



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile - Curriculum Edile

Tesi di Laurea

**Durabilità di materiali compositi applicati su  
murature in ambiente aggressivo:  
influenza della cristallizzazione salina sul fenomeno  
di aderenza**

Relatore: Prof.ssa Ing. Valluzzi Maria Rosa

Correlatori: Prof.ssa Arch. Cardani Giuliana

Ing. Panizza Matteo

Ing. Garbin Enrico

Ing. Girardello Paolo

Laureanda: Gallo Nicol

Anno Accademico 2013-2014







# Indice

<b>INDICE .....</b>	<b>I</b>
<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>1</b>
<b>STATO DELL'ARTE .....</b>	<b>5</b>
1.1 MATERIALI COMPOSITI .....	5
1.2 LE FIBRE .....	6
1.2.1 <i>Fibre di carbonio</i> .....	8
1.2.2 <i>Fibre in vetro</i> .....	8
1.2.3 <i>Fibre aramidiche</i> .....	8
1.2.4 <i>Fibre in basalto</i> .....	9
1.2.5 <i>Trefoli in acciaio</i> .....	9
1.2.6 <i>Confronto tra le fibre</i> .....	10
1.3 LE MATRICI .....	12
1.3.1 <i>Matrici organiche</i> .....	12
1.3.2 <i>Matrici inorganiche</i> .....	14
1.3.3 <i>Confronto tra matrici</i> .....	14
1.4 STUDI E RICERCHE SUI MATERIALI COMPOSITI .....	15
1.4.1 <i>Aderenza dei materiali compositi al substrato</i> .....	15
1.4.2 <i>Rinforzo di elementi strutturali</i> .....	17
1.5 DURABILITÀ DEI MATERIALI COMPOSITI .....	20
1.5.1 <i>Premessa</i> .....	20
1.5.2 <i>Durabilità dei materiali FRP</i> .....	21
1.5.3 <i>Durabilità TRM</i> .....	28
1.5.4 <i>La cristallizzazione salina e la durabilità dei compositi</i> .....	28
<b>DEGRADO DELLE MURATURE .....</b>	<b>35</b>
2.1 PREMESSA .....	35
2.2 GENERALITÀ.....	36
2.3 POROSITÀ DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE .....	37
2.4 L'ACQUA NELLE COSTRUZIONI.....	38
2.5 INTERAZIONE ACQUA-MATERIALI DA COSTRUZIONE.....	42
2.5.1 <i>Meccanismi fisici</i> .....	44
2.5.2 <i>Meccanismi chimici</i> .....	44
2.6 SALI SOLUBILI E LA LORO CRISTALLIZZAZIONE .....	45

2.6.1	<i>I sali</i> .....	46
2.6.2	<i>Cristallizzazione</i> .....	47
2.7	TEST DI RISALITA CAPILLARE E CRISTALLIZZAZIONE SALINA SUI MODELLI IN SCALA REALE DELLA SPERIMENTAZIONE CON I COMPOSITI .....	50
	<b>CAMPAGNA SPERIMENTALE</b> .....	<b>61</b>
3.1	PREMESSA .....	61
3.2	PROCEDURA SPERIMENTALE: PROVA PULL-OFF .....	63
3.3	AREA DI INTERESSE .....	65
3.4	MODELLI IN MURATURA A SCALA REALE .....	66
3.5	MATERIALI COMPOSITI DELLA SPERIMENTAZIONE .....	69
3.6	APPLICAZIONE DEI MATERIALI COMPOSITI AI PANNELLI MURARI IN ESAME .....	70
3.6.1	<i>Termografie</i> .....	79
3.7	FASE PRELIMINARE ALLE PROVE DI PULL-OFF .....	81
3.8	PROVE DI PULL-OFF .....	95
	<b>RISULTATI DELLE CAMPAGNA SPERIMENTALE</b> .....	<b>97</b>
4.1	RISULTATI DELLE PROVE PULL-OFF .....	97
4.2	TRATTAMENTO DATI .....	99
4.2.1	<i>Utilizzo di Gimp</i> .....	100
4.2.2	<i>Utilizzo di RDF</i> .....	100
4.2.3	<i>Calcolo delle aree e inserimento del coefficiente correttivo</i> .....	103
4.3	IL PANNELLO IN PIETRA A2 .....	108
4.4	CONFRONTO TRA SUPPORTI .....	110
4.5	CONFRONTO TRA COMPOSITI .....	115
4.5.1	<i>TRM ALBARIA</i> .....	115
4.5.2	<i>TRM EMACO</i> .....	118
4.5.3	<i>CFRP</i> .....	122
4.5.4	<i>GFRP</i> .....	124
4.5.5	<i>Confronto tra compositi</i> .....	127
4.6	CONFRONTO TRA ALTEZZE .....	133
	<b>CONCLUSIONI</b> .....	<b>141</b>
	<b>APPENDICE</b> .....	<b>147</b>
	TABELLA DEI RISULTATI SPERIMENTALI .....	147
	CATALOGAZIONE CAMPIONI .....	153
	SCHEDA TECNICA ALBARIA STRUTTURA .....	182
	SCHEDA TECNICA EMACO 955 M .....	188
	SCHEDA TECNICA MBRACE FIBRE .....	191

SCHEDA TECNICA FIBRE NET .....	195
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>199</b>





# Introduzione

Il consolidamento strutturale e, più in generale, gli interventi di rinforzo delle strutture esistenti, costituiscono oggi una delle principali attività nel settore dell'ingegneria civile. In Italia, in particolare, un forte impulso al consolidamento strutturale è determinato dalla necessità di ripristinare i dissesti prodotti dagli eventi sismici e soprattutto di garantire un adeguato livello di sicurezza sismica rispetto agli eventi futuri.

In quest'ambito, l'impiego di materiali compositi fibrorinforzati rappresenta un'importante innovazione tecnologica che trova crescente impiego nella pratica professionale. Si tratta di una tecnologia ormai consolidata nelle applicazioni su strutture in cemento armato e in costante crescita anche nelle applicazioni su strutture in muratura. Uno dei vantaggi risiede nelle elevate caratteristiche meccaniche dei compositi che consentono di ottenere incrementi di resistenza significativi, senza incrementi dei carichi sulla struttura.

A fianco dei compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) si sono sviluppati altri compositi che utilizzano fibre ad alta resistenza immerse in una matrice di malta inorganica. Le malte, pur essendo meno efficaci delle resine come adesivi, 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.

Se in letteratura si possono trovare numerose sperimentazioni riguardanti il comportamento dei compositi nei confronti dell'aderenza e del rinforzo strutturale, ben poco è stata studiata la durabilità di tali materiali.

La presente tesi si inserisce in questo contesto, con il proposito di fornire un contributo allo studio del comportamento di materiali compositi in riferimento all'applicazione su supporti murari degradati dall'interazione con l'ambiente circostante. La campagna sperimentale, eseguita in collaborazione con il Politecnico di Milano, prende in esame quattro tipologie di rinforzo, due a matrice inorganica (TRM), una malta di calce idraulica

(ALBARIA STRUTTURA) e una malta cementizia (EMACO R955M) accoppiate ad una rete in fibra di carbonio (*Fibre Net CF 200B*), e due a matrice organica (GFRP e CFRP) , costituiti da resina epossidica (MBrace Saturant Adesivo) accoppiata a tessuto unidirezionale in fibra di carbonio e in fibra di vetro (MBrace Fibre). Tali materiali sono stati applicati a due tipi di supporto, ossia una muratura in mattoni pieni e una in blocchi di arenaria, entrambe costruite con una malta a base di calce. I materiali sono stati forniti da BASF Construction Chemicals Italia Spa.

L'applicazione ha quindi riguardato un pannello in mattoni pieni in laterizio e uno in blocchi di pietra Serena, facenti parte di modelli in scala reale edificati negli anni '90 dal Politecnico di Milano presso il cantiere della vicina scuola edile (ESEM); i modelli sono stati sottoposti, nel corso degli anni, a numerose sperimentazioni inerenti il fenomeno della cristallizzazione salina, e risultano tuttora impregnati, come il terreno circostante le basi dei modelli, del solfato di sodio utilizzato allo scopo.

I pannelli, dopo un periodo di due mesi, necessario alla maturazione delle matrici inorganiche, sono stati sottoposti a cicli di cristallizzazione salina promossi dal contatto con l'acqua contenuta in serbatoi presenti alla base delle murature; durante il processo si sono individuate nei pannelli murari tre fasce significative: la zona più vicina al terreno caratterizzata da risalita capillare e cristallizzazione salina, la zona alta del pannello indisturbata, e una zona di transizione tra le due. Per indagare gli effetti nei confronti dell'adesione dei materiali compositi al supporto si è scelta la prova di pull-off, che consiste nell'applicare una forza ortogonale ad una superficie isolata dall'area circostante mediante apposite incisioni, e misura la resistenza allo strappo di materiali stratificati applicato ad un substrato. Si sono quindi condotte 112 prove: le variabili che entrano in gioco sono la tipologia di composito, il tipo di supporto, il degrado del substrato e la presenza o meno del giunto di malta.

Nel primo capitolo del documento si illustrano le caratteristiche dei materiali compositi, in riferimento a diverse tipologie di matrici e diversi tipi di fibre, e si riportano i principali contributi sperimentali presenti in letteratura che riguardano l'aderenza e l'utilizzo dei compositi per il rinforzo strutturale di travi, pannelli murari e archi o volte. Si è poi dedicata una parte al tema della loro durabilità, per fornire quante più informazioni possibili sul loro comportamento in condizioni ambientali aggressive. Il secondo capitolo riporta gli aspetti principali legati al degrado delle murature, cioè le conseguenze

dell'interazione dei materiali da costruzione con l'ambiente, con particolare attenzione al problema della risalita capillare e della cristallizzazione salina. È inoltre presentata la ricerca condotta da *Baronio e Binda* (1991-2010) sulla l'effetto degradante dei sali su modelli in muratura a scala reale; tali modelli saranno poi presi in esame per la sperimentazione dei materiali compositi di cui tratta la tesi. Nei capitoli seguenti si presentano il programma sperimentale, le attività condotte e la descrizione dei risultati sperimentali ottenuti, il loro trattamento ed elaborazione. Infine, le conclusioni di questa campagna sperimentale sono presentate nel quinto ed ultimo capitolo.



## Capitolo 1

# Stato dell'arte

In questo capitolo si fornisce una panoramica dello stato dell'arte relativo a: i materiali compositi, le fibre e le matrici, gli studi e le ricerche ad essi correlate, e la durabilità di tali materiali.

### 1.1 Materiali compositi

La definizione di materiale composito, data dall'ASM (*Materials Engineering Dictionary*), è: *“a combination of two or more materials (reinforcing elements, fillers, and composite matrix binder), differing in form or composition on a macro scale. The constituents retain their identities, that is, they do not dissolve or merge completely into one another although they act in concert. Normally, the components can be physically identified and exhibit an interface between one another”*.

Il punto chiave dei materiali compositi risulta quindi essere l' accoppiamento di materiali diversi, con proprietà significativamente diverse (se non opposte) in modo tale che le proprietà dell'unione siano per lo più migliori delle proprietà dei singoli costituenti.

In generale si distinguono quattro fasi in un materiale composito:

1. *la matrice* è il costituente continuo che, bloccando il rinforzo, gli trasferisce il carico esterno e lo protegge dai fattori ambientali, dall'usura e da eventuali azioni meccaniche di taglio;
2. *il materiale di rinforzo* che viene aggiunto sotto forma di fibre lunghe, fibre corte o particelle;
3. *l'interfaccia*, cioè la zona di contatto tra il materiale di rinforzo e la matrice;

4. *le porosità* che possono venire a formarsi tra matrice e fibra essendo il loro accoppiamento di tipo meccanico e quindi soggetto ad imperfezioni.

Considerare i compositi solo in funzione di matrice e rinforzo è fuorviante: le prestazioni ottenibili possono variare moltissimo al variare delle interazioni interfacciali e della porosità. Se la relazione matrice-rinforzo è alla base della progettazione dei compositi, la considerazione delle altre due fasi sono di vitale importanza nella produzione industriale.

Il composito è quindi un materiale con carattere anisotropo ed eterogeneo, costituito da più componenti unite con lo scopo di combinarne le proprietà chimiche e meccaniche in modo da ottimizzarle nel prodotto finale, ottenendo caratteristiche non ottenibili con i singoli costituenti. I materiali compositi sono infatti caratterizzati da elevata resistenza e rigidità, hanno bassa densità e peso, offrono ottime proprietà di resistenza anche nei confronti della corrosione e dell'usura, nonché una grande versatilità.

Per tali motivi negli ultimi anni si è verificata un'ampia diffusione dei compositi nel campo delle strutture civili ed edili: le prime applicazioni su calcestruzzo armato e acciaio risalgono agli anni ottanta; successivamente, alla fine degli anni novanta, i compositi sono stati proposti per rinforzo di strutture in muratura; negli ultimi anni sono stati impiegati soprattutto nel campo del consolidamento strutturale, per interventi di adeguamento o miglioramento sismico affianco ai tradizionali metodi di rinforzo.

## **1.2 Le fibre**

La fase fibrosa è costituita da fibre molto sottili di varia lunghezza alle quali sono dovute le principali caratteristiche meccaniche del materiale composito finale. Il materiale delle fibre è solitamente tenace, rigido, caratterizzato da alte resistenze ma con un comportamento prevalentemente fragile. Nella definizione di fibra, secondo la normativa ASTM D3868, si stabilisce che possa essere chiamato filamento qualunque materiale di forma allungata che abbia il rapporto tra la minima lunghezza e la massima dimensione trasversale di 10:1 e con una massima dimensione trasversale inferiore al millimetro. La denominazione di fibra viene invece associata a uno o più filamenti riuniti in modo ordinato [ASTM D3868].

Le fibre sono quindi costituite da filamenti molto sottili e difficili da manipolare singolarmente. Per tale motivo le fibre sono disponibili commercialmente in vari e forme, di cui le più comuni sono [CNR-DT 200/2004] (Figura 1.1):

- *filamento (monofilament)*: elemento base con diametro di circa 10  $\mu\text{m}$ ;
- *cavo di filatura (tow)*: è il prodotto della macchina di filatura ed è costituito da un fascio di un gran numero di filamenti (dell'ordine delle migliaia), praticamente senza torsione, destinato ad essere filato, ritorto o strappato per l'utilizzazione sotto forma di fibra discontinua;
- *filo o filato (spun yarn)*: filo formato da fibre tenute insieme da torsione;
- *filo assemblato (roving)*: fascio costituito da filati assemblati parallelamente e senza torsione intenzionale.

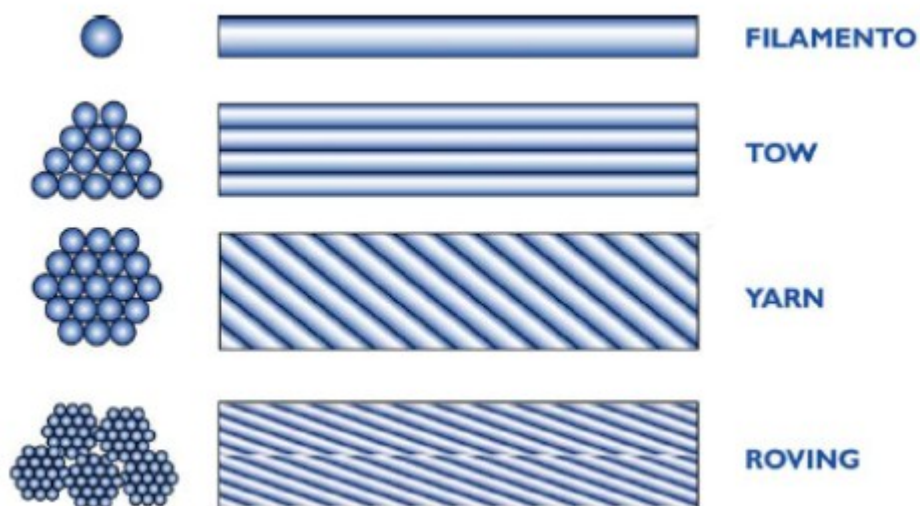


Figura 1.1: tipologie di fibre [CNR-DT 200/2004].

Unendo insieme alcune centinaia di *tows* o *yarns* si ottiene il *tape*, in cui i *tows* o gli *yarns* possono essere semplicemente affiancati oppure cuciti tra loro o fissati su un supporto. Nei *tessuti* invece le fibre sono disposte in modo da garantire una quasi isotropia nel piano.

Le fibre comunemente usate nei compositi sono quelle di carbonio, vetro e aramide: la loro geometria filiforme, con le quali si trovano in commercio, garantisce una grande versatilità nelle applicazioni e vi conferisce spiccate caratteristiche di rigidità e resistenza, questo grazie alla diminuzione dei difetti che spesso sono causa di innesco di

crisi locali; negli ultimi anni a queste si sono aggiunti nuovi materiali come le fibre di basalto, acciaio o le fibre derivanti da materiali naturali come canapa e lino

### **1.2.1 Fibre di carbonio**

Le fibre di carbonio, usate per la fabbricazione di compositi ad elevate prestazioni, si distinguono per l'alto modulo di elasticità normale (il quale può variare da valori di circa 150 GPa a valori prossimi a 850 GPa) e l'elevata resistenza (la loro tensione di rottura è generalmente compresa fra i 1900 MPa e i 3200 MPa). La moderna tecnologia di produzione delle fibre di carbonio si basa essenzialmente sulla pirolisi, cioè la decomposizione termica in assenza di ossigeno di sostanze organiche, tra i quali i più usati sono le fibre di poliacrilonitrile (PAN) e di rayon.

Tali fibre presentano un comportamento a rottura estremamente fragile.

A confronto con gli altri tipi di fibre, le fibre di carbonio risultano essere le meno sensibili ai fenomeni quali creep e fatica e sono contraddistinte da una modesta riduzione di resistenza a lungo termine.

### **1.2.2 Fibre in vetro**

Le fibre di vetro, usate per la fabbricazione di compositi con prestazioni medio-alte, si distinguono per la loro elevata resistenza (la loro tensione di rottura varia da 2400 MPa a 3500 MPa), e hanno un modulo di elasticità normale che varia da circa 50 GPa a valori prossimi a 85 GPa. Esse sono ottenute per filatura a caldo di vetri di composizione adatta in funzione del tipo di applicazione e dell'ambiente in cui si dovrà operare. Le fibre di vetro presentano una resistenza all'abrasione relativamente modesta e, inoltre, presentano una modesta resistenza allo scorrimento viscoso e a fatica.

### **1.2.3 Fibre aramidiche**

Le fibre aramidiche, fibre di natura organica costituite da poliammidi aromatiche in forma estremamente orientata, si distinguono per l'elevata tenacità e per la loro resistenza alle operazioni di manipolazione. Il modulo di elasticità normale e la resistenza a trazione sono intermedi tra quelli delle fibre di vetro e quelli delle fibre di carbonio. La loro



resistenza a compressione è di norma pari a circa 1/8 di quella a trazione. La tecnologia di produzione si basa sull'estrusione ad alta temperatura ed alta velocità del polimero con successivo raffreddamento veloce ed essiccamento. La sintesi del polimero viene effettuata prima dell'estrusione utilizzando soluzioni fortemente acide. Le fibre aramidiche possono degradarsi per esposizione prolungata alla luce solare, con perdita della resistenza a trazione fino al 50%. Il comportamento viscoso è simile a quello delle fibre di vetro, ma rispetto a queste ultime la resistenza a rottura è molto più elevata. Anche la resistenza a fatica flessionale è più elevata di quella delle fibre vetro.

#### **1.2.4 Fibre in basalto**

Il basalto è una roccia derivata dalla solidificazione della lava vulcanica (punto di fusione di circa 1400°C). È un miscuglio di ossidi di silicio, alluminio, calcio, magnesio, ferro e, in tracce, di altri elementi. Le fibre sono filamenti molto sottili di basalto che appartengono alla categoria delle fibre minerali assieme alle fibre di carbonio e alle fibre di vetro ma, rispetto a queste, hanno migliori proprietà meccaniche e fisiche. Sono inoltre ottimi isolanti termici e acustici, mantengono le proprietà meccaniche anche ad alte temperature e sono molto stabili chimicamente (sia in ambiente acido che alcalino). Le fibre di basalto sono una valida alternativa alle fibre di vetro, in quanto posseggono caratteristiche meccaniche comparabili in termini di resistenza meccanica e moduli di elasticità, ma presentano vantaggiose proprietà quali l'assenza di reazioni tossiche con aria o acqua, sono incombustibili, hanno un ottimo grado di isolamento termico, e non producono reazioni chimiche a contatto con altre sostanze chimiche.

