi, pietrisco e poca malta. A causa del fluage della malta il nucleo subisce un assestamento e il carico viene trasferito sui paramenti esterni provocando la rottura di questi per carico di punta.

Il dissesto si manifesta con fessure verticali sui paramenti e con il loro distacco dal nucleo; in particolare, per muri di medio spessore si ha lo smembramento in due o più tronchi paralleli, che possono subire un'inflexione concorde o discorde.

Nell'ambito dell'instabilità locale, tipico esempio è quello della muratura di facciata di un edificio a più piani con solai che per degrado non sono in grado di offrire alcun vincolo allo spostamento orizzontale della muratura: tale fenomeno risulta facilitato dal disassamento dei carichi e dalla eventuale disomogeneità della muratura stessa.

### **1.5.3 Dissesti dovuti a sforzo normale e a flessione**

La manifestazione si coglie nel tipico rigonfiamento della muratura in zona compressa: come tale, l'imbozzamento si evidenzia in una sola direzione.

Nel caso di avanzato dissesto insorgono anche in questo caso lesioni che provocano lo smembramento della compagine muraria in elementi indipendenti a sviluppo per lo più verticale, che giungono a collasso per instabilità e che si accompagnano, sovente, a distacchi ed espulsioni del materiale murario.

Da un punto di vista tecnologico le cause che predispongono una muratura vecchia alla pressoflessione sono:

- non omogeneità delle sezioni;
- impiego di malte scadenti;
- piani di posa dissimili e di varia inclinazione;
- difettoso collegamento trasversale degli inerti;
- invecchiamento dei materiali.

Tali cause dipendono essenzialmente dal degrado del materiale e dalla scarsa accuratezza del procedimento costruttivo.

A lato di esse, occorre considerare un insieme di fattori, di natura più propriamente meccanica, presenti normalmente già all'atto della concezione dell'opera (e pertanto, con conseguenze sulla struttura teoricamente prevedibili), ma che possono assumere rilevanza nell'accentuazione del dissesto, specie se i concomitanza con i fattori prima accennati.

#### **1.5.4 Dissesti dovuti al taglio**

Le sollecitazioni dovute al taglio possono agire su una parete in direzione parallela o perpendicolare al suo piano.

Nel caso in cui gli sforzi siano paralleli al piano delle facciate la sollecitazione predominante risulta il taglio; se gli sforzi sono perpendicolari, data la snellezza della parete, gioca un ruolo predominante la flessione.

Nel primo caso le principali cause di dissesto sono:

- cedimenti di fondazione;
- azioni sismiche;

caratteristici nelle vecchie murature (in genere l'azione del vento è tale da non produrre danni negli edifici antichi).

Per quanto riguarda i cedimenti di fondazione, sono casi eccezionali quelli in cui si verifica un cedimento uniforme, lento e di piccole dimensioni di un intero edificio, senza produrre alcuna lesione.

In genere, essendo il terreno non omogeneo e la pressione unitaria esercitata da diversi muri disuguale, il cedimento non è uniforme e avvengono movimenti reciproci tra le varie parti della costruzione, denunciati da inevitabili fessure.

I dissesti tipici indotti da tali cedimenti risultano:

- nei muri di piccolo spessore su fondazioni continue senza aperture lesioni a forma di parabola;
- nei muri di grande spessore la forma di parabola si altera talmente da rendersi irriconoscibile;
- negli edifici con molte aperture, un cedimento della parete centrale provoca lesioni localizzate nei maschi murari compresi tra una apertura e l'altra della stessa verticale più prossima al limite del cedimento.

Per quanto riguarda le azioni sismiche, per quanto la resistenza alle azioni orizzontali caratterizzi in misura preminente la resistenza degli edifici in muratura sottoposti a sisma, non è possibile studiare e interpretare il loro comportamento in modo soddisfacente, sulla base di quest'unico parametro, come può essere fatto, per esempio, per le strutture intelaiate in acciaio o in cemento armato.

La problematica del comportamento degli edifici in muratura sottoposti a forze dinamiche ha caratteri peculiari e richiede una trattazione specifica.

In questa ottica acquista importanza primaria l'effettivo comportamento d'insieme, il quale tiene conto anche dell'efficacia di elementi strutturalmente secondari in campo statico, ma significativi in campo dinamico (quali tramezzi, setti di canne fumarie, ecc.).

Tale comportamento d'insieme dipende certamente, in misura considerevole, dalla resistenza degli elementi principali, quelli che possono essere enucleati dal contesto individuati come maschi murari, rispetto alle azioni orizzontali.

Dipende anche dalla presenza, dalla disposizione in pianta, dalla resistenza e dal grado di vincolo di elementi ritenuti strutturalmente secondari, i quali tuttavia sono in grado di offrire significativi contributi di resistenza o di innescare prematuramente processi di sconnessione a rottura; in definitiva, il comportamento d'insieme risulta caratterizzato dal grado di vincolo interno delle strutture e dalla loro duttilità.

## **1.6 Tecniche di intervento nelle murature**

Scopo dei seguenti paragrafi è fornire una breve ma incisiva panoramica sulle tecniche di intervento tradizionali più efficaci.

Occorre premettere che nell'ampio panorama di tecniche di intervento edilizio si possono individuare diverse categorie: si può spaziare infatti dalle tecniche antiche utilizzate da secoli, a tecniche che, pur recenti, hanno ormai acquisito una loro "storia", per giungere a tecniche recentissime attualmente ancora in evoluzione e per le quali sono in corso sperimentazioni.

A livello metodologico, di fronte a questa eterogeneità e ricchezza di tecniche di intervento, può essere utile cercare di ordinare la materia secondo uno schema classificatorio, pur con tutti i limiti che possono derivare da una eccessiva schematizzazione.

Si presenta una classificazione delle tecnologie di intervento in base all'obiettivo che si prefiggono; in tal senso, si possono inquadrare in tre categorie, anche se non è raro riuscire con un unico prodotto a raggiungere più obiettivi.

### **1.6.1 Tecnologie per dare nuova consistenza alle strutture**

In edifici storici è facile imbattersi in murature verticali che sono sì di ampio spessore, ma che anche alla persona "non tecnica" mostrano dubbia capacità portante, in quanto la malta che lega i mattoni è dilavata oppure mancano addirittura porzioni di corsi. Non è poi raro imbattersi in murature che più che composte da mattoni appaiono sotto forma di un mix omogeneo (o a strati separati) di sassi, sabbia, cocci e ogni tanto di mattoni veri e propri.

Nei secoli passati, soprattutto per opere di minore importanza come edifici di civile abitazione, ma non solo, i maestri manovali impiegavano materiale tipico del luogo di costruzione che non richiedeva rilevanti trasporti, ampliando le dimensioni del muro per ottenere una buona capacità portante piuttosto che ricercando materiale di qualità. In tali condizioni di rilievo a poco serve una valutazione sulla carta della capacità portante, con verifica a semplice compressione ( $\sigma=N/A < \sigma_{amm}$ ), in quanto è lecito il dubbio su quale sia lo sforzo massimo ammissibile in detti casi. Il risultato numerico è sì un riferimento, ma va preso solo come tale e non come un valore assoluto.

In questi casi occorre avere piuttosto senso fisico, verificando che tutti gli elementi siano ben connessi tra di loro e che ogni forza sia opportunamente contrastata. Le ampie dimensioni dell'elemento portante aiutano gli addetti ai lavori, ma in fase di rilievo preventivo bisogna fare molta attenzione in quanto sono numerosi casi in cui ampie colonne murarie o ampi setti manifestano fessure da schiacciamento preannunciando una crisi.

Un'altra tipologia di muri che richiede particolari attenzioni sono i cosiddetti "muri a sacco": proprio per il discorso precedentemente citato, dove nei secoli passati vi era difficoltà a procurarsi nei cantieri materiali di buona qualità a basso costo, e quindi si realizzavano più volte setti portanti di ampio spessore con struttura a "sandwich": mattoni buoni sui due fianchi e nel mezzo un riempimento di "scarti di re" (cocci in generale) con un po' di malta legante.

E' evidente che da un punto di vista strutturale la parete così composta ha sì inerzia, ma una limitata resistenza (lo sforzo effettivo nella parte portante di mattoni è maggiore del rapporto tra forza di compressione e area della parete  $\sigma_{\text{effettivo}} > N/A$ ). Se l'obiettivo è dunque quello di ridare consistenza all'elemento murario si può intervenire attraverso diversi metodi.

### **1.6.1.1 Le iniezioni**

La tecnica di consolidamento delle iniezioni è appropriata, in generale, in presenza di lesioni diffuse e per murature in pietra, generalmente dotate di percentuali relativamente elevate di vuoti interni. È essenziale, infatti, che esista la "possibilità fisica" di far penetrare all'interno del corpo murario le miscele leganti che esercitano il loro ruolo di miglioramento delle prestazioni meccaniche del muro, sia eliminando in parte le cavità (fessure o vuoti), sia rafforzando i legami fra i vari componenti della muratura stessa.

È un metodo di consolidamento definito "passivo" perché non richiede l'esecuzione di operazioni tali da alterare l'equilibrio o l'aspetto esteriore della struttura. Per queste sue caratteristiche costituisce una tecnica di consolidamento estremamente diffusa negli edifici storici di particolare pregio artistico o architettonico, ove sia necessario mantenere la struttura e l'aspetto originario.

Le miscele sono costituite da acqua e leganti inorganici (calci, cementi) o da miscele organiche (resine). I leganti citati presentano un diverso grado di compatibilità con il supporto originario, soprattutto in relazione alla qualità delle malte esistenti, e conferiscono un diverso comportamento, in termini di rigidità e resistenza, alla muratura consolidata.

Nel caso di iniezioni di resine epossidiche, l'alto costo delle materie prime e la necessità di mano d'opera qualificata per la realizzazione degli interventi, limitano la possibilità di utilizzo di tale tecnica a situazioni che presentino caratteristiche particolari, quali:

- presenza di affreschi murali per i quali l'utilizzo di miscele ad acqua può risultare dannoso;
- valori dei carichi unitari prossimi alla rottura della muratura stessa;
- degradi diffuso del legante;
- presenza di ampie cavità all'interno delle zone da iniettare.



**Figura 23 Realizzazione di una iniezione**

È evidente che l'efficacia di un tale tipo di intervento dipende dalla possibilità della miscela iniettante di permeare e diffondersi sufficientemente all'interno della massa muraria in modo da raggiungere tutti gli interstizi presenti nel supporto. Il muro deve essere quindi sufficientemente iniettabile, ossia deve presentare una tessitura con sufficiente continuità tra i vuoti e, allo stesso modo, la miscela deve essere progettata in modo da garantire una sufficiente penetrabilità, ossia un'adeguata fluidità (né scarsa, né eccessiva) in relazione ai tempi di esecuzione richiesti.

L'intervento consiste nel far penetrare la miscela legante, in pressione o per colata, a seconda dello stato di degrado della muratura, nei vuoti presenti, in modo tale da ripristinarne o migliorarne le caratteristiche meccaniche.

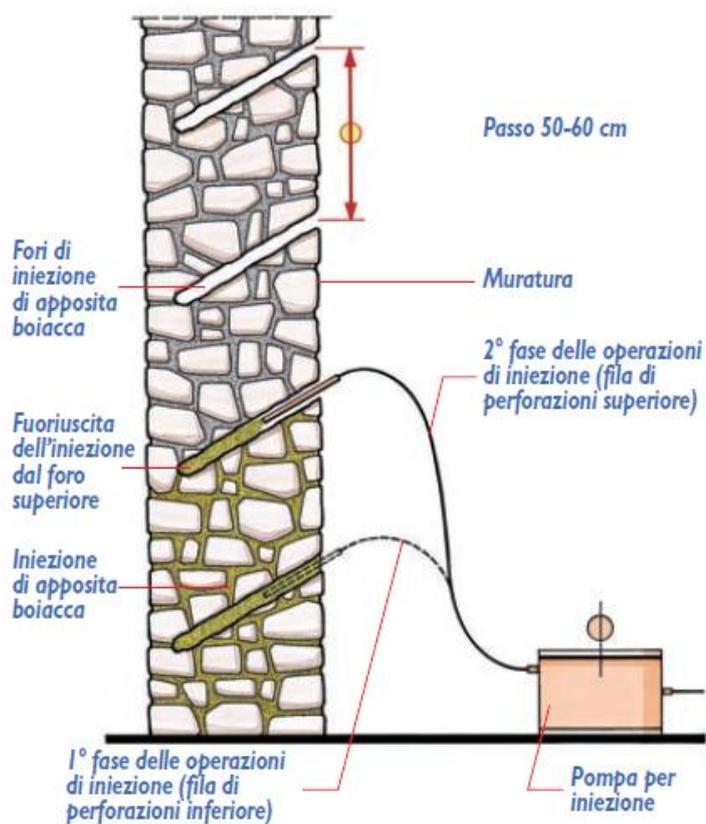


Figura 24 Consolidamento delle murature mediante iniezione

Al fine di saturare le cavità interne; dopo aver effettuato dei fori (diametro 20-40 mm, passo 50-60 cm) nella parete con attrezzi a perforazione (senza percussione, dunque), previa altresì pulizia con lavaggio ad acqua o ad aria per togliere polveri, si procede a iniettare nel muro la miscela. Le operazioni iniziano nella fila di perforazioni più bassa e procedono poi sino a che lentamente la stessa non incomincia a fuoriuscire dai fori della fila superiore. Quando ciò avviene la miscela ha saturato le cavità della parte bassa del setto o pilastro murario e, dopo aver sigillato i fori della fila inferiore si può ripetere l'operazione di iniezione nella fila superiore, osservando ciò che avviene in quella a questa successiva.

Lo schema di perforazione deve essere abbastanza fitto per garantire la sovrapposizione delle aree di iniezione. È bene distribuire i fori su vertici di triangoli

equilateri di lato uguale il doppio, riuscendo così ad interessare un'area maggiore, come schematizzato in Figura 25.

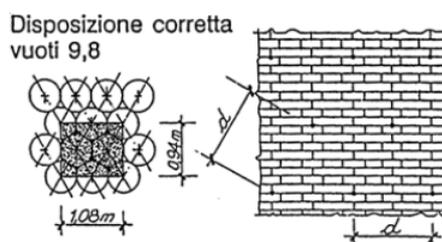


Figura 25 Schema di perforazione

Indipendentemente dal prodotto impiegato vi è il problema di garantire in maniera scientifica il risultato; in tal senso è consigliabile operare attraverso delle prove di indagine sonica da effettuare prima e dopo l'intervento, così da poter comparare i risultati (la velocità degli ultrasuoni emessi dagli strumenti dipende dalla densità del materiale incontrato, ragion per cui la percentuale di vuoti rimasti nella parete è facilmente determinabile con prove sonore). In alternativa, è possibile prelevare a campione dei carotaggi di parete da sottoporre a prove di compressione in laboratorio (anche se si evidenzia che per un discorso statistico si dovrebbe operare con carotaggi in più punti).

### 1.6.1.2 Intonaci armati

La tecnica di consolidamento mediante intonaci armati consiste nel realizzare in aderenza alla superficie muraria, delle lastre di materiale a base cementizia (malta, betoncino, gunita), armate con una rete metallica, e rese solidali ad essa da tiranti passanti in acciaio.

Ai fini dell'affidabilità della tecnica svolgono un ruolo fondamentale i connettori trasversali, la cui efficacia è pressoché nulla, con il tipo di muratura in esame, se essi non sono passanti ed ancorati nella stessa paretina armata, applicata su entrambe le facce della parete da rinforzare.

La tecnica consente di migliorare le caratteristiche di resistenza dell'apparato murario, grazie all'incremento di sezione resistente apportato dalle lastre e all'effetto di

confinamento esercitato sulla muratura degradata, e di aumentarne nel contempo la duttilità. Può risultare adatta a quelle murature in stato di degrado particolarmente avanzato e non in grado di sopportare eccessive manipolazioni; in presenza di quadri fessurativi complessi ed estesi, altre tecniche come le iniezioni o la sostruzione muraria possono infatti risultare inapplicabili.

L'applicazione delle paretine non prevede alterazioni allo stato di sollecitazione della struttura durante l'esecuzione, ma modifica in maniera sostanziale la rigidità delle pareti e quindi la loro risposta sismica. La tecnica rende per tale ragione molto problematico l'intervento localizzato se limitato solo ad alcune pareti, mentre si presta a rinforzare zone limitate di una parete particolarmente ammalorata, oppure le intersezioni verticali delle pareti non sufficientemente connesse.

Dal punto di vista esecutivo, il metodo prevede tecnologie e materiali di basso costo e facile reperibilità, e l'impiego di attrezzature generalmente adoperate per operazioni d'intonacatura. Ne derivano i vantaggi di economicità, rapidità di esecuzione e non necessità di manodopera specializzata.

Aspetti negativi legati agli effetti della tecnica sono:

- *alterazione dell'aspetto esteriore della muratura*: il metodo non risulta applicabile in edifici particolarmente interessanti dal punto di vista storico ed architettonico o con decorazioni parietali quali affreschi o stucchi;

- alterazione delle proprietà fisiche della parete, quali isolamento termico e traspirabilità;

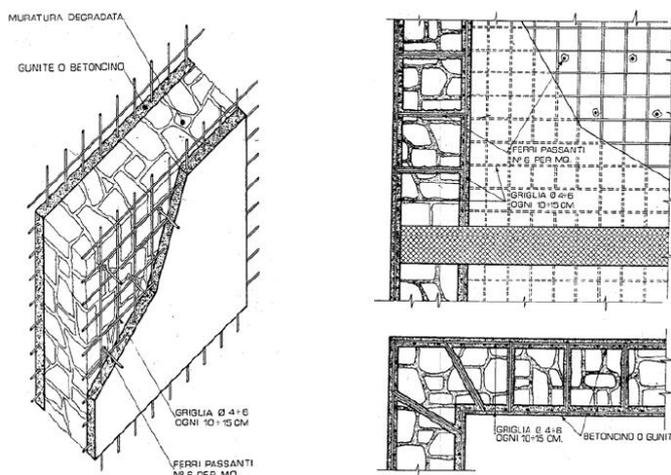
- *alterazione delle caratteristiche di deformabilità delle pareti*: l'intervento conferisce elevata rigidità alla parete, per cui un suo impiego non controllato può provocare scompensi localizzati e pericolose alterazioni al comportamento statico e dinamico dell'intero edificio;

- *notevole vulnerabilità nei confronti di agenti ambientali* derivante dalla possibilità di corrosione dei connettori trasversali;

Anche per questa tecnica mancano regole specifiche per la progettazione e l'esecuzione a base sperimentale; tuttavia, esso risulta molto praticato in virtù della sua economicità e facilità d'esecuzione, basandosi su criteri di dimensionamento empirici e generici.

Il controllo dell'efficacia della tecnica è molto spesso trascurato, in virtù della fiducia nella sua affidabilità.

Questo tipo di intervento può essere utilizzato per il rinforzo sia di murature in pietra che di mattoni. Per murature in pietra di qualità scadente è opportuno associare l'intervento citato alla tecnica delle iniezioni.



**Figura 26 Consolidamento di muratura mediante lastre sottili armate con rete elettrosaldata in acciaio e collegate da ferri passanti.**

### 1.6.1.3 Le iniezioni armate

La tecnica delle iniezioni armate consiste nel disporre armature all'interno della muratura, inserendole in fori successivamente cementati con miscele per iniezioni.

In base alla modalità di impiego, possono avere la funzione di “cucitura” tra elementi sconnessi (rinforzo localizzato delle zone d'angolo, ammassamento dei muri ortogonali, ricongiungimento di parti lesionate) oppure di rinforzo dell'intero elemento strutturale.

In presenza di murature di buona qualità, che non siano degradate, ma non presentino adeguate ammorsature tra le pareti ortogonali, è possibile infatti ripristinare il collegamento tra i diversi elementi strutturali per mezzo di un reticolo di fori armati e cementati. Viceversa, se estese ai componenti strutturali (pilastri o pareti), le iniezioni armate permettono di conferire alle murature esistenti una maggiore resistenza alle sollecitazioni (taglio, pressoflessione) conferendo caratteristiche simili a quelle della muratura armata.

Dal punto di vista strutturale, tale tecnica di consolidamento associa all'aumento di resistenza a compressione della muratura, prodotta dalla cementazione, un ampliamento del dominio di rottura nel campo delle trazioni, per effetto della presenza di armatura metallica.

La disposizione trasversale nello spessore del muro delle barre di armatura consente, inoltre, di contrastare l'espansione laterale degli elementi compressi.

La tecnica non comporta modifiche dal punto di vista estetico, per cui può collocarsi tra gli interventi possibili per opere di particolare pregio artistico.

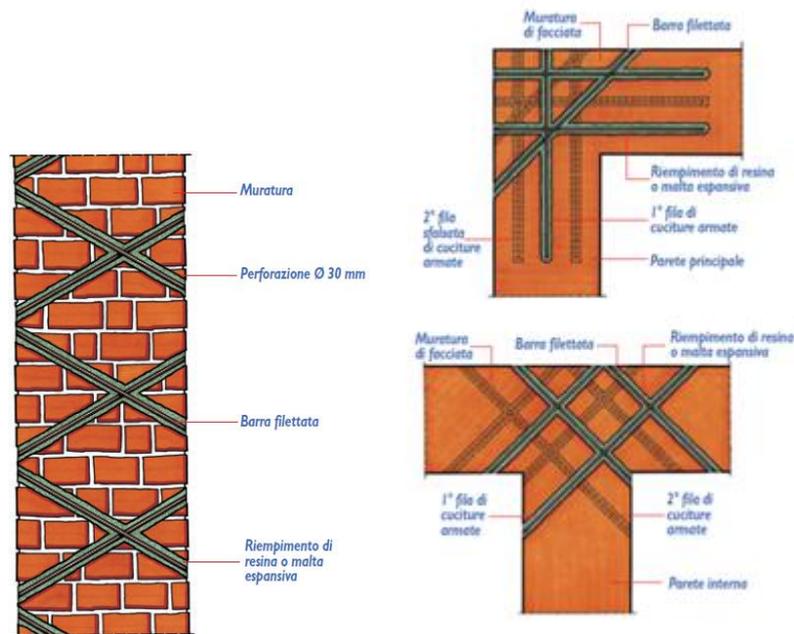


Figura 27 Schemi tipici di reticoli cementati: in corrispondenza di intersezioni murarie, per il ripristino di lesioni e per il rinforzo dell'intero elemento strutturale.

#### 1.6.1.4 Tecnica del “cuci e scuci”

Questo tipo di intervento è indicato per tutte quelle situazioni in cui il degrado della malta ha ridotto la capacità portante della muratura. L'obiettivo è il ripristino delle caratteristiche fisiche e meccaniche della muratura, nel rispetto dei materiali e delle tecniche originarie. La tecnica consente di ristabilire la continuità strutturale degli elementi murari attraverso la sostituzione graduale degli stessi, senza interrompere la funzione statica delle murature nel corso dell'operazione.

L'operazione di cuci e scuci consiste:

1. nel rimuovere a piccoli tratti, partendo dal basso, le parti di muratura degradate (cause di degrado localizzato), ovvero le zone di muratura ai bordi delle lesioni (caso di lesioni localizzate), ovvero le partite murarie con segni di schiacciamento (caso con schiacciamenti localizzati);
2. nel sostituire gradualmente le parti rimosse, partendo sempre dal basso, con nuova muratura. Si dovrà preliminarmente valutare se occorre o meno puntellare lamuratura prima di cominciare la demolizione: nei primi due casi indicati la decisione di puntellare dipenderà essenzialmente dalle dimensioni dell'intervento, oltre che dallo stato generale della fabbrica; nel terzo caso (incipiente schiacciamento) la puntellatura è sempre necessaria, perché le operazioni di rimozione, anche se condotte a mano senza attrezzi traumatizzanti, possono peggiorare una situazione già compromessa.

Salvo rari casi, nei quali la muratura deve essere sostituita con conci della stessa natura di quelli rimossi (per esempio negli edifici monumentali con muratura di pietra in vista), in generale la muratura in sostituzione si realizza con mattoni pieni di buona qualità, legati da malta cementizia. I mattoni si preferiscono non solo per le dimensioni di facile maneggio, ma anche perché si possono ammorsare nella muratura esistente.

La malta cementizia è preferita sia perché lega bene con i mattoni, sia perché ha una presa piuttosto rapida.

Nel caso di muri molto spessi con lesioni passanti, le operazioni di cuci e scuci si possono attuare da entrambe le facce operando da ciascun lato su metà spessore del muro ridotto la capacità portante della muratura. Forzando l'operazione, così da riempire per bene ogni vuoto.

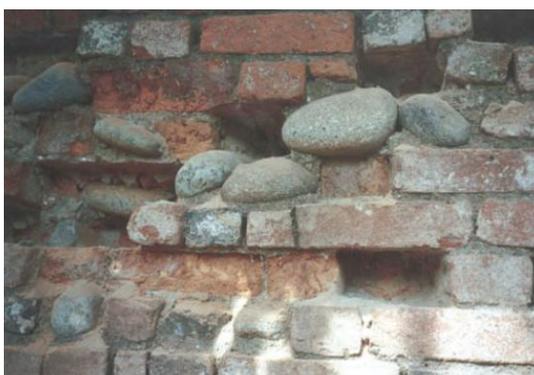


Figura 28 Esempio di muratura mista, mattoni, pietre, ciottoli

### **1.6.2 Tecnologie che aumentano la capacità portante dell'esistente murario**

Premesso che alcune delle tecnologie sopra presentate oltre a ridare consistenza al nucleo portante possono, se ben impostate, aumentarne anche la capacità portante. Vi sono situazioni in cui è necessario, causa aumento di carico in progetto, dover rinforzare la struttura verticale.

Nel caso di strutture in muratura, il problema si presenta in particolar modo per pilastri e colonne. La soluzione prevalente è quella di cerchiare il componente esistente così da contenerne gli spancamenti laterali: un pilastro schiacciato dal carico tende ad aprirsi sui fianchi formando delle fessure parallele verticali; se si realizzano attorno al pilastro delle cinture sufficientemente rigide si tende ad impedire tale movimento e dunque il pilastro resiste al carico in eccesso. Le opere di cerchiatura possono avvenire attraverso le seguenti tecniche.

#### **1.6.2.1 Collari metallici**

Si realizzano l'equivalente di staffe metalliche mediante dei collari saldati in opera o imbullonati nelle estremità. Per una colonna tonda ciò è sufficiente. Nel caso di pilastri quadrati o rettangolari, al fine di non creare concentrazioni di sforzi negli spigoli è sempre meglio predisporre negli angoli dei profili verticali ad L (tipo paraspigoli) prima di posizionare i collari.

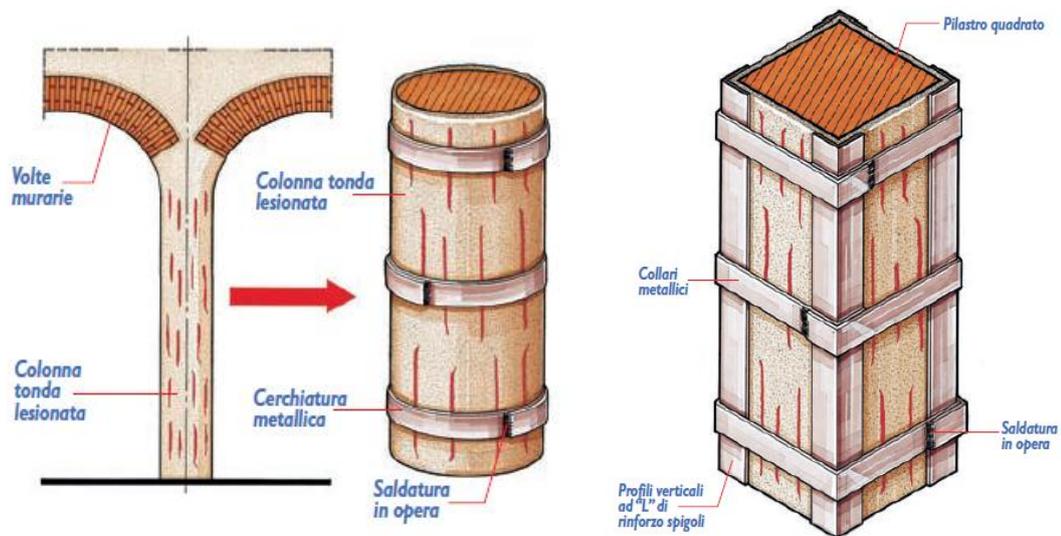


Figura 29 Cerchiature di colonne e consolidamento di pilastri con cerchiature metalliche

### 1.6.2.2 Tiranti metallici

Se anziché con colonne si ha a che fare con torri campanarie o interi edifici, le cerchiature metalliche si traducono, in maniera più adatta ai casi in esame in veri e propri tiranti (esterni o interni alla costruzione).

I tiranti sono sempre quattro sullo stesso asse, perché in analogo modo a quello che avveniva per i pilastri devono confinare l'elemento murario.

I tiranti possono essere messi in tiro e quindi si è in grado di aumentare l'effetto di schiacciamento laterale; ovviamente fondamentale appare la progettazione di apposite piastre sulla testa dei tiranti per evitare effetti locali di punzonamento dei mattoni.



Figura 30 tiranti torre campanile

### 1.6.2.3 Fasciature di tessuti a base di fibra di carbonio

L'impiego di FRP Fiber Reinforced Polymer viene sempre più considerato per il rinforzo e la riparazione di elementi murari portanti (muri, volte, pilastri) in edifici esistenti.

Numerosi casi applicativi sono presenti in letteratura, così come ormai numerosi sono gli studi sperimentali volti a caratterizzare, dal punto di vista strutturale, le prestazioni della muratura nelle nuove condizioni di esercizio.

L'intervento si basa sull'incollaggio di tessuti costituiti da materiali fibrosi ad elevata resistenza meccanica, applicati sul supporto murario mediante resine di varia natura.

La facilità esecutiva della tecnica e l'efficacia del tipo di rinforzo nel sopperire alla carente resistenza a trazione della muratura consentono di realizzare sistemi caratterizzati da limiti di resistenza molto più elevati della muratura tradizionale e da un comportamento a rottura meno fragile. La presenza del rinforzo permette, infatti, di mantenere legati gli elementi resistenti, finanche nella situazione di collasso. In tal senso, la fragilità intrinseca al materiale di rinforzo, dovuta all'elevato modulo elastico, diviene un fattore secondario, compensato da valori di resistenza a trazione praticamente non raggiungibili in esercizio dalla muratura.



Dal punto di vista strutturale, la tecnica si presta quindi molto bene al miglioramento del comportamento a flessione o a taglio, anche in ambito sismico. Altri vantaggi tipici dei materiali fibrorinforzati sono le ottime proprietà chimico-fisiche, quali la bassa densità, l'elevata resistenza alla corrosione, la bassa conducibilità, ecc., peraltro non sempre comuni alle numerose tipologie riscontrabili sul mercato (barre e laminati realizzati con fibre di carbonio, vetro, polivinilalcol, aramide, ecc.).

Dal punto di vista del calcolo non esistono delle formulazioni univoche. A livello internazionale si fa tuttora riferimento ai modelli teorici adottati per le strutture di cemento armato, calibrati in base ai risultati di prove sperimentali effettuate sulla muratura.

Le ricerche sono tese ad individuare i meccanismi di collasso “modificati” dalla presenza del rinforzo ed a fornire schemi per la definizione dei relativi contributi resistenti. Ne deriva che, nel contesto applicativo, il progetto degli interventi è

realizzato in assenza di metodi più o meno rigorosi, non essendo ancora disponibile una normativa specifica; ciò concerne la scelta del tipo di materiali (sistemi fibra-resina), il dimensionamento del rinforzo in termini di larghezza e spessore (numero di strati di fibra eventualmente sovrapposti) e la distribuzione dello stesso sulla superficie muraria, a seconda delle prestazioni strutturali richieste.

Il sistema proposto consiste nell'applicazione di strisce di FRP di determinata larghezza mediante apposite resine (nella fattispecie di tipo epossidico), con diverse finalità (regolarizzazione della superficie del supporto, adesione e protezione del fibrorinforzato).

I materiali componenti il rinforzo vengono disposti per strati successivi, previa livellatura e pulitura superficiale della muratura nell'area di applicazione; l'efficacia dell'intervento è, infatti, strettamente legata all'adesione del sistema muratura-fibra, al fine di consentire l'attivazione del contributo del rinforzo solidalmente alla muratura. In situ, è pertanto spesso necessario rimuovere gli strati ricoprenti non portanti (malte e intonaci) ed eliminare le irregolarità superficiali fino a scarti preferibilmente non superiori al millimetro.

Tali operazioni possono essere effettuate sia con mezzi meccanici (sabbatura per la pulitura delle superfici e utilizzo di flessibile per la livellatura) che manuali (impiego di spazzole abrasive e di scalfittura, rispettivamente per le due operazioni citate). Sulle superfici così preparate viene disposto inizialmente uno strato di prodotto impregnante (anche in più strati, a seconda della porosità della muratura), applicato mediante pennello o rullo, con lo scopo di favorire l'aggrappo degli strati successivi al supporto; ad avvenuta asciugatura del prodotto (che può richiedere oltre le 12 ore), viene disposto un successivo strato di stucco epossidico, applicato a mano mediante frattazzo, che consente di uniformare la superficie di applicazione delle fibre, avendo cura di stendere il materiale con sufficiente regolarità e limitatezza di spessore.