#### **1.2.5 Trefoli in acciaio**

Sono fili di acciaio ad alta resistenza (Ultra High Tensile Strength Steel) continui e intrecciati a formare trefoli, a loro volta assemblati in un "tessuto". L'acciaio utilizzato è derivante dall'evoluzione di un acciaio perlitico o ipereutettoidico (con contenuti di carbonio tra lo 0.8% e lo 0.96%) sottoposto ad un processo che può essere riassunto in una prima trafilatura, seguita da rinvenimento, placcatura in ottone o zinco, trafilatura fine e taglio. Si raggiungono così classi di resistenza elevate (comprese, ad oggi, tra i 2400

ed i 4000 MPa) con diametri ridottissimi. I singoli fili sono prodotti in diametri dell'ordine di 0.20 - 0.48 mm, e nel complesso il trefolo ha dimensioni variabili tra 0.89 - 1.02 mm (quindi, tipicamente, un decimo del diametro minimo di un trefolo da precompressione). Le dimensioni così ridotte dei filamenti di acciaio sono, da un lato funzionali alla realizzazione di laminati flessibili e di spessore contenuto (tra 1.19 mm e 1.32 mm), dall'altro risultano essenziali nel raggiungimento di resistenze sufficientemente elevate da consentire il loro utilizzo a fini strutturali: è infatti durante il processo di trafilatura a diametri così ridotti che si osservano quei mutamenti della microstruttura dell'acciaio, da cui è possibile ottenere spiccate proprietà meccaniche.

### 1.2.6 Confronto tra le fibre

Nelle seguenti tabelle e nei seguenti grafici vengono comparate le tre tipologie di fibre esaminate nei paragrafi precedenti.

**Tabella 1.1:** Confronto tra le proprietà delle fibre di rinforzo [CNR-DT 200/2004].

	Modulo di elasticità normale $E$	Resistenza a trazione $\sigma_T$	Deformazione a rottura $\varepsilon_T$	Coefficiente di dilatazione termica $\alpha$	Densità $\rho$
	[GPa]	[MPa]	[%]	[ $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ]	[ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
Fibre di vetro E	70 – 80	2000 – 3500	3.5 – 4.5	5 – 5.4	2.5 – 2.6
Fibre di vetro S	85 – 90	3500 – 4800	4.5 – 5.5	1.6 – 2.9	2.46 – 2.49
Fibre di carbonio (alto modulo)	390 – 760	2400 – 3400	0.5 – 0.8	-1.45	1.85 – 1.9
Fibre di carbonio (alta resistenza)	240 – 280	4100 – 5100	1.6 – 1.73	-0.6 – -0.9	1.75
Fibre aramidiche	62 – 180	3600 – 3800	1.9 – 5.5	-2	1.44 – 1.47

Come si può notare le fibre di carbonio possono esibire valori del modulo di elasticità normale molto più elevati di quelli relativi ai comuni materiali da costruzione. Si tratta quindi di materiali molto efficienti dal punto di vista strutturale, che tuttavia possono generare problemi di accoppiamento con altri materiali, aspetto quest'ultimo da doversi sempre valutare con molta attenzione da parte del Progettista.

In Figura 1.2 si riporta il confronto tra le fibre in relazione al loro comportamento a trazione monoassiale: si vede che le fibre di vetro presentano maggiori deformazioni

percentuali. In Figura 1.3 sono relazionati il modulo e la resistenza a trazione delle principali fibre.

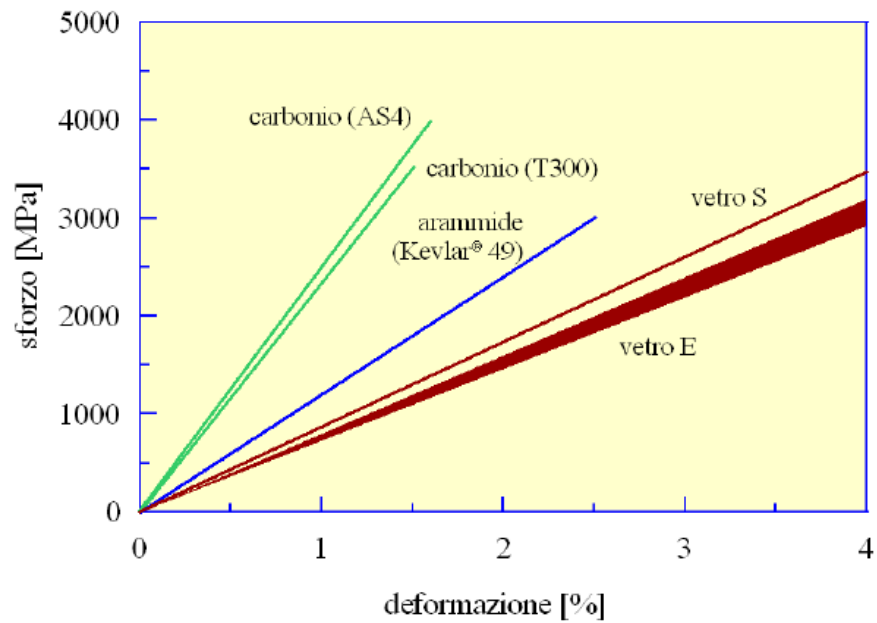


Figura 1.2: Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo: comportamento a trazione monoassiale [CNR-DT 200/2004].

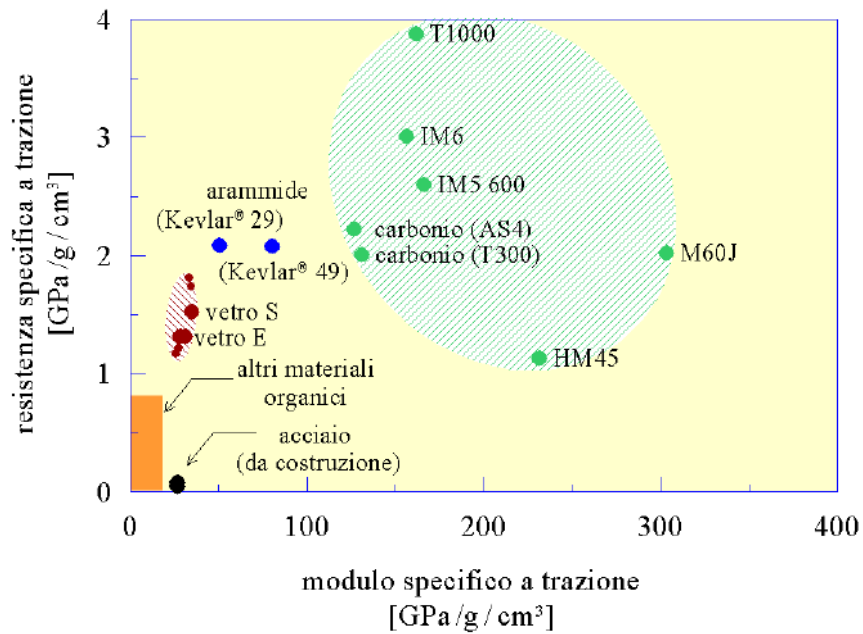


Figura 1.3: Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo: i valori del modulo e della resistenza sono rapportati alla densità (valori "specifici") [CNR-DT 200/2004].

### 1.3 Le matrici

La fase matrice ha il compito di dare forma e geometria al materiale, di inglobare le fibre, tenendole in posizione e proteggerle dalla corrosione o dalla formazione di difetti superficiali, di deformarsi in modo da trasmettere e distribuire, il più uniformemente possibile, le tensioni tra le fibre, che costituiscono l'elemento resistente. Le matrici, inoltre, devono assicurare un'adesione sufficiente (con eventuale interposizione di legante) e, contemporaneamente, resistere agli sforzi di taglio presenti all'interfaccia fibra-matrice in modo da essere in grado di trasmettere le sollecitazioni tra le fibre e, se necessario, anche tra gli spezzoni di fibre eventualmente danneggiate.

Se sottoposte alle variazioni di temperatura tipiche dei processi di fabbricazione del composito, le matrici non devono presentare ritiri di notevole entità per evitare l'insorgere di tensioni residue indesiderate nelle fibre o comunque nell'interfaccia fibra-matrice.

Nel campo delle costruzioni le matrici maggiormente utilizzate sono essenzialmente di due tipi:

- *matrici organiche*: sono prodotti caratterizzati da un vasto impiego, e sono costituiti principalmente da resine termoindurenti; Esistono numerose famiglie di resine che si differenziano le une dalle altre in base alla diversa composizione chimica, con ripercussioni sulle proprietà fisico-chimiche dei materiali;
- *matrici inorganiche*: sono prodotti di recente immissione nel campo dei materiali compositi con fibre; sono costituite da un legante idraulico pozzolanico e da additivi specifici che favoriscono lo sviluppo di particolari caratteristiche meccaniche e fisiche;

#### 1.3.1 Matrici organiche

Gli FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) sono i compositi "classici" realizzati con matrici organiche (resine epossidiche). Questa tipologia di matrice presenta alcune caratteristiche limitanti, proprie della tipologia del materiale, che riguardano soprattutto l'alta vulnerabilità alle temperature elevate, l'assenza di permeabilità al vapore e costi relativamente alti. Inoltre, le resine epossidiche utilizzate per questa funzione (di tipo

bicomponente) obbligano le maestranze di cantiere ad alcune precauzioni di fondamentale importanza per la buona riuscita dell'intervento di rinforzo. Le caratteristiche delle matrici organiche sono le seguenti:

- influenza dalla temperatura nella fase di applicazione della resina; la temperatura infatti gioca un ruolo fondamentale nelle reazioni di catalisi della resina epossidica. Temperature superiori a 25-30°C accelerano notevolmente la reazione di catalisi, facendo troppo rapidamente indurire la resina ed impedendo un'adeguata stesura. Al contrario, in presenza di temperature inferiori a 5°C la reazione di catalisi della resina difficilmente si innesca, impedendone l'indurimento;
- influenza dell'umidità del supporto; la struttura da sottoporre a rinforzo deve essere completamente asciutta ed eventualmente protetta da precipitazioni atmosferiche, in quanto l'indurimento della resina viene compromesso dalla presenza di acqua, poiché questa impedisce il comportamento della normale reazione di catalisi dei due componenti che formano la miscela;
- l'utilizzo di mano d'opera specializzata;
- l'utilizzo dei dispositivi di protezione individuale; le resine sono prodotti tossicologici per ingestione e contatto diretto con la pelle, e devono quindi essere trattati indossando guanti in lattice, tute di protezione e occhiali protettivi.
- scarsa resistenza al fuoco; nei polimeri infatti, superata una temperatura di 60°-80°C, si ha in generale un decadimento delle proprietà meccaniche. È necessario, quindi, in strutture rinforzate con sistemi compositi FRP, se esposte al pericolo potenziale del fuoco, predisporre impianti antincendio e rivestimenti resistenti;
- parziale irreversibilità dell'intervento in quanto la resina epossidica ha un forte potere impregnante, penetrando nella struttura con uno spessore di circa 10 mm;

Gli FRP più impiegati sono sicuramente i CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*), ai quali si affiancano gli SRP (*Steel Reinforced Polymer*).

### 1.3.2 Matrici inorganiche

Negli ultimi anni è stato sperimentato con successo l'impiego di rinforzi costituiti da fibre ad alta resistenza entro matrici inorganiche 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 inorganica 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;
- 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;
- 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 [Carbone, 2010] .

Di queste nuove generazioni di rinforzi, che impiegano matrici inorganiche, fanno parte gli FRCM (*Fiber Reinforced Cementitious Matrix*), gli SRG (*Steel Reinforced Grout*), i TRC (*Textile Reinforced Concrete*), e i BTRM (*Basalt Textile Reinforced Mortar*).

### 1.3.3 Confronto tra matrici

Un confronto delle principali caratteristiche/differenze tra le matrici inorganiche e quelle organiche è riportato in Tabella 1.2.

Tabella 1.2: principali differenze tra le due tipologie di matrice [Carbone, 2010].

Matrice	Resistenza alle alte temperature	Umidità del supporto	Lavorabilità	Permeabilità al vapore	Viscosità	Tossicità	Pulizia attrezzi per la posa
<u>Inorganica</u>	Uguale a quella del supporto	Favorisce l'adesione	Buona (Pot life molto ampio)	Comparabile con quella del supporto	Alta allo stato fluido con conseguente difficoltà di impregnazione delle fibre	Nulla	Con sola acqua
<u>Organica</u>	Perdono le caratteristiche strutturali tra i 60°- 80°C.	Deve essere totalmente assente	Limitata ad un certo periodo di tempo e variabile anche in base alla temperatura	Nulla	Bassa allo stato fluido con conseguente facilità di impregnazione delle fibre	Pericolosità sia per contatto che per inalazione, consigliato l'uso di DPI	Con solvente nitro

## 1.4 Studi e ricerche sui materiali compositi

La disomogeneità e l'anisotropia dei materiali compositi rende molto complesso lo studio del loro comportamento. Se la letteratura riguardante gli FRP è molto ampia, nel caso dei compositi a matrice inorganica i lavori di ricerca sono meno frequenti.

### 1.4.1 Aderenza dei materiali compositi al substrato

#### Matrici organiche

La caratterizzazione dell'aderenza dei compositi nei confronti del supporto è di fondamentale importanza per la previsione della portanza degli elementi strutturali rinforzati.

Relativamente ai compositi a matrice polimerica molte ricerche sono state condotte da diversi autori, inoltre nelle linee guida *CNR-DT 200/2004* e *CNR-DT 200 R1/2012* è suggerito un approccio progettuale per la valutazione dei limiti di aderenza. Altre

raccomandazioni disponibili per l'utilizzo di compositi classici sono quelle contenute nell'*ACI 440.2R-08* valido per gli Stati Uniti.

In *Huang et al. (2005)* sono state valutate sperimentalmente le proprietà degli SRP e confrontato queste proprietà con equazioni micro-meccaniche, per determinare se tali equazioni erano adatte per la previsione delle costanti del materiale. *Faella et al. (2009)* propone double-shear pull-out tests per analizzare il comportamento di CFRP e GFRP su quattro diversi campioni di supporto, in pietra naturale e in laterizio. Come parametro fondamentale viene indagata l'energia di frattura, il cui valore risulta fortemente influenzato dalla natura del substrato, mentre la tipologia di composito gioca un ruolo secondario. *Aiello e Sciolti (2006)* hanno investigato il comportamento di due tipi di CFRP su due tipologie di supporto in muratura, determinando le tensioni di aderenza e le corrispondenze che intercorrono con la geometria e la tipologia del supporto tramite Push-pull Shear Test. Per comparare l'aderenza di CFRP e SRP al supporto sono state eseguite prove a trazione [*Mitolidis et al., 2008*], in cui strisce dei due compositi sono state incollate a prismi di calcestruzzo per la misurazione delle tensioni di aderenza. Ne è risultato che l'adesione delle strisce di SRP è inferiore rispetto a quelle di CFRP, e che la larghezza delle fibre influisce sull'aderenza.

### Matrici inorganiche

Nel caso di compositi a matrice cementizia il fenomeno dell'aderenza si manifesta in modo sostanzialmente diverso da quanto accade, in generale, per gli FRP; infatti nei compositi a matrice cementizia le fibre tendono a scorrere rispetto alla matrice, mentre negli FRP non si hanno apprezzabili scorrimenti fibre/matrice e la delaminazione avviene nel primo strato di muratura. La sperimentazione con FRCM di *Focacci e Menegazza (2009)* ha consentito l'individuazione del meccanismo di delaminazione, essenzialmente consistente nella graduale perdita di aderenza tra le fibre e la matrice cementizia, mentre quest'ultima rimane perfettamente aderente al supporto.

Anche in *Carbone (2010)* i risultati sperimentali mostrano la tendenza, nei rinforzi a matrice cementizia, alla localizzazione del collasso nel rinforzo piuttosto che nel primo strato di supporto. In questa sperimentazione vengono condotte prove in funzione del tipo di rinforzo (CFRCM o SRG) e del materiale di supporto (laterizio o muratura in mattoni). *Banholzer e Brockmann (2006)* hanno eseguito uno studio sulle differenti tecniche e procedure di prova per determinare le proprietà dei TRC, le loro caratteristiche



di aderenza al substrato e l'effetto di diverse combinazioni di materiale. I test di pull-off sono stati condotti su fibre di vetro accoppiate ad una malta cementizia a grana fine. Si è ottenuto che l'adesione tra la matrice cementizia e le fibre è controllata da un forte legame d'interfaccia tra i filamenti più esterni del trefolo e la malta e dallo scorrimento dei filamenti più interni, fenomeno influenzato dal modo casuale e non prevedibile con cui la matrice penetra ad avvolgere i singoli filamenti.

### Confronto

Le prime prove di aderenza in cui si mettono a confronto matrici inorganiche con quelle organiche sono prove a taglio diretto eseguite da *Matana et al.* (2005); I test sono stati condotti su 24 coppie di provini in calcestruzzo uniti mediante SRP e SRG. I provini con SRP hanno prodotto una rottura del substrato di calcestruzzo per taglio, un considerevole danneggiamento del calcestruzzo, ma anche i carichi massimi a rottura; i provini rinforzati con SRG, invece, hanno registrato una rottura nello strato di malta e valori di carico ultimo nettamente inferiori.

## **1.4.2 Rinforzo di elementi strutturali**

### Travi in calcestruzzo armato

Gli FRP sono da tempo utilizzati per il rinforzo strutturale. Due campagne di prove a flessione su travi in c.a. rinforzate con FRP sono state condotte da *Kim et al.* (2005) e *El-Hacha* (2006). Nella prima campagna sperimentale sono state testate sei travi caratterizzate da diversa larghezza dello strato SRP. Nelle travi rinforzate si sono osservati incrementi della capacità portante sino a più del 53% e modalità di rottura pseudo-duttile. Anche per la seconda indagine sono state testate sei travi, alle quali sono state applicate diversi tipi di compositi CFRP e SRP; i risultati confermano una modalità di rottura duttile per tutte le travi, con aumento del 25% per il carico a snervamento e del 42% per il carico ultimo. Indagini su travi in c.a. rinforzate a flessione con SRP sono state portate a termine da *Casadei* (2005), *Prota e Nanni* (2005), i cui risultati sperimentali hanno fornito informazioni importanti circa le prestazioni delle travi rinforzate in termini di resistenza, deformazioni e modalità di fallimento.

Per quanto riguarda i rinforzi con matrice cementizia sono ancora relativamente pochi i contributi che riguardano il loro comportamento. Lo studio presentato da *Mantegazza e*

*Barbieri (2002)* tratta dell'impiego di un sistema composito strutturale fibroso in matrice cementizia. Sono state condotte prove a compressione diagonale su pannelli in muratura rinforzati con FRCM, da cui risultano dati sperimentali che evidenziano un incremento medio del carico massimo del 50% nel caso di pannello rinforzato unilateralmente con singolo strato di FRCM, del 170% nel caso di pannello rinforzato unilateralmente con doppio strato di FRCM, del 250% nel caso di pannello rinforzato bilateralmente con doppio strato di FRCM. Anche *Faella (2010)*, in seguito a prove di compressione diagonale su pareti in muratura di tufo, valuta un incremento della resistenza dei pannelli rinforzati con CFRM.

Altre ricerche mettono a confronto le performance di sistemi di rinforzo a matrice inorganica e organica. In *Wobbe et al. (2004)* sono state sottoposte a prova di flessione quattro travi, di cui una di controllo, rinforzate con SRG e SRP. Le tre travi rinforzate con SRG e SRP sviluppano un livello di resistenza massima superiore a quello dell'elemento di controllo. Il comportamento ultimo di travi in c.a. rinforzate a flessione con materiali compositi è stato studiato anche da *Prota et al. (2004)*. Il programma sperimentale ha previsto prove a flessione su 10 travi in spessore, di cui una trave di controllo, due rinforzate con CFRP, quattro rinforzate con tessuto in acciaio ad alta densità incollato con resina epossidica, e tre rinforzate con tessuto in acciaio a bassa densità impregnato con malta cementizia. La modalità di rottura di tutti gli elementi, ad eccezione della trave di controllo, è per delaminazione del rinforzo; tuttavia l'uso di CFRP consente un aumento di resistenza più significativo rispetto a quello ottenuto per l'uso dei tessuti in acciaio impregnati sia con resina che con malta cementizia. In *Di Tommaso et al. (2007)* è stato posto a confronto l'incremento di resistenza ottenuto con compositi CFRCM rispetto a quello ottenuto con CFRP. L'osservazione del collasso ha mostrato un minor incremento di resistenza nelle travi rinforzate in CFRCM associato però 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.

*Huang et al. (2005)* presentano una ricerca finalizzata alla dimostrazione dell'efficacia di SRP e SRG. Tale efficacia è valutata su strutture esistenti per gli SRP, mentre le prestazioni SRG sono state studiate su travi in cemento armato preparate in laboratorio. Si dimostra che entrambi i compositi migliorano significativamente la resistenza dei componenti in calcestruzzo, quindi SRG e SRP risultano idonei per applicazioni pratiche.