Su tale superficie, dopo circa 30 minuti dall'applicazione, è possibile procedere alla stesura del primo strato di adesivo, sul quale vengono disposte le strisce di fibra. Queste vengono fatte aderire alla resina mediante pressione manuale e successivo passaggio con rullo dentato, il quale permette di eliminare le bolle d'aria eventualmente inglobate tra le fibre e lo strato di resina, impregnando le fibre stesse con l'adesivo.

Con modalità analoghe alla stesura della prima mano di adesivo, viene disposto un successivo strato dello stesso al di sopra delle fibre, al fine di permearle completamente di resina.

Nel caso si necessiti di ulteriori strati di rinforzo, questi vengono applicati in successione al di sopra degli strati precedenti, avendo cura di non dislocare le fibre sottostanti e rispettando i tempi necessari a rendere pronta la superficie di adesione. Infine, ove necessario, il sistema può essere completato da uno strato protettivo superficiale alle radiazioni ultraviolette (fibre aramidiche o poliestere).

Nel proseguo si rappresentano in termini generali le modalità di collocazione di interventi di fasciatura di edifici con i compositi FRP per i principali meccanismi di collasso prodotti da un evento sismico in edifici in muratura. I meccanismi di collasso rappresentati sono tratti dalle norme “Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni -Testo allegato al parere n. 66 dell’Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei LL.PP. reso nella seduta del 21 luglio 2006”.

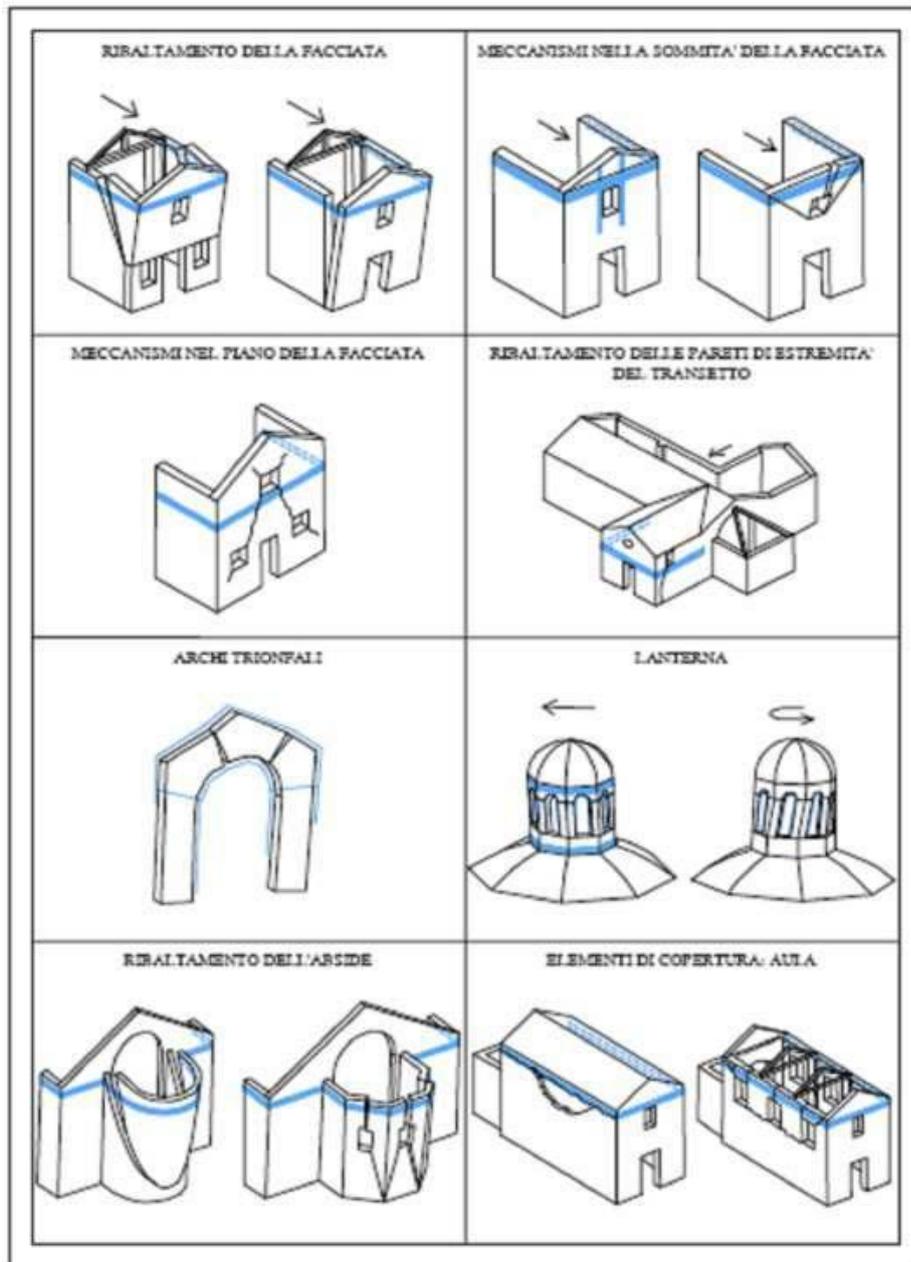


Figura 31 Modalità di collocazione di interventi di fasciatura

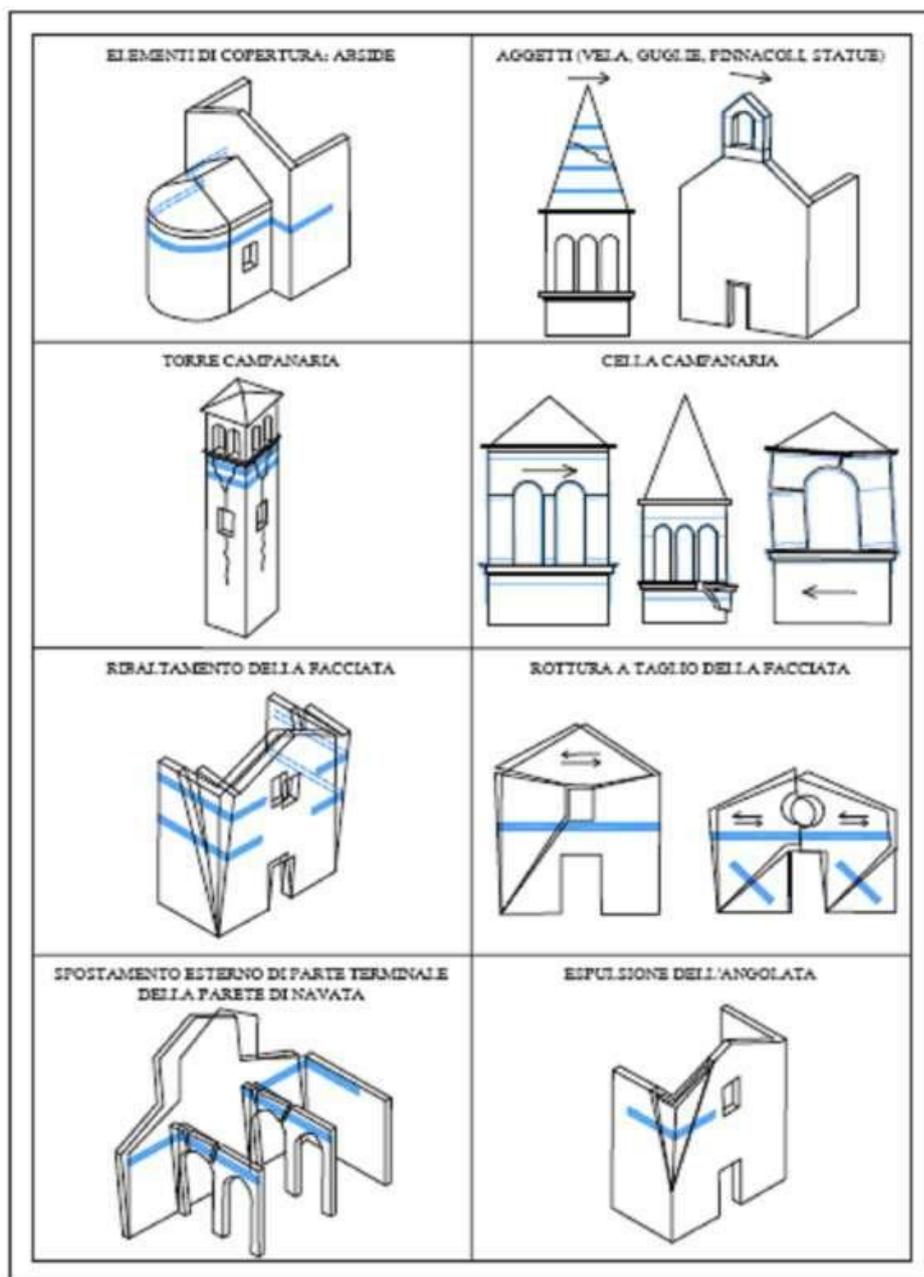


Figura 32 Modalità di collocazione di interventi di fasciatura FRP

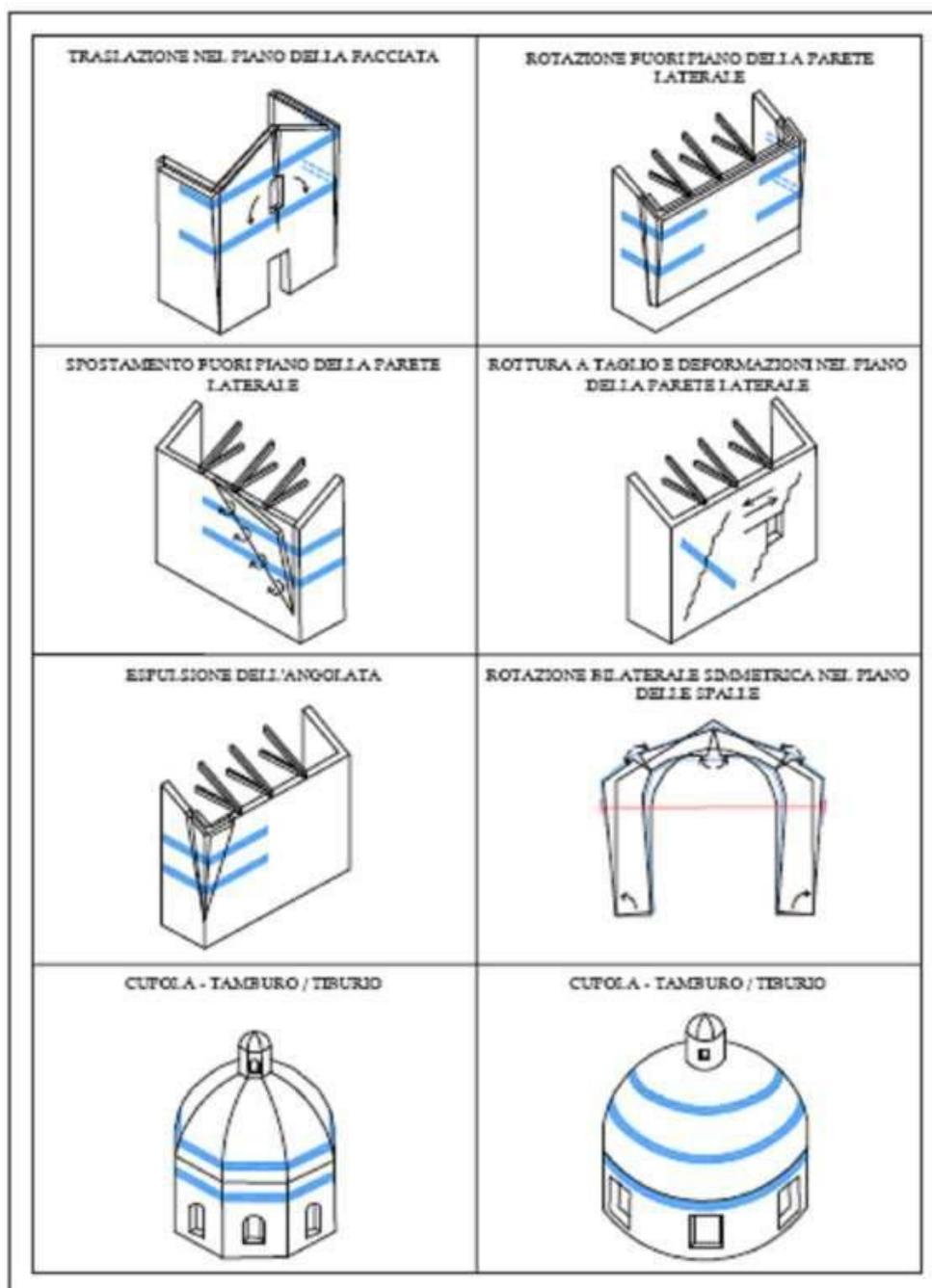


Figura 33 Modalità di collocazione di interventi di fasciatura

## **2 I MATERIALI COMPOSITI FIBRORINFORZATI**

### **2.1 Introduzione**

I materiali innovativi, ed in particolare i materiali compositi, rappresentano oggi una soluzione concreta a numerosi problemi di rinforzo, restauro e riabilitazione strutturale.

Sono ormai diventati competitivi, rispetto ad altri tipi di intervento più tradizionali, nel rinforzo a flessione e/o a taglio di travi in calcestruzzo, nelle cerchiature di pilastri, nel rinforzo di pannelli murari, nel rinforzo di elementi lignei e acciaio. Trovano applicazione sia nel restauro di edifici “moderni” che nel restauro del patrimonio storico, e sono stati recentemente trattati anche a livello normativo.

I motivi che hanno reso possibile il successo nell’impiego di questi materiali sono le notevoli proprietà meccaniche, la leggerezza, la limitata invasività e la relativa reversibilità dell’intervento e la facilità di posa in opera.

Proprio la rapidità e la semplicità delle operazioni di cantiere hanno spesso reso tale tecnica vantaggiosa anche dal punto di vista economico, nonostante il costo, ancora relativamente elevato, ma in via di diminuzione, del materiale.

Di seguito sono introdotte definizioni e classificazioni fondamentali per poter comprendere i meccanismi e le proprietà alla base di questi materiali che sono stati studiati scorporandoli nei loro componenti di base, la matrice e le fibre. Particolare attenzione è stata riposta nello studio dei sistemi destinati all’edilizia.

### **2.2 Definizioni**

Con la denominazione di materiale composito si vuole indicare una miscela di due o più componenti che, pur conservando ciascuno la propria identità chimica, contribuiscono mutuamente a fornire proprietà meccaniche e fisiche complessivamente molto superiori a quelle dei singoli elementi come entità separate.

In ogni tipo di materiale composito si possono identificare tre fasi (Figura 34), presenti ciascuna in percentuale volumetrica variabile in base al tipo di composito:

- una matrice (fase continua), quella parte di miscela identificabile come un elemento senza soluzione di continuità che generalmente definisce forme e volume della struttura in cui è inserita;
- un rinforzo (fase fibrosa), costituito da entità multiple (fibre) diffuse più o meno uniformemente nella matrice.
- un'interfase cioè la zona di contatto tra il materiale di rinforzo e la matrice;

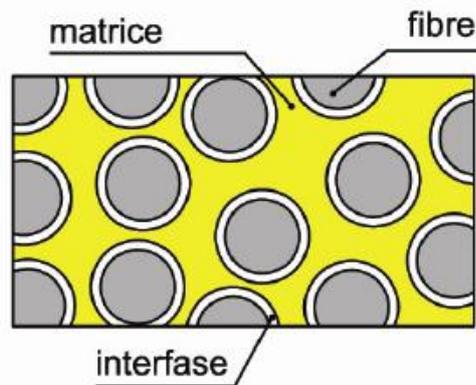


Figura 34 Schema delle fasi in un composito.

Mentre lo scopo del rinforzo è quello di sopportare le sollecitazioni agenti sul materiale composito, quello della matrice è innanzi tutto quello di tenere unite le fibre fra loro nella disposizione voluta, trasferire loro i carichi esterni applicati e proteggerle dalle condizioni ambientali circostanti.

Così mentre il rinforzo fibroso definisce sostanzialmente le prestazioni meccaniche che il composito è in grado di offrire, la matrice, costituendo l'interfaccia fra le fibre e l'ambiente circostante, identifica, almeno per grandi linee, il possibile campo di applicazione di ciascun particolare materiale composito.

L'interfase è il terzo componente posto tra la fibra e la matrice; esso ha lo scopo di promuovere l'adesione tra le due fasi. Si tratta di un elemento che avvolge le fibre in uno strato sottilissimo, spesso monoatomico, e le rende compatibili con la matrice organica. L'interfase non contribuisce direttamente alla determinazione delle caratteristiche meccaniche del composito, ma lo influenza pesantemente, in quanto l'interfaccia fibra-matrice rappresenta uno dei punti di maggiore criticità del sistema e la mancanza di adesione tra le due fasi costituisce una delle principali cause di cedimento strutturale del composito

Il principio di unire uno o più materiali disomogenei per ottenere un composto capace di sfruttare le migliori caratteristiche di ciascun componente è noto sin da epoche remote.

La prima testimonianza di mattoni in terra cruda essiccata rinforzati con paglia si trova nella città di Çatal Hüyük, in Anatolia, datata dagli archeologi intorno al 6500 AC. Gli stessi romani erano soliti rinforzare malte ed intonaci con fibre animali, secondo una tecnica che è stata utilizzata fino agli inizi del XX secolo.

Il calcestruzzo armato può essere considerato un primo esempio di materiale composito moderno, pur presentando un rinforzo non diffuso bensì puntuale.

Attualmente per distinguere i materiali compositi come quelli sopra accennati da quelli realizzati per ottenere prestazioni globali estremamente più elevate, si è introdotta la seguente denominazione di materiali compositi avanzati.

## **2.3 Materiali compositi fibrorinforzati a fibre lunghe**

I materiali compositi a fibra lunga rappresentano una evoluzione delle applicazioni dei compositi a fibra corta.

Mentre in questi ultimi le fibre, disperse nella matrice secondo direzioni casuali, hanno il compito di migliorare le caratteristiche della matrice stessa o di conferirle nuove proprietà, nei compositi a fibra lunga invece la fibra svolge il vero e proprio ruolo di rinforzo strutturale e la matrice ha il compito di trasferire gli sforzi tra le fibre e dal supporto alle fibre, oltre alla funzione protettiva nei confronti delle fibre stesse.

### **2.3.1 Tipologia e classificazione delle fibre**

Il termine corretto per indicare la singola fibra è “filamento”, ovvero un elemento di struttura allungata, sottile, con dimensioni longitudinali molto maggiori rispetto al diametro (circa 10  $\mu\text{m}$ ).

Riunendo più filamenti in fasci paralleli, si ottiene il cosiddetto “tow”, le cui caratteristiche dipendono dal numero di filamenti che lo costituiscono.

Attorcigliando un tow su se stesso, si ottiene lo “yarn”. Una caratteristica peculiare di quest’ultimo risiede nel fatto che, ad ogni pollice di lunghezza, corrisponde

un giro d'attorcigliamento. Ciò conferisce una certa stabilità nei confronti dello sfaldamento.

Il "trefolo", detto anche "roving", è costituito da più yarn avvolti tra loro.

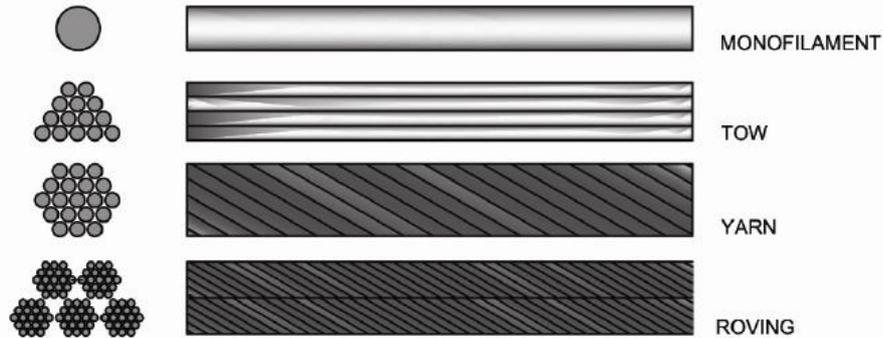


Figura 35 Tipologie di fibre

Dall'unione di tow o yarn si ottengono dei tape in cui i fili possono essere cuciti, affiancati o fissati ad un supporto.

La classificazione è quella tipica dei materiali prodotti dall'industria tessile e anche le denominazioni derivano da questa: il Tex è l'unità di misura della massa lineare (titolo: massa per unità di lunghezza) ed è equivalente ad un grammo per chilometro di fibra. La vecchia unità di misura è il denier che equivale a 0,111 Tex.

Le fibre destinate al mercato dell'edilizia non si trovano in commercio, come yarn e roving, ma assemblate in strutture più facilmente utilizzabili, come tessuti e nastri o all'interno di materiali compositi preformati in forma di lamine, profilati e barre.

Le fibre maggiormente utilizzate per la produzione di materiali compositi a fibra lunga sono le fibre di vetro, di carbonio e aramidiche.

Anche all'interno di ciascuna delle tre tipologie ci sono notevoli variazioni nelle proprietà delle fibre, in funzione del particolare processo produttivo seguito o dell'aggiunta di additivi modificatori delle caratteristiche del prodotto.

In generale si può comunque dire che, in confronto agli altri materiali da costruzione, le fibre presentano elevati valori di resistenza ed un valore del modulo elastico variabile in un campo molto ampio.

La bassa densità comporta che i valori di resistenza specifica (rapporto resistenza/densità) e modulo elastico specifico (rapporto modulo/densità) siano superiori a quelli dei materiali da costruzione tradizionali.

### 2.3.2 Le fibre di vetro

Le fibre di vetro sono utilizzate per la fabbricazione di materiali compositi dalle caratteristiche medio-alte.

Le fibre di vetro sono prodotte per fusione, trafilatura e veloce raffreddamento di particolari vetri, generalmente composti di alluminio-boro silicati ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ), da cui derivano i vari tipi di prodotto in commercio, ognuno caratterizzato da diverse proprietà.

Nel processo produttivo i vari componenti vengono miscelati a secco e portati al punto di fusione di circa  $1260^\circ\text{C}$ , il vetro fuso passa dalla fornace (tank) alla filiera di platino (bushings) da cui viene fatto passare per gravità attraverso fori praticati nel fondo; i filamenti prodotti sono quindi raggruppati, eventualmente con una leggera torsione, in una treccia o fibra.

I filati sono raccolti in roving, senza ritorcitura; quelli destinati all'impiego nel campo dell'ingegneria civile presentano un titolo superiore a 2000 Tex.

Al variare delle proporzioni delle materie prime impiegate per la produzione di queste fibre, si ottengono prodotti con caratteristiche e prestazioni meccaniche diverse tra loro.

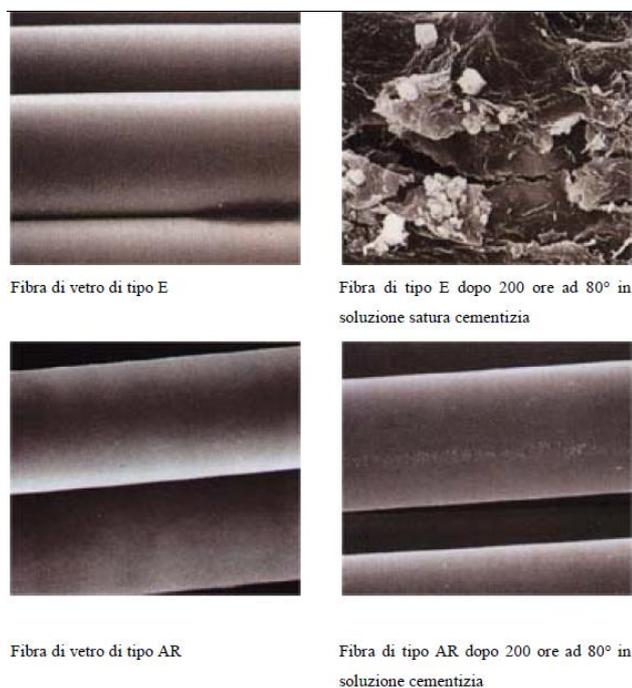
TIPOLOGIE E CARATTERISTICHE DELLE FIBRE DI VETRO		
TIPO DI FIBRA	COMPONENTI	PROPRIETÀ CARATTERISTICHE
E-GLASS	Silicato di calcio	Ordinarie – uso generico
ECR-GLASS	Silicato di calcio in assenza di boro	Resistenza agli acidi
S-GLASS	Silicato di magnesio	Resistenza meccanica ed al calore
C-GLASS	Carbonato di Sodio-calce-borosilicato	Alta resistenza alla corrosione
AR-GLASS	Ossidi di alluminio calcio magnesio, zirconio e di torio	Resistenza agli alcali – uso in matrice cementizia

Tabella 3 Tipologie e caratteristiche delle fibre di vetro

Le fibre di vetro presentano caratteristiche inferiori a quelle delle fibre aramidiche o di carbonio, ma hanno il vantaggio di un costo più basso: per questo motivo sono spesso utilizzate in combinazione con le altre per ottenere un rinforzo di proprietà intermedie e costi contenuti.

Presentano comunque buone proprietà, quali un'ottima compatibilità con le matrici organiche, mentre hanno lo svantaggio di essere facilmente attaccate dagli alcali e quindi, per la maggior parte, sono incompatibili con matrici cementizie.

Per ovviare a questo inconveniente sono state messe a punto le fibre di tipo AR (alkali resistant), ottenute con l'aggiunta di zirconio alla miscela di fusione, che presentano una buona resistenza agli alcali (Figura 36).



**Figura 36** Comparazione degli effetti di attacco alcalino su fibre di vetro di tipo E e fibre di vetro di tipo AR

Le fibre di vetro presentano anche lo svantaggio di una bassa resistenza a fatica e lo stesso modulo elastico, relativamente basso, limita lo sfruttamento della resistenza a trazione delle fibre di vetro, e che risultano così idonee per il rinforzo di elementi in materiali molto deformabili come il legno.



**Figura 37 Tessuto e mat in fibra di vetro**

Le più utilizzate in edilizia sono le fibre E-glass, più economiche ma con scarse proprietà meccaniche, e le S-glass che raggiungono resistenze paragonabili a quelle delle fibre di carbonio, ma con un modulo elastico sensibilmente più basso e con un costo molto elevato.

MATERIALE	DENSITA' [kg/m <sup>3</sup> ]	MODULO ELASTICO [GPa]	RESISTENZA A TRAZIONE [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA [%]	RESISTENZA SPECIFICA [MPa*m <sup>3</sup> /kg]
Fibre tipo E	2550	70	3500	3,8	1,37
Fibre tipo S	2500	90	4700	5,5	1,88
Acciaio FeB44K	7850	210	540	20	0,07

**Tabella 4 Confronto tra le fibre di vetro più diffuse e l'acciaio da costruzione**

### **2.3.3 Le fibre di carbonio**

Le fibre di carbonio vengono utilizzate per la fabbricazione di compositi ad elevate prestazioni, essendo caratterizzate da un elevato valore di modulo elastico e di resistenza meccanica.

Esse, però, esibiscono un comportamento a rottura fragile, caratterizzato da un assorbimento di energia relativamente modesto anche se le tensioni di rottura sono elevate.

Rispetto alle fibre di vetro ed aramide, sono le meno sensibili ai fenomeni di scorrimento viscoso (creep) e di fatica, essendo contraddistinte da una modesta riduzione della resistenza a lungo termine.

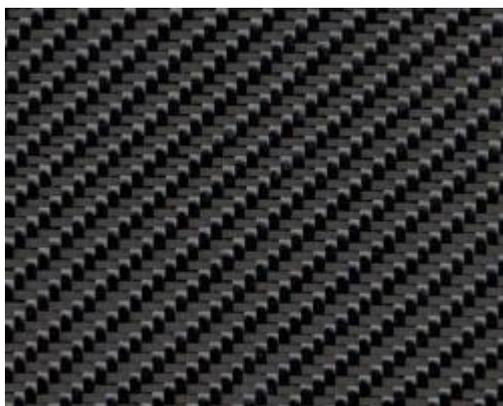


Figura 38 Tessuto in fibra di carbonio

Le fibre di carbonio si ottengono con un processo industriale di lavorazione ad alta temperatura di particolari polimeri denominati precursori; il poliacrilonitrile, indicato generalmente con il suo acronimo PAN, è quello più utilizzato sia nel campo tessile dell'abbigliamento, sia nel campo dei prodotti per l'edilizia.

Ovviamente i processi produttivi possono dare vita a materiali più o meno puri e per questo motivo sul mercato sono presenti diversi tipi di fibre di carbonio, caratterizzati da parametri di elasticità e resistenza molto diversi tra loro.

In particolar modo le fibre di carbonio si classificano in fibre ad alta resistenza fibre ad alto modulo e fibre ad altissimo modulo.

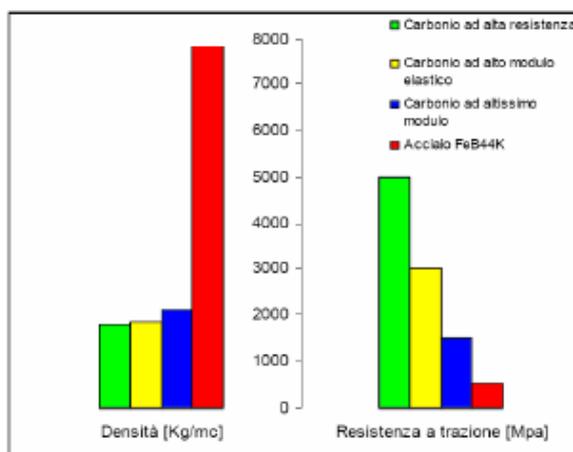


Figura 39 Confronto tra le prestazioni delle più comuni fibre di carbonio

Nelle applicazioni dell'ingegneria civile le fibre più utilizzate sono quelle standard o ad alta tenacità, con valori del modulo elastico inferiori a 250 GPa, mentre le fibre ad alto e altissimo modulo vengono utilizzate solo in casi particolari.

MATERIALE	DENSITA' [kg/m <sup>3</sup> ]	MODULO ELASTICO [GPa]	RESISTENZA A TRAZIONE [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA [%]	RESISTENZA SPECIFICA [MPa*m <sup>3</sup> /kg]
Carbonio ad alta resistenza	1800	230	5000	2	2,78
Carbonio ad alto modulo2100 (HM)	1850	400	3000	0,9	1,62
Carbonio ad altissimo modulo	2100	700	1500	0,3	0,71
Acciaio FeB44K	7850	210	540	20	0.07

Tabella 5 Confronto tra le fibre di carbonio più comuni e l'acciaio da costruzione.

Il modulo elastico elevato comporta un aumento del pregio e del costo delle fibre. La maggiore rigidità tuttavia non è sempre auspicabile, come nel caso in cui il decrescere dell'allungamento ultimo porta a fenomeni di rottura fragile.

### 2.3.4 Le fibre aramidiche

Le fibre Aramidiche sono fibre polimeriche ad altissime prestazioni meccaniche ottenute dalla lavorazione di Poliammidi Aromatiche (in inglese ARomatic polyAMIDes) dalla cui contrazione deriva il nome "Aramid". Si tratta quindi di fibre derivate per sintesi da petrolio e gas naturale.

Le prime fibre aramidiche prodotte risalgono al 1961 e sono state commercializzate con la denominazione di Nomex. Successivamente la Dupont nel 1971 ha brevettato e commercializzato il Kevlar, che a tutt'oggi costituisce la quasi totalità delle fibre aramidiche utilizzate nei materiali compositi.

Il Kevlar presenta proprietà meccaniche superiori a quelle del Nomex e confrontabili con quelle di alcuni tipi di fibre in carbonio. I vari tipi esistenti in commercio si differenziano per la struttura chimica e per le prestazioni meccaniche. I più diffusi sono il Kevlar 29 e il Kevlar 39, mentre più recenti e meno diffuse sono le fibre denominate Kevlar 149.

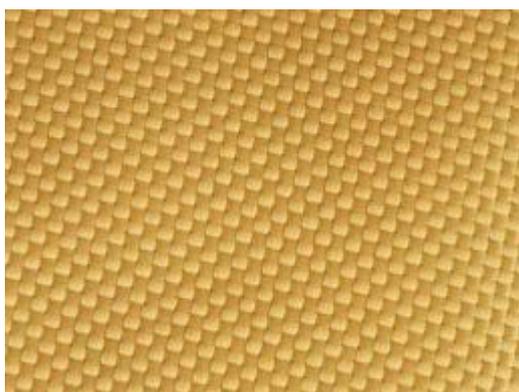
Presentano, in genere, elevati valori di resistenza meccanica sia a trazione che a taglio, modulo elastico inferiore a quello del carbonio, a cui sono spesso accoppiate, elevata resistenza agli urti e una struttura stabile alle alte temperature.