### Pannelli murari

Numerose ricerche sul comportamento fuori piano di pannelli murari rinforzati con compositi si sono sviluppate a partire dalla sperimentazione di *Triantafillou* (1998), dove veniva analizzata la flessione fuori piano, nel piano e il taglio di pannelli rinforzati con CFRP. Nello stesso anno *Gilstrap e Dolan* (1998) hanno realizzato un programma di prove a flessione su quattro punti orizzontali eseguite per sei pannelli di muratura rinforzati con AFRP e CFRP. Le conclusioni ottenute da queste prime sperimentazione sono risultate molto incoraggianti perché si è dimostrata l'efficacia del rinforzo di FRP. A seguito di queste ricerche si sono affiancati gli studi di *Silva et al.* (2001), *Albert et al.* (2001), *Hamoush et al.* (2002), e *Hwee Tan et al.* (2004), Galati (2006). Successivamente si è studiato il comportamento dei campioni sottoposti a flessione su tre punti in orizzontale utilizzando cicli di carico [*Papanicolaou et al.* 2007], l'importanza di questa ricerca sta nell'utilizzo di TRM oltre a i classici FRP. Da questi test, si concluso che il rinforzo con matrice cementizia consente un sostanziale aumento di resistenza e di deformabilità; questo beneficio è tanto più grande quanto maggiore è il numero di fibre.

### Archi e volte

Per quel che riguarda il rinforzo di archi e volte sono state sperimentate sei volte in muratura rinforzate con strisce di GFRP e di CFRP. I risultati hanno precisato l'aumento nella resistenza e nella duttilità delle volte rinforzate e l'influenza sulla resistenza ultima della larghezza delle strisce e del legame fra il laminato e la muratura [*Valluzzi et al.*, 2001]. In *Badalà et. al* (2001) è illustrata una procedura di analisi limite, per il calcolo della capacità portante di volte a botte rinforzate con CFRP. Uno studio sperimentale ed analitico è stato effettuato su modelli di archi in muratura con differenti configurazioni di rinforzo tramite strisce in fibra di carbonio CFRP [*Briccoli Bati et al.*, 2007]. L'analisi sperimentale effettuata ha permesso di valutare sia l'efficacia delle differenti configurazioni di rinforzo che l'affidabilità dei modelli analitici proposti per il calcolo del carico di collasso della struttura, oltre all'aumento nel carico, nella rigidezza e nella duttilità al collasso degli archi in muratura una volta rinforzati con le strisce di CFRP. Nel lavoro di *Oliveira e Basílio* (2006) è stata focalizzata l'attenzione sul comportamento degli archi in muratura di laterizio, rinforzati con strisce in fibra di vetro (GFRP). I risultati sperimentali ottenuti mostrano come il rinforzo in GFRP utilizzato per queste indagini

produce un sensibile miglioramento nelle prestazioni della struttura rispetto alla stessa non rinforzata.

Sono state effettuate prove sperimentali su archi e volte anche con compositi con matrice cementizia e fibre di carbonio (CFRCM) [Jasienko *et al.* 2009]. In Briccoli Bati e Rovero (2007) sono stati impiegati tessuti di vetro applicati con malta cementizia (GFRM) su tutta la superficie di intradosso dell'arco riscontrando un incremento della capacità portante, senza un'alterazione del cinematismo di collasso tipico dell'arco non rinforzato. È stato indagato anche il comportamento di archi rinforzati con fibre di basalto annegate in matrice cementizia (BTRM), convalidando la semplicità dell'applicazione di BTRM, anche su supporti di forma che hanno una forma complessa e l'efficacia di questo sistema di rinforzo che porta ad un miglioramento del comportamento meccanico della struttura in termini di resistenza e deformazione.

In Borri *et al.* (2007) sono state comparate le prestazioni di SRP e SRG applicati a strutture ad arco in muratura, da cui ne risulta che i materiali compositi SRP/SRG hanno determinato un significativo incremento della capacità portante sia nel caso di applicazioni estradossali che in quello di applicazioni intradossali; inoltre nelle applicazioni intradossali, l'impiego della matrice cementizia ha garantito le migliori prestazioni in termini di capacità portante, consentendo una migliore redistribuzione delle tensioni tra il laminato e la corteccia muraria.

## **1.5 Durabilità dei materiali compositi**

### **1.5.1 Premessa**

E' di fondamentale importanza conoscere quali siano i problemi di durabilità connessi all'impiego dei materiali compositi utilizzati in interventi di consolidamento strutturale.

Con durabilità, in riferimento ai compositi, si intende la capacità di un materiale di resistere ad azione atmosferiche, attacchi chimici, all'abrasione, e le altre condizioni di servizio [ACI 440.2R-08]. Per quanto riguarda gli FRP, molti di questi sistemi presentano ridotte proprietà meccaniche dopo l'esposizione a determinati fattori ambientali, tra cui l'alta temperatura, l'umidità, e l'esposizione chimica.

Per quanto riguarda i compositi a matrice inorganica sono ancora pochi, se non nulli, gli apporti in letteratura in riferimento alla durabilità. In generale, vista l'attuale esigua disponibilità di dati relativi al comportamento a lungo termine dei materiali compositi, si consiglia, in situazioni di particolare rilevanza (con riferimento alla destinazione d'uso manufatto della struttura sulla quale si è intervenuti, al numero di elementi rinforzati e all'entità degli incrementi di resistenza conseguiti), un adeguato monitoraggio delle applicazioni. Esso può consistere nell'esecuzione periodica di prove sia non distruttive che semi-distruttive, o di prove mediante sensori incorporati. Lo scopo è quello tenere sotto controllo i seguenti parametri o solo alcuni di essi [CNR-DT 200/2004]:

- temperatura del rinforzo;
- umidità dell'ambiente;
- andamento di spostamenti e deformazioni;
- continuità e livello di danneggiamento delle fibre;
- estensione dei difetti di incollaggio.

### 1.5.2 Durabilità dei materiali FRP

L'esposizione ad un ambiente aggressivo, il tipo di fibra, il tipo resina, la formulazione e il metodo di polimerizzazione sono alcuni dei fattori che influenzano la riduzione nelle proprietà meccaniche. La causa del degrado può essere fisica o chimica, e gli effetti possono essere reversibili o irreversibili. La Tabella 1.3 riassume i possibili meccanismi di degrado nei sistemi FRP [Dejke, 2001]. L'ACI 440.2R-08 introduce il *fattore di riduzione ambientale*  $C_E$  che risulta essere una stima della durata di ciascun tipo di fibra in base all'ambiente con cui viene a contatto. La Tabella 1.4 illustra come, se il sistema FRP è applicato in un ambiente non aggressivo, ad esempio in interni, il coefficiente  $C_E$  è più vicino all'unità. Se il sistema si trova in un ambiente aggressivo, caratterizzato da umidità, cicli di gelo-disgelo, presenza di sali, o alcalinità, è necessario utilizzare un  $C_E$  più basso.

**Tabella 1.3:** possibili meccanismi di degrado negli FRP [Dejke, 2001].

<b>Component</b>	<b>Reversible changes</b>	<b>Irreversible changes</b>
<b>Resin</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Water swelling</li> <li>* Temperature flexibilising</li> <li>* Physical ordering of local molecular regions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Chemical breakdown by hydrolysis</li> <li>* Chemical breakdown by UV-radiation</li> <li>* Chemical breakdown by thermal activation</li> <li>* Chemical break-down by stress induced effects associated with swelling and applied stress</li> <li>* Physical ordering of local molecular regions</li> <li>* Chemical composition changes by leaching</li> <li>* Precipitation and swelling phenomena to produce voiding and cracks</li> <li>* Non-uniform de-swelling to produce surface cracks and crazes</li> <li>* Chemical effect of thermoplastic polymer content on long term stability</li> </ul>
<b>Interface</b>	Flexibilising interface	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Chemical breakdown as for resin (see above)</li> <li>* Debonding due to internally generated stresses associated with shrinkage and swelling and the applied stress</li> <li>* Leaching of interface</li> </ul>
<b>Fibre</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>* Loss of strength due to corrosion</li> <li>* Leaching of fibre</li> <li>* Chemical breakdown by UV-radiation</li> </ul>

**Tabella 1.4:** Fattore di riduzione ambientale  $C_E$  per i sistemi FRP [ACI 440.2R-08].

Exposure conditions	Fiber type	Environmental reduction factor $C_E$
Interior exposure	Carbon	0.95
	Glass	0.75
	Aramid	0.85
Exterior exposure (bridges, piers, and unenclosed parking garages)	Carbon	0.85
	Glass	0.65
	Aramid	0.75
Aggressive environment (chemical plants and wastewater treatment plants)	Carbon	0.85
	Glass	0.50
	Aramid	0.70

La zona critica nello studio della durabilità degli FRP è considerata l'interfaccia tra l'adesivo e il substrato. La meccanica del legame di aderenza non è ancora stata definita in maniera completa; *Dolan et al.* 2008 distingue due fattori di aderenza: ingranamento meccanico e collegamento superficiale che include il legame a idrogeno. L'ingranamento meccanico si ha quando l'adesivo ancora allo stato viscoso penetra all'interno dei pori

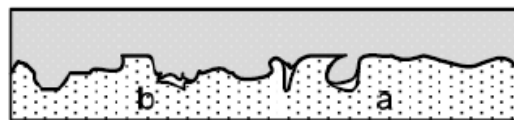
superficiali del substrato e solidificando genera una sorta di ancoraggio. I legami ad idrogeno responsabili di una stabile aderenza tra adesivo e substrato sono frutto di una interazione chimica tra quest'ultimi. Si possono quindi avere due situazioni di stesura dell'adesivo: una permette il completo sviluppo di un legame tra adesivo e substrato, incrementando la resistenza a trazione tangenziale e normale del legame di aderenza (Figura 1.4, b), nell'altra una resina troppo viscosa solidifica senza penetrare a fondo nei pori, e non permettendo così una corretta aderenza (Figura 1.4, c).



a) Roughened surface



b) Perfect adhesive coating



c) Flaws in adhesive coating

Figura 1.4: tipologie di interfaccia adesivo – substrato [Dolan, 2008]

I due principali fattori ambientali ai quali sono esposti gli FRP nell'ambito dell'ingegneria strutturale sono: la presenza d'umidità e l'effetto della temperatura. La prima racchiude i fenomeni di risalita d'acqua e di soluzioni saline nonché il movimento di umidità, la seconda i cicli di gelo e disgelo e l'effetto del fuoco e delle alte temperature.

La presenza di umidità o acqua in un composito FRP potrebbe comportare la rottura dei legami a idrogeno e la conseguente plasticizzazione della matrice polimerica riducendo la resistenza del legame di aderenza tra adesivo e substrato, comportando in prima istanza il danneggiamento fisico dell'adesivo e in seconda istanza il distacco dell'adesivo dal substrato. In *Chin et al.* (1998) viene condotta una sperimentazione con lo scopo di

caratterizzare l'assorbimento e il trasporto di liquidi attraverso tre film costituiti da tre matrici di materiale composito differenti: resina epossidica, isopoliestere e vinilestere. Sono stati immersi sei provini per ogni specie in tre liquidi diversi: acqua distillata, soluzione salina ed una soluzione cementizia che simulasse le condizioni alcaline che si sviluppano all'interno del cemento. Le immersioni sono state fatte secondo due diverse temperature ambientali: 22°C e 60°C. Dai risultati si è concluso che la resina epossidica alla quale corrisponde il più alto valore dell'equilibrio di massa e di solubilità presenta il minor valore del coefficiente di diffusione. *Ghiassi et al. (2013)* ha affrontato il problema dell'umidità nei compositi attraverso una sperimentazione in cui mattoni rinforzati con CFRP e GFRP venivano immersi in acqua deionizzata per 24 settimane. Il degrado nell'aderenza dovuto all'umidità è stato investigato tramite prove pull-off e pull-out dopo diversi tempi di immersione. L'immersione in acqua ha comportato una riduzione delle proprietà meccaniche dei materiali costituenti. La resistenza a compressione dei mattoni si è ridotta del 25% dopo 24 settimane di immersione. Un'analoga riduzione è stata osservata anche nella resistenza alla trazione della resina epossidica. Anche la resistenza di pull-off dei campioni è significativamente diminuita (circa 60%) dopo 24 settimane di immersione.

Come suddetto, anche la temperatura gioca un ruolo fondamentale per quanto riguarda la durabilità del legame d'aderenza tra composito e substrato. La temperatura di transizione vetrosa  $T_g$  è una temperatura limite, oltre la quale si ha un crollo delle prestazioni del composito FRP. Il raggiungimento di quest'ultima comporta il rammollimento della matrice (resina epossidica) ed un conseguente indebolimento del legame di aderenza nonché un calo della capacità portante dell'intero materiale composito (30 - 40 %). *Camata e Spacone (2007)* valutano l'influenza delle alte temperature sul comportamento di debonding tra FRP e cemento armato. I test compiuti in laboratorio sono stati svolti considerando temperature comprese tra 40°C e 120°C, esaminando tre tipi diversi di resine epossidiche aventi diverse temperature di transizione vetrosa. La sperimentazione consiste in un totale di 20 double-lap shear test su provini il calcestruzzo rinforzati con CFRP. I risultati delle prove evidenziano due modalità principali di rottura: coesiva all'interno del calcestruzzo e adesiva all'interfaccia; oltre le temperature di transizione vetrosa delle resine nella matrice si verificava l'effetto di *softening*, che comporta il trasferimento del carico alla sola fibra.



Anche temperature inferiori allo zero potrebbero risultare pericolose, infatti gelano l'acqua presente nei vuoti superficiali del substrato e nell'interfaccia FRP – substrato, generando fenomeni espansivi che potrebbero portare alla delaminazione.

Le ricerche compiute per valutare il comportamento d'aderenza a diverse temperature sono limitate e spesso offrono risultati discordanti. *Silva e Biscaia* (2008) hanno eseguito prove a flessione e pull-out test per analizzare gli effetti dei cicli di gelo-disgelo su campioni di travi rinforzate esternamente con GFRP o CFRP. I campioni sottoposti a cicli di gelo-disgelo hanno mostrato una riduzione della capacità di carico. *Colombi et al.* (2010) presenta i risultati di una sperimentazione avente lo scopo di valutare il legame di aderenza tra strisce di CFRP e applicati a prismi di calcestruzzo. Sulla base delle raccomandazione ASTM alcuni campioni sono stati esposti a 100 o 200 cicli di gelo-disgelo, da -18°C a +4°C, per una durata di circa 5 ore ciascuno, permettendo di analizzare il legame di aderenza a seguito di un'esposizione ad ambiente aggressivo. In questo caso risulta che i cicli termici sembrano non influenzare sensibilmente il valore della forza di adesione per i provini rinforzati con CFRP. Risultati simili sono stati ottenuti anche da *Toutanji e El-Korchi* (1999), che presentano i risultati di una sperimentazione sulle prestazioni a trazione di provini rinforzati con CFRP sottoposti a 300 cicli di gelo-disgelo; tali provini non hanno presentato alcuna riduzione significativa nella resistenza a causa dell'esposizione ai cicli termici.

La concomitanza di umidità ed elevate temperature in concorrenza ai normali carichi applicati ha un'influenza consistente sulla durabilità dell'aderenza; in generale tutte le proprietà resistenti calano all'aumentare del livello di umidità e temperatura. La sperimentazione di *Meyers e Ekenel* (2005) è focalizzata proprio nella valutazione dell'effetto dell'umidità superficiale, dell'umidità relativa e della temperatura sull'aderenza tra calcestruzzo e rinforzo in CFRP. A tal proposito sono state effettuate test di pull-off e prove di flessione. Il trend generale dei risultati delle prove di pull-off eseguite sui provini sottoposti a cinque differenti situazioni di umidità, mostra come le prestazioni dell'aderenza diminuiscano all'aumentare della percentuale di umidità relativa; ciò accade sia in termini di tensione allo strappo che in termini di tipologia di rottura. Per quanto riguarda la temperatura si è osservato che per temperature inferiori allo zero, l'impregnazione risultata difficoltosa, mentre per le temperature superiori ai 40°C non ci sono state grosse difficoltà nell'installazione visto un più veloce indurimento

da parte dell'adesivo. *Aiello e Sciolti* (2007) analizzano il comportamento all'interfaccia FRP-muratura in termini di durata sotto specifiche condizioni ambientali, simulate in laboratorio con l'utilizzo di una camera climatica a 40°C e 90% di umidità per circa sei mesi. L'analisi di aderenza è stata effettuata mediante prove double-shear su elementi in pietra rinforzati con CFRP e GFRP. L'influenza della temperatura e dell'umidità è risultata variabile, a seconda della degradazione dei materiali polimerici utilizzati per il rinforzo. Generalmente si è registrato un decadimento della forza di legame, che colpisce in alcuni casi lo strato di interfaccia e in altri casi anche la zona di rinforzo. Anche *Bricoli Bati e Rotunno* (2001) indagano sull'interazione umidità-temperatura-durabilità. La sperimentazione consiste in una serie di shear test (con controllo di spostamento del mattone centrale ad ogni incremento di carico pari a 500 N) su provini in muratura, realizzati con triplette di mattoni messi in opera con della comune malta bastarda, rinforzati con CFRP e sottoposti a cicli di gelo – disgelo e umido – secco. Ne risulta che i provini rinforzati, nonostante l'esposizione ai cicli di degrado, hanno un valore del picco di rottura doppio rispetto a quelli non rinforzati. I risultati derivati dai cicli di gelo – disgelo rivelano un progressivo e continuo decadimento della resistenza a taglio. Sicuramente il parametro più significativo, per misurare l'effetto del degrado risulta essere il carico di picco, che confrontato con il valore fornito dai provini rimasti in condizioni ottimali di laboratorio, offre la stima del decremento di resistenza del legame di aderenza. In *Valluzzi et al.* (2011) si è vista la realizzazione di prove di laboratorio su assemblaggi murari costituiti da uno a tre mattoni di laterizio con interposti giunti di malta, rinforzati con strisce di CFRP in diverse configurazioni, sottoposti a cicli termici e condizioni di umidità differenti. Le prove di adesione sono state condotte con il sistema pull-off. Per valutare l'effetto dell'umidità nell'aderenza tra supporto e composito si sono considerate tre condizioni di saturazione dei provini prima dell'applicazione dei fibrorinforzati. I risultati di queste prove mostrano che maggiore è il contenuto di acqua nel supporto minore è la tensione di pull-off. La presenza di malta influenza negativamente l'aderenza FRP-supporto. La ricerca sperimentale sotto cicli termici ha mostrato che possono verificarsi alcuni danni irreversibili a causa del diverso comportamento della resina nell'adesione: in caso di mattoni altamente porosi la rottura avveniva sempre in corrispondenza del mattone e i valori di tensione di pull-off mostrano una chiara riduzione. In caso di mattoni meno porosi il danno sembra non verificarsi.

L'esposizione a combinazioni di diversi fattori ambientali, oltre ad elevata temperatura e umidità, di campioni rinforzati con FRP è stata oggetto di alcune di ricerche; un'indagine su 10 diversi sistemi di rinforzo esposti a cinque ambienti diversi per un periodo di 24 mesi è stata condotta da *Karbhari e Gosh* (2009). Lo studio è focalizzato sulle performance di CFRP e GFRP. I provini rinforzati con tali compositi sono stati esposti a diverse condizioni ambientali: immersione in acqua deionizzata a 22.8°C, in acqua salata (soluzione al 5% di NaCl) a 22.8°C, o in acqua deionizzata a 37.8° C, oppure immersione in soluzione alcalina a base di cemento a 22.8°C; sono state considerate anche le condizioni di temperatura ambiente, di 22.8°C, per i campioni di controllo. I risultati mostrano chiaramente gli effetti di deterioramento sul legame di aderenza risultato dell'esposizione in ambiente aggressivo. La metà dei sistemi mostra la perdita di oltre il 40% nella tensione di pull-off nel corso del periodo di indagine. Test accelerati su prismi di cemento rinforzati con GFRP sono stati portati a termine da *Mukhopadhyaya et al.* (1998). Questi test consistevano nell'esposizione dei campioni a cicli alternati di asciutto-bagnato in una soluzione di cloruro di sodio al 5 % , a cicli di gelo-disgelo in aria con una temperatura tra i 20°C e i -17.8°C, e una combinazione tra immersioni in soluzioni clorate e cicli di gelo-disgelo. È stato provato che l'effetto negativo più immediato e diretto dell'esposizione a condizioni ambientali aggressive avviene nella zona di discontinuità tra il rinforzo e il substrato in calcestruzzo. Inoltre tutti gli esemplari esposti a regimi aggressivi hanno mostrato maggiori variazioni dimensionali e movimenti differenziali tra il rinforzo e il calcestruzzo rispetto ai campioni di controllo. La successione tra immersioni in soluzioni clorate e cicli di gelo-disgelo hanno portato a movimenti differenziali maggiori tra il GFRP e il supporto rispetto alle altre esposizioni, risulta quindi l'ambiente più aggressivo.

Altri test accelerati sono stati condotti da *Desiderio et al.* (2005) su murature in tufo trattate con CFRP, e sottoposte a cicli di temperatura, umidità, ed esposizione alla luce UV. I risultati hanno mostrato una diminuzione del carico di rottura e naturalmente del legame tra rinforzo e supporto, con un decadimento maggiore per l'esposizione UV dei campioni. In *Cromwell* (2011) vengono sperimentati diversi protocolli di prova che testano la durabilità di dei FRP nei confronti dell'ambiente aggressivo.

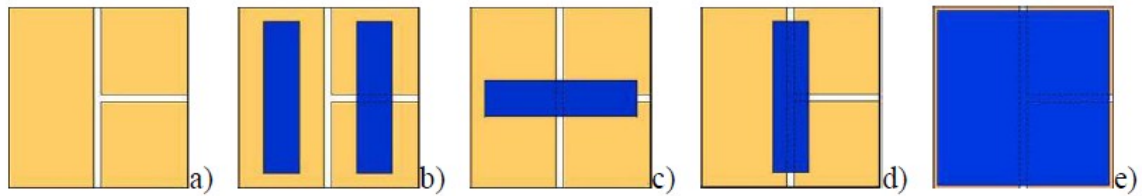
### 1.5.3 Durabilità TRM

La durabilità nei TRM è uno dei temi di recentissima investigazione. Fino a questo momento non sono stati ricercati i fattori che interagiscono negativamente nell'aderenza e nella durabilità di tali compositi. Solamente una comparazione tra le prestazioni di TRM e CFRP esposti ad alte temperature è stata presentata da *Trapko* (2013). La sperimentazione si articola in due fasi. La prima punta a dimostrare l'influenza del rinforzo in CFRP e FRCM su cilindri sperimentali in calcestruzzo, in funzione del tipo di matrice e della disposizione dei rinforzi. La seconda parte è finalizzata allo studio dell'influenza delle alte temperature nei confronti dei compositi. Cilindri di calcestruzzo rinforzati interamente con CFRP e FRCM sono stati esposti a temperature elevate di 60° C, 120° C e 180°C prima di essere testati fino a rottura. I risultati hanno dimostrato che, in caso FRP è necessario porre particolare attenzione alle alte temperature. A 40° C si ha una riduzione della capacità portante del campione del 20%. La riduzione della capacità per gli FRCM risulta invece del 5-10% corrispondente ad un aumento di temperatura da 40°C a 80°C. Inoltre, è stato osservata una limitata diminuzione di deformazione in compressione (circa 11%) dopo l'aumento di temperatura da 40° C a 80°C.

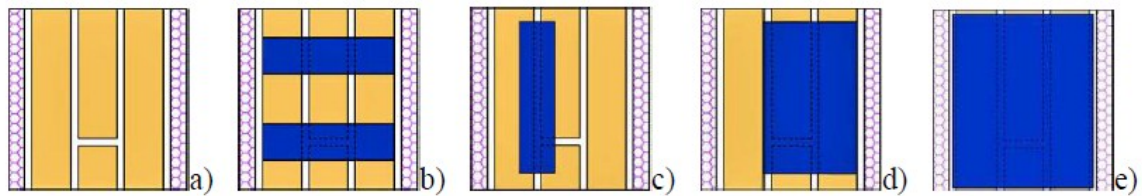
### 1.5.4 La cristallizzazione salina e la durabilità dei compositi

Degna di nota è la sperimentazione condotta da *Binda e Valluzzi* (2011) sull'effetto della cristallizzazione salina sull'aderenza e la durabilità dei compositi, in quanto risulta essere l'unica ad indagare questa tematica. La procedura e i dettagli di queste prove sono riportati nel documento *RILEM TC 243 MSC*. e nel *European Contract NIKER (FP7-ENV-2009.1-N.244123)*.

Due serie di provini sono stati oggetto dei test sulla cristallizzazione. Campioni pilota non rinforzati con composito sono stati considerati come riferimento. In Figura 1.5 si possono vedere gli assemblaggi della serie S, con la disposizione delle strisce di composito in 4 configurazioni. In Figura 1.6 gli assemblaggi della serie T con le diverse configurazioni di strisce di composito.



**Figura 1.5.:** Provini serie S per i test sulla cristallizzazione salina: a) campione semplice senza composito; b) configurazione 1; c) configurazione 2; d) configurazione 3; e) configurazione 4; [Binda *et al.*, 2011].



**Figura 1.6.** Provini serie T per i test sulla cristallizzazione salina: a) campione semplice senza composito; b) configurazione 1; c) configurazione 2; d) configurazione 3; e) configurazione 4; [Binda *et al.*, 2011].

Il programma sperimentale prevedeva: test sulla cristallizzazione salina sui campioni in muratura, misurazione del danno con il profilometro laser, analisi sull'aderenza con prove non distruttive (termografiche) che permettono di controllare la connessione tra composito e supporto, e eventuali prove di pull-off sui provini non danneggiati dai cicli di prova.

Ogni singola prova si è svolta inserendo il provino, avente dimensioni approssimative di 250x200x120 mm, in un vaso di plexiglass. In modo graduale si è versate la soluzione salina di solfato di sodio (i soluti dovevano essere presenti in percentuale non superiore al 10% dissolti in acqua distillata) all'interno del vaso. Dopo 24 ore si è tolto il provino dal contenitore e si è rimosso il liquido rimasto nel vaso. Nel vaso svuotato e pulito si è posto uno strato di ghiaia fine sul quale si è collocato il provino e si sono sigillati gli spazi vuoti tra il provino ed il contenitore con dei pezzi di polistirene, lasciando la superficie superiore libera. Si sono infine conservati i contenitori in un locale condizionato a 20°C e 50% U.R.

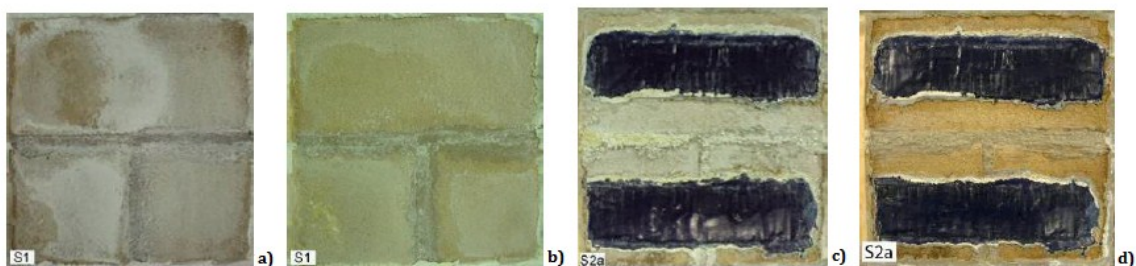


**Figura 1.7.** Alcune fasi del test sulla cristallizzazione [Binda *et al.*, 2011].

Dopo 4 settimane il primo ciclo di cristallizzazione si è concluso. I provini sono stati oggetto di ispezione visiva, di pulitura delle efflorescenze e delle particelle libere e di rilievo fotografico. Una lettura del profilo della superficie con un profilometro laser ha permesso di quantificare il danno. Dopo queste operazioni si è versata acqua demineralizzata fino a sommergere metà dell'altezza del provino e si è continuata l'esposizione per un altro mese. In tutto i cicli sono stati sette

#### Ispezione visiva e descrizione del danno

Ogni provino è stato sottoposto a ispezione visiva e rilievo fotografico alla fine di ogni ciclo (ogni quattro settimane), e le foto sono state fatte prima e dopo la pulizia dei provini. In Figura 1.8 alcune immagini dei provini con e senza rinforzo, e prima e dopo la pulizia.



**Figura 1.8.** Rilievo fotografico dei provini: a) e b) provino senza rinforzo prima e dopo la pulizia; c) e d) provino rinforzato prima e dopo la pulizia [Binda *et al.*, 2011].

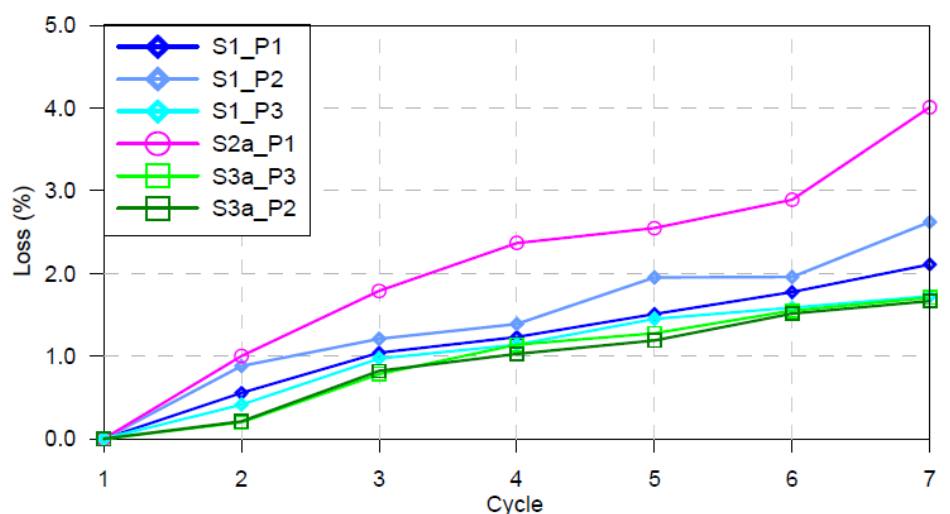
Alla fine dei 7 cicli si è potuto affermare che i provini non rinforzati e quelli rinforzati si sono comportati in modo diverso, anche se il tipo di danno era simile. Come si vede dalla Figura 1.8 a) e b) si può vedere che il provino senza composito presentava incrostazioni saline sia sul mattone che in corrispondenza del giunto. Dopo la pulizia era visibile una

delaminazione della superficie del mattone. In Figura 1.8 c) e d) viene presentato il provino con il composito, e come si può vedere anche in questo caso le incrostazioni saline sono evidenti. Attorno alle strisce di composito il materiale era molto umido, e apparentemente il mattone era interessato da un profondo degrado. Dopo la pulizia erano evidenti gli accumuli di sale attorno alle strisce e qualche segno di distacco ai bordi.

#### Letture del profilo con profilometro e calcolo dell'area persa (%)

L'uso del profilometro laser (Cardani, 2002) ha permesso di misurare, con ottima risoluzione, la perdita di materiale dalla superficie esposta, calcolata in tempi successivi. Il profilo registrato alla fine di ogni ciclo di quattro settimane, mostrava un deterioramento della superficie, dovuto alla perdita di materiale, in seguito misurata tramite il calcolo dell'area persa ad ogni ciclo. I diagrammi prodotti dal profilometro presentavano apparentemente un incremento nei valori corrispondenti all'area, corrispondenti ai rigonfiamenti sulla superficie all'inizio della delaminazione.

La perdita dell'area registrata nelle sezioni verticali dal profilometro laser ad ogni ciclo può essere assunta come un parametro del continuo degrado, e potrebbe anche essere usato per l'implementazione di un modello matematico per prevedere il comportamento del materiale in presenza di cristallizzazione salina. In Figura 1.9 il diagramma ottenuto elaborando i dati restituiti dal profilometro.



**Figura 1.9.** Diagramma sulla perdita di materiale, in ascissa il numero di cicli, in ordinata la perdita di materiale percentuale [Binda *et al.*, 2011].

Applicazione dei raggi IR

La termografia è una tecnica di analisi non distruttiva che si basa sull'acquisizione di immagini nell'infrarosso. Questa tecnica, lavorando nel campo degli infrarossi, permette di rilevare l'energia emessa da un materiale in termini di radiazioni elettromagnetiche. Tutti i provini sono stati sottoposti a termografia IR prima e dopo il test, e le immagini sono state restituite da una camera infrarossi.

La prima termografia è stata effettuata su provini essiccati in forno a massa costante e davano come risultato una distribuzione abbastanza costante delle temperature. È stato possibile vedere che alcuni difetti di legame erano presenti anche prima dei test di cristallizzazione in corrispondenza dei giunti di malta (Figura 1.10). La seconda termografia è stata effettuata dopo 7 cicli, scaldando i provini con una lampada IR. Ovviamente questi provini erano umidi, e quindi una diretta comparazione non è stata possibile. La Figura 1.11 mostra la presenza di umidità lungo i perimetri esterni delle strisce di composito; è ipotizzabile che la delaminazione avvenga attorno e sotto le strisce.

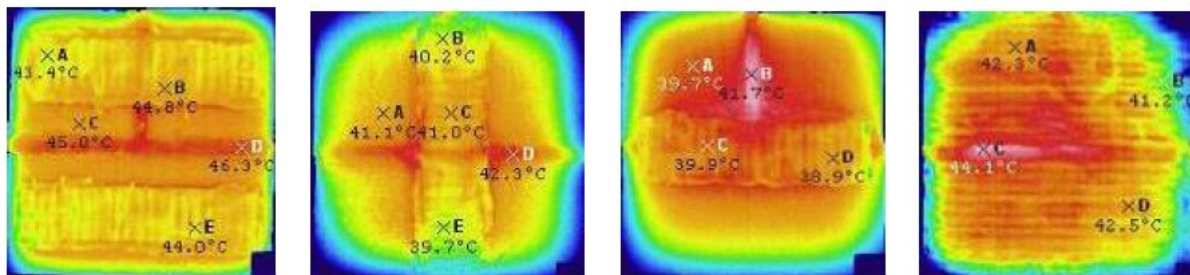


Figura 1.10. Restituzioni termografiche di alcuni provini asciutti prima dei test di cristallizzazione [Binda et al., 2011].

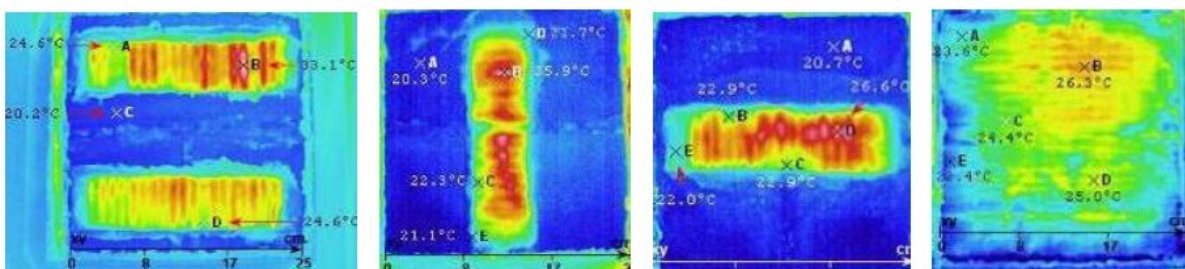


Figura 1.11. Restituzioni termografiche di alcuni provini dopo dei test di cristallizzazione [Binda et al., 2011].

Alla fine di tale sperimentazione si è potuto concludere che il danno causato dai sali sembra essere maggiore nei campioni di muratura rinforzati con composito, questo



probabilmente può essere dovuto agli accumuli di umidità e di sali attorno alle strisce di FRP e sotto esse. Le subefflorescenze causate dalla cristallizzazione salina causano la delaminazione e il distacco delle strisce. Altri test sono necessari per investigare l'influenza della cristallizzazione salina sulla durabilità dei compositi.



## Capitolo 2

# Degrado delle murature

### 2.1 Premessa

In sede di progetto i materiali da costruzione vengono scelti in funzione delle loro prestazioni richieste nella struttura; si stabiliscono pertanto le proprietà meccaniche (carico di snervamento, modulo elastico, ecc.) in quanto, quando i materiali sono destinati ad applicazioni strutturali, il loro comportamento meccanico assume un ruolo primario nella progettazione. Sono poi formulate le prescrizioni per garantire il raggiungimento delle caratteristiche considerate nel progetto; durante la costruzione sono previsti dei controlli di qualità sia per i materiali che per la messa in opera. Viene programmata la manutenzione con tecniche di ispezione e di monitoraggio. Spesso invece non vengono valutati con molta attenzione gli aspetti relativi all'interazione dei materiali con l'ambiente, pertanto prima di valutare le cause di eventuali degradi, i materiali e le tecniche di recupero è opportuno considerare l'azione dell'ambiente sui materiali.

Se si esclude il danneggiamento traumatico, come quello provocato da incendi, guerre e terremoti, le principali cause del deterioramento "naturale", che hanno portato nel corso dei secoli ad un lento ma inesorabile degrado degli edifici storici, sono connesse all'interazione tra i materiale delle costruzioni e l'ambiente circostante.

Il principale responsabile di questa interazione degradante è l'acqua. L'acqua infatti gioca un ruolo determinante in tutti i meccanismi di degrado dei materiali da costruzione in genere e di quelli storici in particolare.

## 2.2 Generalità

L'azione dell'ambiente sui materiali da costruzione può essere schematizzata come segue:

- *Azioni chimiche*: sono specifiche perché dipendono dalla composizione chimica di ogni materiale. Ad esempio: la corrosione dei metalli, l'attacco solfatico del calcestruzzo, l'attacco alcalino del vetro, l'attacco acido delle pietre, ecc.
- *Trasporto nei materiali porosi*: nel caso dei materiali porosi (calcestruzzo, pietre, laterizi) l'attacco del materiale da parte degli agenti aggressivi, liquidi e gassosi, avviene non solo sulla superficie ma anche in profondità. Tramite i processi di diffusione, di permeazione, di assorbimento capillare, di trasporto ionico, ecc., gli agenti inquinanti penetrano all'interno del materiale.
- *Variazioni di umidità*: sono responsabili delle variazioni dimensionali che si possono modificare di alcuni materiali esposti all'azione dell'ambiente. Se queste variazioni dimensionali vengono impedito possono generare sforzi nei materiali con conseguenze pericolose per la sua integrità.
- *Variazioni di temperatura*: producono delle variazioni dimensionali che se contrastate possono danneggiare il materiale. La temperatura può avere conseguenze molto importanti sul comportamento in esercizio di un materiale; in particolare la temperatura influisce sulla velocità delle reazioni chimiche responsabili del degrado del materiale. Gli sbalzi termici creano una differenza di temperatura tra le superfici e il "cuore" di un materiale che genera delle tensioni interne a causa della differente dilatazione della zona superficiale rispetto a quella interna.
- *Azioni espansive*: processi di tipo chimico (cristallizzazione di sali) o di natura fisica (cicli di gelo e disgelo) possono produrre espansioni in grado di danneggiare seriamente i materiali porosi e fragili.

Le conseguenze dell'interazione dei materiali con l'ambiente possono indurre degradi tali da causare perdite prestazionali degli stessi e l'impossibilità di continuare ad utilizzare la struttura per le funzioni per le quali era stata progettata.

### 2.3 Porosità dei materiali da costruzione

La porosità è una delle caratteristiche fisiche che ha maggior rilevanza nel determinare il comportamento nel tempo o durabilità di un materiale. La porosità di un materiale solido si definisce come l'insieme degli spazi vuoti esistenti all'interno della sua massa solida. Tali spazi possono essere totalmente isolati dall'esterno (porosità chiusa), oppure in comunicazione con l'esterno attraverso la superficie della massa solida (porosità aperta). La porosità totale di un materiale è costituita dall'insieme della porosità chiusa e di quella aperta. Ambedue i tipi di porosità hanno importanza nel determinare le caratteristiche tecnologiche del materiale (la sua resistenza meccanica, la conducibilità termica ed acustica, la lavorabilità, la lucidabilità, ecc.), tuttavia è la porosità aperta che gioca il ruolo fondamentale nei processi di deterioramento dovuti alle interazioni con l'ambiente. Infatti, i pori aperti sono accessibili all'acqua e alle altre sostanze chimiche con cui il materiale da costruzione può venire in contatto e dunque essi costituiscono la via attraverso la quale il deterioramento procede dall'esterno verso le parti più interne del materiale. La porosità aperta, inoltre, influenza la scelta dei tipi di trattamenti conservativi che possono essere adottati per la conservazione del materiale. Sia dal punto di vista del degrado che da quello dei trattamenti conservativi l'insieme dei pori aperti può essere considerato come una vera e propria rete stradale (si parla spesso di rete capillare) che consente il movimento dei fluidi (liquidi e gas) e nella quale possono avvenire reazioni chimiche e si possono sviluppare sforzi di tipo meccanico.