MATERIALE	DENSITA' [kg/m <sup>3</sup> ]	MODULO ELASTICO [GPa]	RESISTENZA A TRAZIONE [MPa]	DEFORMAZIONE A ROTTURA [%]	RESISTENZA SPECIFICA [MPa*m <sup>3</sup> /kg]
Kevlar® 29	1440	70	3600	3.6	2.50
Kevlar® 39	1450	140	3600	1.9	2.48
Kevlar® 149	1470	160	3200	1.5	2.18
Acciaio FeB44K	7850	210	540	20	0.07

**Tabella 6 Confronto tra le fibre aramidiche più comuni e l'acciaio da costruzione**

I valori di densità molto bassi determinano il rapporto resistenza-peso più alto tra le fibre impiegate nei compositi.

Nel settore delle costruzioni civili, le fibre aramidiche sono per lo più impiegate sulle strutture in muratura dove un elevato modulo elastico del rinforzo non è necessario, anzi potrebbe costituire un inconveniente; non trovano invece grande impiego nel consolidamento delle strutture in cemento armato dove le fibre in carbonio garantiscono, a parità di costi, un più alto modulo elastico e quindi maggiore capacità di assumere carichi e parità di deformazioni della struttura rinforzata.



**Figura 40 Tessuto in Kevlar**

## **2.4 Le matrici**

Sinora, le matrici più utilizzate per la realizzazione di materiali compositi fibrorinforzati sono quelle di natura organica, ovvero le resine. Meno diffuse sono le matrici inorganiche cementizie, metalliche e ceramiche, che però stanno assumendo un ruolo sempre più importante.

In questo studio si soffermerà l'attenzione sulle matrici di tipo organico e inorganico maggiormente utilizzate nel settore dell'edilizia; il fine sarà quello di delinearne aspetti principali e i vantaggi e gli svantaggi di ognuna.

### **2.4.1 Le matrici organiche**

Genericamente queste matrici si possono definire come un prodotto organico, solitamente un polimero, naturale o di sintesi.

Tra le molte applicazioni che esse trovano in vari settori, si vuole soffermare l'attenzione su quelle destinate alla realizzazione di materiali compositi, definiti appunto FRP, Fiber Reinforced Polymer.

La principale distinzione che si può fare è tra resine termoplastiche e termoindurenti, in funzione del loro comportamento al riscaldamento.

Le resine termoplastiche possono essere fuse, con un'adeguata quantità di calore, forgiate secondo la forma desiderata e solidificate per raffreddamento; il processo di fusione e solidificazione può essere ripetuto senza che le caratteristiche della resina decadano sensibilmente.

Le resine termoindurenti invece durante la fase di reticolazione subiscono un processo chimico irreversibile e pertanto non possono essere riforgiate; sotto l'azione del calore, a differenza delle precedenti, degradano sensibilmente e successivamente solidificano sempre per azione del calore.

Per uno studio approfondito, che esula dagli scopi della presente ricerca, si rimanda a testi specialistici, alcuni dei quali sono riportati in bibliografia, mentre si riportano, in sintesi, le nozioni di base ritenute indispensabili per lo studio delle applicazioni nel campo dell'edilizia.

Le resine si differenziano per la diversa composizione chimica che ne determina le proprietà:

<b>Classificazione delle resine</b>	
<b>Resine Termoindurenti</b>	<b>Resine Termoplastiche</b>
Alchidiche	Acriliche
Ammidiche	Policarbonati
Epossidiche	Poliesteriche termoplastiche
Fenoliche	Polifluoruri di vinile
Poliesteriche insature	Poliolefiniche (polietilene,
Poliuretaniche	polipropilene)
Siliconiche	Vinilesteriche

Tabella 7 Classificazione delle resine

#### **2.4.1.1 Le matrici termoindurenti**

Queste resine subiscono un processo di trasformazione irreversibile nel processo di polimerizzazione, legato alla reticolazione covalente che le rende insolubili ed infusibili.

Le più importanti dal punto di vista delle applicazioni commerciali sono le resine fenoliche e quelle ammidiche, mentre per il settore edile sono le resine epossidiche.

Le resine fenoliche sono prodotte dalla reazione della formaldeide con il fenolo, in presenza di catalizzatori che possono essere sia acidi che basici, la cui scelta

determina le caratteristiche dei prodotti della reazione stessa. Hanno largo utilizzo quali adesivi per il compensato ed in altre applicazioni industriali, che richiedano ottime proprietà adesive delle resine.

Le resine ammidiche sono prodotte dalla reazione di policondensazione dell'urea e della melamina con la formaldeide. Rispetto alle resine fenoliche, presentano un processo produttivo molto simile, ma il prodotto finale è una resina trasparente e di proprietà meccaniche più elevate, che però presenta gli svantaggi di una minore resistenza all'umidità ed al calore.

Tra le resine ammidiche, quelle a base di melamina sono migliori ma più costose di quelle derivate dall'urea, a cui sono spesso mescolate per ragioni di economicità.

Le resine epossidiche derivano il loro nome dal materiale utilizzato per la produzione e dalla presenza di gruppi epossidici, agli estremi del polimero prima della reticolazione.

Le proprietà meccaniche, la flessibilità, l'adesione, e la resistenza chimica, ne fanno il prodotto più diffuso in edilizia quale adesivo strutturale, ma anche per altri usi come la realizzazione di schiume e di pavimenti industriali.

Le schiume poliuretatiche sono polimeri ottenuti attraverso la reazione tra diisocianato e un glicole. Nel processo di produzione i gruppi di isocianato in eccesso reagiscono con l'acqua producendo anidride carbonica che gonfia la schiuma nella fase di reticolazione.

Le resine poliestere insature sono prodotte a partire da un glicole e un acido attraverso un processo di polimerizzazione a passi, al composto viene aggiunto un inibitore per impedire una ulteriore polimerizzazione. L'aggiunta di un opportuno iniziatore porta alla formazione di un gel che in seguito dà luogo alla produzione del polimero finale.

Il pregio di queste resine è la semplicità nell'uso dei componenti di base, il rapido tempo di polimerizzazione, le buone proprietà del prodotto finale e l'assenza di prodotti volatili quali scarti della reazione.

Le resine siliconiche sono polimeri a base silicio, prodotti attraverso reazioni di policondensazione a partire da intermedi organosiliconici. Il processo di reticolazione porta a resine di caratteristiche estremamente diverse, usate come vernici isolanti o agenti impregnati.

Le resine alchidiche sono poliesteri di svariata composizione, quelli più comuni sono a base di ftalica e glicerolo; in genere sono modificate con l'aggiunta di acidi grassi. Possono essere suddivise in due famiglie, la lacca la cui polimerizzazione avviene con l'evaporazione del solvente e il vernice la cui polimerizzazione comporta reazioni chimiche tra i componenti.

#### **2.4.1.2 Le matrici termoplastiche**

Le resine termoplastiche hanno la caratteristica di subire un processo di polimerizzazione reversibile, ovvero possono essere fuse mediante l'apporto di calore e successivamente, attraverso il raffreddamento, subire una nuova solidificazione; durante questo processo non si hanno alterazioni chimiche nel materiale, tanto che il prodotto finale ottenuto non presenta sensibili decadimenti delle proprietà rispetto a quello iniziale.

I polimeri termoplastici in genere cristallizzano con difficoltà e comunque danno luogo a solidi che presentano zone amorfe e zone cristalline, queste ultime caratterizzate dalla loro temperatura di fusione (melting temperature,  $T_m$ ).

Le resine amorfe e le regioni amorfe delle resine parzialmente cristallizzate sono invece caratterizzate dalla temperatura di transizione vetrosa (glass transition temperature,  $T_g$ ) alla quale passano dallo stato vetroso a quello gommoso.

Le resine acriliche sono prodotte principalmente attraverso l'utilizzo di acrilato di metilene sottoposta a vari processi di natura chimica e fisica che influenzano le caratteristiche del prodotto finale.

Esistono molti tipi di polimeri acrilici, tra cui i cianoacrilati sono largamente utilizzati come adesivo.

I policarbonati sono polimeri termoplastici cristallini che presentano proprietà meccaniche molto buone, in particolare alta resistenza agli urti. Altre caratteristiche sono lo scarso assorbimento dell'umidità atmosferica, buona resistenza alle alte temperature e stabilità termica.

I poliesteri termoplastici ad elevato peso molecolare presentano alcune difficoltà nel processo produttivo legate alla necessità di utilizzare componenti di difficile produzione. Si utilizza glicole a basso peso molecolare attraverso un processo a due

passi, nel primo si produce poliestere a basso peso molecolare, quindi, a temperatura più elevata, si provoca la condensazione delle molecole.

Tra i polimeri a base vinilesterica quello più utilizzato è il polivinilacetato, un polimero amorfo, sia come prodotto finito che come base per la produzione di altri polimeri. Gli usi principali sono nelle vernici e nelle resine adesive.

Il Polifluoruro di vinile presenta una struttura ad alta percentuale di cristallinità; è commercializzato sotto forma di pellicole, estremamente resistenti agli agenti chimici e atmosferici, al calore, all'abrasione e all'ossidazione. Per queste sue caratteristiche è impiegato nell'industria delle costruzioni come rivestimento superficiale.

I materiali poliolefinici più diffusi sono il polietilene e il polipropilene.

Il polietilene ramificato, denominato polietilene a bassa densità, si ottiene a partire dall'etilene e si presenta come un solido con percentuale di cristallizzazione compresa tra il 50% e il 60%. Le proprietà fisico-chimiche e meccaniche sono dipendenti dal peso molecolare, dalla sua distribuzione e dalla conformazione delle ramificazioni delle catene che costituiscono il polimero. Le principali proprietà sono la resistenza a tutti gli agenti chimici e l'isolamento elettrico e viene largamente utilizzato in tutte quelle applicazioni che richiedono queste caratteristiche.

Il polietilene ad alta densità è ottenuto sempre a partire dall'etilene, ma attraverso un differente processo produttivo. Il materiale presenta un'elevata percentuale di cristallinità (intorno al 90%), che comporta maggiore resistenza e rigidità rispetto al polietilene a bassa densità, mentre la resistenza agli agenti chimici e la bassa permeabilità è sostanzialmente la stessa.

Gli utilizzi principali sono in forma di tubazioni, film, fogli e guaine.

Il polipropilene è prodotto attraverso la polimerizzazione del propilene con un processo simile a quello del polietilene ad alta densità. L'elevata percentuale di cristallinità conferisce elevata resistenza meccanica e rigidità, mentre la resistenza all'urto è molto variabile in funzione del processo produttivo. L'inerzia chimica è molto più bassa rispetto al polietilene: come tale è necessario prevedere opportune protezioni per un utilizzo in applicazioni esposte.

## **2.4.2 Le resine in edilizia**

Le resine più utilizzate in edilizia, con la funzione di matrice per i materiali compositi fibrorinforzati, sono quelle termoindurenti, generalmente solo parzialmente polimerizzate e con consistenza fluida o pastosa. Grazie all'aggiunta di un reagente si avvia la reazione di polimerizzazione, o reticolazione, che le porta a solidificare assumendo una struttura vetrosa.

I principali vantaggi sono la facilità di impregnazione delle fibre, dovuta alla bassa viscosità, la capacità di reticolare a temperatura ambiente, la buona resistenza agli attacchi chimici e l'assenza di una temperatura di fusione.

Gli svantaggi sono il comportamento fragile a rottura, la scarsa resistenza alle alte temperature, che hanno un limite nella temperatura di transizione vetrosa, al di sopra della quale la resina prende lo stato solido, la sensibilità alle condizioni igrometriche in fase di messa in opera.

Le più utilizzate sono quelle epossidiche, seguite dalle resine di poliestere e vinilestere.

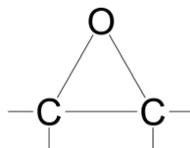
Gli aspetti negativi caratteristici delle resine termoindurenti hanno portato allo studio di matrici termoplastiche per i compositi. Queste sono caratterizzate da una temperatura di esercizio più alta, una maggiore tenacità rispetto alle resine termoindurenti e una maggiore resistenza agli agenti ambientali. Inoltre, se portate ad una temperatura adeguatamente alta, ovvero superiore a quella di transizione vetrosa  $T_g$ , per le resine amorfe, o alla temperatura di fusione  $T_m$  per le resine semicristalline, possono essere modellate secondo la forma desiderata e successivamente solidificate per raffreddamento, mantenendo inalterate le loro proprietà.

La principale limitazione è rappresentata dalla difficoltà di impregnazione delle fibre a causa della loro viscosità elevata.

### **2.4.2.1 Le resine epossidiche**

Le resine epossidiche sono il tipo di resina maggiormente utilizzato per le applicazioni nel settore edile e poiché verranno utilizzate nell'attività sperimentale prevista in questo studio, si ritiene opportuno un approfondimento della loro trattazione.

Si tratta di polieteri, che assumono il nome di resine epossidiche a causa della presenza di gruppi epossidici prima della reticolazione. I gruppi epossidici sono anelli costituiti da un atomo di ossigeno e due di carbonio.



**Figura 41 Gruppo epossidico**

La produzione avviene a partire dalla reazione di policondensazione tra l'epicloroidrina e il defenilpropano, in eccesso di epicloroidrina in modo da garantire la presenza dei gruppi epossidici agli estremi del polimero.

Altre molecole utilizzabili in sostituzione del defenilpropano sono i glicoli, il glicerolo e l'idrochinone.

Successivamente le resine vengono fatte reagire per condensazione o accoppiamento con vari materiali, quali composti amminici, come poliammine, poliammidi, fenolformaldeide, urea-formaldeide, acidi e anidridi acide.

Possono anche subire processi di polimerizzazione cationica usando come catalizzatori degli acidi di Lewis come il BF<sub>3</sub>.

Per i materiali compositi impiegati in edilizia la resina epossidica più utilizzata è il diglicidil etero del disfenolo A. Il reagente principale così prodotto si presenta come un prepolimero epossidico, generalmente fluido a temperatura ambiente, la cui viscosità dipende dal grado di polimerizzazione in cui si trova. Al momento dell'impiego, al reagente principale viene aggiunto un agente reticolante, comunemente detto induritore, che di solito è costituito da un'ammina alifatica.

La reazione non dà luogo a prodotti di scarto e può avvenire a temperatura ambiente o ad alta temperatura, influenzando in tal modo le proprietà del prodotto finale.

È evidente che la struttura della resina può essere variata intervenendo sulla composizione chimica del prepolimero di partenza, in modo da ottenere un prodotto finale dalle caratteristiche desiderate.

La temperatura massima di esercizio delle resine epossidiche è una delle criticità

dell'applicazione: già per temperature superiori a 60°C è necessaria la scelta di resine particolari e comunque va tenuta in considerazione l'abbassamento delle caratteristiche meccaniche delle resine stesse.

La resina epossidica più utilizzata in edilizia è il diglicidil etero del bisfenolo A (DGEBA).

Confrontando le proprietà meccaniche delle resine epossidiche con quelle delle altre resine impiegate in edilizia non si rilevano differenze tanto elevate da giustificare la netta preponderanza d'impiego delle prime. Le ragioni sono invece da ricercare in altre caratteristiche come un basso ritiro, sia in fase di reticolazione che nel tempo, e la migliore interfaccia con le fibre, che comporta prestazioni migliori del composito finale.

<b>CARATTERISTICHE DELLE MATRICI ORGANICHE</b>		
	<b>POLIESTERE</b>	<b>EPOSSIDICHE</b>
<b>Densità [g/cm<sup>3</sup>]</b>	1,2	1,3-2,5
<b>Modulo elastico [GPa]</b>	4500	4500
<b>Resistenza a flessione [MPa]</b>	100	100
<b>Deformazione a rottura [%]</b>	2-5	2-5
<b>Assorbimento acqua [%]</b>	0,2	0,05-0,3

Tabella 8 Caratteristiche delle matrici organiche

### 2.4.3 Le matrici inorganiche

Negli ultimi anni è stato sperimentato con successo l'impiego di rinforzi costituiti da fibre ad alta resistenza entro matrici inorganiche (malta cementizia) che risultano compatibili sotto il profilo chimico, fisico e meccanico con supporti in c.a. e in muratura.

A fronte della minore capacità adesiva della matrice cementizia rispetto alle resine polimeriche, la prima offre tuttavia alcuni vantaggi:

- ha la medesima resistenza al fuoco del supporto (calcestruzzo o muratura) e quindi garantisce una buona prestazione anche in caso di incendio, proteggendo la fibra al suo interno dall'esposizione diretta alle fiamme. Al

contrario dei polimeri, per i quali superata una temperatura di 60°- 80°C si ha in generale un decadimento delle proprietà meccaniche;

- ha una permeabilità comparabile con quella della muratura che permette uno scambio termo-igrometrico con l'esterno e quindi una certa traspirabilità dell'elemento rinforzato, molto importante nelle strutture in muratura e maggiormente negli edifici storici in cui spesso sono presenti decorazioni e affreschi;
- garantisce l'applicabilità del sistema di rinforzo anche su supporti umidi, al contrario dei sistemi FRP dove le resine (polimeriche ed epossidiche) non catalizzano alla presenza dell'acqua;
- rende più facile l'applicazione su superfici scabre ed irregolari e di manipolazione, infatti, è la matrice stessa a colmare le irregolarità della superficie (considerati gli spessori del sistema) senza necessità di una preventiva rasatura.
- è di semplice applicazione, essendo la malta un materiale di uso comune nella pratica edilizia, che non necessita di particolari misure precauzionali o di manodopera altamente specializzata.

Nella letteratura tecnico-scientifica, sono ancora relativamente pochi i contributi che riguardano il comportamento sperimentale di rinforzi con matrice cementizia.

Tra le applicazioni su elementi strutturali, in (Kolosh, 1998) sono stati testati sistemi di rinforzo su pareti realizzati con un tessuto bidirezionale di fibre in carbonio applicato in uno o più strati come sottile rifodera della parete; il placcaggio consente di incrementare le capacità del pannello attraverso una ripartizione delle tensioni di trazione su una superficie più estesa, con un significativo incremento della resistenza ad azioni fuori dal piano.

In (Faella C., 2010) un sistema di rinforzo analogo è stato utilizzato su pareti in muratura di tufo, che sono state sottoposte a prove di compressione diagonale valutando l'incremento di resistenza dei pannelli rinforzati.

Un ulteriore incremento della resistenza può essere conferito applicando due strati di tessuto sovrapposti (Mantegazza G., 2002)



**Figura 42 pannelli in muratura di tufo (Faella et al. 2010) in a) e di mattoni (Mantegazza, Barbieri 2002) in b), entrambi rinforzati a taglio**

L'uso di placcaggi in compositi con matrice cementizia è stato impiegato nel rinforzo di travi in calcestruzzo armato: in (Wobbe E., 2004); (Huang X., 2004)) sono state realizzate prove di flessione su travi rinforzate con strisce di tessuto unidirezionale in acciaio (SRG), e l'incremento di resistenza a flessione valutato in (Barton et al 2005); in (Di Tommaso A., 2007) è stato posto a confronto l'incremento di resistenza ottenuto con compositi a matrice cementizia (CFRCM) rispetto a quello ottenuto con resine polimeriche (CFRP), utilizzando tessuti in fibre di carbonio.

L'osservazione del collasso ha mostrato un minor incremento di resistenza nelle travi rinforzate in CFRCM associato tuttavia ad un incremento della duttilità dovuto alla modalità di delaminazione che si manifesta all'interno della matrice, piuttosto che nello strato di supporto prossimo all'incollaggio.



**Figura 43 Delaminazione di travi in calcestruzzo rinforzate con e SRG**

Pur nella ristrettezza delle applicazioni proposte nella letteratura tecnicospagnola, si evince uno specifico interesse verso i rinforzi in materiale composito con matrice cementizia, di cui tuttavia manca ancora una adeguata comprensione e modellazione dei fenomeni di crisi per delaminazione.

In Italia, in ogni caso, numerose aziende stanno già intraprendendo questa strada introducendo nel mercato diversi sistemi che prevedono l'utilizzo di matrici cementizie.

La Ruredil, ad esempio, ha brevettato diversi sistemi di rinforzo FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix), ciascuno dei quali è stato appositamente sviluppato per rispondere alle esigenze di rinforzo e adeguamento sismico delle diverse strutture esistenti: le strutture in calcestruzzo armato, le strutture murarie e gli elementi di tamponamento.



**Figura 44 Ruredil X Mesh Tc30**

In questi sistemi di rinforzo vengono impiegati due diversi tipi di fibre, carbonio e PBO (poli-parafenilenbenzobisoxazolo), entrambi materiali sintetici che presentano

proprietà meccaniche ad alte prestazioni in grado di assorbire gli sforzi generati dai sovraccarichi e dagli eventi eccezionali, quali i terremoti.

Le fibre di PBO, rispetto a quelle in carbonio, hanno una resistenza a trazione superiore del 40% e un modulo elastico maggiore del 15%.

## 2.5 I materiali compositi in edilizia

Le fibre di rinforzo per materiali compositi destinati al mercato dell'edilizia non vengono commercializzate come yarn e rowing, ma assemblate in strutture più facilmente utilizzabili nei cantieri edili, come tessuti, nastri o all'interno di materiali compositi preformati in forma di lamine, profilati e barre.

I tessuti differiscono dai nastri essenzialmente per la loro dimensione, essendo i nastri di larghezza da 20 a 30 centimetri mentre i tessuti di larghezza superiore a 30 centimetri e fino a 120 – 130 centimetri. Nei tessuti, come nei nastri, vi è una direzione principale detta ordito (warp) ed una secondaria, detta trama (weft) ortogonale all'ordito<sup>1</sup>.

I tessuti possono essere ottenuti a partire dal rowing, nel qual caso sono detti stuoia (woven rowing), oppure direttamente dalla tessitura di yarn, quando si richiede maggiore leggerezza e compattezza. In generale un laminato ottenuto a partire da un tessuto avrà una frazione in fibre minore rispetto a quella di un laminato composto da lamine unidirezionali a causa dell'ondulazione (crimp) delle fibre nel tessuto.

Una classificazione può essere fatta in base al tipo di tessitura in tela, batavia e raso:

- la tela (plain) è la più semplice, si presenta con un filo sopra ed uno sotto, ha una struttura più rigida ma è più difficile da impregnare con la resina a causa del crimp che arriva al 10%. Questo comporta una minore efficacia del rinforzo nel piano del laminato;

---

<sup>1</sup> Nel settore tessile si indica con ordito la direzione lungo la quale si arrotola il tessuto e trama quella ortogonale all'ordito.

<sup>2</sup> La pultrusione dei materiali compositi è il processo produttivo normalmente impiegato nella produzione di quella, odio, griglia al sezione cava e di profilati vari. Strati continui di fibra rinforzata

- il batavia (twill) presenta due fili sopra e due sotto, è più facile da impregnare rispetto alla tela presentando una minore ondulazione, ha però lo svantaggio di essere più difficile da maneggiare;
- Il raso (satin) presenta più fili sopra ed uno sotto, è ancora più efficace del batavia, presentando un'ondulazione minima e quindi la massima rigidezza nel piano, ma anche più delicato da maneggiare in fase di realizzazione del laminato.

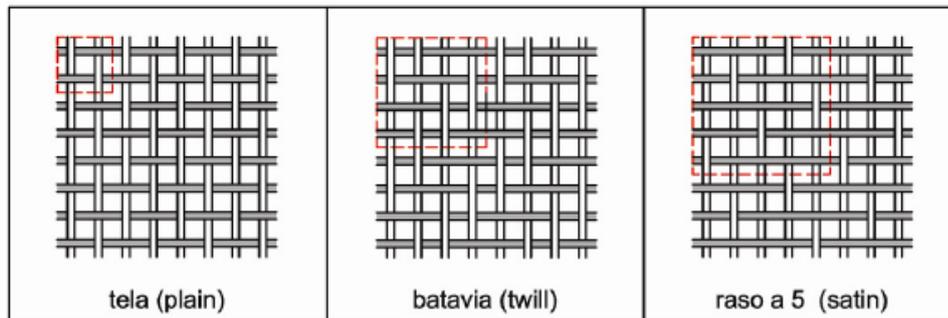


Figura 45 Tipologie di tessuto

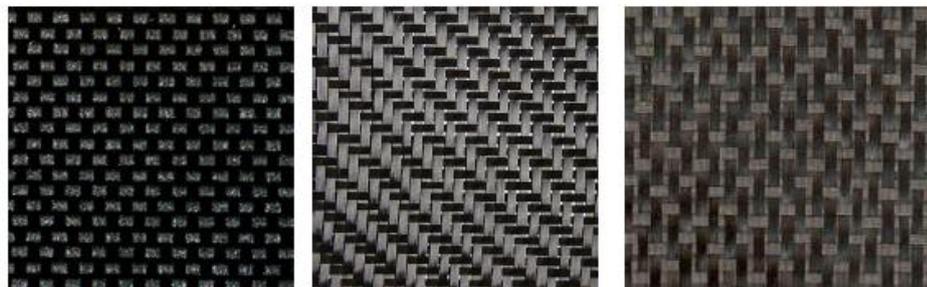


Figura 46 A sinistra tessuto plain in fibra di carbonio, al centro tessuto twill 2x2 in fibra di carbonio, a destra tessuto satin-4 in fibra di carbonio

La classificazione proposta sopra è valida per tessuti bidirezionali, che presentano un ordito ed una trama, ma esistono anche altri tipi di disposizione delle fibre, in base a cui i tessuti si possono classificare in:

- tessuti unidirezionali, con fibre orientate in un'unica direzione ed allineate su di un piano;
- tessuti intrecciati convenzionali, la maggior parte dei tessuti più comunemente utilizzati sono intrecci convenzionali di trefoli di filamenti. La struttura intrecciata blocca i filamenti dell'ordito e della trama. I filamenti

della trama e dell'ordito non sono completamente distesi ma, nel sovrapporsi alternativamente, si incurvano aumentando la deformabilità finale del tessuto;

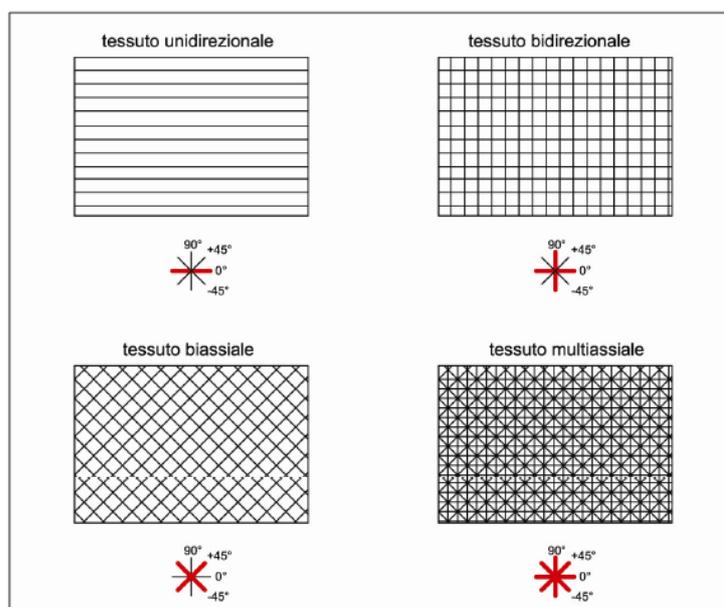
- tessuti ad intreccio piano e mat, realizzati per tessuti da impregnare e ricoprire con una matrice polimerica al fine di eliminare l'incurvamento dei filamenti fuori dal piano del laminato e di ottenere un materiale con proprietà elastiche più uniformi. In questo tipo di struttura, i filamenti della trama sono solo appoggiati su quelli dell'ordito (non intrecciati con essi) e vengono successivamente cuciti fra loro con un filamento molto leggero. Le fibre possono essere disposte in modo ordinato (tese ed allineate) o disordinato (non allineate e curve come nei mat). In questo caso, d'altra parte, è difficile prevedere quali possano essere le caratteristiche meccaniche del risultante materiale;
- tessuti ad intreccio su più assi, o tessuti multiassiali, finalizzati all'ottenimento di una maggiore resistenza allo strappo ed agli sforzi di taglio, un esempio di tessuto intrecciato su più assi è quello triassiale nel quale i filamenti sono intrecciati con angoli di circa  $60^\circ$ .

La disposizione delle fibre ovviamente influenza le proprietà del tessuto: i tessuti unidirezionali, avendo tutte le fibre orientate secondo l'ordito, presentano un'elevata resistenza a trazione secondo quella direzione e sono pertanto anisotropi anche nel piano.

I tessuti bidirezionali presentano in genere le fibre disposte secondo due direzioni ortogonali (verticale ed orizzontale oppure inclinate a  $\pm 45^\circ$ ) con caratteristiche uguali nelle due direzioni (tessuti bilanciati) o differenti per quantità e tipo di fibre utilizzate nelle due direzioni (tessuti sbilanciati).

I tessuti multiassiali, con fibre disposte secondo più direzioni, possono arrivare ad essere quasi isotropi nel piano del tessuto.

Un'altra tipologia di tessuto è quella definita a largo intreccio, che si presenta come rete con maglie larghe da 3 a 6 millimetri che facilitano l'impregnazione del tessuto e consentono l'uso di una quantità ridotta di fibre.



**Figura 47** Classificazione dei tessuti in funzione dell'orientamento delle fibre

Infine vi sono i tessuti ibridi, realizzati con differenti tipi di fibre al fine contenere i costi e di ottimizzare le prestazioni, combinando opportunamente le proprietà dei diversi materiali.

In generale la scelta del tipo di tessuto dipende da diversi fattori quali la sollecitazione cui si prevede sarà sottoposto il rinforzo, la natura del supporto da rinforzare le condizioni ambientali ed il costo dell'intervento.

Ad esempio si utilizzano tessuti unidirezionali per assorbire sforzi di trazione in strutture soggette a flessione semplice o per cerchiare strutture sottoposte a compressione assiale, mentre si preferiscono tessuti multiassiali per strutture sottoposte a taglio, torsione, sollecitazioni composte o anche per sollecitazioni soggette a variazioni di direzione.

Per la scelta del tipo di fibra invece si fa riferimento alla resistenza ed alla rigidità richieste dal progetto e alla qualità della sollecitazione (costante, ciclica, da impatto).

# 3 MATERIALI COMPOSITI A BASE DI FIBRE DI BASALTO

## 3.1 Introduzione

Nell'ambito dell'adeguamento e ripristino delle strutture esistenti è ormai ampiamente consolidato l'impiego di materiali compositi fibrorinforzati.

Come si è detto nei capitoli precedenti, queste fibre, carbonio, vetro e aramide le più diffuse, in virtù delle loro ottime prestazioni meccaniche e chimiche e della loro più semplice lavorabilità, costituiscono una valida alternativa a tecniche tradizionali di rinforzo.

Parallelamente, il sempre più diffuso interesse nei confronti di questioni legate alla salvaguardia dell'ambiente, ha portato, però, a considerare, come possibile alternativa, anche l'impiego di fibre naturali, le biofibre.

Sono stati studiati molti tipi di fibre come sisal, kenaf, canapa, lino, cocco e banane ma si è visto che, se da una parte presentano numerosi vantaggi come il basso costo, la bassa densità e la biodegradabilità, dall'altra risultano molto sensibili ai carichi termici e igroscopici e posseggono limitate proprietà meccaniche.

Una possibile soluzione, che tiene conto delle questioni ambientali, ma che non trascuri i requisiti meccanici, è rappresentata dall'uso di fibre minerali come il basalto.

Il basalto è una roccia vulcanica caratterizzata da un buon comportamento in termini di resistenza, campo di temperature e durabilità. Queste caratteristiche, combinate ad un costo potenzialmente basso, potrebbero fare del basalto il sostituto ideale alle fibre di acciaio, vetro e carbonio in molte applicazioni.

Sebbene studi approfonditi su questo materiale siano ancora abbastanza recenti, negli ultimi 10 anni numerose ricerche sono state avviate con l'obiettivo principale di definire le proprietà e il comportamento di queste fibre e dei compositi con esse realizzati, anche se, ovviamente, restano ancora vasti campi da investigare, soprattutto in merito alle possibili applicazioni.

Nella prima parte di questo capitolo si riporta la sintesi di un'approfondita attività di ricerca letteraria preliminare, volta alla definizione dello stato dell'arte inerente le fibre di basalto come rinforzo di materiali compositi.

Nella seconda parte del capitolo sono stati riportati, discussi e analizzati i risultati di una parte della vasta campagna sperimentale condotta presso il laboratorio del Cetma di Brindisi.

Sono stati realizzati dei provini di laminati a base di fibre di basalto, utilizzando diversi tipi di matrici commerciali, da organiche a inorganiche, e sono state condotte delle prove a trazione che hanno permesso di determinare la resistenza, il modulo elastico e la deformazione ultima.

I risultati delle prove hanno reso possibile non solo conoscere le caratteristiche meccaniche dei vari laminati, ma di mettere in luce anche i limiti di ciascuno.

## **3.2 Stato dell'arte sulle fibre di basalto**

In questi paragrafi sono state raccolte e rielaborate le informazioni, gli studi, i risultati più rilevanti raggiunti dalla comunità scientifica, negli ultimi anni, in merito alle fibre di basalto.