La porosità si esprime comunemente come rapporto percentuale del volume degli spazi vuoti rispetto al volume apparente della massa solida e si indica con il simbolo P:

Porosità totale = porosità aperta + porosità chiusa

$$\text{Porosità (P\%)} = \frac{\text{Volume spazi vuoti}}{\text{volume apparente}} \%$$

La porosità di un materiale naturale è strettamente connessa al suo processo genetico (ad esempio la porosità è bassa o molto bassa nelle rocce ignee intrusive ed effusive e nelle metamorfiche, mentre è elevata nei tufi vulcanici e in molte rocce sedimentarie). Analogamente per i materiali artificiali essa è correlata al processo di produzione (ad esempio, i fenomeni di ritiro durante la presa di una malta a calce o l'evaporazione dell'acqua nella manifattura di un laterizio provocano la formazione di spazi vuoti).

Inoltre, la porosità intrinseca di un materiale può variare con i processi di deterioramento e, nella maggior parte dei casi, è maggiore nel materiale deteriorato che nel corrispondente materiale sano.

Quando si studia un materiale da costruzione, per comprenderne il comportamento rispetto ai diversi fattori di deterioramento e per valutare la necessità di trattamenti di conservazione, è di fondamentale importanza misurarne la porosità, non solo come valore complessivo (P totale % e  $P_{aperta}$ %), ma anche relativamente alla dimensione dei pori (distribuzione dei pori in funzione del loro diametro, espressa come percentuale in volume). Infatti la dimensione dei pori gioca un ruolo fondamentale nelle interazioni del materiale con l'acqua [L. Zevi, *Manuale del Restauro*].

### **2.4 L'acqua nelle costruzioni**

L'acqua, nelle sue diverse forme, è sicuramente il maggior agente di degrado naturale ai danni dei materiali da costruzioni. Prima di analizzare le interazioni tra l'acqua e i materiali da costruzione, vengono di seguito elencate e brevemente descritte le vie ed i meccanismi attraverso i quali l'acqua giunge ad un edificio (Figura 2.1).

#### Acqua di struttura

È l'acqua presente nei legami chimici della struttura cristallina di ogni materiale. È quindi strettamente connessa al materiale stesso e non va considerata nel calcolo del contenuto di acqua del materiale in quanto non ha rilevanza nelle manifestazioni di degrado.

#### Umidità di costruzione

È rappresentata dall'acqua utilizzata durante gli interventi di edificazione e ristrutturazione per la preparazione delle malte e degli intonaci e comunque utilizzata nelle fasi di cantiere. È un tipo di umidità che poco interessa in quanto tende ad evaporare al termine dei lavori stessi. È in ogni caso buona regola, durante un intervento di conservazione e/o restauro, utilizzare acqua in quantità strettamente necessarie sia per evitare manifestazioni visibili che possono interessare anche l'intero edificio sia, soprattutto, perché si possono innescare fenomeni di trasporto dei sali solubili contenuti nei materiali in parti dell'edificio che ne erano fino a quel momento privi.

### Umidità di igroscopicità

Tutti i materiali, a causa della loro porosità, assorbono umidità, sotto forma di vapore, dall'aria che li circonda. La quantità di acqua assorbita dal materiale per igroscopicità dipende dalla pressione parziale del vapore contenuto dall'aria (cioè dal tenore di umidità relativa di quest'ultima) e dalla porosità e caratteristiche del materiale.

### Umidità meteorica

Si tratta dell'acqua proveniente dalle precipitazioni meteoriche. Escludendo le superfici di copertura dell'edificio (per le quali si presuppone un adeguato sistema di difesa) le parti maggiormente interessate sono le superfici verticali contro le quali il vento spinge l'acqua meteorica che viene quindi assorbita orizzontalmente attraverso la porosità del materiale. Il vento porta la pioggia a contatto con la parete, ma la penetrazione è dovuta principalmente all'azione capillare e quindi alle caratteristiche porosimetriche e fisiche del materiale. L'umidità meteorica si localizza sulle superfici esterne e può interessare, a seconda della forma dell'edificio, della zona geografica e dell'intensità del vento, sia zone circoscritte, soprattutto in corrispondenza di cornicioni o davanzali, che l'intera muratura. Le caratteristiche dello strato di finitura della superficie svolgono un ruolo importante ai fini della protezione dato che la penetrazione dell'acqua nel materiale avviene principalmente attraverso le fessure presenti sulla superficie.

Nel caso di un muro di mattoni, i giunti di malta di allettamento assorbono da 4 a 5 volte più dei mattoni. In ogni caso l'infiltrazione di acqua piovana può penetrare nello spessore murario al massimo per 6-7 centimetri e la muratura si asciuga in pochi giorni per effetto dell'evaporazione. Solo in presenza di fessure passanti nel paramento murario, l'acqua meteorica assorbita può raggiungere la superficie interna. Oltre a colpire direttamente le superfici esterne dell'edificio, le precipitazioni meteoriche, se non adeguatamente raccolte ed allontanate (cosa molto frequente negli edifici antichi spesso privi di gronde e pluviali) possono imbibire il terreno circostante l'edificio e, attraverso il meccanismo della risalita capillare, essere assorbite dalle murature tornando in tal modo a "bagnare" il manufatto.

### Umidità di condensazione

È causata dal passaggio allo stato liquido del vapore contenuto nell'aria ambiente e dal suo successivo deposito sulla superficie del manufatto. Il contenuto in vapore dell'aria è

definito dall'umidità relativa espressa dal rapporto percentuale tra la quantità di vapore contenuto nell'aria e la massima quantità di vapore che lo stesso volume potrebbe contenere alla medesima temperatura; l'umidità relativa fornisce quindi il grado di saturazione dell'aria e dipende dalla temperatura.

Quando l'aria ambiente viene in contatto con una superficie (tipicamente le pareti del manufatto) che si trova ad una temperatura inferiore a quella di rugiada ha luogo la condensazione: il vapore in eccesso si trasforma in liquido sotto forma di goccioline di acqua o cristalli di ghiaccio che si depositano sulla superficie stessa bagnandola, se il materiale della superficie è compatto e poco poroso (è, ad esempio, il caso del marmo) o creando delle macchie o delle velature, se il materiale è poroso (come nel caso di un intonaco).

Il fenomeno della condensazione è discontinuo nel tempo con carattere stagionale in relazione alle variazioni climatiche dell'ambiente esterno. Nelle costruzioni più recenti, caratterizzate da ridotti spessori murari, la condensazione avviene principalmente in inverno quando l'aria calda presente all'interno di un locale viene in contatto con le pareti che, a causa della loro ridotta resistenza termica, sono fredde. Nelle costruzioni più antiche, che presentano maggiori spessori murari (e quindi resistenze termiche più elevate) il fenomeno si manifesta con maggiore intensità nelle stagioni intermedie (primavera ed autunno) in quanto le pareti restano, per la loro grossa inerzia termica, a temperature diverse rispetto all'aria. In primavera l'aria si riscalda molto più velocemente della parete (che mantiene più a lungo nel tempo il "freddo invernale"), mentre in autunno si innesca il fenomeno contrario: l'aria incomincia a raffreddarsi mentre la parete si mantiene ancora calda.

Il fenomeno della condensazione non è, in generale, così intenso da innalzare in maniera significativa il contenuto di umidità di una muratura, ma è da evitare in quanto porta periodicamente acqua sulla superficie con conseguenze negative soprattutto nel caso di affreschi o decorazioni.

In presenza di sali solubili nelle murature la condensazione può innescare cicli di assorbimento e cristallizzazione dei sali con conseguenti formazioni di efflorescenze saline. Inoltre la presenza di umidità sulla superficie favorisce la crescita di formazioni biologiche inestetiche e a volte pericolose per lo stesso materiale.



Se all'interno della muratura si raggiungono temperature inferiori a quelle di rugiada, la condensazione avviene all'interno della parete con conseguente formazione di acqua nella struttura muraria (condensazione interstiziale). Il fenomeno è legato alla diffusione del vapore attraverso murature che separano ambienti a temperatura ed umidità differenti e si verifica quando lo spessore murario non presenta una distribuzione corretta degli strati causando una resistenza al passaggio del vapore. La condensazione interstiziale è tuttavia un processo molto blando ed in genere le percentuali di acqua condensata sono normalmente molto limitate.

#### Umidità da assorbimento capillare

In questo caso il fattore scatenante è la presenza di acqua nel terreno adiacente al manufatto che la assorbe a causa della porosità del materiale che lo costituisce.

Molto sinteticamente, i fattori che insieme concorrono ad innescare l'assorbimento capillare sono l'interazione chimica e fisica tra il materiale costituente il manufatto e la molecola di acqua e il tipo di porosità del materiale. Ambedue determinano la prevalenza delle forze di adesione che attivano la migrazione del liquido lungo le pareti dei pori capillari del materiale in senso orizzontale e verticale vincendo, in questo caso, la forza di gravità. La forza di adesione per unità di superficie è detta pressione capillare ed è tanto più attiva, facendo quindi innalzare in modo tanto maggiore il liquido, quanto minore è il raggio del capillare. Una volta innescato il fenomeno della risalita capillare questo, nel caso di un'alimentazione costante di acqua dal terreno, potrebbe portare l'acqua ad una altezza considerevole se il fenomeno non fosse contrastato dall'evaporazione dell'acqua dal sistema murario. In pratica, una struttura muraria a contatto con un terreno umido raggiunge un equilibrio derivante dal bilancio idrico tra la quantità di acqua assorbita per capillarità e quella persa per evaporazione. La riduzione dell'altezza massima del fronte umido è conseguente alla prevalenza dei fenomeni di evaporazione su quelli di assorbimento. È per tale ragione che, in genere, le murature esposte a nord presentano fronti di risalita più alti rispetto a quelle esposte a sud, soggette ad una maggiore insolazione e, quindi, ad una maggiore evaporazione.

L'origine dell'acqua presente nel terreno ha un'influenza fondamentale sull'estensione del danno. Se l'acqua proviene dalla falda freatica la risalita interesserà tutto il perimetro murario con contenuti di acqua simili per tutti i setti murari e altezze del fronte di risalita

pressoché costanti in ogni periodo dell'anno. Se, invece, la presenza di acqua nel terreno è dovuta ad acque disperse (acque meteoriche o acque provenienti da rotture degli impianti idrici e/o fognari) la risalita si localizza in modo differenziato lungo il perimetro dell'edificio e le altezze del fronte di risalita sono generalmente variabili nel tempo. [Binda et al., 1991].

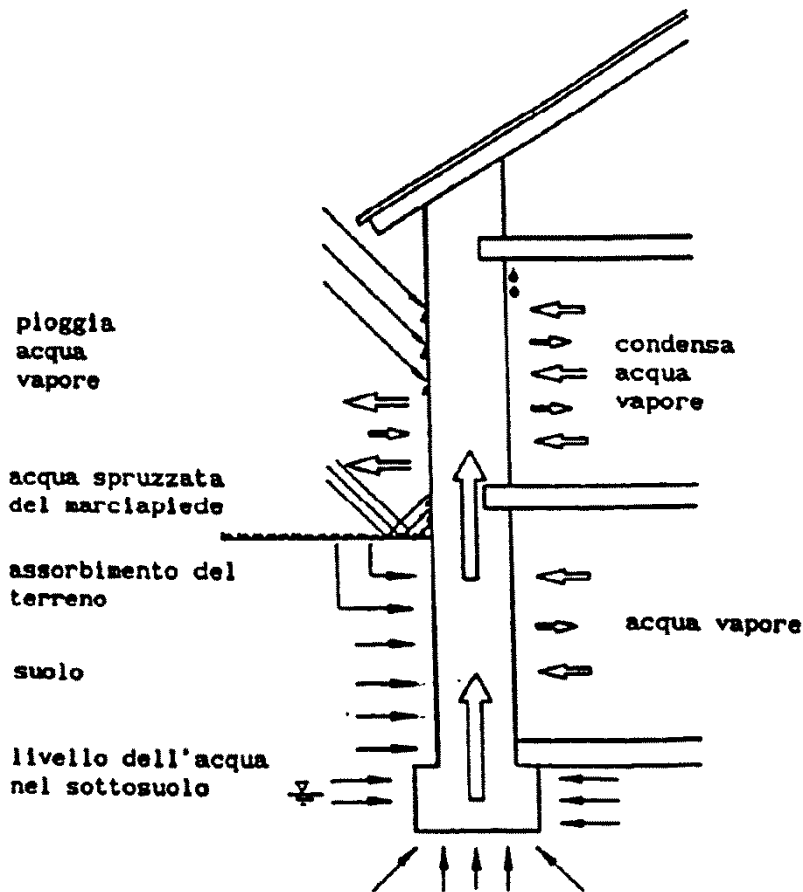
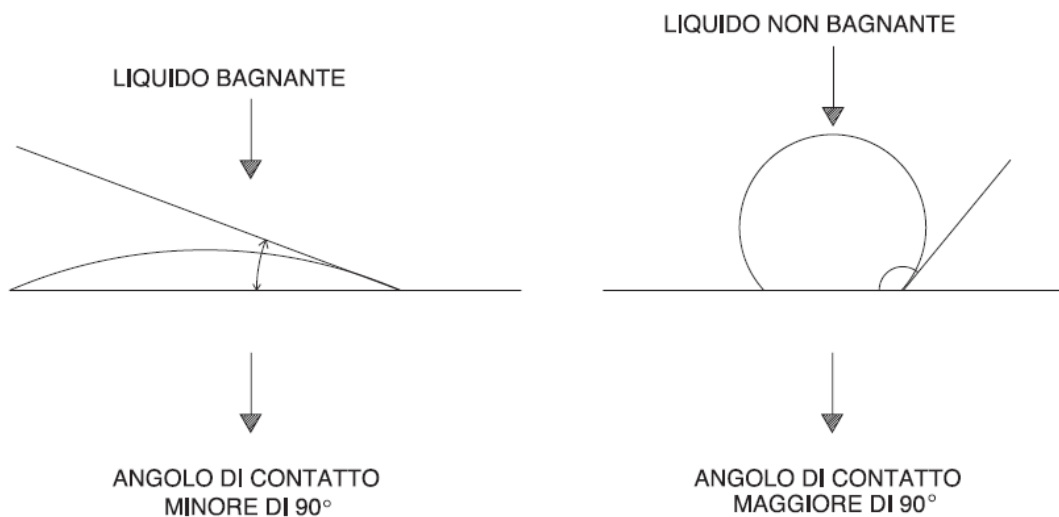


Figura 2.1: esempi di diverse possibilità di penetrazione dell'acqua [Binda et al., 1991].

## 2.5 Interazione acqua-materiali da costruzione

L'acqua è un liquido bagnante nei rispetti di tutti i materiali lapidei. Ciò è dovuto al fatto che le forze di attrazione che si stabiliscono tra la superficie del materiale e le molecole dell'acqua sono maggiori di quelle esistenti tra le molecole stesse dell'acqua. L'attrazione è talmente forte che il primo strato monomolecolare di molecole d'acqua che aderisce alla superficie del solido (sia quella esterna sia quella interna costituita dalle pareti dei

pori) assume le caratteristiche chimico-fisiche di un solido. Questa affinità può essere facilmente visualizzata, almeno con i materiali meno porosi, depositando una piccola goccia di acqua sulla superficie piana e pulita del materiale: si osserverà che la goccia tende ad appiattirsi sul solido, in modo da rendere massima la superficie di contatto. Se si ripete la prova con un liquido non bagnante (ad es. un olio o il mercurio) si vedrà che la goccia assume una forma sferica che rende minima la superficie di contatto. La tangente nel punto di contatto tra goccia e solido forma un angolo con la superficie del solido che è  $<90^\circ$  per il liquido bagnante e  $>90^\circ$  per il liquido non bagnante.



**Figura 2.2:** Un liquido non bagnante tende a formare una goccia sferica sulla superficie del solido, perché non c'è affinità tra i due materiali. La tangente alla goccia nel punto di contatto forma con la superficie solida un angolo  $>90^\circ$ . Un liquido bagnante tende ad appiattirsi sul solido per rendere massima la superficie di contatto. La tangente alla goccia nel punto di contatto forma un angolo  $<90^\circ$  [L. Zevi, *Manuale del Restauro*].

La misura dell'angolo di contatto tra acqua e materiale lapideo è spesso utilizzata per valutare l'effetto di trattamenti protettivi idrorepellenti: infatti a seguito del trattamento l'angolo di contatto deve aumentare e divenire maggiore di  $90^\circ$ . Questa misura può essere di difficile esecuzione quando la porosità è abbastanza elevata, perché la goccia viene assorbita molto rapidamente entro gli spazi porosi aperti. Infatti, come già accennato, l'affinità si verifica anche nei riguardi delle pareti dei capillari e provoca una forza di attrazione capace di far risalire l'acqua anche in direzione verticale, vincendo la forza di gravità.

La risalita capillare è tanto maggiore quanto più piccolo è il raggio del capillare entro il quale l'acqua viene attratta. Dunque, a parità di porosità totale e di condizioni ambientali, nei materiali con molti micropori la risalita capillare dell'acqua può interessare porzioni

maggiori di materiale rispetto alla risalita che si può verificare in un materiale con prevalenza di macropori.

I meccanismi attraverso i quali l'acqua ha danneggiato le murature degli edifici storici possono essere schematicamente suddivisi in fisici e chimici [L. Zevi, *Manuale del Restauro*].

### **2.5.1 Meccanismi fisici**

Il più importante meccanismo fisico di degrado è la formazione del ghiaccio: quando la temperatura scende al di sotto di zero gradi centigradi, l'acqua presente nei pori delle pietre, dei mattoni, delle malte congela con aumento di volume di circa il 10%. Le escursioni termiche diurne e stagionali fanno avvenire ciclicamente il fenomeno del gelo e disgelo dell'acqua così che i materiali sono sottoposti ad una sollecitazione ripetuta che può provocare la rottura a fatica.

Un secondo meccanismo degradante di tipo fisico che ha coinvolto le malte, soprattutto negli intonaci, è il dilavamento da parte dell'acqua piovana nei confronti dei leganti aerei (calci, gesso), che ad indurimento avvenuto producono composti relativamente idrosolubili. Un altro meccanismo di tipo fisico è legato alla presenza di sali idrosolubili all'interno delle murature. Ma è di nuovo l'acqua a promuovere il danneggiamento: con l'alternarsi delle stagioni asciutte a quelle umide o piovose l'acqua fuoriesce dalle murature e vi rientra. Mentre l'acqua è in grado di evaporare, i Sali si depositano all'interno dei pori creando una pressione di cristallizzazione; questo tipo di degrado è sicuramente meno grave tra quelli descritti, a meno che il sale non sia di un particolare tipo capaci di reagire chimicamente con la malta.

### **2.5.2 Meccanismi chimici**

Anche nei meccanismi chimici di degrado l'acqua gioca un duplice ruolo di fondamentale importanza: per prima cosa l'acqua è uno dei componenti che partecipa alle reazioni chimiche che avvengono all'interno dei materiali provocandone il deterioramento; in secondo luogo l'acqua funge da "trasportatore" di sali, trascinandoli da dove si trovano originariamente verso altri componenti con i quali possono reagire chimicamente.

L'alternarsi delle piogge con i periodi di clima asciutto provoca un movimento dell'acqua all'interno dei materiali.

## 2.6 Sali solubili e la loro cristallizzazione

L'acqua all'interno delle murature è sempre presente sotto forma di soluzione salina da cui possono separarsi sali anidri o idrati che provocano danni ai materiali. La migrazione e ricristallizzazione dei sali solubili trasportati dall'acqua costituisce il principale meccanismo di alterazione dei materiali lapidei. La forma e l'entità del danno dipendono dalla porosità e dalla igroscopicità del materiale. L'acqua, soprattutto se molto pura, provoca lo scioglimento dei sali che incontra nel suo percorso per depositarli altrove; inoltre l'acqua proveniente dal suolo si carica dei sali che questo contiene e, proseguendo il suo cammino attraverso i materiali porosi verso la superficie d'evaporazione, li trasporta nel suo percorso. Lo stesso accade per l'acqua d'infiltrazione, nel suo viaggio inverso, dall'alto al basso.

La solubilità dei sali è molto variabile, ci sono sostanze praticamente insolubili come il cloruro d'argento e sali molto solubili come il cloruro o il solfato di sodio. Il trasferimento dei sali dipende, quindi, dalla loro solubilità e dai flussi d'acqua all'interno dei materiali porosi, flussi che a loro volta sono influenzati dalla presenza di sali che possono dar luogo a variazioni di viscosità, cambiamenti di tensioni superficiali e differenze di pressioni osmotiche.