Quest'ultime sono state indagate con un approccio prevalentemente di confronto con le altre tipologie di fibre, dalle caratteristiche ormai ben note.

In particolar modo, la maggior parte delle campagne sperimentali condotte, hanno avuto come obiettivo quello di indagare circa la possibilità di sostituire le fibre di vetro con quelle di basalto.

Quello che emerge è che le fibre di basalto presentano caratteristiche meccaniche e costi simili a quelli delle fibre di vetro, ma, rispetto a queste, hanno un migliore comportamento alle alte temperature e resistenza alle aggressioni chimiche.

### **3.2.1 Natura e composizione chimica**

Le fibre di basalto sono fibre minerarie ottenute dal basalto, una roccia effusiva di origine vulcanica. Quest'ultima è formata principalmente da plagioclasio calcico e pirosseni, ma alcune possono essere anche ricche di olivina. Il basalto si forma in

seguito alla rapida solidificazione del magma a contatto con aria o acqua ed è la principale roccia costituente la parte superiore della crosta oceanica. Può presentarsi con aspetto che va dal porfirico al microcristallino al vetroso.



Figura 48 Esempio di cava e rocce di basalto

Per quanto riguarda la composizione chimica, prevalgono il biossido di silicio  $\text{SiO}_2$  con un contenuto intorno al 50% e l'ossido di alluminio  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Oltre a questi due composti principali vi sono anche  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and  $\text{FeO}$ , Tabella 9.

Componente	% in peso
$\text{Na}_2\text{O}$	1,65
$\text{MgO}$	5,45
$\text{Al}_2\text{O}_3$	12,95
$\text{SiO}_2$	50,33
$\text{K}_2\text{O}$	0,70
$\text{CaO}$	10,10
$\text{TiO}_2$	2,69
$\text{BaO}$	0,1
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	14,93
$\text{Mn}_3\text{O}_4$	0,41
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,36

Tabella 9 Composizione percentuale delle fibre di basalto

In particolar modo, il contenuto di  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{FeO}$  ha un ruolo molto importante perché determina alcune proprietà fisico-meccaniche come la densità (2,70 per il basalto contro i  $2,54 \text{ g/cm}^3$  del vetro E), il colore (dal marrone al verde opaco, a seconda del contenuto di  $\text{FeO}$ ), la bassa conduttività del calore e una buona stabilità termica.

La composizione chimica del basalto influenza notevolmente le proprietà delle fibre che quindi, a seconda della cava da cui è stato estratto il basalto, presentano caratteristiche differenti.

Jean-Marie Nolf, direttore della Basaltex R&D, una delle principali aziende produttrici di fibre di basalto in Europa, sostiene che nonostante la grande disponibilità di questa roccia nelle miniere e cave di tutto il mondo, solo una dozzina di queste presenta un basalto la cui composizione è stata analizzata e qualificata come idonea per la produzione di filamenti continui sottili. (Ross, 2010)

### **3.2.2 Processo produttivo**

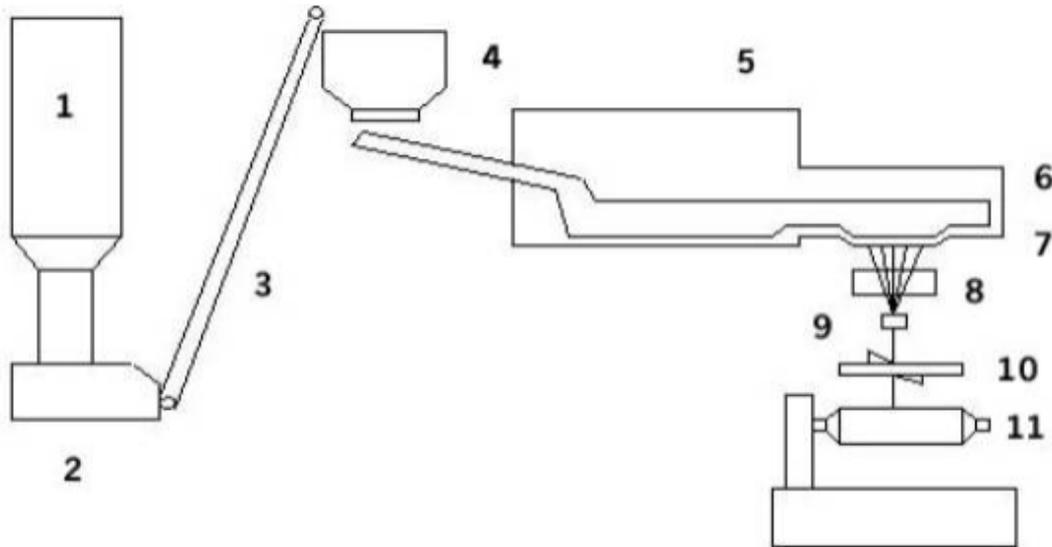
Le proprietà meccaniche delle fibre continue di basalto, oltre che dalla composizione chimica, sono influenzate anche dalle condizioni di stampaggio (temperatura di trafilatura, periodo di omogeneizzazione del fuso e diametro delle fibre). Per esempio, a parità di composizione chimica, un aumento della temperatura di trafilatura di 160°C (da 1220°C a 1380°C) aumenta la resistenza da 1,3 a 2,23 GPa e il modulo di elasticità da 78 a 90,3 GPa. (A. A. Dalinkevich, 2009)

Il primo ad avere l'idea di estrarre fibre dalle rocce di basalto è stato il francese Paul Dhé, idea che gli valse un brevetto (USA) nel 1923. Intorno poi al 1960, sia negli Stati Uniti che in Unione Sovietica (URSS) si è cominciato ad indagare sulle possibili applicazioni delle fibre di basalto, in particolare per attrezzature militari, come i missili. Oggi la maggior parte dei produttori di fibre di basalto si trovano in Russia e in Ucraina.

Il processo produttivo delle fibre di basalto è differente a seconda che si tratti di fibre corte e fibre continue.

Per quanto riguarda la produzione di fibre corte, le tecnologie più diffuse sono quelle melt-blowing, come il metodo Junkers. In questa tecnologia, la roccia di basalto fusa viene fatta colare su un insieme di cilindri rotanti in acciaio; il fuso viene poi soffiato fuori dal cilindro per effetto di getti d'aria grazie ai quali solidifica rapidamente sotto forma di fibre. Le caratteristiche del metodo di Junkers provocano la formazione delle così dette fiber heads, degli oggetti sferici aventi un diametro da 10 a 100 volte più grande del diametro della fibra. Sebbene molte di queste si spezzino durante il processo di produzione, le altre, principalmente le più piccole, rimangono all'estremità delle fibre, causando un deterioramento e una grande irregolarità delle caratteristiche meccaniche delle fibre.

Le fibre continue vengono prodotte, invece, attraverso lo spinneret method, per estrusione e stiratura di rocce di basalto selezionate (Figura 49).



**Figura 49** Schema semplificato di una linea di lavorazione delle fibre di basalto: 1) silos contenente il materiale grezzo, 2) dispositivo per pesatura, dosaggio e miscelatura, 3) rullo trasportatore, 4) dispositivo caricatore, 5) forno di fusione, 6) riscaldatori

I pezzi di roccia di basalto vengono fusi in contenitori di rodio-platino, inviati ad una filiera dello stesso materiale, filati per gravità attraverso gli ugelli della stessa ad una temperatura di 1350-1420°C e poi tirati da un rullo.

La fusione del basalto avviene in due fasi: nella fornace iniziale viene fuso, poi viene convogliato nella zona di riscaldamento secondario, dotata di un sistema di controllo preciso della temperatura.

La tecnologia di filatura è simile a quella delle fibre di vetro, anche se rispetto a questa vi sono alcune differenze significative.

Per alcuni aspetti la produzione del basalto è più semplice. Le fibre di basalto, infatti, hanno una composizione meno complessa rispetto a quelle di vetro, che sono generalmente ottenute attraverso la combinazione di un 50% di sabbia di silice e di ossidi di boro, alluminio e altri materiali, che però devono essere inviati ai forni di fusione in maniera indipendente mediante dei sistemi che ne permettono anche un controllo delle quantità. A differenza del vetro, per la produzione di fibre di basalto non sono necessari materiali secondari e quindi si ha un'unica linea di alimentazione che trasporta le rocce frantumate ai forni di fusione.

Le difficoltà insorgono proprio quando il basalto entra in quest'ultimi: a differenza del vetro, che è trasparente, questa roccia, essendo opaca, assorbe, piuttosto che trasmettere, energia infrarossa. Per questo motivo per i bruciatori a gas posti in sommità, utilizzati nei convenzionali forni per il vetro, risulta più difficile riscaldare in maniera uniforme l'intero cumolo di basalto. Utilizzando sistemi a gas che riscaldano dall'alto, per garantire una temperatura omogenea, il basalto fuso deve essere tenuto in dei reservoir per svariate ore (da qui appunto la necessità di una fusione a due fasi).

Per ovviare a questo problema, i produttori hanno impiegato numerose tecniche che permettono un'omogeneizzazione delle temperature, come ad esempio l'immersione di elettrodi nel fuso. Ihor Markuts, direttore delle vendite e marketing della Technobasalt, sostiene però che le compagnie preferiscono il riscaldamento a gas piuttosto che quello elettrico per motivi di qualità, sebbene i costi siano più elevati.

Come per le fibre di vetro, nella produzione di fibre di basalto si utilizzano delle boccole di rodio-platino. Poiché quest'ultime sono più abrasive rispetto al vetro, le costose boccole hanno bisogno di riparazioni più frequenti. Inoltre l'usura non uniforme dei fori cilindrici da cui escono i filamenti provoca un degrado del processo di controllo. Senza una manutenzione opportuna, la forma dei fori può variare fino a valori dei diametri troppo grandi, che producono roving con carichi di rottura non prevedibili. Mentre le boccole delle fibre di vetro durano 6 mesi o più prima di dover essere fuse, riformate e riformate, una boccia usata per la produzione di fibre di basalto dura dai 3 ai 5 mesi. Negli ultimi anni, però attraverso maggiori sforzi nel processo di controllo si è riusciti ad estendere la vita di queste boccole ad un ciclo di 6 mesi.

A causa di tutte queste difficoltà, il costo di produzione delle fibre di basalto supera quello delle fibre di vetro-E, anche se è importante sottolineare che le prestazioni sono di gran lunga migliori a confronto. Il rapporto qualità-prezzo delle fibre di basalto è, infatti, incomparabile con quello di tutte le altre fibre presenti in commercio.

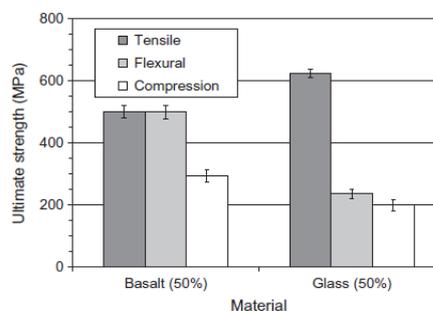
Infine, bisogna aggiungere che le tecnologie di produzione delle fibre continue di basalto sono ancora nella fase iniziale del loro sviluppo e che le loro prospettive reali sono enormi. Il grande interesse nei confronti delle potenzialità di questi materiali sta infatti incoraggiando numerosi investimenti volti al miglioramento delle attrezzature di produzione con obiettivo una diminuzione dei costi.

### 3.2.3 Proprietà meccaniche

Negli ultimi dieci anni, numerosi studi sono stati condotti allo scopo di determinare le caratteristiche delle fibre di basalto, soprattutto in un'ottica di confronto con le fibre di comune utilizzo, come carbonio e vetro, di cui sono ben note le proprietà.

Da queste indagini è emersa la possibilità di sostituire le fibre di vetro con quelle di basalto in molte applicazioni in cui i compositi di vetro sono largamente applicati.

In uno studio dell'Università di Napoli Federico II (V. Lopresto, 2010) sono state condotte prove meccaniche su laminati plastici rinforzati con fibre di basalto e di vetro E. Il confronto dei risultati ottenuti nei 2 laminati hanno mostrato un'elevata performance del basalto in termini di Modulo di Young, resistenza a compressione e flessione, energia e forza di impatto e un comportamento a trazione lievemente inferiore.



**Figura 50** Confronto della resistenza ultima a trazione, compressione e flessione tra compositi di fibre di basalto e di vetro-E

La prova della trave corta ha confermato quanto sopra detto attraverso la determinazione di un'aderenza interfacciale simile a quella tra vetro E e matrice epossidica.

In un articolo di (Czigány T., 2008) sono state studiate le proprietà meccaniche, statiche e dinamiche, e la microstruttura di compositi di polipropilene rinforzati con fibre di basalto, carbonio e vetro. Le proprietà meccaniche statiche sono state determinate con prove a trazione e a flessione, le proprietà meccaniche dinamiche con

un falling weight test e la microstruttura del composito è stata analizzata attraverso uno scanning electron microscope (SEM).

Ne è risultato che le proprietà meccaniche del composito con fibre di basalto sono simili a quelle del composito con fibre di vetro e, in alcuni casi addirittura, si avvicinano a quelle del laminato in fibre di carbonio. Questo studio ha messo in luce anche il fatto che il legame tra le fibre di basalto e il polipropilene non è molto forte e che quindi per sfruttare al meglio le proprietà di queste fibre sarebbe meglio utilizzare altri tipi di resina.

In un articolo di (Zhishen Wu, 2010) si è indagato il comportamento a fatica di vari compositi FRP: fibre di carbonio, di vetro, di PBO e di basalto. I risultati delle prove hanno mostrato che le proprietà meccaniche delle innovative fibre di PBO e di basalto sono comparabili a quelle delle convenzionali fibre di carbonio e di vetro.

### 3.2.4 Comportamento alle alte temperature

Una caratteristica che contraddistingue le fibre di basalto è il buonissimo comportamento alle alte temperature e resistenza al fuoco. Se esposti a quest'ultimo, la maggior parte degli FRP perde rapidamente le proprie capacità strutturali.

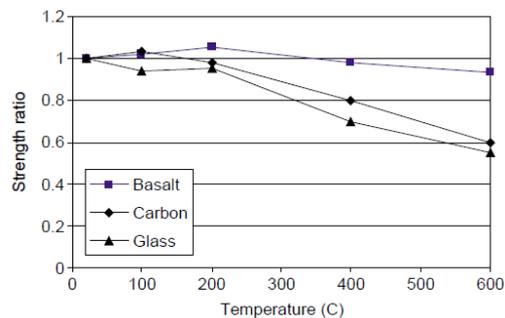
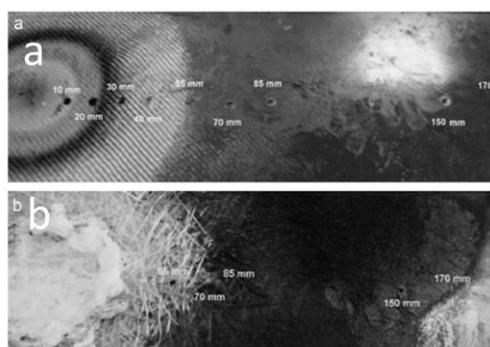


Figura 51 Variazione di resistenza in funzione della Temperatura

Le fibre di basalto, invece, essendo in grado di mantenere fino al 90% della propria resistenza originaria per temperature al di sotto dei 600°C, mostrano prestazioni superiori alle fibre tradizionali. (Jongsung Sim, 2005). Sono quindi ideali per quegli elementi a cui è richiesta una grande resistenza al fuoco, dato che, inoltre, emettono fumi meno velenosi.

Dal confronto della risposta al fuoco tra compositi realizzati con fibre di basalto e con fibre di vetro, si riscontra, nel caso del composito con basalto, una migliore risposta termica e una minore perdita di peso. Grazie, infatti, ad una minore conduttività termica e ad una maggiore inerzia termica, il composito con fibre di basalto rispetto a quelle di vetro mostra una maggiore integrità della superficie e una regione ad alta temperatura più piccola, (G. Landucci, 2009)



**Figura 52** Immagini ottenute dall'analisi termo-gravimetrica: (a) pannello con fibre in basalto; (b) pannello con fibre di vetro

Oltre ad essere buoni isolanti termici, queste fibre vengono utilizzate anche per pannelli acustici e posseggono un basso assorbimento di umidità (meno del 0,1% a temperatura ambiente con una umidità relativa pari al 65%)

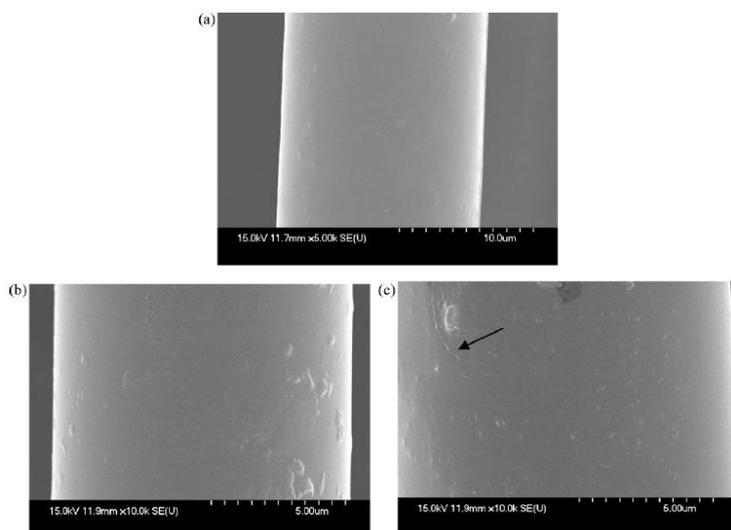
### **3.2.5 Resistenza chimica: comportamento in ambiente acido e alcalino**

Un altro importante aspetto, oggetto di numerosi studi, riguarda la valutazione della resistenza chimica delle fibre di basalto. Questa è stata determinata in funzione dei cambiamenti di resistenza in seguito a determinati intervalli di tempo di esposizione all'ambiente aggressivo (aging), alla natura aggressiva del mezzo (acida o alcalina) e alle condizioni tempo-temperatura a cui le fibre sono state soggette.

Le percentuali di silicio, alluminio, calcio, magnesio e ossido di ferro nella composizione del basalto hanno per questo aspetto un'importanza fondamentale; la presenza di ossidi di ferro, infatti, permette alle fibre di basalto di sviluppare una grande resistenza chimica e al calore.

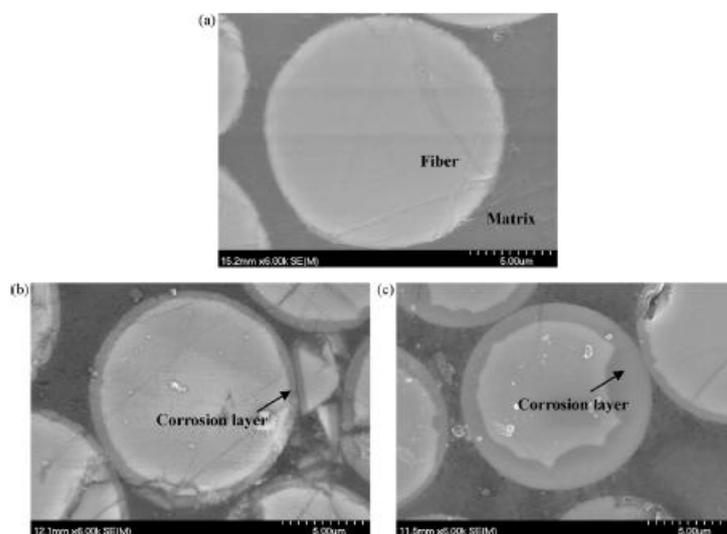
Oltre alla composizione chimica, nel caso di mezzi tensioattivi (alcali, alcune soluzioni saline,...), non sono trascurabili anche aspetti come le condizioni dello stato superficiale della fibra, ad esempio il livello di difettosità, e i processi termici subiti da questa.

Per quanto riguarda la risposta chimica in ambiente acido, le fibre di basalto mostrano una resistenza più grande delle fibre di vetro sia di tipo E che di tipo S. Si è visto infatti che quando le fibre di vetro vengono a contatto con acidi molto forti sulla superficie della fibra non si forma un film protettivo e gli acidi sono quindi in grado di trasformare rapidamente queste fibre in silice ad alta porosità, provocando fessurazioni locali (Figura 53).



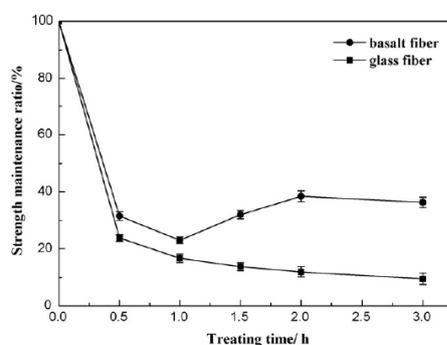
**Figura 53 Immagini SEM di fibre di vetro a) prima del trattamento, b) dopo 1 h di trattamento, c) dopo 3 ore di trattamento**

Al contrario, quando le fibre di basalto si trovano in un mezzo acido, sebbene inizialmente si abbia la formazione di evidenti fessure in direzione assiale alla fibra, con conseguente diminuzione della resistenza, già dopo poche ore di trattamento, le fessure risultano riempite dai prodotti delle reazioni chimiche. Si forma così un film protettivo che permette di ridurre l'attacco alle fibre e le conseguenti perdite di resistenza (Figura 54).



**Figura 54** Immagini Sem della sezione trasversale di fibre di basalto a) senza trattamento, b) dopo un'ora di trattamento, c) dopo 3 ore di trattamento

Analizzando la risposta a trazione (Figura 55) di fibre di basalto in mezzo acido, si è visto addirittura che a tratti in cui la resistenza diminuisce notevolmente seguono tratti in cui si ha un aumento di questa, dovuti proprio alla formazione di questo film protettivo (Bin Wei H. C., 2010).

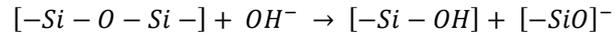


**Figura 55** Relazione resistenza residua-tempo di trattamento

Se si considera, invece, un mezzo alcalino, le fibre di basalto continuano a mostrare una resistenza molto più elevata rispetto a quella della maggior parte di fibre di vetro. Per questo motivo le fibre di basalto sono ritenute una valida soluzione per applicazioni di rinforzo in strutture in calcestruzzo (Ludovico, Prota, & Manfredi, 2010).

La corrosione in un mezzo alcalino è controllata principalmente dal dissoluzione del reticolo  $\text{SiO}_2$  e non dalla diffusione, come invece avviene nel caso di soluzioni

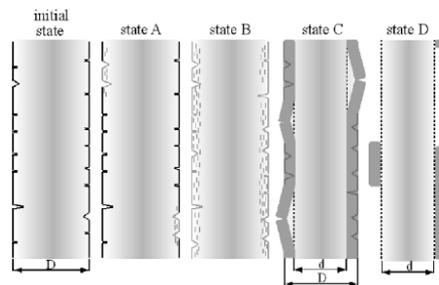
acide. Gli ioni idrossili della soluzione sciolgono i legami silossanici e, di conseguenza, i silicati migrano in soluzione:



La risposta delle fibre di basalto dipende da vari fattori, tra cui il tipo di soluzione alcalina, il diametro e le condizioni superficiali della fibra.

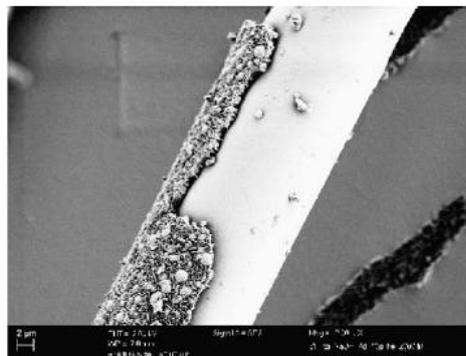
Si è visto, infatti, che il basalto in una soluzione di NaOH ha una risposta differente rispetto a quella che ha in una soluzione cementizia (C. Scheffler, 2009).

Nel primo caso l'attacco degli ioni OH<sup>-</sup> sui reticoli Si-O-Si inizia in pochi punti del filamento, concentrandosi soprattutto là dove sono presenti difetti.



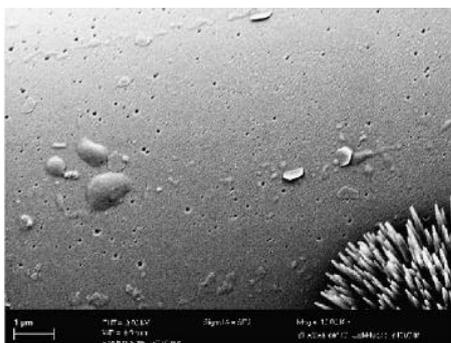
**Figura 56** Rappresentazione schematica del processo di corrosione in una soluzione di NaOH

Successivamente si forma un sottile strato corrosivo che ricopre l'intera superficie del filamento, strato che poi, in una terza fase, inizia a cadere fino a quando è quasi del tutto rimosso. Questo porta ad una diminuzione del diametro caratteristico della fibra e ad una conseguente diminuzione di resistenza della stessa.

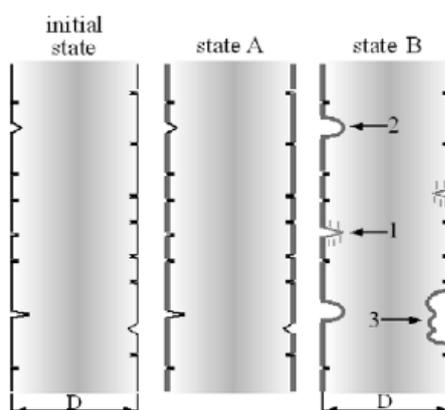


**Figura 57** Fibra di basalto in seguito ad un trattamento di 7 giorni a 40°C

Nel caso invece di fibra di basalto immersa in una soluzione cementizia, non si ha la formazione di uno strato corrosivo sulla superficie della fibra ma bensì di buchi di differente forma e profondità.



**Figura 58** Fibra di basalto in seguito ad un trattamento di 7 giorni a 40°C in soluzione cementizia



**Figura 59** Rappresentazione schematica del processo di corrosione in una soluzione cementizia

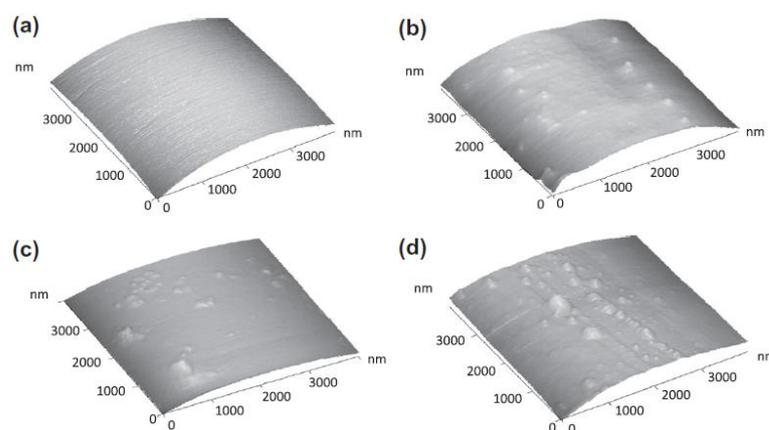
Oltre al tipo di soluzione alcalina, come si è detto in precedenza, il comportamento delle fibre di basalto dipende anche dal diametro e dalle condizioni superficiali delle fibre (A. A. Dalinkevich, 2009).

Questo è legato al fatto che la difettosità della fibra aumenta con il diametro per motivi legati alle tecnologie di produzione, e la presenza di molti difetti provoca un più rapido assorbimento delle sostanze aggressive e quindi un più rapido decadimento delle proprietà della fibra.

Un modo per poter ridurre la difettosità superficiale della fibra consiste nell'effettuare il sizing. Quest'ultimo consiste nell'applicazione di alcuni particolari sistemi multicomponenti acquosi (detti appunto agenti di sizing), che permettono non

solo di proteggere la superficie della fibra da danni meccanici ma anche di facilitare il processo di tessitura dei prodotti, l'adesione e l'impregnazione con la matrice, etc.

Numerosi studi hanno mostrato che le fibre di basalto modificate con concentrazioni ottimali di queste sostanze, mostrano una morfologia della superficie più ruvida (Figura 60), aumentano la resistenza a trazione e nei suoi compositi l'adesione tra strati, la ILSS (inter-layer shear strength), risulta migliorata.



**Figura 60 Immagini AFM della superficie delle fibre di basalto (a: non trattata; b: 2.5% SiO<sub>2</sub>; c: 5% SiO<sub>2</sub>; e d: 7.5% SiO<sub>2</sub>).**

Importante è il controllo della concentrazione poiché, se gli agenti di sizing fossero troppo elevati, si rischierebbe di formare sulla superficie delle fibre dei cluster, accumuli di particelle, (Bin Wei H. C., 2010) oppure uno spessore troppo grande dello strato di interfase che, essendo caratterizzato da resistenza meccanica bassa, provoca effetti negativi sulle proprietà meccaniche delle fibre.

### **3.2.6 Tipologie di prodotti commerciali**

Le fibre di basalto sono vendute sotto molteplici forme, molto diverse tra loro.

Oltre ai prodotti più comuni, che possono essere personalizzati secondo le richieste del cliente, ogni azienda ne mette in commercio di sempre più particolari: per questo, il basalto può ormai essere utilizzato in quasi ogni settore, con diverse tipologie di impiego.

Tra le più importanti distinguiamo:

- Wool. Sotto forma di "lana" può essere utilizzato così com'è, come isolante termico e acustico e come particolare sistema di filtrazione. Più comunemente è mantenuto insieme sotto forma di boards e sheets: queste ultime applicazioni sono molto utili quando viene utilizzato al posto dell'amianto nuovamente come isolante termico e acustico negli ambiti più svariati, dall'edilizia civile e industriale al campo meccanico come quello dei rivestimenti dei vani motore, passando per la protezione personale e la componentistica di sicurezza per gli elettrodomestici.



**Figura 61 Tessuto in lana basaltica (wool)**

- Roving. Il roving è una matassa continua di fibra. Due modi per utilizzare direttamente le matasse di fibre di basalto, suggerite dai produttori, possono essere lo stampaggio di compositi tramite poltrusione<sup>2</sup> (o "formatura a tiro") e filament winding<sup>3</sup> (o "formatura per avvolgimento di fili"): queste due tecniche innovative non prevedono l'impiego di una resina in particolare e questo evidenzia ancora una volta l'importanza del trattamento superficiale (o sizing) che il filo di basalto subisce durante la produzione

---

<sup>2</sup> La poltrusione dei materiali compositi è il processo produttivo normalmente impiegato nella produzione di canne, di articoli a sezione cava e di profilati vari. Strati continui di fibra rinforzata vengono impregnate con resina catalizzata e fatte poi passare attraverso una maschera di metallo riscaldata usando un apposito macchinario che "tira" il materiale composito. L'altra concentrazione di rinforzi in fibra garantisce l'alta resistenza del prodotto finito.

<sup>3</sup> Il filament winding è la tecnica produttiva preferita per la produzione di articoli di forma cilindrica come tubature, canaline e serbatoi. Strati continui di fibra vengono impregnati di resina catalizzata e avvolti attorno ad un mandrino rotante secondo uno schema deciso in ragione delle caratteristiche desiderate nel prodotto finale.

e che ne migliora la scorrevolezza e la bagnabilità specifica. Il filato è fornito quasi con ogni diametro e peso (tex<sup>4</sup>), secondo le più diverse necessità.



**Figura 62 Roving (matassa) di fibra basaltica**

- Chopped strand. Questa particolare forma di fibra tritata può essere utilizzata, secondo le indicazioni dei produttori, per applicazioni molto diverse tra loro: utilizzato con resina fenolica forma compositi adatti a sostituire materiale resistenti all'attrito (tamburi, dischi e pasticche dei freni, frizioni, ...); con speciali sizing possono essere utilizzati persino come rinforzo e alleggerimento di cementi e calcestruzzi anche in elevate percentuali; è impiegato dalle varie aziende anche per la produzione di mats e felts (stuoie e feltri) a loro volta usati come isolanti termici e acustici nell'edilizia al posto dei vecchi prodotti in amianto.

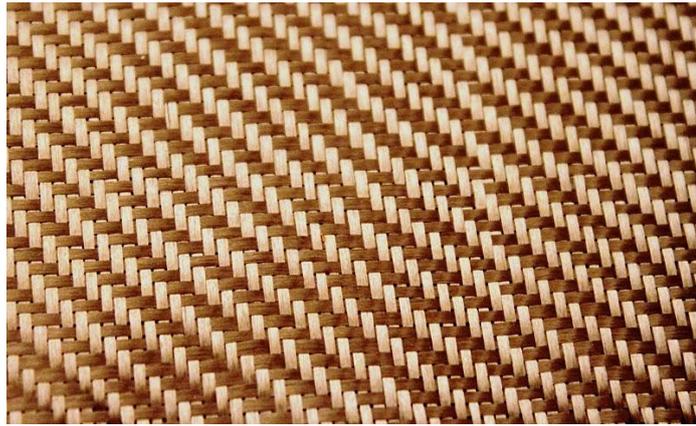
---

<sup>4</sup> Unità di misura per la densità lineare delle fibre pari alla massa espressa in grammi di 100 m di filo o di filato



**Figura 63 Chopped strands realizzati in fibra di basalto**

- Fabrics. Tra le forme commerciali più comuni e più interessanti si possono trovare le già viste fibre filate (roving o strand) tessute in forma di particolari stoffe e tele, utili soprattutto per la produzione di compositi dalle più svariate proprietà. La compatibilità, come già spiegato in precedenza, è garantita infatti con tutti i tipi di resine. Il tessuto è identificato da specifiche che richiamano quelle utilizzate nella definizione dei prodotti dell'industria tessile: di particolare importanza c'è la possibilità di avere la multiassialità per conferire specifiche caratteristiche politropiche strutturali o la possibilità di avere più strati di tipo diverso insieme (combined o stitched), come avviene nel caso della comune fibra di vetro (tessuto+mat, tessuto+chopped, tessuto+nonwoven, ...). In conclusione, si possono trovare tessuti veramente molto diversi tra loro a seconda del tipo di filo utilizzato o a seconda della tecnica di tessitura scelta. Proprio quest'ampia gamma di prodotti rende possibile il loro impiego nella costruzione di compositi secondo le metodologie e per gli scopi più vari, dalle pale per i generatori elettrici da energia eolica agli scafi di imbarcazioni di varia grandezza.



**Figura 64 Tessuti realizzati in fibra di basalto**

- Nonwoven. Di minor costo rispetto al precedente, questo tessuto non tessuto ha comunque eccellenti proprietà in un campo molto ampio di applicazioni. È prodotto da uno o più strati uniformi di chopped strand ed ha così il vantaggio che l'aria contenuta facilmente fuoriesce durante la produzione di compositi mediante laminazione. Ha ottima resistenza meccanica, termica e chimica e la consueta capacità di isolamento termico, elettrico e acustico; d'uso comune nel settore dei trasporti e della cantieristica.



**Figura 65 Lavorato di tipo nonwoven**

### **3.3 Attività sperimentale: caratterizzazione meccanica laminati in fibre di basalto.**

I paragrafi seguenti sono dedicati all'esposizione delle attività effettuate nel corso della prima parte della campagna sperimentale tenutasi presso i laboratori del Cetma di Brindisi.

Scopo di questa prima serie di prove è la caratterizzazione meccanica di materiali compositi fibrorinforzati a base di fibre di basalto.

Sono state eseguite prove di trazione uniassiale su laminati in fibre di basalto realizzati sia con matrice cementizia che con matrice organica.

A seguito dell'esecuzione delle prove, è stato possibile valutare la resistenza e deformazione ultima a rottura e il modulo a trazione di queste differenti tipologie di provini.

Infine, è stato compiuto un confronto tra i risultati ottenuti dai vari sistemi, che ha permesso di mettere in luce le principali differenze e, in particolar modo, soprattutto per i compositi a matrice inorganica che sono di uso abbastanza recente, evidenziarne i limiti e le criticità.

Il metodo di prova utilizzato è quello standard illustrato nella ASTM D 3039/D 3039M-00, il quale fornisce una procedura di prova per la determinazione delle proprietà meccaniche a trazione, nel piano, dei compositi a matrice polimerica, rinforzati con fibre ad alto modulo.

#### **3.3.1 Materiali**

Per la realizzazione dei provini sono stati utilizzati dei materiali forniti da aziende che collaborano con il Cetma: la Selcom per i tessuti in basalto, la Mapei per le matrici e la Fidia per tessuti e matrici

### 3.3.1.1 Le matrici

Come si è anticipato, i laminati a base di fibre di basalto sono stati realizzati utilizzando per l'impregnazione sia matrici organiche che inorganiche polimero modificate. In particolar modo, sono stati scelti i prodotti commerciali riportati in Tabella 10 :

<b>Matrici organiche</b>	<b>Matrici inorganiche polimero-modificate</b>
Mapewrap 31 (Mapei S.p.A.); Fidsaturant HM-T (Fidia);	Mapewrap 11 e Mapewrap12 (Mapei S.p.A.); Sikagard-720 EpoCem (Sika);

**Tabella 10 Matrici commerciali utilizzate nella campagna sperimentale**

Mapewrap 31 è un adesivo a base di resine epossidiche caratterizzato da una buona stabilità dimensionale, una buona resistenza chimica e all'umidità e buone proprietà di adesione. La sua temperatura di transizione vetrosa varia tra i 50°C e i 180°C a seconda delle condizioni di polimerizzazione (per polimerizzazione a temperatura ambiente è di circa 60°C).

<b>Proprietà meccaniche MapeWrap 31</b>	
Resistenza a trazione (ASTM D 638):	30 N/mm <sup>2</sup>
Allungamento a trazione (ASTM D 638):	1,2 %
Resistenza a compressione (ASTM C 579):	80 N/mm <sup>2</sup>
Resistenza a flessione (ISO 178):	70 N/mm <sup>2</sup>
Modulo elastico a compressione (ASTM C 579):	3000 N/mm <sup>2</sup>
Modulo elastico a flessione (ISO 178):	3800 N/mm <sup>2</sup>

**Tabella 11 Proprietà meccaniche MapeWrap 31**

La Fidsaturant HM-T della Fidia è un prodotto da impregnazione bicomponente, senza solventi, a base di resina epossidica.

È ideale per l'impregnazione con la tecnica manual lay-up di tessuti in acciaio per il rinforzo e consolidamento di strutture in CA, CAP, muratura, legno ed acciaio.

Caratteristiche della resina miscelata			Caratteristiche della resina reticolata	
Tempo di lavorabilità [min]	35°C	15		a 5 gg a 22°C
Tempo di gelo [min] Picco esotermico	20°C Temp	50	Temperatura di transizione vetrosa [°C]	65
		160	Modulo di elasticità a trazione [GPa]	2,5
Tempo di completa reticolazione [h]	20°C	15	Resistenza a trazione [MPa]	70
			Deformazione a rottura [%]	6,0

**Tabella 12 Proprietà Fidsaturant HM-T**

Mapewrap 11 e Mapewrap 12 sono degli stucchi epossidici a consistenza tissotropica utilizzati generalmente per l'incollaggio di tessuti in fibra di carbonio, aramidici e di vetro.

Proprietà meccaniche Mapewrap 11-12	
Resistenza a trazione (ASTM D 638):	30 N/mm <sup>2</sup>
Allungamento a trazione (ASTM D 638):	1 %
Resistenza a compressione (ASTM C 579):	70 N/mm <sup>2</sup>
Resistenza a flessione (ISO 178):	40 N/mm <sup>2</sup>
Modulo elastico a compressione (ASTM C 579):	8000 N/mm <sup>2</sup>
Modulo elastico a flessione (ISO 178):	4000 N/mm <sup>2</sup>

**Tabella 13 Proprietà meccaniche Mapewrap 11-12**

Sikagard-720 EpoCem è una malta fine tixotropica a 3 componenti a base di leganti cementizi e resine epossidiche in dispersione acquosa, generalmente utilizzata per il livellamento e la finitura di superfici in calcestruzzo, malta e pietra.

Proprietà meccaniche Sikagard-720 EpoCem	
Resistenza alla compressione (EN 12190)	47,5 N/mm <sup>2</sup>
Forza di adesione (EN 1542)	3 N/mm <sup>2</sup>
Modulo elastico (EN 13412)	>22 GPa

Resistenza alla flessione-trazione (SIA 162/1)	6,4 N/mm <sup>2</sup>
--	-----------------------

**Tabella 14 Proprietà meccaniche Sikagard-720 EpoCem**

Le malte cementizie scelte per questa serie di prove sono tutte malte cementizie polimero modificate. Infatti, uno degli aspetti più critici delle matrici cementizie è dato dall'elevata viscosità che le caratterizza e che impedisce di realizzare una buona impregnazione delle fibre. Con l'aggiunta di una componente polimerica si riesce, però, a migliorare la lavorabilità della malta che, assumendo così una consistenza tissotropica, risulta più idonea per la realizzazione di laminati con fibre.

### **3.3.1.2 I tessuti**

I tessuti utilizzati per la realizzazione dei provini sono di due tipi:

- tessuto unidirezionale, avente grammatura di 300 g/m<sup>2</sup>, realizzato dalla Selcom;
- un tessuto unidirezionale, Fidbasalt Unidir 400 C95, prodotto da Fidia.



**Figura 66 Fidbasalt Unidir 400 C95**

Quest'ultimo è caratterizzato da una grammatura di 400 g/m<sup>2</sup> e un modulo elastico a trazione di 95 GPa. Ulteriori caratteristiche tecniche sono illustrate nella Tabella 15.

<b>Proprietà geometriche e meccaniche</b>		
<b>Fibra secca (singolo filamento)</b>		
Tensione caratteristica a trazione, $\sigma_{fibra}$	3080	MPa
Modulo Elastico, $E_{fibra}$	95	GPa
Deformazione a rottura, $\varepsilon_{fibra}$	3,15	%
Densità	2,8	g/cm <sup>3</sup>
<b>Tessuto impregnato</b>		
Titolo filato	1200	Tex
N° fili/cm	3,3	Fili/cm
Massa	396	g/m <sup>2</sup>
Spessore equivalente del rinforzo FRP, $t_f$	0,140	mm
Resistenza caratteristica del rinforzo FRP, $f_{fk}$	1900	MPa
Modulo di elasticità normale del rinforzo FRP, $E_f$	90	GPa
Deformazione a rottura del rinforzo FRP, $\varepsilon_f$	2,11	%

**Tabella 15 Proprietà geometriche e meccaniche FIDBASALT UNIDIR 400 C95**

I tessuti sono termosaldato con fili di poliestere per evitare sfilacciamenti e facilitarne la posa.

### **3.3.2 Preparazione dei provini: metodo Hand Lay-up**

I laminati sono stati tutti realizzati attraverso il procedimento di stratificazione manuale, Hand Lay-up. Questo metodo, in virtù della sua semplicità e della sua economicità, risulta essere il più utilizzato.

Per la preparazione dei laminati con matrice epossidica, il metodo prevede le seguenti fasi.

Si prende uno stampo, che può essere in legno, gesso, vetroresina o metallo, e, dopo averlo trattato con agenti antiaderenti, che impediscono l'adesione del pezzo allo stampo stesso, vi si distribuisce sopra, con un pennello, un primo strato di resina.

Nel nostro caso, è stata utilizzato come supporto una piastra metallica su cui è stato precedentemente disposto un foglio di mylar per permettere successivamente il distacco del campione.

Vengono poi applicati strati di fibre continue alternativamente a strati di resina, fino ad ottenere lo spessore e il numero di strati desiderati.

Nel disporre le fibre ci si serve di un rullo frangibolle che serve sia per migliorare l'impregnazione delle stesse con la resina, ma anche per evitare la formazione di bolle d'aria che influirebbero sulla qualità del prodotto finale.

In Figura 67 si riportano le fasi principali di realizzazione del laminato con matrice Fidsaturant HM-T.



**Figura 67** Preparazione laminato con matrice epossidica Fidsaturant: in successione, preparazione resina e deposizione primo strato, posizionamento del tessuto, rullaggio, deposizione ultimo strato di resina

Per la preparazione dei laminati con matrice cementizia, servendosi di una cazzuola, si spalma il primo strato di matrice sul supporto, cercando di farlo il più uniforme possibile, e poi si applica il tessuto. Con le mani è necessario premere il tessuto sulla matrice, cercando di impregnare bene le fibre, che devono essere, infine, rivestite con un ultimo sottile strato di malta.



**Figura 68 Preparazione composito in matrice Sikagard-720**

La realizzazione dei laminati con matrice cementizia è risultata la più complicata. Sebbene la preparazione dell'impasto sia più semplice e meno dannosa per la salute umana, (a differenza delle resine organiche, le malte cementizie sono prodotti atossici), a causa della loro grande viscosità, è più difficile realizzare una soddisfacente impregnazione del tessuto garantendo l'avvolgimento delle fibre non superficiali e cercando di limitare gli spessori (la norma che regola la prova prevede 1 mm di spessore per i laminati).

Una volta realizzati, i laminati sono stati lasciati ad indurire a temperatura ambiente per i tempi previsti dalle rispettive schede tecniche.

Ad indurimento ultimato, i provini sono stati tagliati secondo i requisiti e le raccomandazioni di forma e dimensioni riportati nella norma (Tabella 16), ossia in rettangoli di 250x15 mm.

Fiber Orientation	Width, mm [in.]	Overall Length, mm [in.]	Thickness, mm [in.]	Tab Length, mm [in.]	Tab Thickness, mm [in.]	Tab Bevel Angle, °
0° unidirectional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]	58 [2.25]	1.5 [0.062]	7 or 90
90° unidirectional	25 [1.0]	175 [7.0]	2.0 [0.080]	25 [1.0]	1.5 [0.062]	90
balanced and symmetric	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—
random-discontinuous	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—

**Tabella 16 Raccomandazioni sulla geometria dei provini**

Sono state ottenute 4 tipologie differenti di provini, come illustrato in Tabella 17.

N. tot provini	Campione	Fibra	Matrice
7	EBU	Unidirezionale Selcom	Mapewrap 31
5	EFU	Fidbasalt Unidir	Fidsaturant HM-T
5	UBM	Unidirezionale Selcom	Mapewrap 11-12
5	UBS	Unidirezionale Selcom	Sikegard-720

**Tabella 17 Schema dei provini realizzati**

Ogni serie di campioni è stata contraddistinta da una sigla, seguendo la seguente terminologia:

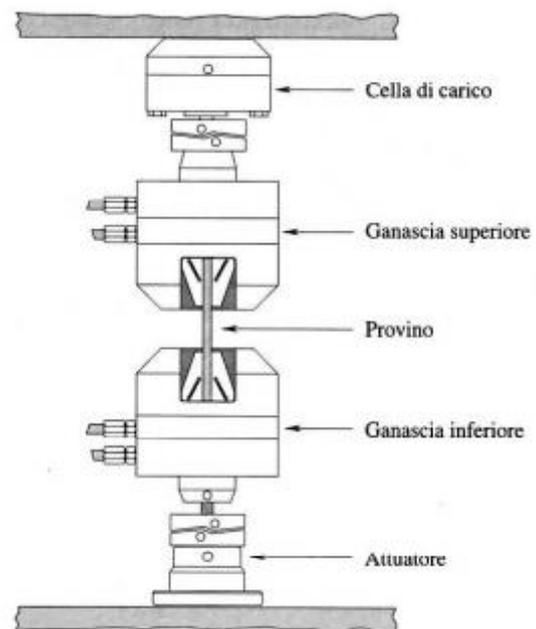
- EBU: Unidirezionali Basalto Epossidica;
- EFU: Unidirezionali Fidbasalt Unidir Epossidica
- UBM: Unidirezionali Basalto Mapewrap 11-12;
- UBS: Unidirezionali Basalto Sikegard-720;

La differenza tra UBM e UML è che nel realizzare i provini UML si è utilizzato, in fase di impregnazione, un rullo liscio.

### 3.3.3 Esecuzione della prova

I provini sono stati sottoposti ad una prova di trazione attraverso una macchina di prova universale MTS Insight, con cella di carico da 100 kN. La prova consiste nell'applicare un carico di trazione monotono lungo l'asse longitudinale di un provino di forma rettangolare. Si realizza così nella zona del provino lontana dalle ganasce (o afferraggi, morse, grips) uno stato di tensione prettamente monoassiale.

Dalla misura del carico mediante celle di carico e della deformazione mediante estensimetri o estensimetri, applicati nella zona centrale del provino (gauge area), si ricavano i valori per la costruzione del diagramma.



**Figura 69** Macchina utilizzata per la prova a trazione

Le estremità dei provini sono state rivestite con uno strato di carta vetrata, con il lato ruvido rivolto verso il provino. In questo modo non si danneggia la superficie dei provini durante il serraggio e si limita lo slittamento del provino agli afferraggi durante l'applicazione del carico.

Infine i provini sono stati inseriti nella macchina in modo che i loro assi longitudinali fossero allineati con la direzione del carico.

Le misure delle deformazioni è avvenuta attraverso un estensometro collegato al computer, Figura 70.

Tutte le prove di trazione sono state condotte imponendo una deformazione pari a 2mm/min



Figura 70 Estensometro utilizzato per la misura delle deformazioni

La norma prevede un minimo di 5 provini da testare per ogni tipo di laminato.

Una volta ultimata la prova sono stati annotati il tipo e la posizione di rottura scegliendo una descrizione standard che utilizza tre parametri, visualizzati in un codice a tre lettere: la prima indica il tipo di rottura, la seconda l'area di rottura, la terza la posizione della rottura, come mostrato in Figura 71.

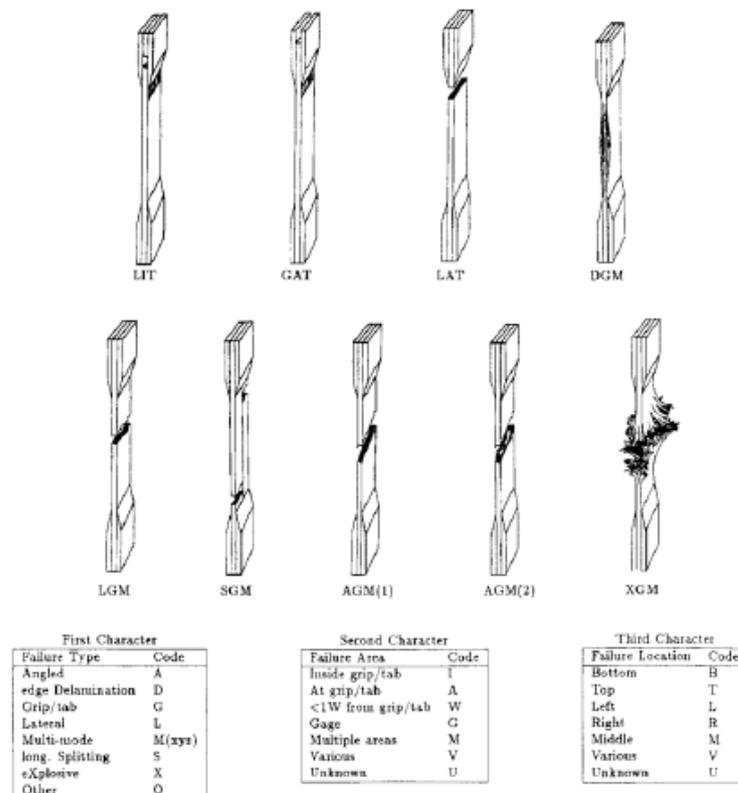


Figura 71 Codici identificativi delle modalità di rottura per trazione.

### 3.3.4 Risultati

Come si è detto in precedenza, la strumentazione utilizzata nella prova, registrando il valore del carico e delle deformazioni, ha permesso di ottenere le informazioni necessarie per la costruzione del diagramma tensione-deformazione, dal cui studio è stato possibile, poi, ricavare il valore di importanti parametri, come, ad esempio, il modulo di elasticità. Quest'ultimo è stato ottenuto, come stabilito da norma, selezionando un range di deformazioni opportuno, nel nostro caso da 0,003 a 0,005, e usando la seguente espressione:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Dove:

E è il modulo di elasticità a trazione;

$\Delta\sigma$  è la differenza di tensione applicata tra i due punti a deformazione 0,003 e 0,005;

$\Delta\varepsilon$  è la differenza di deformazione tra 0,003 e 0,005.

Di seguito sono riportati e discussi i risultati delle prove: una prima analisi è stata condotta all'interno di ciascuna tipologia al fine di stabilire la "migliore" prestazione in relazione al comportamento meccanico esibito, successivamente si è proceduto ad un confronto tra i risultati migliori per esprimere un giudizio complessivo tra le varie tecnologie.

#### 3.3.4.1 Provini a matrice organica: EBU e EFU

Dalle prove a trazione condotte sui provini a matrice epossidica, EBU, si può notare una buona ripetitività dei risultati. I coefficienti di variazione si mantengono infatti tutti al di sotto del 10% ed il valore massimo si ha per i valori di tensione. Essendovi infatti differenze di area tra provini, coerentemente, là dove queste sono più piccole, EBU02 e EBU03, si hanno valori di tensione sensibilmente maggiori.

La tensione massima media è di 329,31 MPa, il modulo medio è di 13,53 GPa e la deformazione ultima media pari 2,67%, valore molto buono dal punto di vista della duttilità.

Provino	A [mm <sup>2</sup> ]	P <sub>max</sub> [N]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\epsilon_u$ [%]	Modulo [GPa]
EBU01	12,58	4227,37	336,09	2,80	13,24
EBU02	10,72	3917,42	365,43	2,70	15,16
EBU03	11,99	4271,18	356,18	2,75	14,25
EBU04	12,17	3681,95	302,56	2,47	13,19
EBU05	12,69	3653,99	287,84	2,49	12,62
EBU06	12,01	3818,15	317,80	2,67	13,07
EBU07	12,43	4216,51	339,31	2,80	13,21
Media		3969,51	329,31	2,67	13,53
Dev Std		266,57	28,11	0,14	0,87
Coeff var [%]		6,72%	8,54%	5,22%	6,40%

**Tabella 18 Risultati prova a trazione di EBU**

Per quanto riguarda i provini della serie EFU, i risultati ottenuti, a prima vista, sembrerebbero non del tutto soddisfacenti, infatti, sia il valore della tensione a rottura che quello del modulo sono abbastanza bassi e in generale sono abbastanza dispersi. Questo fatto si verifica perché nel calcolo della tensione si è considerata l'area della sezione trasversale del provino che risulta più del doppio rispetto a quella misurata per i provini EBU.

Provino	A [mm <sup>2</sup> ]	P <sub>max</sub> [N]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\epsilon_u$ [%]	Modulo [GPa]
EFU01	31,33	6173,09	197,04	2,86	7,84
EFU02	28,61	6026,59	210,65	2,96	8,04
EFU03	29,58	6053,41	204,67	2,90	7,99
EFU04	33,99	5476,02	161,11	2,36	7,61
EFU05	31,72	5640,03	177,83	2,58	7,54
Media		5873,83	190,26	2,73	7,80
Dev Std		299,19	20,46	0,25	0,22
Coeff var [%]		5,09%	10,75%	9,22%	2,85%

**Tabella 19 Risultati prove a trazione EFU**

Per poter ottenere dei valori più confrontabili, quello che si può fare è ricondursi alla sola sezione trasversale del tessuto. Così facendo, si ipotizza che la matrice non

contribuisca a livello tensionale a sopportare il carico, ma che abbia solo la funzione di trasferire i carichi alle fibre, l'unico elemento resistente del sistema.

Nota lo spessore del tessuto secco, che da scheda tecnica è di 0,14 mm, vengono ricalcolati di seguito tutti i valori delle grandezze in esame (Tabella 20).

Provino	A [mm <sup>2</sup> ]	P <sub>max</sub> [N]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\epsilon_u$ [%]	Modulo [GPa]
EFU01	2,36	6173,09	2619,42	2,86	104,17
EFU02	2,29	6026,59	2636,61	2,96	100,58
EFU03	2,36	6053,41	2561,03	2,90	100,02
EFU04	2,34	5476,02	2337,52	2,36	110,42
EFU05	2,39	5640,03	2358,66	2,58	100,00
Media		5873,83	2502,65	2,73	103,04
Dev Std		299,19	144,04	0,25	4,48
Coeff var [%]		5,09%	5,76%	9,22%	4,34%

**Tabella 20 Risultati prove a trazione EFU calcolati su tessuto secco**

Ci si accorge subito che con questa interpretazione i valori sono molto buoni, infatti la dispersività si abbatte, solo quella relativa alle deformazioni ultime rimane lievemente più alta, e in ogni caso i valori ottenuti indicano una grande rigidità del laminato e una grande capacità in termini di resistenza ultima.

In particolar modo, i valori di resistenza ultima e modulo elastico sono più alti rispetto a quelli riportati nella scheda tecnica: la resistenza ultima media, 2502.65 MPa, è di un 30% più grande (il valore nella scheda è, però, un valore caratteristico), mentre il modulo elastico medio vale 103 GPa contro i 90 GPa della scheda tecnica.

Nella Tabella 21 sono riportati i risultati ottenuti dai provini della serie EBU calcolati sul tessuto secco.

Provino	A [mm <sup>2</sup> ]	P <sub>max</sub> [N]	σ <sub>max</sub> [MPa]	ε <sub>u</sub> [%]	Modulo [GPa]
EBU01	2,17	4227,37	1947,68	2,80	76,69
EBU02	2,17	3917,42	1807,98	2,70	74,99
EBU03	2,17	4271,18	1965,75	2,75	78,65
EBU04	2,17	3681,95	1697,85	2,47	74,03
EBU05	2,19	3653,99	1672,00	2,49	73,33
EBU06	2,16	3818,15	1766,74	2,67	72,67
EBU07	2,16	4216,51	1949,38	2,80	75,87
Media		3969,51	1829,62	2,67	75,18
Dev Std		266,57	124,79	0,14	2,08
Coeff var [%]		6,72%	6,82%	5,22%	2,76%

Tabella 21 Risultati prove a trazione EBU calcolati su tessuto secco

Confrontando i valori medi dei risultati dei due sistemi, si vede subito come i provini EFU presentino caratteristiche meccaniche, in termini di resistenza ultima e rigidità, migliori rispetto ai provini EBU (Tabella 22).

	P <sub>max</sub> [N]	σ <sub>max</sub> [MPa]	ε <sub>u</sub> [%]	Modulo [GPa]
EFU	5873,82	2502,64	2,73	103,03
EBU	3969,51	1829,62	2,66	75,17
Vantaggio EFU su EBU	48%	37%	2%	37%

Tabella 22 Confronto risultati EFU/EBU

Una volta rielaborati i risultati ottenuti dalla prova, è possibile costruire il diagramma tensione-deformazione. Questo, per i compositi unidirezionali in matrice epossidica, con fibre parallele alla direzione del carico, è caratterizzato da un andamento lineare fino al punto di tensione massima, oltre il quale il provino si rompe (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

Nel caso di EBU05 è possibile notare, in prossimità della tensione massima, una diminuzione improvvisa della tensione dovuta, probabilmente, alla rottura di qualche fibra, a cui, comunque, segue un tratto lineare avente la stessa pendenza del tratto precedente. Se da un punto di vista teorico, infatti, viene assunto che tutte le fibre abbiano la stessa resistenza e che il composito si rompa immediatamente dopo la rottura delle fibre, nella pratica, la resistenza delle fibre non è un unico valore ma segue una distribuzione statistica. Quello che succede è quindi che alcune fibre si rompano in

corrispondenza di livelli tensionali inferiori ma poichè le altre fibre si fanno carico di stress maggiori, il sistema non cede simultaneamente.

Dal diagramma è possibile visualizzare chiaramente come i provini EFU presentino una rigidità maggiore rispetto a quelli EBU.

Per quanto riguarda i meccanismi di rottura, i provini si sono rotti tutti per crisi a trazione delle fibre, accompagnata da uno splitting longitudinale (distacco nell'interfaccia fibre/matrice) parallelo alla direzione delle fibre. Questo provoca un tipico aspetto a spazzola nella zona di rottura.

Provino	Meccanismo di crisi
EBU01	SGB
EBU02	SGM
EBU03	SGT
EBU04	SGM
EBU05	SGT
EBU06	SGT
EBU07	SGM

Tabella 23 Meccanismi di rottura provini EBU

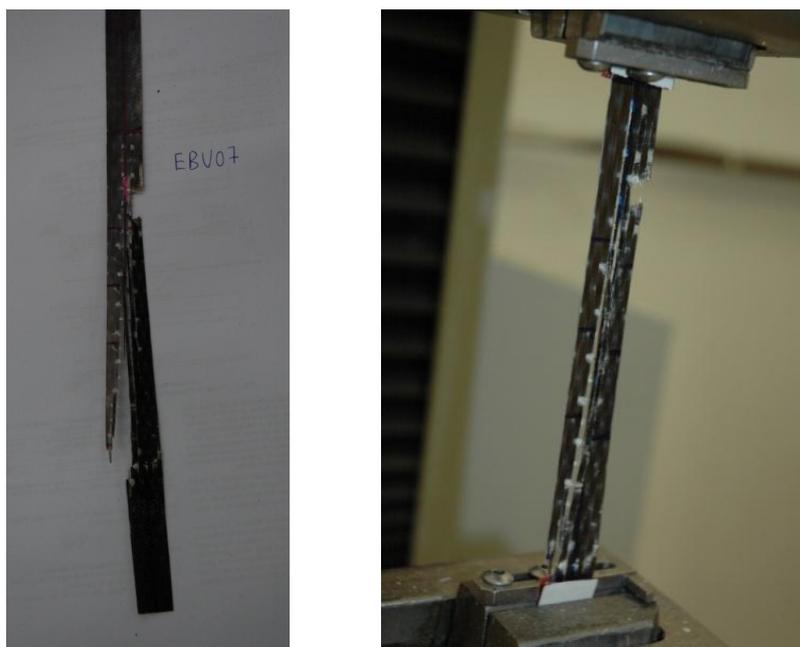


Figura 72 Tipica rottura di provini di EBU

Provino	Meccanismo di crisi
EFU01	AAT
EFU02	SGM
EFU03	SGM
EFU04	SGM
EFU05	SAT

Tabella 24 Meccanismi di rottura provini EFU



Figura 73 Tipica rottura di provini di EFU

### 3.3.4.2 Provini a matrice inorganica

I risultati ottenuti dai provini a matrice inorganica sono abbastanza vari in quanto le prestazioni fornite dalle due matrici sono molto differenti.

I campioni della serie UBM, realizzati con la malta Mapewrap 11-12, presentano risultati abbastanza buoni, ma, anche in questo caso, a causa della maggiore difficoltà di realizzazione, i provini hanno una sezione trasversale abbastanza disuniforme. Questo fatto provoca una certa variabilità nei valori di resistenza (Tabella 25).

Provino	A [mm <sup>2</sup> ]	P <sub>max</sub> [N]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\epsilon_u$ [%]	Modulo [GPa]
UBM01	35,70	3281,37	91,90	2,32	6,23
UBM02	36,69	3053,91	83,23	2,12	6,09
UBM03	29,36	3178,63	108,25	2,29	7,08
UBM04	30,59	3097,2	101,24	2,20	7,26
UBM05	34,04	3141,72	92,28	2,24	6,39
Media		3150,57	95,38	2,23	6,61
Dev Std		86,84	9,61	0,08	0,52
Coeff var [%]		2,76%	10,07%	3,56%	7,93%

**Tabella 25 Risultati prova a trazione provini di UBM**

Anche in questo caso, è più opportuno rielaborare i parametri riconducendosi al tessuto secco (Tabella 26).

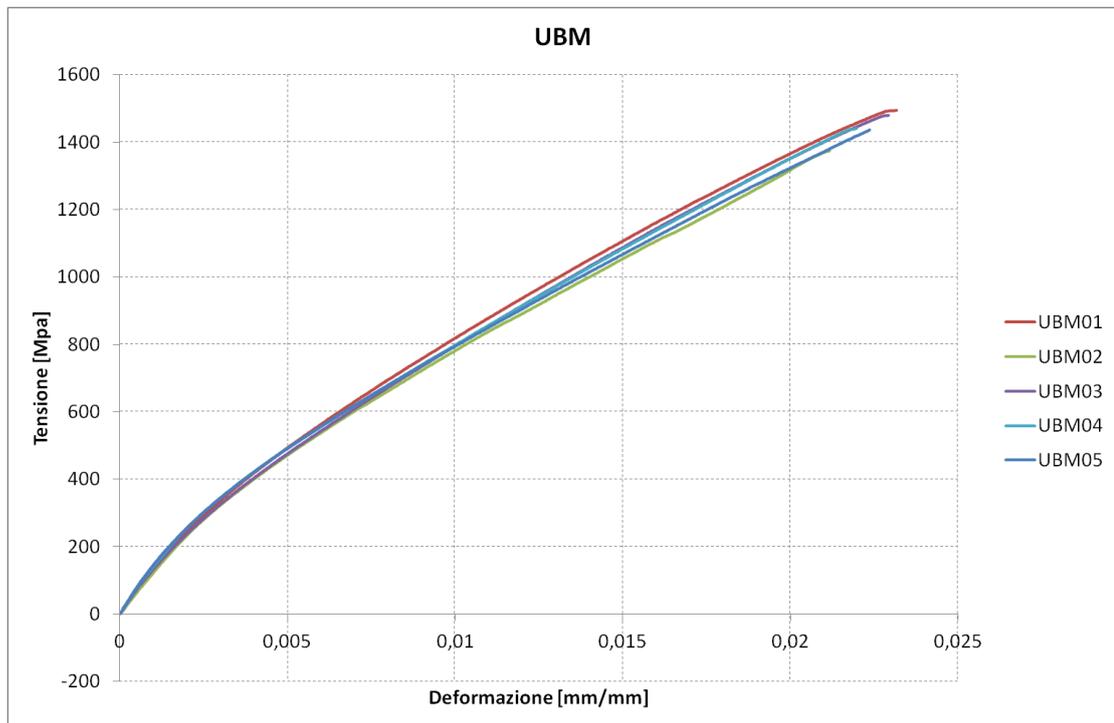
Provino	A [mm <sup>2</sup> ]	P <sub>max</sub> [N]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\epsilon_u$ [%]	Modulo [GPa]
UBM01	2,19	3281,37	1495,43	2,32	101,43
UBM02	2,22	3053,91	1375,10	2,12	100,76
UBM03	2,15	3178,63	1479,76	2,29	96,866
UBM04	2,15	3097,2	1441,23	2,20	103,359
UBM05	2,19	3141,72	1437,29	2,24	99,571
Media		3150,57	1445,76	2,23	100,40
Dev Std		86,84	46,66	0,08	2,40
Coeff var [%]		2,76%	3,23%	3,56%	2,39%

**Tabella 26 Risultati riferiti allo spessore del tessuto secco dei provini di UBM**

Con questa interpretazione dei risultati, si vede come il coefficiente di variabilità si abbatta, mantenendosi al di sotto del 3,56%. Le tensioni raggiungono il valore massimo di 1495,43 MPa e medio di 1445,76 MPa e soprattutto il modulo di elasticità medio è paragonabile a quello calcolato per i provini EFU.