I sali solubili che si possono trovare nei manufatti lapidei possono avere differenti origini:

- sono parte integrante delle murature;
- sono inerenti ai processi di fabbricazione dei materiali;
- derivano da reazioni e scambi con l'atmosfera che avvolge il manufatto;
- provengono dal terreno sul quale il monumento è stato costruito;
- derivano dall'azione di biodeteriogeni;
- sono generati dalla corrosione elettro-chimica dei metalli;
- si formano in seguito all'utilizzo di prodotti per la pulitura e il consolidamento, o a tecniche di restauro inappropriate.

### 2.6.1 I sali

I sali che con più frequenza sono causa di degrado dei materiali da costruzione sono i solfati, i nitrati e i carbonati, e i cloruri. Poiché la sperimentazione trattata in questa tesi si riferisce a murature interessate principalmente da efflorescenze dovute al Solfato di sodio, ci si limita ad esporre le caratteristiche e la cristallizzazione dei soli solfati.

#### I solfati

I solfati sono sali molto mobili, disciolti nelle acque naturali di cui rappresentano uno dei maggiori costituenti, sono anche contenuti nei leganti aerei e idraulici, nelle rocce, nelle atmosfere inquinate, nelle atmosfere marine:

- *solfato di calcio*: si presenta in varie forme idrate, tra le più diffuse il gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).
- *solfato di magnesio*: presente in varie forme idrate, lo si trova con più frequenza in ambiente rurale;
- *solfato di sodio*: presente in forma idrata o anidra, lo si trova maggiormente in ambiente urbano.

Le origini dei solfati possono essere diverse:

- a) sono presenti nei terreni agricoli, le acque circolanti li possono sciogliere e se queste risalgono per capillarità vi apporteranno i solfati che contengono;
- b) l'acqua di mare contiene piccole quantità di solfati, specialmente solfato di magnesio. I venti di mare trasportano, per chilometri, sospensioni di particelle di acqua marina con i sali;
- c) a volte i materiali usati per la preparazione dell'intonaco possono contenere piccole quantità di solfati come impurezze. Anche i materiali usati erroneamente per il restauro possono causare la presenza di solfati (ad es. stucature o iniezioni di gesso);
- d) possono avere origine microbiologica, esistono alcuni tipi di microrganismi capaci di metabolizzare forme ridotte di zolfo ossidandolo a solfati, accanto ad altri microrganismi che invece producono solfuri (cioè una forma ridotta di zolfo)
- e) l'inquinamento atmosferico.

I solfati sono pericolosi perché, non solo sono solubili in acqua, ma possono esistere in strati di idratazione diversi: possono cristallizzare con diverse quantità di acqua a seconda della temperatura e dell'umidità relativa. Ad ogni stato di idratazione corrisponde un volume specifico diverso, ogni volta che si verifica la trasformazione da uno strato all'altro si ha una variazione di volume. Quando, per l'aumento dell'UR, si ha il fenomeno dell'idratazione, il sale aumenta di volume esercitando una pressione (pressione di idratazione) sulle pareti dei capillari presenti nella struttura porosa di un materiale. Quando questa pressione supera la resistenza delle pareti queste vengono rotte, l'intera struttura diventa più porosa e quindi più suscettibile all'ulteriore azione dell'umidità e dei sali.

### **2.6.2 Cristallizzazione**

Il degrado dovuto ai sali è provocato da fenomeni di solubilizzazione, cristallizzazione, idratazione e igroscopicità; per cui se si è in una situazione di stabilità termodinamica i danni riscontrati saranno insignificanti: esistono casi in cui non sono stati riscontrati particolari alterazioni nelle murature nonostante la presenza di sali, in quanto le condizioni di temperatura e umidità sono rimaste immutate per lunghi periodi di tempo.

La cristallizzazione è il processo più pericoloso legato alla presenza dei sali solubili, essa coinvolge pressioni che hanno un ordine di grandezza superiore alla resistenza a trazione dei vari materiali da costruzione. Cristallizzazione o ricristallizzazione hanno luogo per evaporazione del solvente, l'acqua, sulle superfici o all'interno dei pori in seguito al raggiungimento della saturazione della soluzione.

La cristallizzazione è un processo di trasformazione da uno stato disordinato della materia ad uno stato più ordinato: le particelle costituenti il cristallo, siano esse molecole, atomi o ioni, sono disposte nello spazio secondo una struttura periodica.

Gli sforzi meccanici prodotti dal degrado fisico della cristallizzazione salina sono strettamente legati alla presenza e all'evaporazione dell'acqua all'interno dei pori aperti, siano questi primari o secondari. La struttura porosa di un dato materiale, essendo la caratteristica fisica che governa tutto ciò che accade all'interno di esso in conseguenza del movimento dei fluidi, rappresenta uno dei parametri più importanti per valutarne il reale stato di conservazione e per prevederne la sua evoluzione futura. Oltre alla porosità

totale, ciò che gioca un ruolo fondamentale nei processi di degrado dei materiali sono la forma, le dimensioni dei pori e la distribuzione del volume di questi in funzione del loro diametro. Mettere in relazione la porosità o la distribuzione delle dimensioni dei pori con l'alterazione di un materiale è abbastanza arduo, poiché il deterioramento di manufatti da costruzione è causato da molteplici fattori che agiscono simultaneamente. La permeabilità all'acqua, ad esempio, in generale aumenta con l'aumentare della porosità, ma è influenzata anche da altri parametri quali la dimensione dei pori e quindi la superficie specifica degli spazi porosi, la distribuzione della dimensione dei pori oppure la loro forma. Inoltre, l'eterogeneità dei materiali porosi non rende facile la correlabilità tra permeabilità e porosità.

Quando si ha un forte flusso di umidità all'interno di un materiale da costruzione e un costante apporto di soluzione salina, si ha evaporazione del solvente unicamente alla superficie del materiale, con formazione di efflorescenze all'aria. L'efflorescenza quindi si verifica quando la cristallizzazione si produce sulla superficie d'evaporazione e questa coincide con la reale superficie esterna del materiale o struttura. Le efflorescenze possono essere soffici o compatte ed avere diverse forme: a) aghiformi più o meno lunghe, formano un velo biancastro o una peluria (spesso corrisponde ad un supporto molto umido, poroso e ad evaporazione rapida); b) polverulenti in grani liberi; c) patine (croste sottili e fragili); d) croste il cui colore varia dal bianco al nero secondo lo sporco inglobato; e) placche (croste locali); f) scurimenti per effetto bagnato anche al tatto.

Quando il flusso capillare diminuisce, il fronte di prosciugamento si ritira all'interno del materiale e la cristallizzazione ha luogo all'interno dei pori, abbiamo le criptoefflorescenze o subefflorescenze. La criptoefflorescenza può essere causata anche da consolidanti e protettivi che alterano la porosità della pietra e ne riducono la permeabilità e la velocità di evaporazione rispetto alla velocità di flusso di umidità.

Il passaggio dal primo al secondo stadio di essiccazione dipende dalla porosità dei materiali, ovviamente in generale possiamo affermare che materiali con predominanza di micropori e alta igroscopicità hanno una prima fase breve ed un'importante seconda fase; mentre in materiali con predominante macroporosità e bassa igroscopicità si verificherà il contrario. Il tipo di degrado è generalmente legato al tipo di sale da cui deriva.



### Cristallizzazione dei cloruri e dei solfati

La presenza dei cloruri e dei solfati nella maggioranza dei casi può essere fatta risalire a fenomeni di inquinamento atmosferico, per i cloruri basta anche solo la vicinanza del mare. Questo significa che generalmente, veicolo della loro penetrazione negli intonaci è la pioggia, l'umidità relativa dell'aria e più spesso la condensazione. I meccanismi d'azione dei cloruri e dei solfati sono abbastanza diversi, anche se i danni che producono sono simili, la differenza fondamentale è che i cloruri sono molto più solubili dei solfati; quindi è molto più frequente per i cloruri l'alternarsi delle fasi di idratazione e disidratazione, ad ogni minima variazione del contenuto di umidità del materiale poroso. I cloruri hanno una maggiore mobilità all'interno dei pori e sono quindi in grado di svolgere la loro azione distruttiva più velocemente e ogni volta a carico di un punto diverso della struttura porosa. In fase di evaporazione un cloruro cristallizza in un determinato punto di un poro, la sua marcata igroscopicità attira altra acqua e altro cloruro in soluzione dalle zone vicine; inizia così una crescita cristallina che, ad evaporazione ultimata, eserciterà una notevole pressione sulle pareti del poro entro cui il cloruro si è cristallizzato. Per un aumento dell'UR dell'aria o per un nuovo afflusso di acqua dall'interno vi è una ripresa della crescita cristallina e di conseguenza un'ulteriore pressione sulle pareti del poro; se l'afflusso d'acqua non si interrompe il cloruro viene disciolto e trasportato in un altro punto della struttura. I solfati sono meno solubili dei cloruri, quindi si spostano all'interno della struttura porosa solo nella fase iniziale della formazione quando sono ancora in soluzione nell'acqua. Quando l'acqua evapora essi precipitano sulle pareti dei pori come sali idrati e si trasformano in sali anidri ad evaporazione ultimata; da questo momento in poi se si verificano nuovi arrivi di umidità in modeste quantità, sali anidri non si dissolvono, ma tornano ad idratarsi e quindi aumentano di volume [L. Zevi, *Manuale del Restauro*].

## **2.7 Test di risalita capillare e cristallizzazione salina sui modelli in scala reale della sperimentazione con i compositi**

Nel 1976 il Politecnico di Milano ha intrapreso una campagna sperimentale al fine di investigare il degrado causato dalla cristallizzazione salina nelle murature [Baronio et Binda, 1976]. La sperimentazione prevedeva una serie di test, in condizioni termiche e igrometriche controllate, per riprodurre i meccanismi di degrado simili a quelli causati dall'ambiente naturale. Al fine di correlare test di laboratorio al degrado causato dagli agenti atmosferici naturali, sono stati completati nell'Ottobre del 1990 tre modelli di muratura in scala reale, grazie alla concessione dell'area da parte dell'ESEM (Ente Scuola Edile milanese) e al supporto finanziario dell' ICITE (istituto Centrale per l'Industria e la Tecnologia Edilizia) e del CNR (Milano). Si tratta di tre serie di schiere costituite da murature in pietra squadrata (tipo A), di mattoni (tipo B) e mista pietra-mattoni (tipo C). Tali edifici sono esposti agli agenti ambientali ed, inoltre, sono stati sottoposti a numerosi cicli di imbibizione con acqua salina (solfato di sodio). La ricerca si articola principalmente in quattro fasi.

### **Prima fase**

Dal novembre 1990 i contenitori posti sotto il modello A (in pietra) e B (in mattoni) sono stati alimentati con una soluzione satura di  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . L'acqua nei contenitori è stata alimentata naturalmente, dalle piogge, e anche artificialmente. La presenza dell'acqua è stata controllata tramite cinque piezometri. La rilevazione dell'altezza di risalita capillare dell'acqua e la diffusione dei sali (per il modelli A e B), misurate settimanalmente tramite otto rilevatori fissi posizionati sulla superficie esterna di ogni modello, è iniziata nel febbraio del 1991. I dati mostrano sostanziali differenze tra pietra e mattoni. La risalita capillare è risulta essere maggiore per il modello in mattoni (4-10 corsi di mattoni) che per il modello in pietra (2 corsi). Per valutare la durata del degrado nelle murature, alla fine del primo gruppo di test (1992-1996), si è susseguito un periodo senza alimentazione di acqua: si è constatato che il degrado diminuiva nel tempo fino ad arrivare ad una condizione stazionaria.

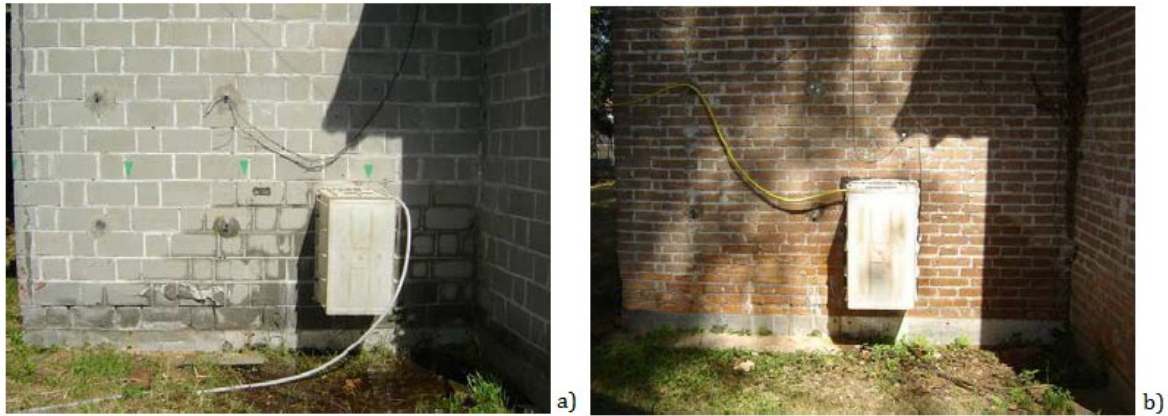
**Seconda fase:**

Un secondo gruppo di test è stato condotto per valutare se il degrado poteva riiniziare con una nuova addizione di acqua (senza sali) nei contenitori dopo un lungo periodo “secco”. Nel modello in pietra si poteva vedere una risalita capillare che interessava i primi tre corsi e solo superficialmente, oltre a efflorescenze nelle vicinanze dei giunti di malta ed esfoliazione superficiale. Una volta fermata l’alimentazione artificiale dell’acqua il degrado si è lentamente ridotto. Nel modello in mattoni, molto più degradato di quello in pietra, si sono osservati distacchi e perdita dello strato superficiale precedentemente danneggiato. Le efflorescenze in assenza di umidità non erano più visibili, e apparivano solamente in inverno lungo il corso più basso.

Quattro anni dopo l’addizione di acqua senza sali, i muri hanno riportato efflorescenze sulla superficie, a dimostrazione del fatto che se i sali non vengono rimossi perdurano nella muratura anche se non visibili, ed anche in presenza di trattamenti superficiali.

**Terza fase:**

La terza fase del programma di ricerca prevedeva l’impiego di NDT (Non Destructive Testing) per la rilevazione della distribuzione e del contenuto di umidità, del tempo e delle modalità del processo di essiccazione e della presenza di sali. Per fare questo è stata simulata l’inondazione di alcune parti di muratura. Per prima cosa al terreno su cui si trovavano i modelli è stata continuamente fornita acqua per 15 giorni, ed in seguito ai pannelli scelti per le indagini sono stati sigillati dei serbatoi (con capacità di 100 litri) per fornire una ulteriore quantità di acqua ad ogni pannello al fine di simulare l’inondazione e aumentare il livello di umidità, per un tempo di 3 giorni. I pannelli murari usati per questa sperimentazione sono il pannello A4 del modello in pietra e il pannello B4 del modello in mattoni (scelti poi anche per la sperimentazione con i compositi).



**Figura 2.3.** Serbatoi sigillati ai pannelli per la simulare l'inondazione; a) Pannello A4 del modello in pietra; b) Pannello B4 modello in mattoni [Binda *et al.*, 2010].

Le prove non distruttive scelte per questa ricerca sono le seguenti:

- *Termografia*, analisi della risposta termica in presenza di discontinuità del materiale in aree umide e asciutte;
- *Indagini soniche*, con l'impiego di onde elastiche a bassa frequenza (3,5 kHz);
- *Ground Penetration Radar Test (GPR)*, in aree umide e asciutte;
- *Powder drilling test*, cioè il prelievo di polvere di mattoni o malte, attraverso una perforazione, per il calcolo dell'umidità ponderale nella muratura.

### Termografia

La "termovisione" è una prova non distruttiva basata sulla conducibilità termica del materiale, ed è usata per identificare aree sotto rasatura e intonaco che possono nascondere anomalie costruttive. Per quanto riguarda i modelli a scala reale la termovisione è stata applicata in momenti differenti della sperimentazione, al fine di controllare il processo di essiccazione dopo la simulazione dell'inondazione. Dall'ispezione visiva si è visto che il livello dell'acqua nel pannello A4, subito dopo la rimozione del serbatoio, ha raggiunto il quinto corso, mentre nel pannello B4 l'acqua ha raggiunto il quattordicesimo corso. Nel pannello A4 il contenuto di umidità si è visibilmente ridotto dopo poche ore di esposizione solare, l'umidità residua era visibile solamente all'interfaccia con i giunti di malta. Nel pannello B4, il contenuto di umidità è rimasto quasi costante per molti giorni nonostante l'esposizione solare. La termovisione è in

grado di rilevare la presenza di umidità anche se non rilevabile ad occhio nudo. La Figura 2.4 e la Figura 2.5, immagini termografiche dei pannelli A4 e B4, mostrano come il pannello A4 risulti asciutto mentre il B4 presenti delle zone umide anche dopo 12 giorni. Le comparazioni tra i dati forniti dalla termocamera e dalla termocoppia, applicata a zone umide (a 40 cm d'altezza) e a zone secche (120 cm d'altezza) permettono di controllare le variazioni giornaliere delle temperature della superficie dei muri (Figura 2.6).

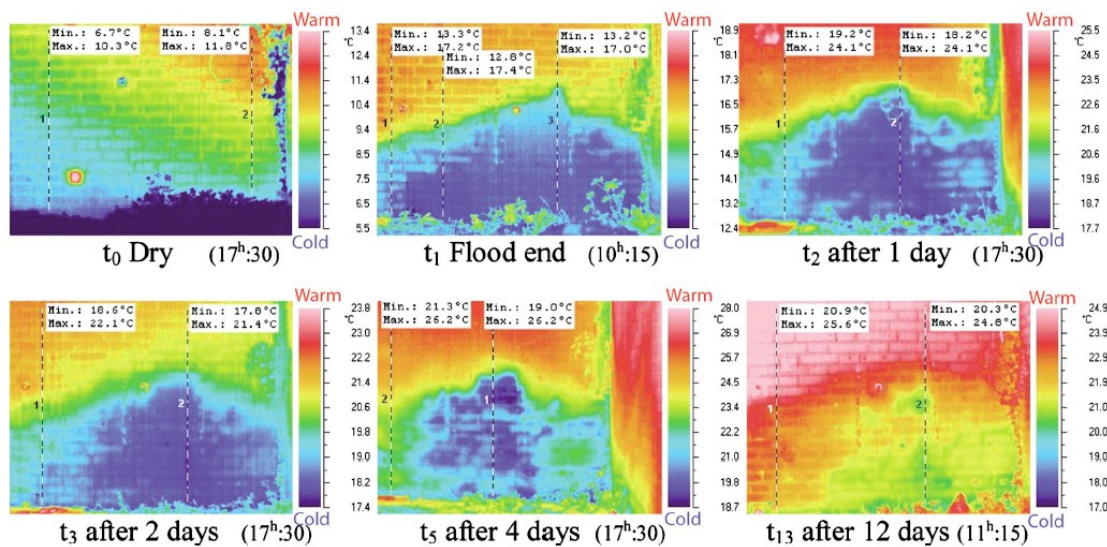


Figura 2.4. Termografia del pannello A4 del modello in pietra: processo di essiccazione nel tempo [Binda *et al.*, 2010].

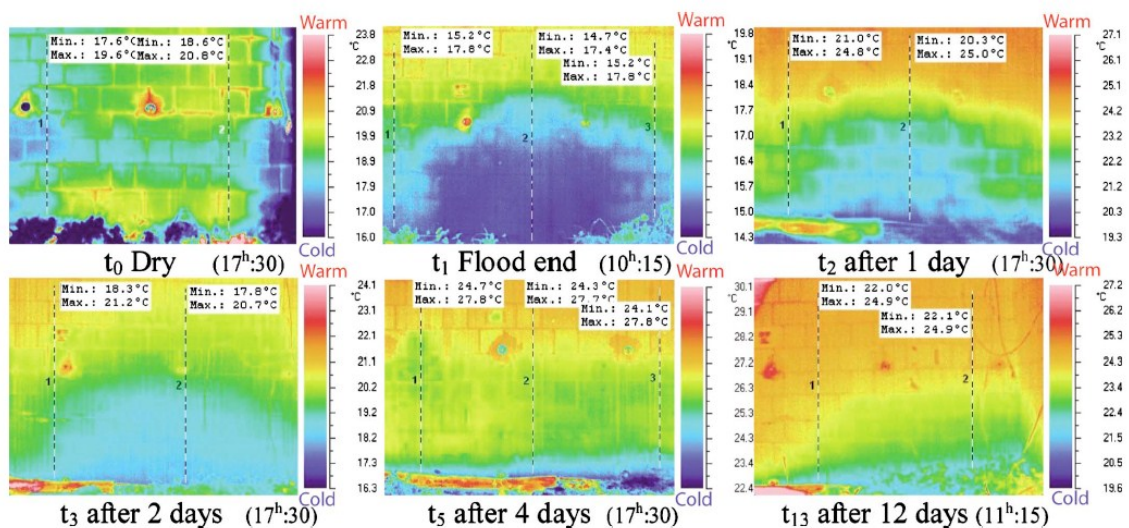


Figura 2.5. Termografia del pannello B4 del modello in mattoni: processo di essiccazione nel tempo [Binda *et al.*, 2010].