Per quanto riguarda l'andamento del diagramma tensione-deformazione, esso si differenzia molto da quello ottenuto con i provini con matrice epossidica. Il tratto lineare fino a rottura ora è sostituito da una curva bilineare: si ha un primo tratto caratterizzato da una elevata rigidità, fino a valori della deformazione dell'ordine del 0,2%, a cui segue un tratto caratterizzato da una diminuzione della pendenza e quindi del modulo, che termina con il raggiungimento del punto di rottura.

Come si nota dal diagramma riportato in Figura 74, tutti e cinque i provini hanno esibito un comportamento analogo.



**Figura 74 Diagramma tensione-deformazione per UBM**

La crisi avviene per rottura a trazione delle fibre e avviene quasi sempre nella zona centrale del provino (gage area).



Figura 75 A destra provini UBM, a sinistra UML

I provini realizzati con matrice Sikagard-720 Epocem hanno fornito risultati non buoni. Tutti i valori sono caratterizzati da una grande dispersione essendo il coefficiente di variazione di tutte le grandezze intorno al 20%. Inoltre l'affidabilità dei valori misurati dall'estensometro non è elevata, in quanto.

Provino	A [mm <sup>2</sup> ]	P <sub>max</sub> [N]	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\epsilon_u$ [%]	Modulo [GPa]
UBS01	22,03	1126,16	51,12	0,83%	6,15
UBS02	21,81	759,94	34,85	1,13%	3,76
UBS03	23,64	1346,61	56,96	1,32%	4,79
UBS04	22,35	1298,59	58,11	1,07%	5,48
UBS05	22,56	1461,03	64,76	1,44%	5,27
Media		1198,47	53,16	1,16%	5,09
Dev Std		273,15	11,33	0,24%	0,89
Coeff var [%]		22,79%	21,31%	20,56%	17,50%

Tabella 27 Risultati prova a trazione UBS

I valori sono molto dispersi e anche abbastanza bassi. Si è cercato di migliorare i risultati calcolandosi le grandezze con riferimento al tessuto secco (Tabella 28), proprio perché, difetti nella realizzazione dei provini, hanno portato ad avere spessori molto vari, talvolta maggiori ai 2 mm, che possono aver causato una grande dispersività dei risultati.

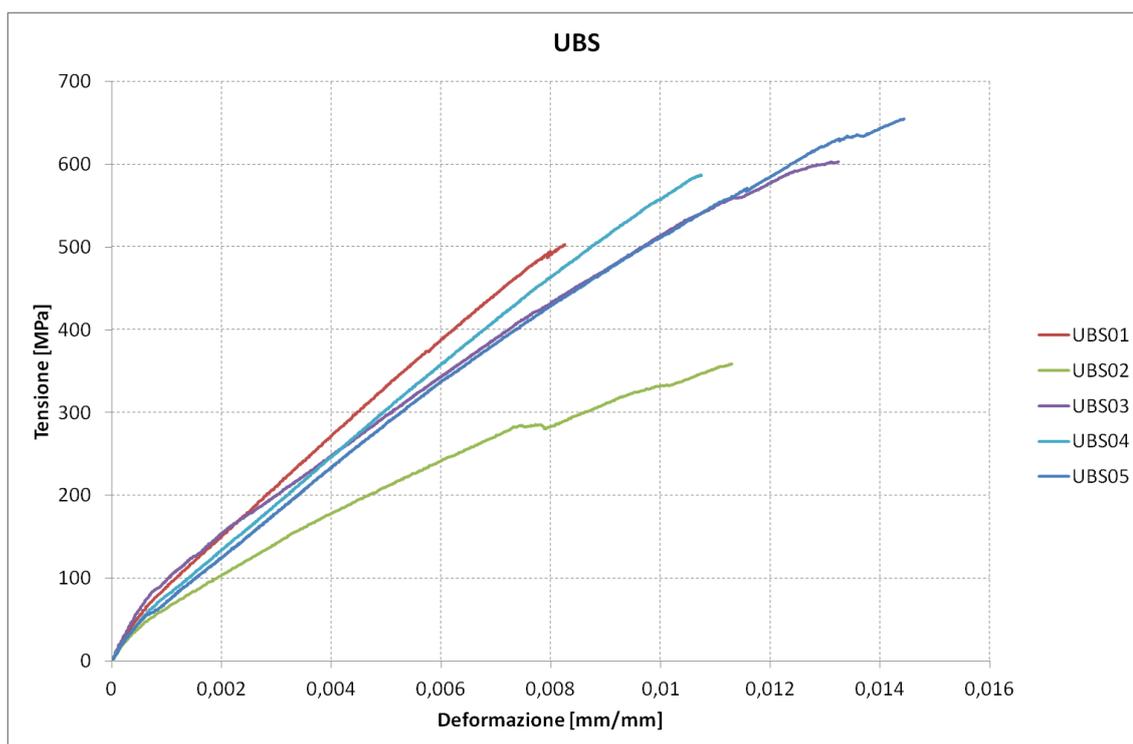
Provino	A [mm <sup>2</sup> ]	P <sub>max</sub> [N]	$\sigma_{\max}$ [MPa]	$\epsilon_u$ [%]	Modulo [GPa]
UBS01	2,24	1126,16	503,27	0,83%	60,57
UBS02	2,12	759,94	358,77	1,13%	38,72
UBS03	2,23	1346,61	602,80	1,32%	50,66
UBS04	2,21	1298,59	587,31	1,07%	55,41
UBS05	2,23	1461,03	654,84	1,44%	53,33
Media		1198,47	541,40	1,16%	51,74
Dev Std		273,15	115,71	0,24%	8,13
Coeff var [%]		22,79%	21,37%	20,56%	15,72%

**Tabella 28 Risultati UBS riferiti al tessuto secco**

Anche con questa rielaborazione, però, si vede come il coefficiente di variazione si mantenga comunque alto. Inoltre, i risultati ottenuti in termini numerici restano ancora insoddisfacenti, in quanto il valore medio del carico massimo che i provini riescono a sopportare è di 1198,47 MPa.

Alla base di queste performance negative, vi è la non adeguatezza della matrice, dalla consistenza troppo viscosa e dalla dimensione dei grani troppo grande, che ha portato ad un'impregnazione del tessuto non omogenea. La matrice non è stata in grado di trasferire in maniera uniforme le tensioni dovute ai carichi: essa, infatti, riesce a penetrare solo tra i filamenti più esterni del filato, con cui sviluppa una forte adesione, mentre quelli più interni si lasciano scivolare come avvolti da una guaina.

Analizzando l'andamento del diagramma tensione-deformazione non solo si nota che non vi è più un unico tratto lineare ma anche che si formano tratti in cui, probabilmente in seguito alla rottura di alcune fibre, si ha un istantaneo abbassamento di carico che poi continua a crescere.



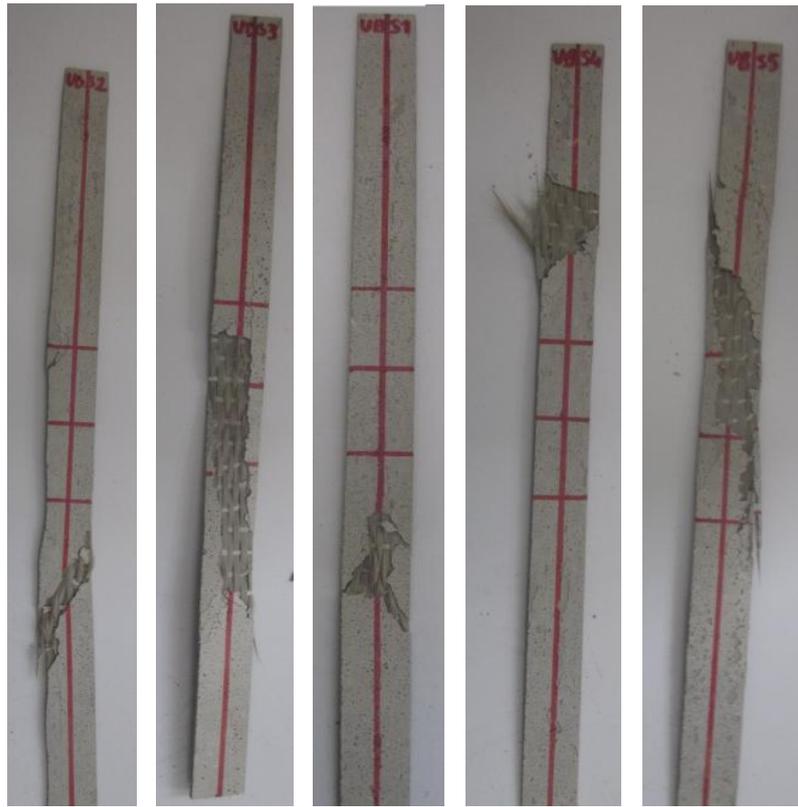
**Figura 76 Diagramma tensione-deformazione per UBS**

Nella Tabella 29 sono riportate le sigle che descrivono i meccanismi di rottura generati nei provini UBS.

Provino	Meccanismo di crisi
UBS01	AAB
UBS02	AAB
UBS03	AGM
UBS04	DAT
UBS05	DGM

**Tabella 29 Meccanismi di rottura UBS**

Dalle immagini riportate in Figura 77 si nota come la crisi sia insorta non tanto per rottura delle fibre, che solo in alcuni casi risultano delaminate alle estremità, quanto più per rottura della matrice stessa che ha perso la sua funzione di trasferimento dei carichi per divenire essa stessa elemento resistente.



**Figura 77 Meccanismi di rottura dei provini UBS**

È inoltre possibile notare come, con questo tipo di matrice, non si riesca neanche ad impregnare le fibre superficiali (Figura 78).



**Figura 78 Impregnazione superficiale fibre provino UBS**

In generale, si può affermare che questo tipo di matrice non è l'ideale per l'impregnazione di tessuti unidirezionali, come quello utilizzato nelle prove. Risultati migliori si potrebbero ottenere accoppiando questo tipo di malta ad una griglia a maglia larga alcuni millimetri, in modo da facilitare l'impregnazione del tessuto.

Inoltre, per testare il comportamento di un composito unidirezionale sollecitato a trazione parallela alle fibre ed individuare il meccanismo che porta a rottura, si può fare riferimento ad una prova di pull-out che valuti l'interazione tra fibre e matrice cementizia.

Il pull-out è una prova sperimentale a carattere semi-distruittivo che consiste nell'estrarre un inserto (in questo caso un filato) da una matrice solida per valutarne l'interazione e la resistenza dei materiali testati.

### 3.3.4.3 Confronto risultati

Nella Tabella 30 sono riportati i vari risultati, ottenuti facendo riferimento al tessuto secco, della campagna di prove di caratterizzazione meccanica. Da un confronto generale emergono alcune importanti considerazioni.

		Matrice organica		Matrici inorganiche modificate	
		Fidsaturant HM-T	Mapewrap 31	Mapewrap 11-12	Sikegard-720
		EFU	EBU	UBM	UBS
<b>P<sub>max</sub> [N]</b>	Media	5873,83	3969,51	3150,57	1198,47
	Dev Std	299,19	266,57	86,84	273,15
	Coeff var [%]	5,09%	6,72%	2,76%	22,79%
<b>σ<sub>max</sub> [MPa]</b>	Media	2502,65	1829,62	1445,76	541,40
	Dev Std	144,04	124,79	46,66	115,71
	Coeff var [%]	5,76%	6,82%	3,23%	21,37%
<b>ε<sub>u</sub> [%]</b>	Media	2,73%	2,67%	2,23%	1,16%
	Dev Std	0,25%	0,14%	0,08%	0,24%
	Coeff var [%]	9,22%	5,22%	3,56%	20,56%
<b>Modulo [GPa]</b>	Media	103,04	75,18	100,40	51,74
	Dev Std	4,48	2,08	2,40	8,13
	Coeff var [%]	4,3%	2,76%	2,39%	15,72%

Tabella 30 Confronto risultati prove di trazione delle varie tipologie di provini

Innanzitutto, i provini della serie EFU sono quelli che, in linea generale, hanno esibito il comportamento migliore, sia in termini di carico, sia in termini di rigidità, inoltre, i valori sono abbastanza omogenei, in quanto il coefficiente di variazione si mantiene sempre al sotto del 10%.

Questi soddisfacenti risultati sono dovuti alla grande compatibilità tra matrice epossidica e fibre di basalto, sistema che permette di realizzare dei rinforzi in grado di sfruttare al meglio le proprietà delle fibre. La matrice, infatti, garantisce la continuità meccanica e il trasferimento degli sforzi e deformazioni alle fibre, con conseguente incremento di rigidità e resistenza meccanica del composito.

Questo meccanismo è più difficile per i laminati realizzati con matrici cementizie. La grande viscosità di quest'ultime determina una ridotta impregnazione delle fibre che, quindi, non collaborano tutte alla resistenza del carico.

Ciò nonostante, i provini ottenuti con la matrice Mapewrap 11-12, essendo un prodotto bicomponente, ottenuto da aggregati fini scelti e resine epossidiche, grazie alla sua consistenza tissotropica, ha permesso di ottenere risultati abbastanza buoni, soprattutto in termini di duttilità. hanno fornito risultati non così deludenti, soprattutto se si valutano le deformazioni e quindi la duttilità. La modalità di crisi è proprio una delle differenze principali tra matrice inorganica e organica.

Generalmente la crisi di provini rinforzati con malte cementizie risulta più duttile di quella dei medesimi provini FRP, anche se quest'ultimi raggiungono valori di carico maggiori.

# 4 INDAGINE SPERIMENTALE SULL'ADERENZA SUBSTRATO MURARIO-COMPOSITO CON FIBRE DI BASALTO

## 4.1 Introduzione

Oggi giorno la tecnologia di rinforzo con materiali compositi rappresenta una soluzione sempre più valida nell'ambito del rinforzo strutturale di edifici in muratura. I materiali fibrorinforzati presentano, infatti, vantaggi come le elevate prestazioni meccaniche, il basso impatto architettonico, l'alta durabilità, la facilità di applicazione e la reversibilità degli interventi che diventano caratteristiche rilevanti quando si deve far fronte alla conservazione e al consolidamento di un patrimonio edilizio di carattere storico-monumentale .

La loro applicazione consente di sopperire alla carenza di resistenza a trazione delle murature e di conferire maggiore duttilità al comportamento globale delle strutture. In questo ambito si colloca il sistema di consolidamento tecnologicamente innovativo con materiali compositi a base di matrice inorganica.

Le malte, pur essendo adesivi meno efficaci delle resine, possono offrire alcuni vantaggi in termini di costi e modalità applicative, oltre che di traspirabilità e resistenza al fuoco, specie per il rinforzo di murature, dove le migliori proprietà meccaniche dei tradizionali FRP non possono essere completamente sfruttate a causa della intrinseca debolezza del supporto murario.

Indipendentemente dalla tipologia di rinforzo, però, l'applicazione su costruzioni non può prescindere dalla valutazione dell'aderenza tra il rinforzo medesimo ed il substrato, perché da essa ne dipende la sua bontà.

Il comportamento di interfaccia rinforzo-substrato è sicuramente un aspetto fondamentale nell'analisi del comportamento strutturale poiché influenza sia lo stato limite ultimo, e quindi la capacità portante degli elementi strutturali rinforzati, sia il comportamento allo stato limite di esercizio, poiché l'aderenza governa la fessurazione e la deformazione.

Ad oggi numerosi studi in letteratura sono disponibili sul comportamento di interfaccia di elementi in calcestruzzo rinforzati con materiali compositi tradizionali mentre ancora pochi o del tutto assenti sono i lavori relativi ai compositi costituiti da bio-fibre.

Nel presente capitolo è analizzato il comportamento di interfaccia di elementi in pietra naturale, tufo e carparo, rinforzati con nastri unidirezionali e griglie in fibre naturali a base di basalto, immersi rispettivamente in matrice epossidica (BFRP, Basalt Fiber Reinforced Polymers) e malta cementizia (BFRG, Basalt Fiber Reinforced Grout).

In particolar modo, il sistema BFRG è un sistema fortemente innovativo, che nasce dall'intenzione di sviluppare una soluzione di rinforzo che sia in grado di soddisfare non solo requisiti meccanici ma anche di ecosostenibilità.

L'aderenza di tali rinforzi è stata valutata attraverso una campagna sperimentale che ha previsto prove di pull-off e di strappo tangenziale.

## **4.2 L'aderenza tra rinforzo e supporto**

I rinforzi in materiale composito collaborano meccanicamente con il supporto grazie all'instaurarsi di tensioni tangenziali sulla superficie di interfaccia.

Le modalità di rottura di un elemento murario rinforzato con compositi FRP possono così farsi rientrare in due modalità principali:

- modalità di rottura che si attingono al raggiungimento del pieno sfruttamento del composito (rottura del rinforzo);
- modalità di rottura per crisi del legame di interfaccia col supporto (rottura per perdita di aderenza).

Nella seconda categoria di crisi, l'energia dissipata all'interfaccia durante la perdita di aderenza non consente il pieno sfruttamento dei materiali. Essa, infatti, avviene solitamente a livelli di tensione e deformazione nel composito molto più bassi di quelle di rottura.

Le sperimentazioni effettuate su elementi in muratura (in particolare pannelli murari soggetti a taglio), rinforzati con materiali compositi, hanno evidenziato che la crisi per delaminazione del rinforzo è quella che accade con maggior frequenza.

Si capisce l'importanza, ai fini progettuali, di una corretta quantificazione delle forze che inducono questo tipo di collasso.

Il fatto che la rottura per delaminazione avvenga all'interno della muratura, rende evidente la necessità di conoscere con sufficiente accuratezza, le caratteristiche meccaniche (resistenza a compressione, a trazione, modulo di Young) del materiale di supporto oltre a quello di rinforzo.

E' da sottolineare il fatto che il distacco dal supporto avviene quasi sempre lungo una superficie di rottura approssimativamente parallela a quella dell'interfaccia, ed ad una profondità di alcuni millimetri all'interno del supporto.

Il meccanismo di adesione è basato, oltre che nel nascere di legami chimici tra gli aderenti, nell'aggrappaggio meccanico tra adesivo ed aderendo, ossia del supporto (mechanical interlocking). Il legame sfrutta in parte la resistenza allo scorrimento reciproco delle due superfici localmente compenstrate, da qui l'importanza di avere superfici porose e generalmente irregolari su scala microscopica sulle quali primer ed adesivo possono spandersi e penetrare per poi solidificare.



**Figura 79 Aderenza tra FRP e supporto in calcestruzzo**

Si capisce come l'efficacia di tali interventi dipenda dall'integrità e dalla qualità dell'incollaggio tra composito e supporto.

Accorgimenti tecnici in tal senso sono la accurata preparazione della superficie da incollare e la specializzazione della manodopera, oltre, ovviamente, alla qualità del materiale di supporto e della resina epossidica utilizzata.

La zona d'incollaggio dovrebbe essere sgombra da polveri e materiale incoerente, operazioni quali sabbiatura, abrasione, scarificazione sono i metodi più comunemente utilizzati per la preparazione della superficie.

L'obiettivo è rendere la zona ruvida ma sufficientemente regolare e "portare a nudo" gli aggregati nel caso di interventi su elementi in calcestruzzo.

La crisi improvvisa per delaminazione può essere evitata progettando dei sistemi di ancoraggio per un migliore sfruttamento del composito in trazione oppure disponendo opportunamente le fibre nelle zone di estremità.

Tali sistemi andrebbero tuttavia progettati mirando anche a garantire una sufficiente duttilità locale dell'intero sistema.

Mentre nel caso del calcestruzzo le superfici su cui intervenire sono solitamente sufficientemente piane e regolari, passando alla muratura diventa importante il ripristino della planarità delle superfici di supporto, per la ovvia necessità di far lavorare le fibre del rinforzo ortogonalmente alla direttrice degli sforzi, consentendo la migliori prestazioni del rinforzo, escludendo pericolosi riallineamenti sotto sollecitazione.

La condizione ottimale per il rispetto di questo presupposto, avviene preparando e lavorando il substrato d'applicazione, mediante abrasione, spazzolatura o molatura meccanica, oppure, quando queste operazioni non siano realizzabili o sufficienti, realizzando opportuni riporti di spessore con speciali malte cementizie antiritiro di caratteristiche meccaniche il più possibile vicine a quelle del supporto.

### **4.3 Parametri che influenzano il legame di aderenza**

Sulla base della letteratura disponibile possono essere individuati differenti fattori che influenzano il legame di aderenza nastro-muratura: tipologia di muratura, tipologia di blocco, lunghezza di aderenza, larghezza del rinforzo, posizione della zona aderente, rigidità del rinforzo, curvatura della superficie aderente, sistemi di ancoraggio.

#### **4.3.1 Tipologia di muratura**

Nell'analisi dell'aderenza nastro-muratura le tipologie di pietra studiate, viste le diverse tipologie di muratura esistente al mondo, sono differenti nelle varie campagne sperimentali che troviamo in letteratura.

Come pietra artificiale è usato il laterizio pieno e a volte bruciato e mattoni in calcestruzzo forati nel mezzo; come pietra naturale è stata utilizzata la pietra leccese, il tufo di Napoli, delle calcareniti siciliane.

In tutte le tipologie di pietra analizzate, nelle campagne sperimentali in cui si è raggiunta la rottura per distacco del nastro, si è osservato che indipendentemente dalla tipologia di pietra il distacco avviene in modo fragile, con asportazione di uno strato di pietra di diversa consistenza a seconda della porosità del materiale.

Si osserva che la viscosità delle resine e la porosità dei mattoni condizionano il legame di aderenza nastro-muratura e quindi l'entità delle sollecitazioni trasmesse e la modalità di rottura.

#### **4.3.2 Lati rinforzati**

Un altro aspetto che condiziona la buona riuscita di un rinforzo, è il numero di strati e i lati della struttura rinforzati.

(Prota A., 2006) ha studiato la risposta di provini di muratura realizzati con tufo. L'aspetto principale che emerge da questo articolo è che il rinforzo su un solo lato del provino porta all'attivazione di evidenti deformazioni fuori dal piano che producono una rottura fragile del provino. Risposta migliore si ha invece quando il provino è rinforzato su entrambi i lati.

#### **4.3.3 Lunghezza di aderenza**

Con riferimento ad una tipica prova di aderenza il valore ultimo della forza sopportabile dal rinforzo di FRP, prima che subentri la delaminazione, dipende, a parità di tutte le altre condizioni, dalla lunghezza,  $l_b$ , della zona incollata.

Tale valore cresce con  $l_b$  fino ad attingere un massimo corrispondente ad una ben definita lunghezza,  $l_e$ : ulteriori allungamenti della zona di incollaggio non comportano incrementi della forza trasmessa.

La lunghezza  $l_e$  viene definita lunghezza ottimale di ancoraggio e corrisponde, quindi, alla lunghezza minima della zona incollata che assicura la trasmissione del massimo sforzo di aderenza.

Per (Basilio I., 2005) la lunghezza ottimale di ancoraggio, per nastri in GFRP incollati su muratura costituita da blocchi in laterizio pieno, è minore di 150 mm. Infatti,

i risultati ottenuti nella sua campagna sperimentale mostrano che l'incremento di lunghezza di aderenza da 100 mm a 150 mm determina un incremento della capacità di carico all'interfaccia di circa il 59%, mentre passando da una lunghezza di aderenza di 150 mm a una di 200 mm, non si hanno variazioni significative del carico massimo trasferibile.

La differente lunghezza della zona incollata non determina variazione nell'andamento delle tensioni lungo il nastro.

Nelle prove di aderenza condotte da (Casareto M, 2003), dove elementi in muratura di laterizio pieno sono stati rinforzati con fibre aramidiche, la lunghezza ottimale di ancoraggio è circa di 100 mm; infatti, nei test, condotti tutti con lunghezze di aderenza maggiore, il carico registrato è simile.

Nel caso di elementi in tufo di Napoli rinforzati con fibre in carbonio, la lunghezza efficace è compresa tra 100 mm e 150 mm. Nelle prove di beam test, infatti, si ha un aumento del carico ultimo di circa il 30 % quando la lunghezza della zona incollata aumenta da 100 mm a 150 mm.

#### **4.3.4 Posizione della zona aderente**

Nella progettazione di un efficiente set-up di prova molto importante si è dimostrata l'importanza della posizione della zona aderente rispetto all'estremità caricata.

(Liu Y., 2005) conduce delle prove di aderenza su elementi bruciati di laterizio forato rinforzati con GFRP, testando due diverse tipologie di campioni, campioni in cui la zona aderente comincia dall'estremo caricato del blocco e campioni in cui la zona aderente è situata nella parte centrale del blocco.

Gli sperimentatori hanno osservato che: per i campioni in cui la zona aderente comincia all'estremo caricato del blocco, il distacco del nastro avviene con asportazione di un cuneo di pietra dell'estremo caricato, per i campioni con zona aderente al centro del blocco, la rottura avviene per delaminazione del nastro.

### **4.3.5 Rigidezza del rinforzo**

La rigidezza del rinforzo rappresenta un importante parametro da tener presente nello studio del comportamento all'interfaccia, infatti, da essa dipende la distribuzione delle tensioni lungo il nastro, la lunghezza di aderenza e il carico massimo trasferibile.

Per le strutture in muratura, (Basilio I., 2005) ha osservato che utilizzando un nastro con maggiore rigidezza, carbonio al posto di vetro, si ha un incremento della capacità tagliante del sistema di circa il 15%, senza che l'andamento della distribuzione del taglio lungo il nastro subisca apprezzabili variazioni.

(Ceroni F., 2003), nelle prove condotte su tufo di Napoli rinforzato con nastri in carbonio o in vetro, ha determinato che il livello massimo di sollecitazione a cui lavorano le fibre varia in funzione della tipologia di fibra incollata. Il livello massimo di tensione registrato nelle fibre di carbonio non supera il 25% del carico di rottura delle fibre di carbonio, mentre nel vetro il livello tensionale nelle fibre è compreso tra il 65% e il 100% della tensione di rottura delle fibre stesse.

(Roko K. E., 2001) nella sua campagna sperimentale rileva che le deformazioni nei campioni rinforzati con carbonio ad alto modulo sono più basse di quelle registrate sui campioni rinforzati con carbonio ad alta resistenza e modulo minore del precedente.

## **4.4 Campagna sperimentale**

Il legame di aderenza governa la buona riuscita di un intervento di ripristino/rinforzo con nastri di FRP/FRG per qualunque tipologia di substrato.

In letteratura sono riportati numerosi risultati sperimentali ottenuti su un substrato in calcestruzzo, mentre poche sono ancora le campagne sperimentali con substrato in pietra naturale.

Tenendo presente che il problema è molto sentito, perché molte sono le strutture in muratura naturale che necessitano di interventi di ripristino, è stata condotta una campagna sperimentale volta alla valutazione delle proprietà di adesione di sistemi FRG/FRP su differenti substrati murari attraverso test di adesione normale e di taglio.

Sono stati studiati due differenti sistemi. Il primo consiste in una griglia di fibre di basalto (Fidbasalt Grid 300 C95, prodotta da Fidia) applicata con una matrice

cementizia (TD13K, malta commercializzata da HD System) su due differenti tipi di supporti murari, tufo e carparo, un particolare tipo di tufo.

Il secondo sistema consiste in un tessuto unidirezionale di fibre di basalto (Fidbasalt Unidir 400 C95, prodotto da Fidia) applicato con un sistema epossidico (Fidprimer e Fidsaturant HM-T, rispettivamente primer e resina epossidica, entrambi prodotti da Fidia) applicati anch'essi a mattoni in tufo e carparo.

Entrambi i sistemi sono stati testati attraverso test di adesione normale (Pull-off) per valutare la resistenza dell'adesione a sforzi di trazione perpendicolari alla direzione delle fibre di rinforzo, e di taglio (DSS- Direct Shear test) per valutare la resistenza dell'adesione a sforzi di trazione tangenziali alle fibre.

#### **4.4.1 Materiali**

Pe la campagna sperimentale sono stati utilizzati i prodotti forniti da Fidia, un'azienda che da anni lavora nel settore dei materiali compositi fibrorinforzati FRP e delle tecnologie innovative.

Fidia si è, infatti, dimostrata molto disponibile sia nella fornitura del materiale, varie tipologie di tessuti di basalto e 2 distinte matrici, una epossidica e una cementizia, e nella condivisione delle conoscenze da loro acquisite sino ad oggi in merito a questa nuova tecnologia.

Per quanto riguarda i mattoni, sono stati scelti il tufo e il carparo, due tipologie di pietre naturali tipiche del territorio pugliese, quindi facilmente reperibili, ma soprattutto, di interesse per uno studio territoriale del problema.

Il carparo è una pietra calcarenitica, derivante dalla cementazione di sedimenti di roccia calcarea, generalmente in ambiente marino.

Si tratta di una pietra gialla, con grana abbastanza grossolana, molto tenace e con caratteristiche meccaniche molto buone.



**Figura 80 Texture di un mattone di Carparo**

È molto usato nel Salento, per la costruzione di case. Per la buona resistenza all'erosione e la buona impermeabilità è usato, anche, per i prospetti di palazzi e chiese, o muri isolati, che spesso restano con la faccia vista del carparo senza ulteriore intonacatura.



**Figura 81 Chiesa Madre Alessano (LE)**

I blocchi di carparo utilizzati nella campagna sperimentale sono stati acquistati dalla Pimar, un'azienda salentina specializzata nell'estrazione e lavorazione di pietra leccese e carparo. I blocchi forniti, dalle dimensioni di 50 x 25 x 20 cm, presentano le caratteristiche tecniche riportate in Tabella 31.

<b>Dati tecnici carparo</b>	
Massa dell'unità di volume [kg/m <sup>3</sup> ]	1651
Grado di compattezza	0,60/0,63
Grado di porosità	38,8%
<b>Prove eseguite</b>	
Coefficiente di imbibizione riferito al peso [g/(m <sup>2</sup> *s <sup>0,5</sup> )]	55
Carico di rottura a compressione semplice [MPa]	4,2
Carico di rottura a flessione [MPa]	1,6

**Tabella 31 Scheda Tecnica Carparo**

L'altra tipologia di pietra naturale oggetto di sperimentazione è il tufo, una pietra molto diffusa nell'Italia centromeridionale.

Grazie alla sua grande lavorabilità, questo materiale è sempre stato nel corso dei secoli cavato facilmente e ridotto in blocchi da costruzione, assumendo, anche per tali motivi, un ruolo assolutamente primario nell'architettura sacra, civile e militare come materiale strutturale e decorativo di gran parte dei tessuti storici di regioni dell'Italia Meridionale quali Lazio, Campania, Puglia e Sicilia.

In questo studio sono stati utilizzati dei tufi di origine calcarea, ossia delle rocce sedimentarie organogene.

Ritrovamenti di rocce tufacee di origine calcarea sono in tutta la Puglia: dal Gargano al litorale, nell'hinterland di terra di Bari, nel Brindisino e, con maggiore addensamento, nel Tarantino e nel Salento.



**Figura 82 Tipico tufo pugliese**

I tufi calcarei hanno connotato fortemente il tessuto urbano della regione pugliese, costituendo in passato e, in misura minore, ancor oggi dei materiali di larghissimo impiego nella realizzazione di innumerevoli opere edili. Essi hanno svolto

prevalentemente il ruolo di pietre da costruzione con funzione portante (ma anche portata), dimostrando tutta la loro versatilità nelle più svariate applicazioni costruttive. Solo recentemente, al loro secolare ruolo di materiale da costruzione, hanno affiancato un ruolo più ornamentale.

I blocchi di tufo utilizzati nella campagna sperimentale, di dimensioni 50 x 25 x 25 cm, provengono dalla cava “Le Marine”, in provincia di Taranto, e presentano le caratteristiche riportate in Tabella 32.

<b>Dati tecnici</b>	
Massa dell'unità di volume [kg/m <sup>3</sup> ]	1384,4
Porosità aperta	37,75 %
<b>Prove eseguite</b>	
Coefficiente di imbibizione riferito al peso [g/(m <sup>2</sup> *s <sup>0,5</sup> )]	464,455
Carico di rottura a compressione semplice [MPa]	2,4
Carico di rottura a taglio del giunto [MPa]	0,3

**Tabella 32 Scheda Tecnica Tufo**

Da un primo confronto tra le schede tecniche delle due pietre emerge che il carparo ha una resistenza a compressione maggiore rispetto al tufo che è caratterizzato da un valore del carico a rottura molto basso. Inoltre, in termini di porosità, il carparo risulta essere più poroso del tufo.

Sono stati realizzati due sistemi: il primo prevede una griglia e la matrice cementizia, il secondo un tessuto unidirezionale e la matrice epossidica. Entrambi i sistemi sono stati applicati sia ai blocchi di tufo che a quelli di carparo.

#### **4.4.1.1 Primo sistema BFRG: Basalt Fiber Reinforced Grout**

Il primo sistema prevede l'accoppiamento di una griglia in fibre di basalto e una matrice cementizia. È stata scelta una griglia poichè con questo tipo di “tessuto” si riesce a realizzare una migliore impregnazione delle fibre, rispetto ad un tessuto unidirezionale, con una matrice cementizia.

La griglia Fidbasalt Grid 300 C95 è un tessuto a rete bilanciata in fibra di basalto, prodotto da Fidia, avente grammatura di 300 g/m<sup>2</sup> e Modulo Elastico a trazione di 95 GPa. Ulteriori caratteristiche tecniche sono riassunte nella Tabella 33.

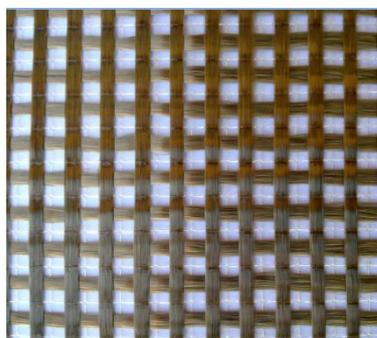


Figura 83 Fidbasalt Grid 300 C95

<b>Proprietà geometriche e meccaniche</b>		
<b>Fibra secca (singolo filamento)</b>		
Tensione caratteristica a trazione, $\sigma_{fibra}$	3080	MPa
Modulo Elastico, $E_{fibra}$	95	GPa
Deformazione a rottura, $\varepsilon_{fibra}$	3,15	%
Densità	2,8	g/cm <sup>3</sup>
<b>Tessuto impregnato</b>		
Titolo filato	1200	Tex
N° fili/cm	1,25	Fili/cm
Massa	300	g/m <sup>2</sup>
Spessore equivalente del rinforzo FRP, $t_f$	0,053	mm
Resistenza caratteristica del rinforzo FRP, $f_{fk}$	1735	MPa
Modulo di elasticità normale del rinforzo FRP, $E_f$	90	GPa
Deformazione a rottura del rinforzo FRP, $\varepsilon_f$	1,93	%

Tabella 33 Proprietà geometriche e meccaniche Fidbasalt Grid 300 C95

Le fibre di basalto, prodotte dalla fusione e successiva filatura di rocce vulcaniche, sono termosaldate con fili di poliestere per evitare sfilacciamenti e facilitarne la posa in cantiere.

È un tessuto adatto per rinforzare elementi in CA e muratura e viene impiegato per il rinforzo di strutture soggette ad azioni dinamiche e sismiche.

Come malta, la Fidia ha consigliato la TD13K, una malta di calce idraulica pronta strutturale, reoplastica<sup>5</sup>, antiritiro, ad alta resistenza meccanica.

È ideale per gli interventi di consolidamento, messa in sicurezza, rinforzo ed adeguamento sismico di edifici in mattoni pieni, murature esistenti e manufatti storici.

<b>Proprietà TD13K</b>	
Granulometria (UNI EN 1015-1)	da 0 a 2 mm
Quantità di acqua	0,18 l/Kg
Massa volumica (UNI EN 1015-10)	1800 ÷ 1900 Kg/m <sup>3</sup>
Utilizzo come rinzaffo: resistenza a compressione (UNI EN 1015-11)	Classe CS IV (≥ 6 N/mm <sup>2</sup> )
Utilizzo come malta da allettamento: resistenza a compressione (UNI EN 1015-11)	Classe M15 (≥ 15 N/mm <sup>2</sup> )
Resistenza a compressione a fine maturazione	> 16 N/mm <sup>2</sup>
pH	> 10,5
Classe di reazione al fuoco	A1
Confezione in sacchi	30 Kg

**Tabella 34 Dati tecnici di base TD13K**

Infine, il sistema è stato applicato ai due differenti substrati murari in pietra naturale, carparo e tufo.

#### **4.4.1.2 Secondo sistema BFRP: Basalt Fiber Reinforced Polymers**

Il secondo sistema studiato è costituito da un tessuto unidirezionale di fibre di basalto accoppiato ad una resina epossidica.

---

<sup>5</sup> Le malte reoplastiche sono molto fluide e non segregabili, prive di ritiro, ad alta resistenza meccanica, di alto potere adesivo all'acciaio e al calcestruzzo, fortemente impermeabili e durevoli. Esse sono costituite da sabbie sottili silicee, cemento ed additivi reoplastici miscelati a secco.

Dati i buoni risultati delle prove a trazione dei provini ottenuti con il sistema proposto da Fidia, il tessuto unidirezionale Fidbasalt Unidir 400 C95 e la resina epossidica Fidasaturant HM-T, si è scelto, per questa seconda parte di campagna sperimentale, di utilizzarli in accoppiamento a substrati murari per le prove di aderenza.

Per le caratteristiche tecniche di tessuto e resina, si rimanda al capitolo 3, dove sono illustrate le proprietà dei due materiali.



**Figura 84 Fidbasalt Unidir 400 C95**

Per l'applicazione di sistemi FRP su supporti murari è necessaria prima la preparazione della superficie in pietra con uno stato di primer, il Fidprimer di Fidia.

Fidprimer è un prodotto da impregnazione bicomponente, senza solventi, tixotropico a base di resina epossidica (le caratteristiche sono riportate in Tabella 35)

È ideale per la preparazione di superfici per l'installazione di rinforzi strutturali in CA, CAP, muratura, pietra naturale e legno.

<b>Caratteristiche della resina miscelata</b>			<b>Caratteristiche della resina reticolata</b>	
Tempo di lavorabilità [min]	35°C	30	Temperatura di transizione vetrosa [°C]	a 5 gg a 22°C
Tempo di gelo [min]				65
Picco esotermico	20°C	60	Modulo di elasticità a trazione [GPa]	2,5
	Temp	190		
Tempo di completa reticolazione [h]	20°C	5	Resistenza a trazione [MPa]	45
			Deformazione a rottura [%]	3,8

**Tabella 35 Caratteristiche Fidprimer**

Anche in questo caso, il sistema è stato applicato su blocchi di tufo e di carparo.

## **4.5 Test di aderenza tangenziale: prove di strappo a taglio DSS**

La prova di strappo a taglio (DSS Test – Direct Shear Strength Test) è stata effettuata per valutare la resistenza dell'adesione a sforzi di trazione tangenziali alle fibre e ai due differenti tipi di supporti in pietra naturale, il tufo e il carparo.

Le prove di strappo tangenziale consistono nel mettere in trazione una striscia di composito nella sua direzione longitudinale, provocando così una distribuzione di tensioni tangenziali all'interfaccia tra rinforzo e substrato.

Questa prova è normalizzata dalla ASTM D 905.

### **4.5.1 Preparazione dei provini**

I provini sono stati realizzando applicando i due differenti sistemi BFRP e BFRG ai mattoni di tufo e carparo, ma, ovviamente il procedimento per la loro preparazione è stato differente.

Per quanto riguarda il sistema BFRG, la superficie dei mattoni è stata inizialmente pulita dalle polveri mediante un aspiratore e poi bagnata, in modo da poter evitare, o quantomeno limitare, un assorbimento dell'acqua contenuta nella matrice che ne pregiudicherebbe le prestazioni.

A differenza delle prove di pull-off, nelle quali il mattone viene interamente ricoperto, per le prove di strappo a taglio si è reso necessario delimitare l'area di applicazione del sistema nel laterizio ad un rettangolo di larghezza pari a 5 cm e lunghezza 20 cm. Pertanto sono state fissate sul mattone umido due corsie in alluminio (Figura 85) che permettono di limitare l'area di applicazione della matrice.



**Figura 85** Disposizione corsie in alluminio

La griglia di basalto è stata tagliata in rettangoli di dimensioni 5 x 40 cm (con un numero di trefoli pari a 3), e la matrice, formata da una malta premiscelata in polvere pronta all'uso, è stata quindi mescolata a mano con una quantità d'acqua lievemente superiore a quella indicata dal produttore per renderla più lavorabile (22 l/kg contro i 18 l/kg).

Per poter realizzare il pezzo di striscia che fuoriesce dal mattone e che poi viene agganciato alla macchina di tiro, è stato appoggiato all'estremità del blocco, un blocco della stessa altezza, rivestito opportunamente con uno strato di teflon.

Dopo un'adeguata miscelazione della matrice, sul mattone umido, ma privo di velo d'acqua, ne è stato applicato un primo strato su una superficie di 5 cm di larghezza e 20 cm di lunghezza.

All'interno dei 20 cm di lunghezza sono compresi 15 cm di lunghezza di ancoraggio più 5 cm di striscia prossimi all'estremità, che sono stati lasciati distaccati dal blocco, avendo anteposto uno strato di scotch in teflon. Come si è detto in precedenza, infatti, si è osservato che per i campioni in cui la zona aderente comincia all'estremo caricato del blocco il distacco del nastro avviene con asportazione di un cuneo di pietra dell'estremo caricato.

Per quanto riguarda la lunghezza di ancoraggio, nelle CNR-DT 200/2004 si definisce lunghezza ottimale di ancoraggio  $l_e$  come la lunghezza minima del rinforzo che assicura la trasmissione del massimo sforzo di aderenza. Il suo valore si ottiene mediante la seguente formula:

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f * t_f}{2 * f_{mtm}}}$$

essendo:

$E_f$  il modulo di elasticità normale del composito fibrorinforzato nella direzione della forza F;

$t_f$  lo spessore del composito fibrorinforzato;

$f_{mtm}$  la resistenza media a trazione della muratura;

In mancanza di dati diretti, si può assumere  $f_{mtm} = 0.10 f_{mk}$  dove quest'ultimo valore rappresenta la resistenza a compressione del mattone.

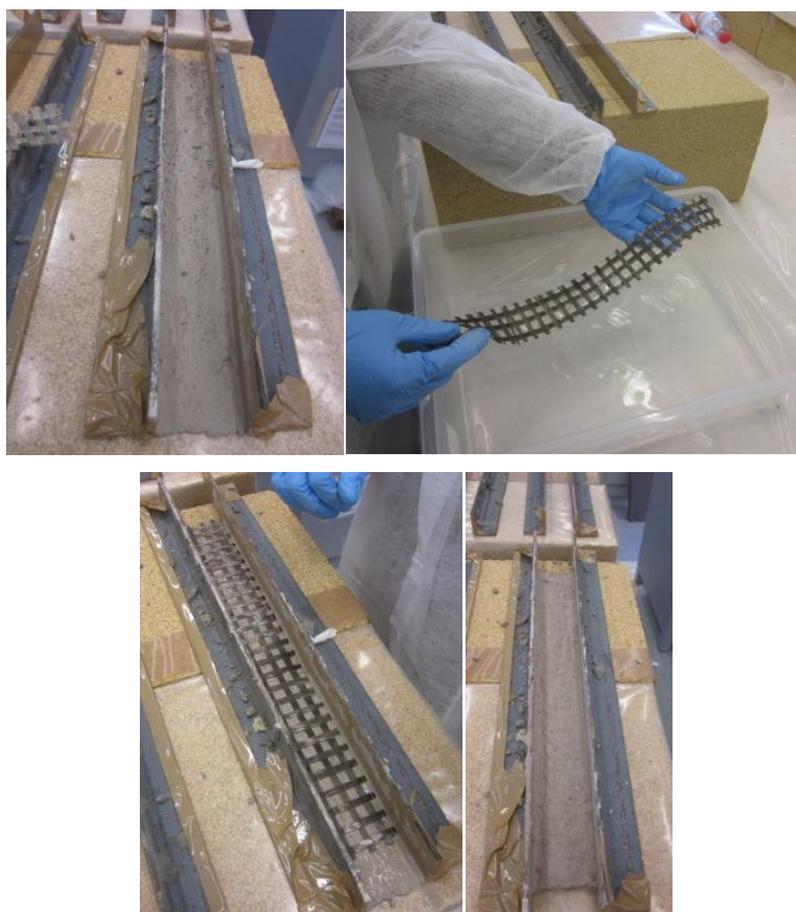
Facendo riferimento a questa formula, una lunghezza di 15 cm come lunghezza di ancoraggio risulta adeguata per tutte le tipologie di sistemi e supporti da verificare, in quanto vicina al valore di quella ottimale.

Lo strato di malta, dello spessore di pochi millimetri circa, è stato poi spalmato sui restanti 20 cm al di fuori del blocco, per realizzare la parte di striscia che fuoriesce da agganciare alla macchina di prova.

Una volta terminata la spalmatura della malta, sono state collocate le strisce di griglia, preventivamente bagnate, come consigliato dal produttore, e premute con le mani in modo che la matrice inorganica penetrasse quanto più possibile tra le maglie della fibra.

Infine, il tutto è stato ricoperto con un secondo strato di malta di spessore all'incirca pari al primo strato Figura 86.

Complessivamente, lo spessore totale del rinforzo applicato risulta essere al di sotto dei 5 mm.



**Figura 86 Fasi preparazione provini DSS del sistema BFRG: in successione applicazione del primo strato di calce, bagnatura del tessuto, applicazione del tessuto e copertura con l'ultimo strato di malta**

Per quanto riguarda la preparazione dei provini del sistema BFRP, il procedimento è stato lievemente diverso.

È stata rimossa la polvere dalla superficie dei blocchi e successivamente è stato applicato uno strato di primer, necessario a regolarizzare la superficie e favorire l'adesione tra supporto e resina.

Dopo un'oretta dall'applicazione del primer, si è proceduto con la stesura del primo strato di resina, applicazione del tessuto asciutto, tagliato in nastri da 5x40 cm, il tutto seguendo le istruzioni ed i dosaggi delle relative schede tecniche.

Per garantire una migliore impregnazione delle fibre ed evitare la formazione di bolle d'aria all'interno della resina, il tessuto è stato steso con un rullo frangibolle e successivamente ricoperto con il secondo strato di resina (Figura 87).



**Figura 87** Fasi preparazione provini DSS del sistema BFRP: in successione applicazione del primer, del primo strato di resina, del tessuto, rullaggio e infine applicazione dell'ultimo strato di resina.

In totale sono stati realizzati 20 provini, 5 per tipologia di sistema e di substrato, come mostrato in Tabella 36.

<b>N. tot provini</b>	<b>Campione</b>	<b>Fibra</b>	<b>Matrice</b>	<b>Substrato</b>
5	CEU	Fidbasalt Unidir	Fidsaturant HM-T	Carparo
5	TEU	Fidbasalt Unidir	Fidsaturant HM-T	Tufo
5	CIG	Fidbasalt Grid	TD13K	Carparo
5	TIG	Fidbasalt Grid	TD13K	Tufo

**Tabella 36** Schema dei provini realizzati

Nell'assegnazione del nome alla serie di campioni si è tenuto conto della seguente terminologia: la prima lettera indica la tipologia di substrato, C per carparo e T per tufo, la seconda lettera indica la matrice utilizzata, E per epossidica e I per

inorganica, la terza lettera, infine, indica la tipologia di tessuto, U come uniassiale e G per griglia.

#### 4.5.2 Esecuzione della prova

Le prove di strappo tangenziale consistono nel mettere in trazione una striscia di composito nella sua direzione longitudinale, provocando così una distribuzione di tensioni tangenziali all'interfaccia tra rinforzo e substrato.

Questa prova, normalizzata dalla ASTM D 905,

Lo strumento utilizzato in questa prova, una Germann Instruments B-14000 Pull machine, consiste in una manovella di carico che trasmette la forza di trazione al nastro e una serie di elementi necessari per l'ammorsamento della striscia e il trasferimento del carico all'interfaccia pietra-rinforzo sotto forma di tensioni tangenziali.

Lo schema del test è illustrato in Figura 88.

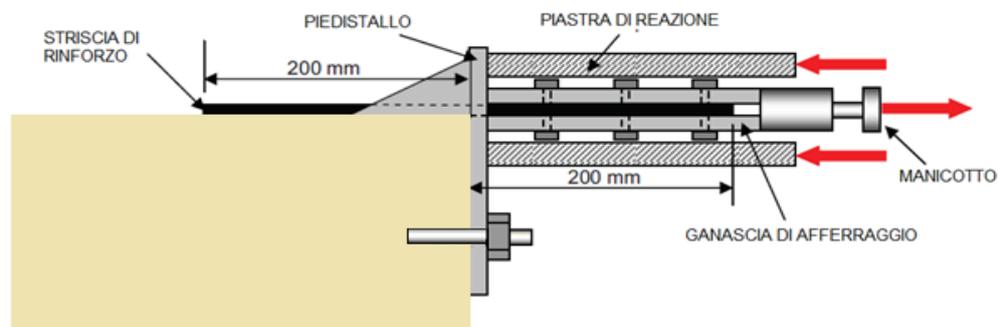


Figura 88 Schema di prova

Il rinforzo viene inserito tra due ganasce piane, strette attraverso dei dispositivi di fissaggio trasversali, un cilindro metallico e due piastre di reazione. Queste parti vengono montate sul provino e appoggiate su un piedistallo fissato alla pietra mediante una vite di ancoraggio.

Dopo aver bloccato la striscia, si collega la manovella di carico e si applica il carico di trazione alla striscia di rinforzo, perpendicolarmente alla superficie di appoggio della pietra.



**Figura 89 Set-up di prova: in successione disposizione del piedistallo, delle ganasce di afferraggio e delle piastre di reazione, del manicotto cilindrico e della manovella di carico.**

### 4.5.3 Risultati

Lo strumento utilizzato nella prova permette di leggere l'andamento del carico man mano che si gira la manovella. Nell'esecuzione della prova si è cercato di ruotare quest'ultima ad una velocità costante, tale per cui ogni giro completo si è compiuto in tre secondi. Partendo da questa considerazione, è stato registrato il valore del carico ad ogni mezzo giro, quindi ogni secondo e mezzo, e con i valori ottenuti si è graficato l'andamento del carico nel tempo.

In particolar modo, noto il valore del carico massimo, è stata calcolata la tensione massima nel tessuto, data dal rapporto tra il carico massimo e l'area resistente del tessuto, dove quest'ultima è definita dalla CNR come:

$$A_{rt} = \frac{T_x N_f}{10 * \rho_{fib}}$$

essendo  $A_{rt}$  l'area resistente del tessuto nella direzione interessata, espressa in  $\text{mm}^2/\text{m}$ ,  $T_x$  il titolo del filato riferito alla direzione in esame, espresso in  $\text{Tex}$  [ $\text{g}/\text{km}$ ],  $N_f$  il numero di filati per unità di larghezza riferiti alla direzione in esame [ $\text{n}^\circ/\text{cm}$ ],  $\rho_{fib}$  la densità delle fibre [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ].

Inoltre, è stato collocato alla macchina un estensometro che ha permesso di visualizzare il valore dell'allungamento della striscia a rottura.

Di seguito si riportano inizialmente, in maniera separata, i risultati ottenuti dalle prove sui campioni BFRP e BFRG e poi si procede ad un confronto generale.

#### 4.5.3.1 Risultati DSS del sistema BFRP

Uno dei parametri principali che permette di definire subito se l'esito della prova è stato buono o no, è costituito dal meccanismo di rottura.

Nella Figura 90 e nella Figura 91 sono riportati i provini al termine della prova. Si nota come per tutti i campioni, sia della serie CEU che della serie TEU, la rottura è avvenuta per distacco di una porzione di pietra più o meno estesa e solo in uno, CEU01, si è avuto il coinvolgimento dell'interfaccia con l'adesivo.

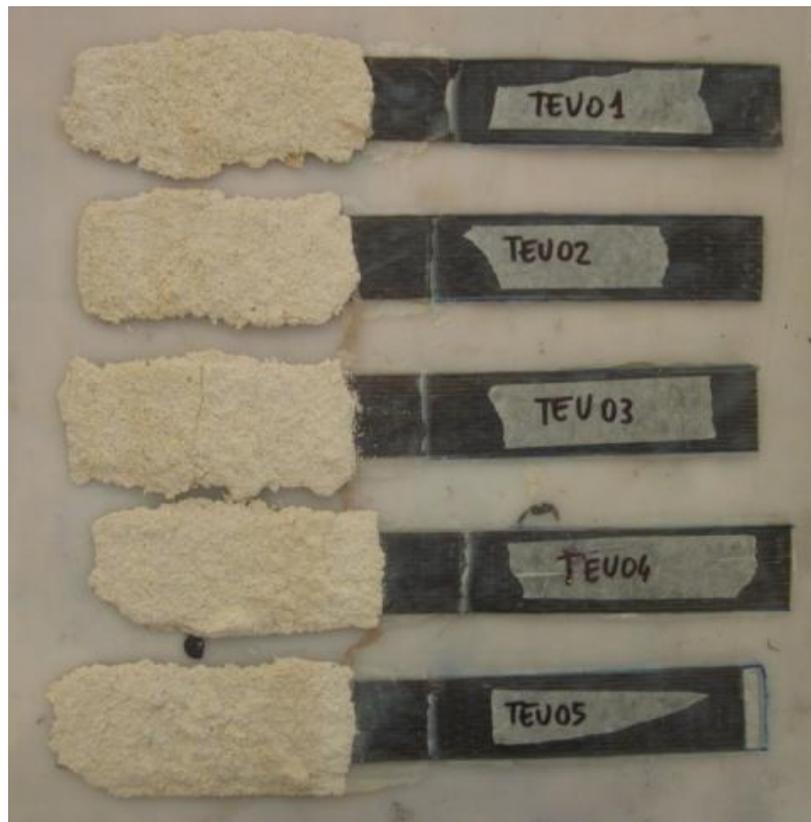


Figura 90 Rottura provini TEU



**Figura 91 Rottura provini CEU**

In tutti casi è stato osservato che l'anello debole del sistema FRP - pietra è la pietra stessa: infatti il distacco del nastro avviene sempre nel substrato con asportazione di uno strato di pietra che rimane attaccato al rinforzo.

La delaminazione si è manifestata con asportazione di un consistente strato di materiale (Figura 92). Questo fatto si può spiegare considerando che sia il carparo che il tufo sono due pietre caratterizzate da un'elevata porosità. Questa caratteristica comporta che lo strato di pietra impregnato dalle resine del sistema di rinforzo è più spesso e che quindi la superficie di rottura si sposta verso strati più profondi.



**Figura 92 Strato di pietra asportato**

Nella Tabella 37 e nella Tabella 38 sono riportati i risultati in termini di carico massimo  $F_{\max}$ , tensione massima nel tessuto  $\sigma_{\max \text{ tes}}$  e rapporto tra la tensione massima nel tessuto e la resistenza caratteristica di quest'ultimo  $\sigma_{\max \text{ tes}}/f_{ck}$ .

Per quanto riguarda i campioni della serie CEU, si vede subito come il valore del carico per i vari provini sia abbastanza uniforme tranne che nel caso di CEU01, per il quale vale all'incirca 3 kN in più. Come si vedrà successivamente, questo fatto è riconducibile ad un diverso meccanismo di rottura che ha interessato il provino.

Campione	$F_{\max}$ [N]	$\sigma_{\max \text{ tes}}$ [MPa]	$\sigma_{\max \text{ tes}}/f_{ck}$ [%]
Resistenza caratterista tessuto $f_{ck}$	13300	1900	-
CEU01	8100	1157,14	61%
CEU02	5500	785,71	41%
CEU03	4800	685,71	36%
CEU04	4400	628,57	33%
CEU05	5500	785,71	41%
Valori medi	5660	808,57	43%
Deviazione Standard	1443,26	206,18	11%
Coefficiente di varianza	25,50%	25,50%	25,50%

**Tabella 37 Risultati DSS su provini CEU**

Campione	$F_{max}$ [N]	$\sigma_{max\ tes}$ [MPa]	$\sigma_{max\ tes} / f_{ck}$ [%]
Resistenza caratteristica tessuto $f_{ck}$	13300	1900	-
TEU01	2500	357,14	19%
TEU02	3700	528,57	28%
TEU03	2900	414,29	22%
TEU04	5500	785,71	41%
TEU05	4600	657,14	35%
Valori medi	3840	548,57	29%
Deviazione Standard	1228,01	175,43	9%
Coefficiente di varianza	32%	32%	32%

**Tabella 38 Risultati DSS su provini TEU**

Il livello massimo di tensione registrato nelle fibre di basalto, nel caso dei provini CEU, raggiunge un valore pari al 61% del carico di rottura delle fibre stesse, il che è indice di un buon sfruttamento delle capacità di resistenza del composito. Nel caso dei provini TEU, invece, dal confronto tra le tensioni mobilitate e la tensione di rottura delle fibre si deduce che il rinforzo è stato poco sfruttato proprio a causa dell'intrinseca debolezza del tufo.

Secondo le DT 200/2004, l'applicazione può ritenersi soddisfacente se almeno l'80% delle prove fornisce una tensione di picco allo strappo non inferiore al 5% della resistenza a compressione del supporto.

La tensione di picco allo strappo si calcola come il rapporto tra il carico massimo a trazione e l'area di applicazione della striscia e fornisce un valore indicativo delle tensioni tangenziali che si formano tra rinforzo e substrato.

Essendo, nel nostro caso, la larghezza della striscia e la sua lunghezza nella zona aderente di, rispettivamente, 50 e 150 mm, tutti i valori di  $F_{max}$  sono stati divisi per 7500 mm<sup>2</sup>.

Essendo la resistenza a compressione del carparo e del tufo, rispettivamente, di 4,2 e 2,4 MPa, i valori minimi da superare, affinché il requisito della norma sia soddisfatto, sono di 0,21 e 0,12 MPa. Come si evince da Tabella 39 e Tabella 40 le verifiche sono soddisfatte per entrambe le serie di provini.

Campione	F <sub>max</sub> [N]	Tensione di picco [MPa]	Resistenza minima da norma [MPa]	Verifica
CEU01	8100	1,080	0,21	superata
CEU02	5500	0,733	0,21	superata
CEU03	4800	0,640	0,21	superata
CEU04	4400	0,587	0,21	superata
CEU05	5500	0,733	0,21	superata

Tabella 39 Verifica DT 200/2004 per CEU

Campione	F <sub>max</sub> [N]	Tensione di picco [MPa]	Resistenza minima da norma [MPa]	Verifica
CEU01	2500	0,33	0,13	superata
CEU02	3700	0,49	0,13	superata
CEU03	2900	0,39	0,13	superata
CEU04	5500	0,73	0,13	superata
CEU05	4600	0,61	0,13	superata

Tabella 40 Verifica DT 200/2004 per TEU

#### 4.5.3.2 Risultati DSS del sistema BFRG

Come si è visto nel paragrafo precedente, la rottura nei compositi con matrice polimerica soggetti ad una prova di strappo si manifesta, generalmente, con l'asportazione di una parte superficiale del supporto, più o meno profonda: da ciò discende il ruolo di primo piano giocato dalle caratteristiche meccaniche del supporto.

Nel caso di compositi con matrice cementizia si incontrano modalità di rottura differenti, che dipendono dalle caratteristiche geometriche della striscia, lunghezza di ancoraggio e larghezza, e dalla combinazione rinforzo-supporto, ma che per lo più non coinvolgono il supporto quanto la matrice stessa.

Le diverse modalità di crisi che si possono innescare sono illustrate in Figura 93: il collasso può avvenire per rottura a trazione della fibra (modalità A); per rottura all'interno del supporto nello spessore immediatamente prossimo all'incollaggio (modalità B); per delaminazione nell'interfaccia supporto rinforzo (modalità C); per delaminazione all'interno della matrice nell'interfaccia malta-tessuto (modalità D); per sfilamento delle fibre all'interno della striscia (modalità E).

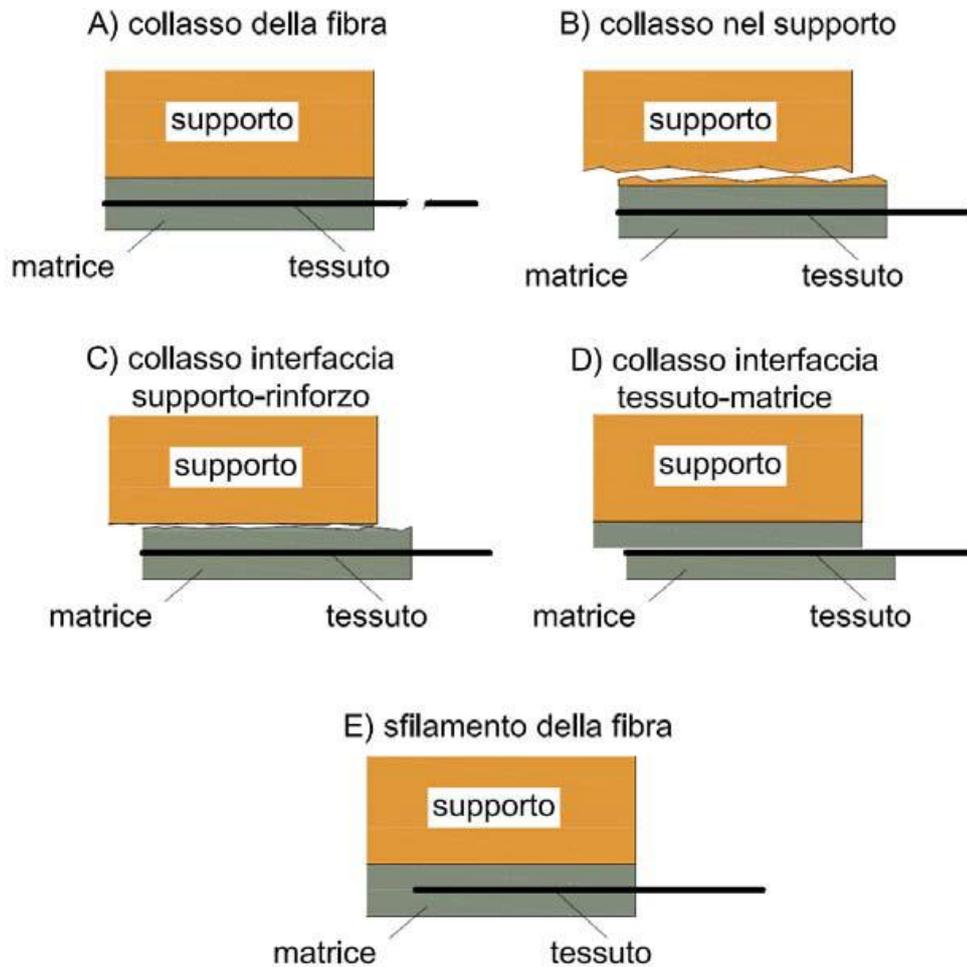


Figura 93 Modalità di crisi prova DSS

Per quanto riguarda la campagna di prove condotta sul sistema BFRG, i meccanismi di rottura che si sono verificati sono tre e spesso si sono attivati contemporaneamente: collasso interfaccia tessuto-matrice, sfilamento delle fibre e in alcuni casi rottura a trazione delle stesse.

A differenza dei sistemi con matrice epossidica, i risultati delle prove con BFRG non hanno evidenziato grandi differenze tra sistemi realizzati su carparo o tufo, sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo. Si analizzano quindi i meccanismi di rottura indipendentemente dal tipo di supporto.

Per quanto riguarda i campioni che hanno raggiunto la crisi per sfilamento delle fibre all'intero della matrice, si ha la formazione di un'ampia fessura, ortogonale rispetto alla direzione del rinforzo, nella matrice in prossimità della zona di applicazione del carico. Al procedere della prova, la fessura aumenta di dimensioni per effetto dello

scorrimento delle fibre all'interno, fino a quando si rompe al punto tale da non essere più in grado di trasmettere valori elevati di carico.

Questa rottura prematura dei provini non ha fornito grandi informazioni in merito alle caratteristiche di aderenza BFRG - substrato, anche se, in ogni caso, il fatto che abbia ceduto prima la striscia all'afferraggio e che non si sia avuta delaminazione della stessa, indica che tra pietra e rinforzo si ha una buona aderenza.

Tra i fattori che possono aver indotto i provini a questo meccanismo di crisi prematuro vi sono la scarsa resistenza a trazione della malta e possibili imperfezioni dei provini stessi.