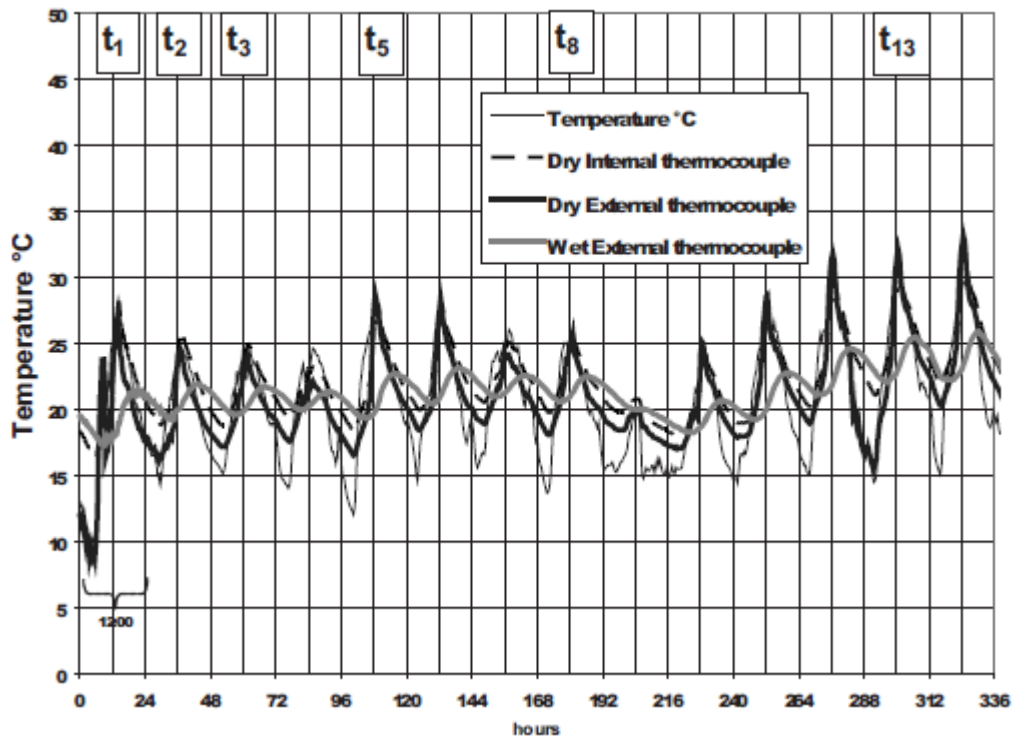


Figura 2.6. Monitoraggio della temperatura della superficie dei pannelli durante il processo di essiccazione [Binda *et al.*, 2010].

### Indagini soniche

Questa prova non distruttiva si basa sulla generazione di onde elastiche con una frequenza compresa tra i 20 Hz e i 20 kHz, generate da impulsi meccanici, applicate in punti della struttura. Queste indagini soniche sono state condotte in diversi momenti sulla stessa area al fine di osservare l'influenza della variazione di umidità sulla velocità. È stata coperta un'area di 0.25 m<sup>2</sup> (50 cm x 50 cm) per includere sia la zona di risalita dell'acqua sia la porzione di pannello "inondata". La frequenza usata in questi test variava in un range di 1-2 kHz. In Figura 2.7 sono riportate le mappe della velocità impulsiva, riferite al pannello A4 in pietra, in diverse condizioni: il grigio più scuro corrisponde a una velocità di 3.2 m/s mentre quello più chiaro corrisponde ad una velocità di 1.2 m/s. Dopo la simulazione di inondazione è stato osservato un aumento complessivo della velocità, causato dall'acqua nei pori e dall'eventuale presenza dei sali, anche se è stata osservata solo una lieve differenza tra le misurazioni prima e dopo la simulazione di inondazione. Questo può essere dovuto al fatto che, dopo la simulazione di inondazione, è stato misurato solo il 3% del massimo contenuto di umidità nel modello in pietra;

Ci si aspettava di osservare una variazione maggiore della velocità delle onde soniche nei modelli in mattoni, dove era stato misurato il 28% di umidità. In Figura 2.8 si nota solo un lieve incremento generale della velocità, troppo piccolo per la misurazione del contenuto di umidità.

Tale dato mostra che questo tipo di test non è adatto alla rilevazione della variazione del contenuto di umidità nelle murature a bassa densità e con sezioni non omogenee.

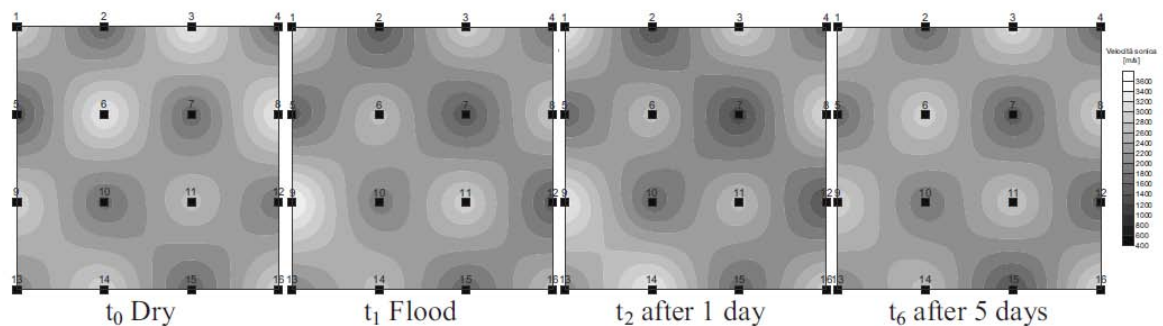


Figura 2.7. Mappe della velocità impulsiva sul pannello A4 in pietra [Binda *et al.*, 2010].

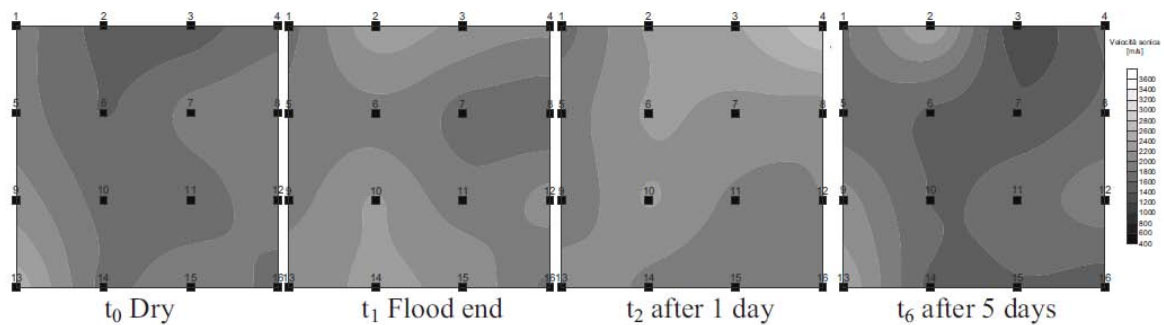


Figura 2.8. Mappe della velocità impulsiva sul pannello B4 in mattoni [Binda *et al.*, 2010].

### Ground Penetration Radar Test

Le misurazioni GPR sono sensibili alle proprietà elettromagnetiche dei materiali. Più specificatamente, la velocità delle onde radar nei materiali da costruzione (esclusi i metalli) è influenzata dalla permittività elettrica, mentre l'intensità dell'onda radar è influenzata dalla conducibilità. Nei materiali porosi questi due parametri sono influenzati dal contenuto d'acqua. In presenza di acqua ci si aspetta un incremento della permittività e della conducibilità, che produrrà una riduzione della velocità e dell'intensità dell'onda radar.

Come risultato, il GPR test può essere una tecnica promettente per la valutazione del contenuto di umidità nelle murature, come anche in altri materiali da costruzione.

Le misurazioni sono state condotte con una antenna ad alta frequenza (2 GHz), che ha permesso l'acquisizione di diverse configurazioni. I dati sono stati misurati in modalità riflessa, ricavando le indicazioni di umidità dalla velocità delle onde radar. Al fine di amplificare la riflessione perpendicolare alla muratura, la misurazione è stata eseguita in modo statico e ponendo dietro il muro uno scudo metallico. Il tempo di riflessione era chiaramente segnalato dal cambio di polarità dall'onda radar riflessa. Le misurazioni sono state eseguite a diverse altezze dei modelli di pietra e mattoni, prima della simulazione di inondazione (condizioni asciutte), immediatamente dopo l'inondazione e in tempi diversi del processo di essiccazione.

La Figura 2.9 e Figura 2.10 mostrano le misurazioni delle velocità rispettivamente nei modelli in pietra e in mattoni. Entrambe le immagini mostrano che le murature sono influenzate dall'umidità sopra l'altezza di un metro dal suolo. Sopra questo livello, gli effetti dell'inondazione sono trascurabili o troppo ridotti per misurarli con il radar GPR. I dati misurati sotto il livello di un metro presentano un andamento costante. Come ci si aspettava la variazione della velocità è molto maggiore nel pannello in mattoni rispetto a quello in pietra, a causa della differente variazione di umidità causata dalla simulazione di inondazione nei due materiali. A dimostrazione della grande sensibilità di questo tipo di test, le misurazioni nella parte inferiore del pannello in mattoni mostrano che la velocità radar può essere misurata con una accuratezza di circa 0.1 cm/ns.



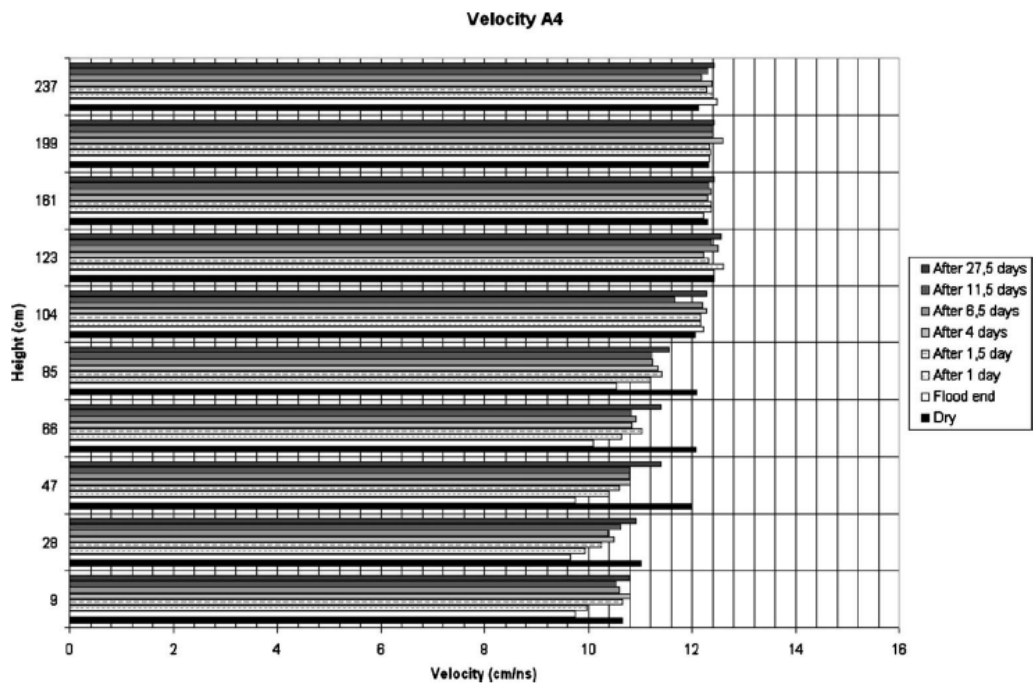


Figura 2.9. Risultati del test GPR nel pannello A4 del modello in pietra [Binda *et al.*, 2010].

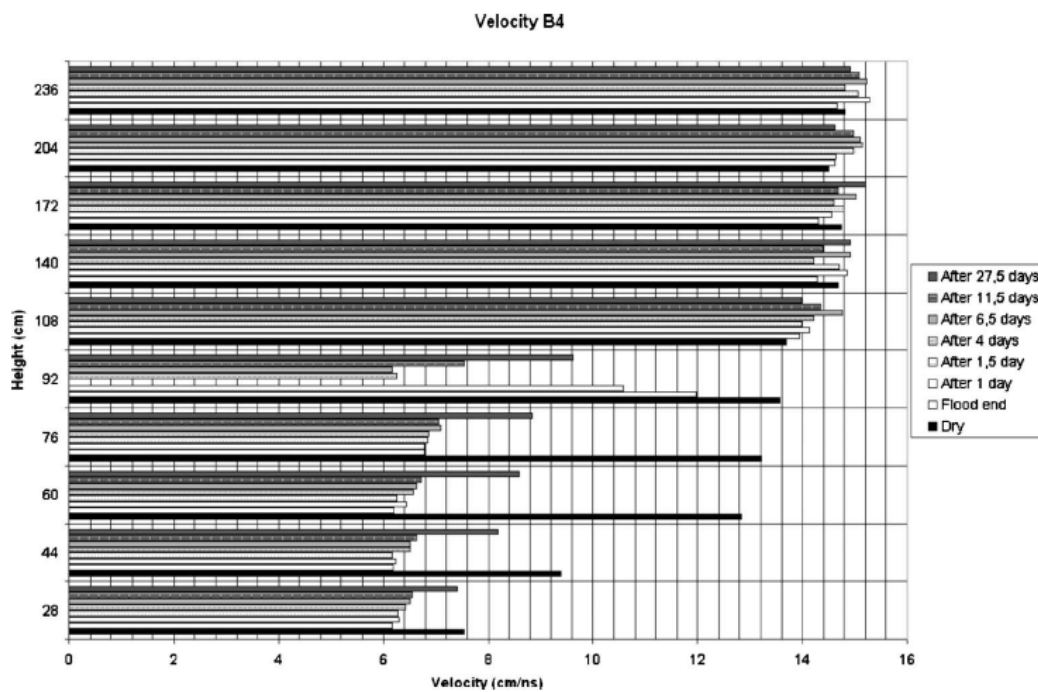


Figura 2.10. Risultati del test GPR nel pannello B4 del modello in mattoni [Binda *et al.*, 2010].

### Powder Drilling Test

La prova “powder drilling test” prevede il prelievo di polvere di mattoni o malte, attraverso una perforazione, per il calcolo dell’umidità ponderale nella muratura. Il contenuto di umidità è calcolato come differenza tra il peso del campione misurato all’atto del prelievo, comprensivo quindi della quota di umidità, ed il peso dello stesso dopo l’essiccazione.

Questo metodo è usato per valutare quale sia la causa dell’umidità presente nelle murature, e per avere una indicazione sulla presenza di sali. Il vantaggio di questa tecnica risiede nel fatto di essere poco distruttiva, di facile impiego, economica e la possibilità di fornire una grande quantità di informazioni per la diagnostica e per controllare l’efficacia degli interventi. Nonostante tutto questo metodo non è facilmente applicabile a tutti i materiali, a causa del calore sviluppato durante la perforazione, il materiale può perdere una certa percentuale di acqua: la velocità di perforazione può ovviamente influenzare questa perdita d’acqua e anche la pressione esercitata dall’operatore può falsare i risultati.

Questo test è stato eseguito a due diverse altezze (30 e 120 cm), perforando a 4 diverse profondità, al fine di monitorare la sezione trasversale di ogni pannello:

- pannelli in pietra (sezione di 30 cm): profondità di 2, 7 e 15 cm partendo dal lato esterno, e 28 cm dal lato interno;
- pannelli in mattoni (sezione di 38 cm): profondità di 2, 9 e 18 cm dal lato esterno, e 36 dal lato interno.

Sono state selezionate due altezze al fine di avere due differenti condizioni: 30 cm, in condizioni di risalita dell’acqua, e 120 cm in condizioni asciutte. Dai risultati si rileva una sensibile differenza tra il contenuto di umidità misurato a 30 e 120 cm di altezza sia per quanto riguarda il pannello A4 pietra che per il B4 in mattoni. La porosità delle due murature è molto diversa (5.2% per la pietra e 35.7% per i mattoni) come anche l’assorbimento capillare dell’acqua ( $0.25 \text{ g cm}^{-2} \text{ h}^{0.25}$  per la pietra e  $2.10 \text{ g cm}^{-2} \text{ h}^{0.25}$  per i mattoni). Di conseguenza risulta una grande differenza nel contenuto di umidità all’altezza di 30 cm tra i 2 modelli: il contenuto di umidità nel modello in mattoni è 10 volte maggiore rispetto il modello in pietra. Le differenti porosità delle unità murarie influenzano il contenuto di umidità nei muri: nei pannelli in pietra il contenuto di umidità

è leggermente inferiore all'interno rispetto all'esterno; al contrario nel pannello in mattoni è stato rilevato un contenuto di umidità maggiore all'interno rispetto all'esterno. Tutti i contenuti di umidità trovati prima della simulazione sono stati inferiori rispetto al contenuto di umidità igroscopico, tranne per le rilevazioni del pannello B4 all'altezza di 30 cm, in cui l'umidità risulta maggiore di quello igroscopico, mostrando, solo in questo caso, la presenza di acqua supplementare dovuta alla naturale umidità di risalita. Il contenuto di umidità igroscopico dovrebbe essere un valore costante lungo il pannello perché viene considerata una umidità fisiologica dipendente dalle condizioni ambientali. Questa è stata calcolata ad una altezza di 120 cm pari all'1% per la muratura in pietra, e all'1.3% per quella in mattoni. La variazione igroscopica lungo l'altezza è indicazione della presenza di sali nella parte inferiore di entrambi i pannelli. Efflorescenze derivanti dalla cristallizzazione salina erano visibili ad occhio nudo sia sul pannello A4 che nel B4. Dopo la simulazione di inondazione, si nota che la muratura in pietra assorbe una quantità di acqua molto bassa (1.2%), in particolare nella parte esterna, grazie alla bassa porosità. Al contrario la muratura in mattoni assorbe una consistente quantità di acqua (15.9%), che si concentra soprattutto all'interno del muro.

#### Quarta fase

Da ricerche successive si sono ricavati dati relativi all'umidità e alla concentrazione di sali sui pannelli A4 e B4.

**Tabella 2.1:** dati relativi alla concentrazione di sali sui pannelli A4 e B4 [Progetto Europeo "CHEF", 2009]

PANNELLO A4, PIETRA			PANNELLO B4, MATTONI		
$t_0$			$t_0$		
Profondità	Altezza	Contenuto di SO <sub>3</sub> [%]	Profondità	Altezza	Contenuto di SO <sub>3</sub> [%]
0-2	120	0.054	0-2	120	0.056
0-2	30	0.070	2-9	30	<0.05
$t_1$			$t_1$		
Profondità	Altezza	Contenuto di SO <sub>3</sub> [%]	Profondità	Altezza	Contenuto di SO <sub>3</sub> [%]
-	120	-	-	120	-
0-2	30	<0.05	2-9	42	<0.05
$t_{11}$			$t_{13}$		
Profondità	Altezza	Contenuto di SO <sub>3</sub> [%]	Profondità	Altezza	Contenuto di SO <sub>3</sub> [%]
-	-	-	-	120	-
-	-	-	2-9	42	<0.05

**Tabella 2.2:** dati relativi alla concentrazione di sali sui e umidità relativi al pannello B4 [Progetto Europeo “SCOST”]

Pannello B4, MATTONE ( 22°C, 50 % U.R.)					
	Altezza [cm]	Profondità [cm]	Contenuto di umidità in sito [%]	Contenuto di umidità igroscopica in laboratorio [%]	SO <sub>3</sub> [%]
MATTONE	105	0-1	1.50	8.63	2.09
		1-2	1.93	5.07	0.94
	50	0-1	8.80	3.09	0.32
		1-2	8.62	2.58	0.19
	25	0-1	23.45	2.66	0.3
		1-2	25.04	2.54	0.27
MALTA	103	0-1.5	0.25	4.01	1.4
		1.5-8	0.26	1.13	0.33
	24	0-1.5	6.67	0.31	0.15
		1.5-8	7.98	0.24	0.24

Come si nota dalla Tabella 2.1 e dalla Tabella 2.2 i dati per i due pannelli sono molto diversi; si nota soprattutto che per il pannello B4 in mattoni la concentrazione di sali è maggiore soprattutto nella parte superiore del pannello. Per il pannello A4 invece la concentrazione maggiore si riscontra nella parte inferiore.