**Figura 94 Rottura per sfilamento delle fibre nei provini TIG05, TIG04 e TIG03**

Come si è detto precedentemente, il meccanismo di trasferimento degli sforzi all'interfaccia è influenzato dalla posizione della zona aderente rispetto all'estremo caricato e, per questo, si è scelto di spostare questa a 5 cm dall'estremità del blocco. Da un punto di vista di realizzazione pratica, però, la scelta di affiancare i due blocchi per poter realizzare la parte di striscia da agganciare alla macchina, ha portato alla deposizione di un accumulo di malta in corrispondenza dell'estremità del campione. In alcuni casi, questa malta ha aderito al supporto, spostando così la sezione iniziale di incollaggio, quella a cui competono le tensioni massime, in corrispondenza dell'estremo caricato. È proprio in questo punto che si sono avute concentrazioni di tensioni e deformazioni che hanno portato così ad una crisi del sistema.

In alcuni casi, il meccanismo di sfilatura delle fibre è culminato con la rottura a trazione delle stesse: nei provini TIG01 e CIG04 è stata parziale e ha interessato solo lo yarn esterno, nel caso del provino CIG05 tutte le fibre hanno ceduto e la striscia di tiro si è staccata dal sistema (Figura 95).



**Figura 95 Rottura a trazione delle fibre nel provino TIG01, CIG04 e CIG05**

Anche in questo caso, l'effetto di imperfezioni, come disallineamenti delle fibre e asimmetrie nell'applicazione del carico, può essere alla base della rottura. In generale, comunque, avendo la striscia una larghezza di soli 5 cm, equivalenti a soli 3 yarn, era prevedibile una rottura per valori di carico relativamente bassi.

Per quanto riguarda quei provini in cui c'è stata anche delaminazione delle fibre, questa è avvenuta in corrispondenza dello strato di malta non aderente al supporto, il quale è stato sollevato dalla griglia. Questo tipo di rottura è da imputarsi al superamento della resistenza a taglio della malta.

Il fatto che abbia ceduto lo strato più esterno di malta induce da un lato a ritenere buona l'adesione della superficie del blocco con la malta di base, che non è quindi

l'elemento critico della resistenza alla delaminazione e, d'altra parte, a suggerire maggiore accortezza nella progettazione del tessuto di rinforzo in modo che non vi sia un eccessivo indebolimento all'interfaccia con la matrice, che rappresenta generalmente l'elemento debole.



**Figura 96 Rottura per delaminazione del provino TIG02 e CIG01**

Sulla base di tutte queste osservazioni è possibile affermare che le prove di aderenza tra pietra naturale ed BFRG dovrebbero essere progettate in modo da evitare che imperfezioni geometriche e di messa in opera alterino i risultati sperimentali.

A tal proposito, campioni di dimensioni trasversali tali da evitare rotture premature come anche posizioni della lunghezza di aderenza adeguate rispetto all'estremo caricato del substrato, possono essere considerati accorgimenti adeguati ad analizzare il fenomeno dell'aderenza.

Inoltre, lo strumento utilizzato nella prova non sembrerebbe il più idoneo al sistema oggetto di sperimentazione: una larghezza massima di 5 cm della striscia, con una griglia, non permette di raggiungere valori di carico significativi alla verifica delle caratteristiche di aderenza del sistema, in quanto questo cede prima per crisi a trazione.

Da un punto di vista numerico, i valori delle tensioni massime, Tabella 41 e Tabella 42, non sono molto elevati, anche se la percentuale di carico assorbita dalle fibre non è bassa, soprattutto se si considera che il valore di riferimento,  $f_{ck}$ , è valutato su un composito con matrice epossidica, matrice caratterizzata da una maggiore resistenza a trazione e in grado di ripartire meglio i carichi.

Campione	$F_{max}$ [N]	$\sigma_{max\ tes}$ [MPa]	$\sigma_{max\ tes} / f_{ck}$ [%]
Resistenza caratteristica tessuto $f_{ck}$	-	1735	-
TIG01	1600	1244,44	71,7%
TIG02	1400	1088,89	62,8%
TIG03	800	622,22	35,9%
TIG04	800	622,22	35,9%
TIG05	1000	777,78	44,8%
Valori medi	1120	871,11	50,2%
Deviazione Standard	363,32	282,58	16,3%
Coefficiente di varianza	32,4%	32,4%	18,72%

**Tabella 41 Risultati DSS provini TIG**

Campione	$F_{max}$ [N]	$\sigma_{max\ tes}$ [MPa]	$\sigma_{max\ tes} / f_{ck}$ [%]
Resistenza caratteristica tessuto $f_{ck}$	-	1735	-
CIG01	1500	1166,67	67%
CIG02	-	-	-
CIG03	-	-	-
CIG04	1100	855,56	49%
CIG05	1100	855,56	49%
Valori medi	1233	959,26	55%
Deviazione Standard	230,94	179,62	10%
Coefficiente di varianza	18,72%	18,72%	18,72%

**Tabella 42 Risultati DSS provini CIG**

Dalla Tabella 42 si vede che, nel caso della serie CIG, i provini CIG02 e CIG03 non sono stati testati e questo perché la striscia da collocare tra le due piastre d'afferraggio si è rotta in fase di montaggio della strumentazione.

Un'ultima considerazione può essere fatta in termini di duttilità. Infatti, se nei sistemi BFRP la rottura insorgeva, sebbene per carichi più elevati, in maniera istantanea e quindi fragile, nel caso dei sistemi BFRG, sebbene i valori di carico siano più bassi, il meccanismo di rottura è più duttile. Inoltre, nei BFRP avendosi un distacco improvviso

del rinforzo, la struttura riduce istantaneamente la propria capacità resistente; nei sistemi BFRG, invece, queste delaminazioni non avvengono e il sistema è in grado comunque di assorbire un po' di carico.

In generale, i risultati sperimentali mostrano la tendenza, nei rinforzi a matrice cementizia, alla localizzazione del collasso nel rinforzo piuttosto che nel primo strato di supporto. La possibilità di collasso delle fibre può essere esclusa con una attenta progettazione che tenga conto della tendenza ad una ripartizione non uniforme delle tensioni in tutta la larghezza del tessuto e che tenga conto, anche, della possibilità di sfilamento di alcuni yarn in tessuti troppo radi.

Delle accortezze che possono essere prese per future sperimentazioni potrebbero essere la presenza di più strati di tessuto, una maggiore larghezza della striscia e l'impregnazione della striscia al di fuori del mattone con resine epossidiche, cosicché sia possibile evitare rotture dei provini per cedimento del rinforzo e migliorare la distribuzione delle tensioni.

#### **4.6 Test di aderenza normale: Pull-off test**

Le prove di strappo normale, dette prove di Pull-off, vengono eseguite per valutare la resistenza dell'adesione a sforzi di trazione perpendicolari alle fibre di rinforzo.

Il metodo di misura consiste nel far aderire alla superficie su cui è collocato il rinforzo, una piccola placchetta circolare di acciaio ( dolly ). Quando, tirando il dolly, lo stesso stacca il rinforzo dal substrato, sull'indicatore numerico è possibile visualizzare il valore dell'adesione in PSI in  $N/mm^2$  oppure in  $kg/cm^2$  ( $N/mm^2 * 10$  )

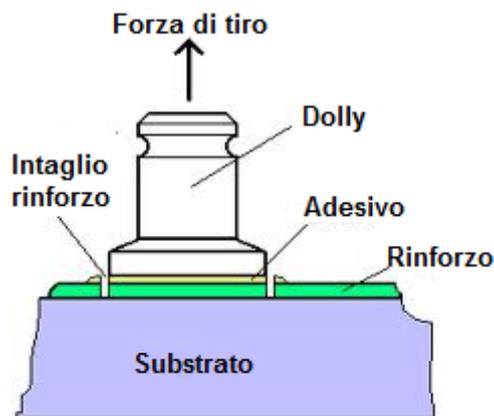


Figura 97 Schema di funzionamento della prova

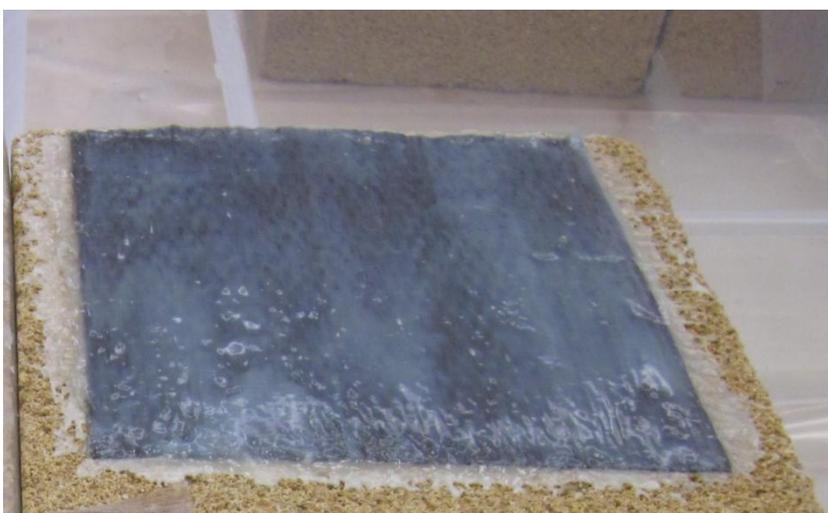
I test sono stati condotti in accordo alla UNI EN 1542 che prevede per la determinazione della resistenza media all'aderenza almeno tre risultati di prova normali. Nel nostro caso, tenendo conto del fatto che spesso si verificano rotture anormali, sono stati preparati e provati più campioni rispetto al minimo richiesto dalla norma.

#### 4.6.1 Preparazione dei provini

Per quanto riguarda l'applicazione dei sistemi di rinforzo BFRP e BFRG sui blocchi di carparo e tufo, i procedimenti seguiti sono stati analoghi a quelli per la preparazione dei provini della prova DSS. L'unica differenza sta nel fatto che non sono state realizzate strisce, ma si è rivestito parte del mattone con un tessuto di forma quadrata (Figura 98 e Figura 99).



**Figura 98 Rinforzo BFRG per la prova di Pull-Off su carparo**



**Figura 99 Rinforzo BFRP per la prova di Pull-Off su carparo**

Terminato il periodo di stagionatura, i campioni sono stati preparati fissando i dolly (Figura 100).

Innanzitutto si è delimitata la zona di prova, definendo un'area a distanza di 2 cm dal margine, successivamente, servendosi di un trapano, sono stati effettuati degli intagli circolari nel rinforzo in modo da svincolarlo dal materiale circostante. Nella realizzazione dell'intaglio, ci si è spinti fino ad una profondità almeno pari allo spessore del rinforzo, ma talvolta, a causa della grande friabilità delle pietre in esame, nell'effettuarlo, si è carotata una parte di pietra.

Una volta intagliati i rinforzi, è stata pulita la zona di applicazione del dolly con acetone e prodotti antistatici, in modo da eliminare le polveri depositate che possono ridurre l'aderenza con il supporto.

Infine, è stato disteso l'apposito adesivo alla base del dolly e si è collocato il tutto in corrispondenza dell'intaglio. L'adesivo è stato lasciato, poi, ad indurire per un giorno.



**Figura 100** Preparazione provini prova di Pull-Off su carparo : in successione, rinforzo intagliato, spalmatura adesivo alla base del dolly, collocazione dolly,

#### **4.6.2 Esecuzione della prova**

La prova di Pull-Off è un metodo diretto di prova consistente in un'estrazione semidistruttiva, atta a stimare la resistenza a trazione normale dei materiali di rinforzo applicati al sottofondo.

Lo strumento utilizzato nella prova è il Defelsko Positest Pull Off Adhesion Tester (Figura 101).



**Figura 101 Macchina e accessori prova Pull-Off**

Con questo strumento, ad avvenuta maturazione dell'adesivo, con un martinetto che esercita la forza contrastando su una struttura di sostegno, si applica al dolly una pressione di distacco in direzione normale alla parete.

Il martinetto è dotato di un manometro tarato che permette, quindi, di leggere il valore di pressione a distacco avvenuto.





Figura 102 Set-up di prova

### 4.6.3 Risultati

Come detto in precedenza, lo strumento permette di visualizzare il valore della pressione che provoca la rottura normale, ossia la resistenza allo sfilamento  $f_h$ .

Nel caso in cui, invece che il valore della pressione, lo strumento misurasse il valore del carico, la norma fornisce una formula per calcolarla:

$$f_h = \frac{4F_h}{\pi D^2}$$

dove:

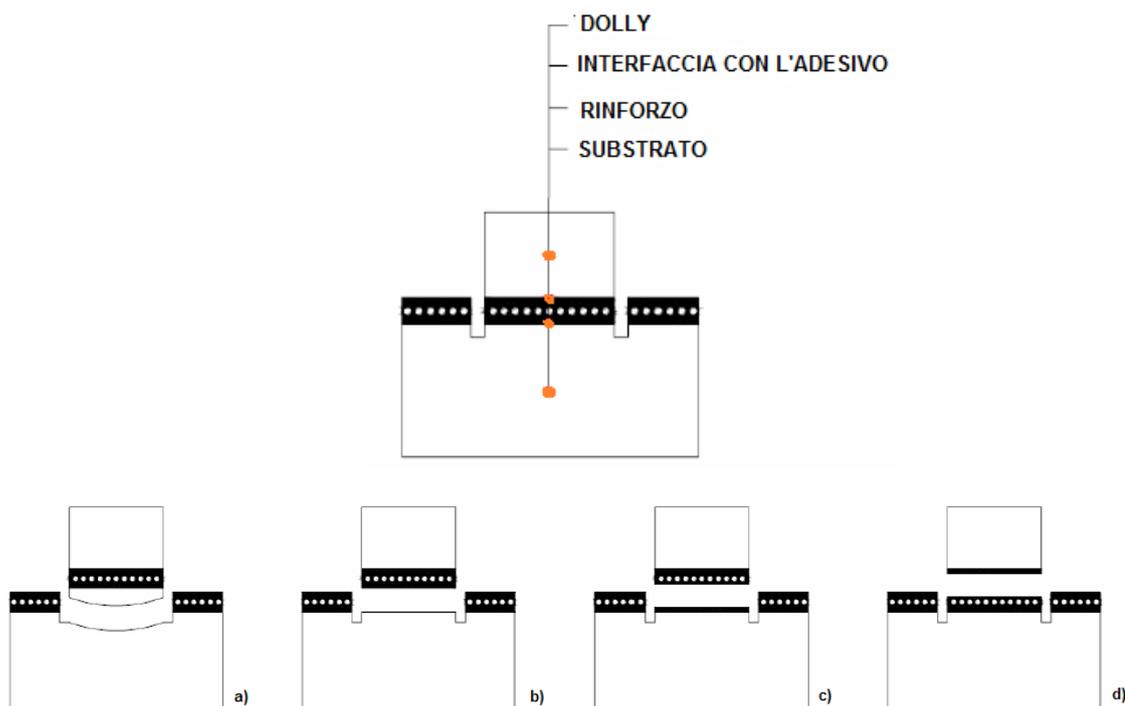
$f_h$  è l'aderenza del campione in prova, in MPa;

$F_h$  è il carico di rottura, in N;

$D$  è il diametro medio del campione di prova, in mm.

In accordo alle DT 200/2004, l'applicazione può ritenersi soddisfacente se almeno l'80% delle prove fornisce una tensione di picco maggiore del 10% della resistenza a compressione della muratura e se la crisi è localizzata al di sotto della superficie di interfaccia composito/substrato.

In Figura 103 sono illustrate le quattro possibili modalità di crisi che si possono verificare a seguito di una prova di Pull-Off: rottura per distacco del substrato, rottura all'interfaccia substrato-rinforzo, rottura della matrice e infine rottura all'interfaccia adesivo-rinforzo. Quest'ultimo meccanismo non è significativo al fine della prova.



**Figura 103** Modalità di crisi dei provini sottoposti a prova di Pull-Off: a) crisi del substrato; b) crisi dell'interfaccia rinforzo-substrato; c) crisi della matrice; d) distacco adesivo-rinforzo

Di seguito sono riportati i risultati della prova sui vari campioni, anche se, come si vedrà, l'informazione in termini di resistenza allo sfilamento è molto dispersa, quindi poco attendibile.

Ciò che interesserà sarà, quindi, il meccanismo di rottura: in base a questo sarà effettuata la valutazione positiva o negativa dei vari sistemi.

#### 4.6.3.1 Risultati Pull-Off del sistema BFRP

In Tabella 43 e Tabella 44 sono riportati i valori di  $f_i$  letti a seguito della prova sui vari dolly. I risultati sono molto dispersi e di conseguenza l'informazione non è molto attendibile. Ciò nonostante si vede come con il carparo, che è una pietra più compatta, si raggiungano valori più elevati rispetto a quelli ottenuti dalle prove su tufo.

CEU	
Dolly	$f_i$ [MPa]
1	2,4
2	-
3	-
4	5,6
5	7
6	7,3
7	-
8	-
9	8
Valore medio	6,06
Dev std	2,22
Coeff Var [%]	36,71%

**Tabella 43 Valori di  $f_i$  da prova di Pull-Off per TEU**

TEU	
Dolly	$f_i$ [MPa]
1	-
2	-
3	3,3
4	-
5	1
6	0,9
7	1
8	2,6
9	0,1
Valore medio	1,48
Dev std	1,21
Coeff Var [%]	81,28%

**Tabella 44 Valori di  $f_i$  da prova di Pull-Off per TEU**

Per quanto riguarda i meccanismi di rottura, i risultati sono stati soddisfacenti. Infatti, sebbene alcuni provini si siano distaccati in corrispondenza dell'interfaccia adesivo-rinforzo o addirittura adesivo-dolly, i rimanenti campioni hanno sviluppato un distacco nel substrato, segno di una buona adesione tra il rinforzo e la pietra.

Come si è spiegato già per le prove di aderenza DSS, essendo sia il carparo che il tufo due tipologie di pietra molto porosa, il primer e la resina riescono a penetrare a fino a strati al di sotto della superficie di applicazione del rinforzo, spostando in questo modo la superficie di rottura.

TEU		
Dolly	Meccanismo di rottura	
TEU01	Distacco adesivo-rinforzo	
TEU02	Distacco adesivo-rinforzo	-
TEU03	Distacco del substrato	
TEU04	Distacco adesivo-rinforzo	-
TEU05	Distacco del substrato	
TEU06	Distacco del substrato	

		
TEU07	Distacco del substrato	
TEU08	Distacco del substrato	
TEU09	Distacco del substrato	

Tabella 45 Meccanismi di rottura prova Pull-Off TEU

CEU		
Dolly	Meccanismo di rottura	
CEU01	Distacco del substrato	
CEU02	Distacco adesivo-rinforzo	-
CEU03	Distacco adesivo-rinforzo	-
CEU04	Distacco del substrato	
CEU05	Distacco del substrato	
CEU06	Distacco del substrato	
CEU07	Distacco adesivo-rinforzo	-

CEU08	Distacco adesivo-rinforzo	-
CEU09	Distacco del substrato	

Tabella 46 Meccanismi di rottura prova Pull-Off CEU

#### 4.6.3.2 Risultati Pull-Off del sistema BFRG

I risultati ottenuti dalle prove di Pull-Off condotte sulla serie CIG e TIG del sistema BFRG, hanno messo in luce molti limiti del sistema in esame.

Prima fra tutti vi è la cattiva, quasi nulla, impregnazione delle fibre con questa malta. Nell'esecuzione della prova, infatti, i tasselli si sono distaccati in corrispondenza dell'interfaccia griglia malta superiore ed il tutto è avvenuto per valori bassissimi di carico.

In Figura 104 si mostra lo strato di tessuto asportato durante la prova: si vede come le fibre più interne siano praticamente prive di malta.



Figura 104 Dolly in seguito alla prova di Pull-Off



**Figura 105** Interfaccia di rottura da prova di Pull -Off

Da ciò si evince come l'elemento debole di questo sistema sia proprio l'interfaccia griglia-matrice e, in particolar modo, emerge come la malta abbia caratteristiche meccaniche non sufficienti.

Il legame che si instaura tra matrice e rinforzo in un sistema FRG, infatti, si basa più su un ingranamento meccanico che chimico, di conseguenza la malta che penetra tra l'ordito e la trama di una griglia deve garantire una certa continuità di materiale con lo strato superiore in modo da evitare distacchi come quelli visti nella prova.

Da un punto di vista numerico, i valori delle forze che hanno provocato i distacchi dei tasselli sono stati talmente bassi che lo strumento non è stato in grado di misurarli; addirittura, in alcuni casi, è stato possibile staccare i dolly con le mani.

## 4.7 Confronto risultati

Al seguito dell'esecuzione delle prove di DSS e Pull-Off sui due differenti sistemi BFRP e BFRG sono emersi limiti e criticità di ognuno di essi.

Per quanto riguarda l'aderenza con i supporti, entrambe le pietre sperimentate, sia il carparo che il tufo, hanno sviluppato una buona adesione con i rinforzi applicati, seppur con lievi differenze dovute alle diverse proprietà meccaniche. L'elevato grado di porosità che caratterizza queste pietre naturali, infatti, ha permesso sia alle resine che alla malta di attaccare bene alla superficie. Come si è detto in precedenza, maggiore è la porosità e, in generale, l'irregolarità della superficie di adesione, migliore sarà l'aggrappaggio meccanico tra adesivo e supporto.

In particolar modo, nei sistemi BFRP la resina è riuscita a penetrare fino a strati in profondità così che il distacco ha interessato ampie porzioni di supporto: questo si è verificato sia nel caso di prove di Pull-Off che nel caso di prove di DSS.

Nelle prove sui sistemi BFRG non si è mai arrivati al distacco del sistema dal supporto e questo perché sono intervenuti prima altri meccanismi di crisi, dovuti essenzialmente alla scarsa resistenza a trazione del sistema.

Nelle prove di DSS la realizzazione di strisce di soli 5 cm, equivalenti a tre yarn della griglia, ha portato il sistema a rotture premature dei provini a trazione, prima si è fessurata la malta e via via si sono rotte le fibre.

Nel caso delle prove di Pull-Off, si è avuto il distacco dei tasselli in corrispondenza dell'interfaccia con il tessuto. Questa rottura probabilmente è da attribuire alla malta la quale ha sviluppato un comportamento fragile a causa del fatto che le condizioni ambientali in fase di preparazione dei provini non erano ottimali; pertanto, non si è avuta una corretta maturazione della stessa. Probabilmente, infatti, sia in termini di assorbimento di acqua da parte del supporto piuttosto poroso, sia in termini temperature piuttosto rigide in fase di maturazione, la malta non è stata in grado di sviluppare al meglio le proprie caratteristiche meccaniche. Migliori risultati, dunque, si potrebbero avere utilizzando appositi agenti impermeabilizzanti da passare sul supporto murario prima della applicazione della malta.

A livello quantitativo, i valori delle tensioni massime si sono misurati per i sistemi BFRP: le migliori proprietà delle resine epossidiche, sia in termini di capacità di

trasmissione dei carichi che di resistenza agli stessi, hanno permesso di raggiungere buoni livelli di carico tali da soddisfare abbondantemente i requisiti minimi imposti dalla CNR.

In generale quindi, appare come il sistema BFRP si sia rivelato una soluzione idonea per la tipologia di supporto analizzata, in quanto riesce a sviluppare con essa una buona aderenza. Per quanto riguarda il sistema BFRG, invece, si ritiene che le tipologie di prove effettuate non siano state in grado di fornire informazioni valide per valutare l'aderenza. Questa, comunque, non appare l'elemento debole del sistema in quanto le rotture che si sono avute non hanno mai interessato lo strato adiacente al supporto. Piuttosto si deve realizzare un maggiore controllo delle modalità e tecniche di preparazione dei provini affinché i materiali possano sviluppare al meglio le loro proprietà.

## **5 Conclusioni**

### **5.1 Introduzione**

Il seguente lavoro di tesi ha avuto il duplice scopo, da un lato, di investigare la possibilità di utilizzare le fibre di basalto come rinforzo per materiali compositi, dall'altro, di indagare l'efficienza di sistemi compositi fibrorinforzati, a base di matrice organica e inorganica, applicati a supporti murari.

Entrambi i campi di indagine sono molto innovativi e convergono in una prospettiva di ricerca comune che punta allo sviluppo di sistemi di rinforzo ecosostenibili che siano il più possibile compatibili con gli elementi che devono essere rinforzati.

### **5.2 Le fibre di basalto e il loro futuro**

In una prima parte dell'attività di tesi, è stata condotta un'approfondita ricerca di letteratura scientifica che ha avuto come scopo quello di definire lo stato dell'arte delle fibre di basalto come rinforzo di materiali compositi.

Sono stati analizzati numerosi articoli redatti da università italiane e straniere e dal loro studio sono emerse buone caratteristiche meccaniche, un ottimo comportamento alle alte temperature e una buona resistenza chimica delle fibre di basalto.

Quest'ultimo aspetto è molto importante e, sebbene numerosi siano gli studi ad esso dedicati, alcuni dettagli rimangono ancora non molto chiari. Il basalto, infatti, essendo un materiale naturale, al variare della propria composizione chimica varia la propria risposta nei confronti di agenti aggressivi, e, proprio in virtù di questa grande variabilità intrinseca al basalto stesso, spesso è possibile incorrere in risultati differenti, a volte contraddittori. Si rende, quindi, necessario uno studio approfondito che vada a scandagliare tutte le possibili risposte dei compositi in fibre di basalto, soprattutto se si punta all'applicazione delle stesse in accoppiamento con il calcestruzzo.

Nel corso dell'attività sperimentale condotta presso il laboratorio del Cetma di Brindisi sono state effettuate una serie di prove a trazione su laminati realizzati con

tessuti e matrici commerciali, fornite da aziende leader nel settore dei materiali fibrorinforzati.

Sono stati realizzati quattro diversi sistemi, derivati dall'accoppiamento di due diversi tessuti unidirezionali (uno di tessitura 300tex e uno di 400tex) e quattro matrici differenti, due epossidiche e due inorganiche polimeromodificate.

I risultati ottenuti hanno confermato le buone prestazioni in termini di resistenze e rigidità dei provini, soprattutto dei sistemi con matrici organiche. Per quanto riguarda quelli con matrici inorganiche, è emersa in parte l'inadeguatezza del sistema, tessuto unidirezionale e matrice inorganica (sarebbe stato più opportuno utilizzare una griglia) e probabilmente le condizioni di prova non del tutto idonee ( le dimensioni dei provini in particolar modo).

Quello del basalto è ad oggi un argomento di ricerca molto interessante che, se approfondito, nel futuro può offrire importanti prospettive, soprattutto nel settore dell'edilizia. In Cina e nei paesi dell'Ex Unione Sovietica, in particolare Ucraina e Georgia, la fibra di basalto è ormai largamente utilizzata per questi scopi da decenni. In Europa, invece, si è ancora alle prime applicazioni, anche se paesi come la Norvegia e il Belgio hanno già intuito le grandi possibilità di questo materiale e stanno avviando delle industrie per la sua produzione.

In Italia è possibile ritrovare episodi isolati di università che hanno intrapreso alcune attività di ricerca come Pisa, Napoli e il Politecnico di Milano, inoltre il Laboratorio di tecnologie dei Materiali del Centro Enea di Trisaia sta sviluppando il Progetto Basalto con il quale si indaga la possibilità di sostituire l'acciaio con il basalto nel calcestruzzo.

Se queste ricerche dovessero portare ad esiti positivi i vantaggi che deriverebbero dall'uso del basalto sarebbero innumerevoli; tra questi, forse, il più importante è quello legato al fatto che il basalto è un materiale naturale, sostenibile e facilmente riciclabile e che per produrlo si hanno emissioni di CO<sub>2</sub> inferiori rispetto, ad esempio, a quelle dell'acciaio.

### **5.3 Applicazione di materiali compositi su supporti in muratura**

Nel corso del lavoro è stato affrontato un'altro importante argomento, quello legato all'uso di materiali compositi fibrorinforzati per interventi di rinforzo su strutture in muratura e, in particolar modo, è stata approfondita la questione legata all'aderenza.

È stata condotta una campagna sperimentale che ha previsto prove di DSS e di Pull-Off su due diverse tipologie di sistemi di materiali compositi applicati a supporti in pietra naturale: gli ormai noti compositi a matrice polimerica BFRP e i più innovativi compositi a matrice cementizia BFRG.

Come si è già detto in precedenza, questi sistemi in cui l'adesivo è una matrice inorganica sono molto interessanti perché permettono di superare importanti limiti legati soprattutto alle resine usate negli FRP.

Dalla campagna sperimentale è emersa la piena efficienza dei rinforzi BFRP, in cui i meccanismi di rottura innescati durante le prove hanno visto distacchi in corrispondenza di strati al di sotto del supporto.

I risultati delle prove BFRG hanno, invece, messo in luce una maggiore difficoltà nella valutazione dell'aderenza con prove tradizionali.

Nelle prove di DSS, le caratteristiche geometriche dei provini e lo strumento utilizzato hanno indotto il sistema ad una rottura prematura che non ha coinvolto l'aderenza con il supporto. Questo da un lato significa che sono necessarie condizioni di prova alternative, che tengano conto della fragilità delle malte e della ridotta resistenza di tessuti a griglia, e dall'altro però anche che l'aderenza con il supporto non è l'elemento debole del sistema.

Quest'ultimo aspetto è stato confermato dalle prove di Pull-Off. Si sono infatti avuti distacchi non in corrispondenza dello strato di malta a contatto con la pietra ma in corrispondenza dell'interfaccia griglia-malta superiore. La malta, infatti, probabilmente a causa dell'elevata porosità della pietra che ha assorbito molta acqua, non è maturata correttamente e per questo non è stata in grado di sviluppare una adeguata resistenza.

## 6 BIBLIOGRAFIA

A. A. Dalinkevich, K. Z. (2009). Modern Basalt Fibrous Materials and Basalt Fiber-Based Polymeric Composites. *Journal of Natural Fibers* , 6:248–271.

Basilio I., O. D. (2005). Experimental characterization of FRPmasonry. *Analytical models and new concepts in concrete and masonry*. Gliwice-Ustron.

Bin Wei, H. C. (2010). Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibers. *Materials Science and Engineering* , A 527 (2010) 4708-4715.

Bin Wei, H. C. (2011). Surface modification and characterization of basalt fibers with hybrid sizings. *Composites* , Part A 42 (2011) 22–29.

C. Scheffler, T. F. (2009). Aging of alkali-resistant glass and basalt fibers in alkaline solutions: Evaluation of the failure stress by Weibull distribution function. *Journal of Non-Crystalline Solids* , 355 (2009) 2588–2595.

Casareto M, O. A. (2003). Bond Behavior of FRP Laminates Adhered to Masonry. *Advancing with composites 2003*. Milano.

Ceroni F., P. M. (2003). Experimental bond behavior in masonry elements externally reinforced with FRP laminates. *Composites in Constructions*. Cosenza.

Czigány T., T. P. (2008). Static and dynamic mechanical behaviour of mineral fiber reinforced composites with polypropylene matrix. *Gépészet 2008*. Budapest.

Di Tommaso A., F. F. (2007). FRCM vs. FRP composite to strengthen RC beams: a comparative analysis. *FRPRCS-8 international symposium proceedings*. Patras.

Faella C., M. E. (2010). Shear capacity of masonry externally strengthened by a cement-based composite material: An experimental campaign. *Construction and Building Materials* , pp. 84-93.

G. Landucci, F. R. (2009). Design and testing of innovative materials for passive fire protection. *Fire Safety Journal* , 1103-1109.

Huang X., B. V. (2004). Properties and potential for application of steel reinforced polymer (SRP) and steel reinforced grout (SRG) composites. *Compos Part B: Eng* , pp. 73–82.

Jongsung Sim, C. P. (2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Composites* , Part B 36(2005)504-512.

Kolosh, H. (1998). Carbon Fibre Cement Matrix (CFRCM) Overlay System for Masonry Strengthening. *Journal of Composites for Construction* , 105-109.

Liu Y., D. J. (2005). Behaviour of GFRP sheets bonded to masonry walls. *International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*. Hong Kong.

Ludovico, M. D., Prota, A., & Manfredi, a. G. (2010). Structural Upgrade Using Basalt Fibers for Concrete Confinement. *JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION* , 541-552.

Mantegazza G., B. A. (2002). Composito fibroso a matrice cementizia (FRCM) per il recupero strutturale delle costruzioni. *SAIE 2002 Conferenza*. Bologna.

Prota A., M. G. (2006). Experimental In-Plane Behavior of Tuff Masonry Strengthened with Cementitious Matrix–Grid Composites. *Journal of composites for construction* , 223-233.

Roko K. E., B. T. (2001). Strain transfer analysis of masonry prisms reinforced with bonded carbon fiber reinforced polymer sheets. *The Masonry Society Journal* , 57-68.

Ross, A. (2010). Basalt Fibers: Alternative To Glass? *Composites World* .

T. Wittek, T. T. (2008). Mechanical properties and fire retardancy of bidirectional reinforced composite based on biodegradable starch resin and basalt fiber. *eXPRESS Polymer Letters* , Vol.2, No.11, 810-822.

V. Lopresto, C. L. (2010). Mechanical characterisation of basalt fiber reinforced plastic. *Elservier* .

Wobbe E., S. P. ( 2004). Flexural Capacity of RC Beams Externally Bonded with SRP and SRG. Long Beach.

Zhishen Wu, X. W. (2010). Tensile fatigue behaviour of FRP and hybrid Frp sheet. *Elservier* , Part B 41 (2010) 396-402.