Al termine della campagna sperimentale si può concludere che i materiali a bassa porosità, come le arenarie nel modello A, assorbono una bassa quantità di acqua, e di conseguenza saranno interessati da un degrado limitato, nonostante la presenza di sali. Al contrario materiali ad alta porosità, come i mattoni in Modello B, assorbono una elevata quantità di acqua in breve tempo e, poiché non sono in grado di rilasciarla completamente in tempi rapidi, possono anche essere soggetti ad un forte degrado soprattutto in presenza di sali all'interno. Inoltre si è dimostrato che se i sali non vengono rimossi perdurano nella muratura anche se non visibili, peggiorando il degrado della muratura. Dall'osservazione della risalita capillare e della diffusione della soluzione salina in funzione del tempo forniscono importanti informazioni sul comportamento delle murature in presenza di acqua: si è constatato infatti che il degrado, in condizioni “secche” diminuiva nel tempo fino ad arrivare ad una condizione stazionaria.

## Capitolo 3

# Campagna sperimentale

### 3.1 Premessa

Lo studio presentato in questa tesi si concentra sulle attività svolte a completamento della ricerca presentata al Capitolo 1 da *Binda e Valluzzi* (2011).

Si è investigato il comportamento di alcuni materiali compositi applicati su murature di edifici sperimentali in scala reale, in riferimento al problema dell'adesione e della durabilità di questi materiali innovativi in ambiente aggressivo (presenza di cristallizzazione salina), secondo il programma sperimentale schematizzato in Figura 3.1:

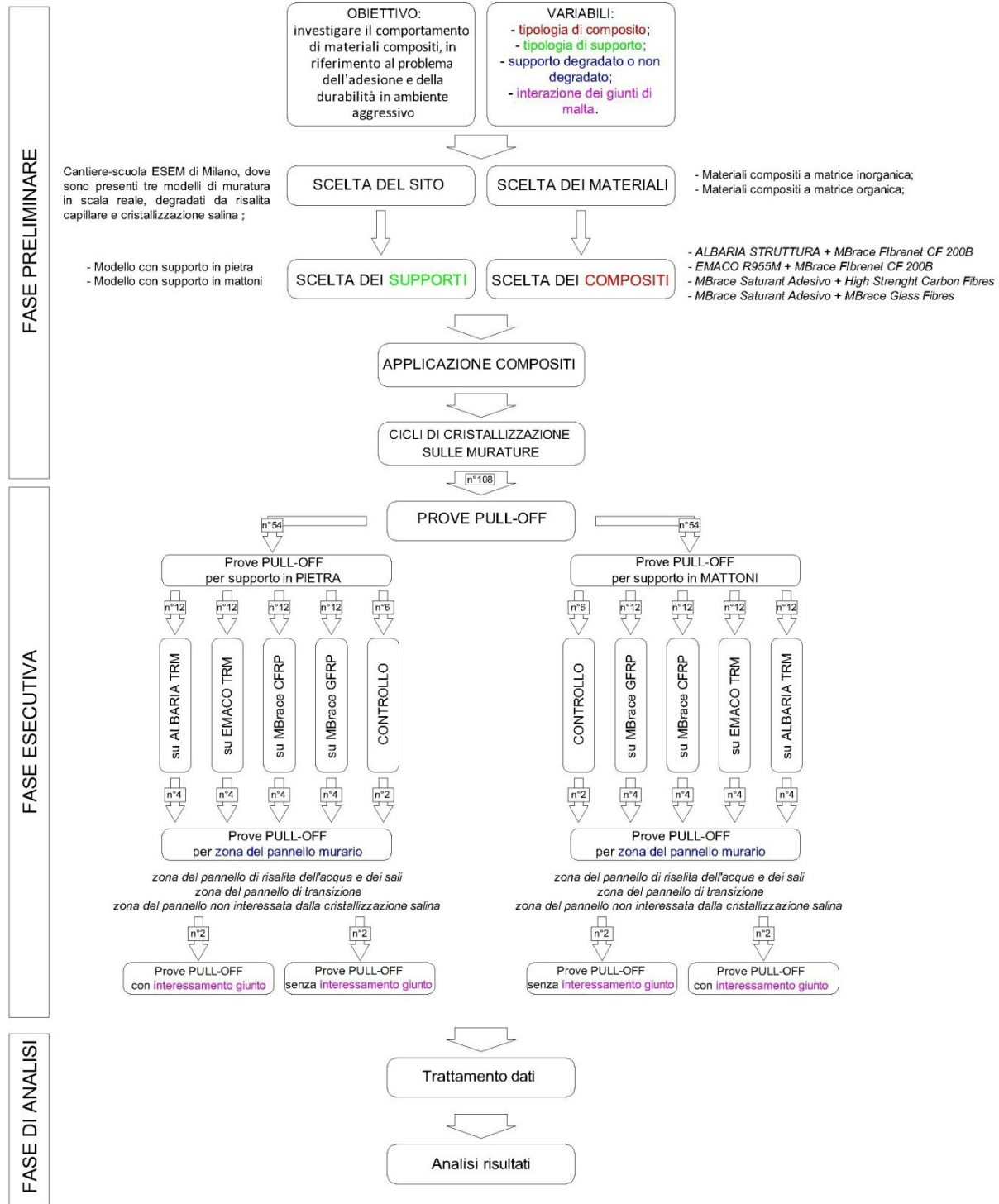


Figura 3.1: lay-out programma sperimentale;

### 3.2 Procedura sperimentale: prova PULL-OFF

Durante la fase esecutiva si è utilizzata la prova pull-off. Questo tipo di prova ha fornito i risultati utili a perseguire gli obiettivi schematizzati nel lay-out del programma sperimentale. Per questo è stato assegnato un paragrafo specifico, al fine di spiegare al meglio come viene effettuata tale prova di pull-off.

La prova di Pull-off è una tecnica di indagine semi-distruttiva che permette la misura della resistenza a trazione o della resistenza allo strappo di un materiale applicato ad un sottofondo.

Le normativa europea UNI EN 1015-12, 2002 e quella americana ASTM C1583-04, 2004 regolamentano questo tipo di prova.

La prova consiste nel fissare un elemento circolare di alluminio (dolly) alla superficie del materiale da testare utilizzando particolari resine bicomponenti e, dopo aver isolato la superficie di prova tramite incisione effettuata con un carotiere dedicato, nel strapparla tramite un apposito estrattore strumentato che permette la misura del valore ultimo di resistenza a trazione (Figura 3.2).

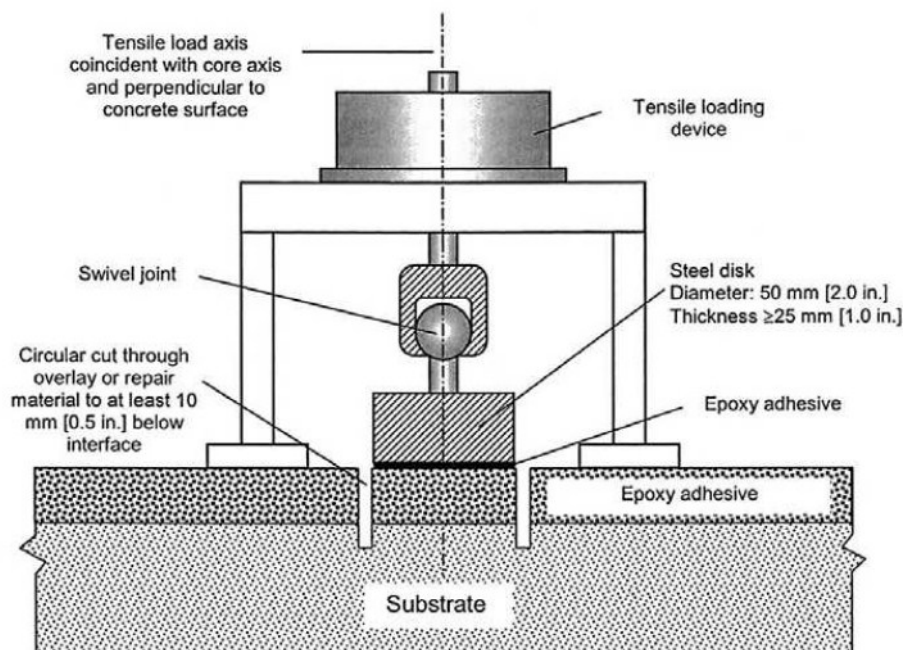
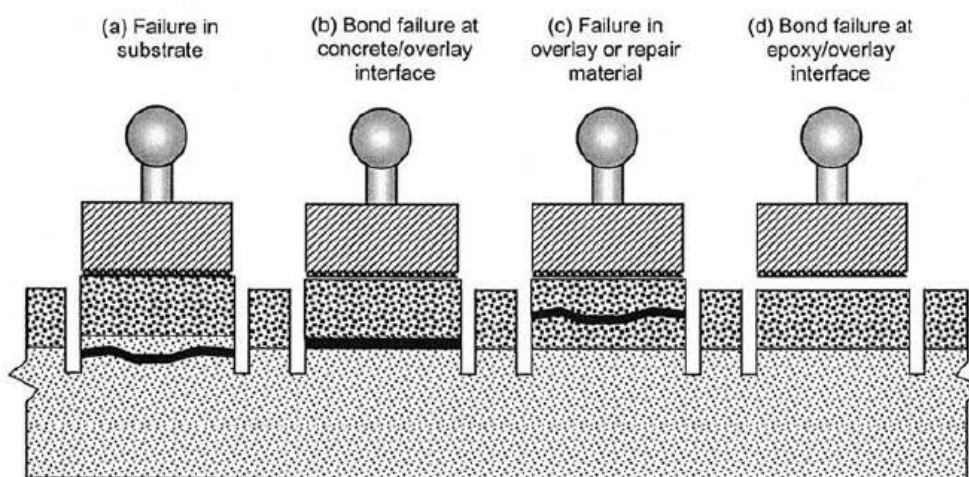


Figura 3.2: configurazione della prova secondo la norma ASTM C1583-04, 2004 [ASTM 2004]

Oltre alla misurazione del valore ultimo di resistenza a trazione, è di fondamentale importanza il tipo di distacco che si verifica.

La normativa americana ASTM prevede quattro diverse modalità di rottura ():

- modalità *a*): rottura coesiva che avviene nel supporto;
- modalità *b*): rottura adesiva all'interfaccia supporto/rinforzo;
- modalità *c*): rottura all'interno del rinforzo;
- modalità *d*): rottura all'interfaccia rinforzo/adesivo.



**Figura 3.3:** classificazione delle modalità di rottura secondo la norma ASTM C1583-04, 2004 [ASTM 2004]

Per le prove di pull-off si è utilizzato il dinamometro Matest (Pull-off tester portatile E124–16kN): l'apparecchio è corredato da una piccola cella di carico e di un visualizzatore digitale ad alta risoluzione, che permette di visualizzare lo sforzo di trazione che viene applicato ruotando la manovella.

I tre piedini di appoggio dello strumento possono essere fissati nella posizione "larga" (ingombro dia. 176mm) con appoggio molto stabile; oppure nella posizione "compact" (ingombro dia. 92,5mm) per test in spazi ristretti o per campioni vicini l'uno all'altro. Per la sperimentazione è stata usata la configurazione larga.



### 3.3 Area di interesse

I pannelli murari su cui si sono eseguite le prove sono siti nel cantiere-scuola Esem di Milano, che si trova nel quartiere Cimiano, nella zona nord-orientale della città, a pochi chilometri dal Politecnico di Milano(Figura 3.4).



Figura 3.4. Inquadramento generale del quartiere Cimiano [Google maps].



Figura 3.5. Cantiere-scuola ESEM e individuazione dei pannelli murari [Google maps].

### 3.4 Modelli in muratura a scala reale

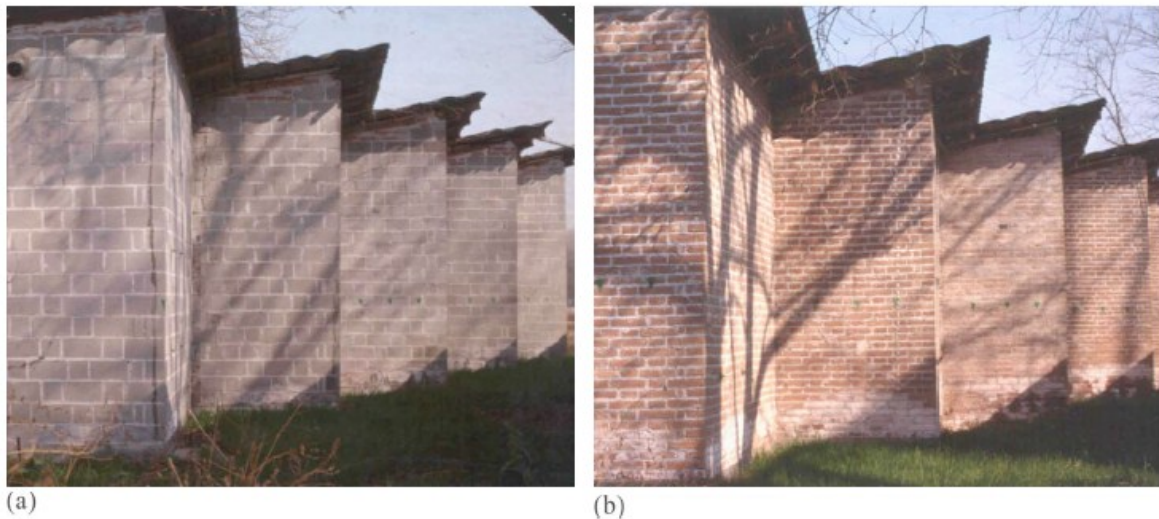
I tre modelli di muratura sono costituiti da un unico piano, con le facciate principali divise in moduli. Due dei tre modelli sono composti da cinque moduli, il terzo da quattro. Ogni modulo è composto da una coppia di pannelli: un pannello di 3 m orientato a Sud e un pannello di 1.5 m orientato a Ovest (tali orientamenti permettono la massima evaporazione)(Figura 3.6).

Per la realizzazione sono stati scelti materiali che potessero ben rappresentare i materiali comunemente usati per le costruzioni. Uno dei modelli è stato realizzato in *Pietra Serena*, proveniente da cave vicine a Firenzuola negli Appennini, largamente usata nel centro Italia, uno è costituito da mattoni faccia vista, e il terzo modello è misto, composto da una parte in pietra e una in mattoni.

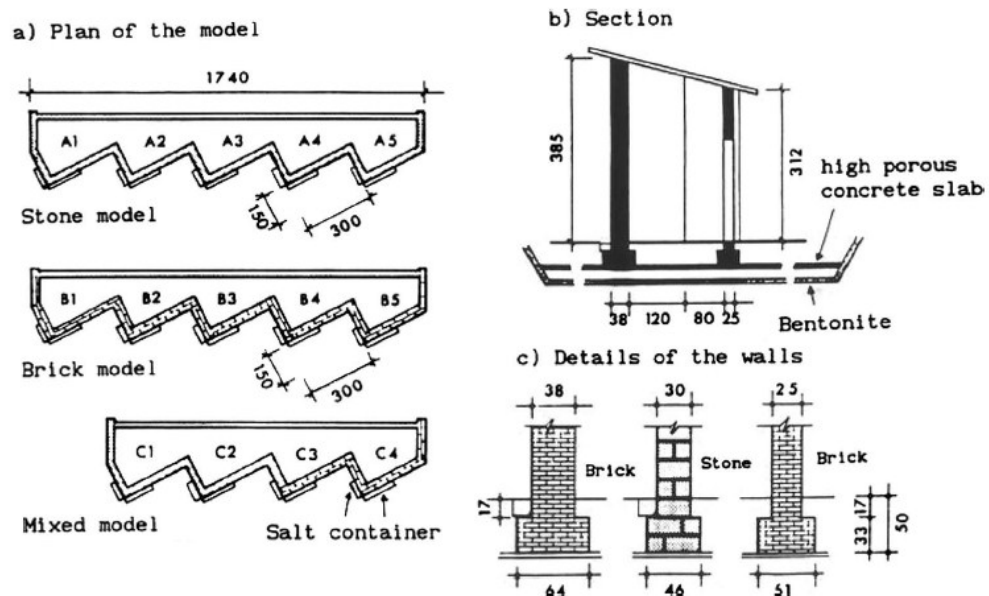
Lo spessore delle facciate è di 38 cm per i muri in mattoni e di 30 cm per quelli in pietra. Il muro posteriore misura 25 di spessore. I modelli hanno un'altezza di 3.8 m nella parte frontale e di 3.4 m nel retro (Figura 3.7).

Questi edifici sperimentali sono stati eretti volutamente in un'area "inquinata" di Milano. Sono stati realizzati dei complessi invece che muri indipendenti al fine di avere all'interno degli stabili un gradiente termico-igrometrico simile a quello delle normali abitazioni. Pertanto i modelli venivano riscaldati durante l'inverno.

Per studiare l'effetto della cristallizzazione salina, è stato indotto un degrado artificiale nelle murature introducendo una soluzione salina ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) in un sistema di contenitori posti sotto la base dei pannelli murari. Il suolo sotto i modelli è stato scavato fino ad un certo livello e coperto da uno strato di bentonite. Questa operazione è stata fatta per assicurare la risalita capillare dell'acqua nelle murature.



**Figura 3.6.** Modelli in scala reale, vista dei pannelli verso Ovest: a) Modello in pietra; b) Modello in mattoni ([Binda *et al.*, 2010]).



**Figura 3.7.** Geometria dei modelli in scala reale; a) planimetria; b) sezione; c) dettagli dei muri [Binda *et al.*, 2010].

### Proprietà dei materiali

Alcuni campioni dei materiali usati per la costruzione dei modelli sono stati sottoposti a test per la misurazione delle caratteristiche fisiche, petrografiche e meccaniche di tali materiali. I risultati sono presentati in Tabella 3.1. L'analisi petrografica ha fornito la seguente composizione per quanto riguarda la pietra: quarzo 32%, feldspati alcalini 7%, plagioclasio 13%, calcite 13%, dolomite 7%, fillosilicati e altri materiali 28%. La malta è stata preparata con un rapporto 1:3 tra grassello di calce e sabbia calcarea.

**Tabella 3.1.** Risultati delle prove per la determinazione delle caratteristiche dei materiali da costruzione usati [Baronio, Binda 1992].

PROPRIETA' MATERIALI				
		<i>Pietra</i>	<i>Mattone</i>	<i>Malta</i>
Resistenza a compressione [N/mm <sup>2</sup> ]	D	106.03	29.39	1.44
	W	59.90	23.57	-
Resistenza a flessione [N/mm <sup>2</sup> ]	D	12.36	4.23	0.37
	W	7.52	4.13	-
Resistenza a trazione [N/mm <sup>2</sup> ]	D	6.83	1.37	-
	W	3.55		
Resistenza al taglio [N/mm <sup>2</sup> ]	D	7.40	5.30	-
	W	4.66	5.31	-
Densità di massa [Kg/m <sup>3</sup> ]		2472.00	1501.00	1902.00
Assorbimento acqua [%]		2.00	25.31	12.10
Coeff. di assorbimento [Kg/m <sup>2</sup> sec]		0.003667	0.3135	0.2793

D= asciutto

W= umido

### Dati ambientali

Nei primi anni della sperimentazione è stata condotta una rilevazione sistematica della temperatura e dell'umidità all'interno e all'esterno dei modelli. In più, dati su temperatura, umidità e inquinamento dell'aria sono stati raccolti dall'osservatorio Brera di Milano (Figura 2.6).

Sono stati rilevati cicli di gelo-disgelo e di cristallizzazione salina.

Poiché i modelli erano privi di aperture, le condizioni interne erano caratterizzate alti livelli di umidità e fasi idrate di solfato di sodio.

### 3.5 Materiali compositi della sperimentazione

Con l'obiettivo di valutare l'influenza di condizioni ambientali aggressive sull'adesione fibra-supporto murario, sono stati scelti i seguenti materiali compositi a matrice inorganica e a matrice epossidica (caratteristiche in Tabella 3.2) forniti da BASF Construction Chemicals Italia Spa:

- *ALBARIA STRUTTURA*, malta da muratura di calce pozzolanica, priva di cemento, con *MBrace Fibre Net CF 200B*, rete bidirezionale in carbonio ad alta resistenza (TRM ALBARIA).
- *EMACO R955M*, malta cementizia, premiscelata, polimero modificata, con *MBrace Fibre Net CF 200B*, rete bidirezionale in carbonio ad alta resistenza (TRM EMACO).
- *MBrace Saturant Adesivo*, adesivo bicomponente a base epossidica con *MBrace High Strength Carbon Fibres*, rinforzo fibroso a base di tessuti unidirezionali in fibra di carbonio (CFRP).
- *MBrace Saturant Adesivo* con *MBrace Glass Fibres* rinforzo fibroso a base di tessuti unidirezionali in fibra di vetro (GFRP).

**Tabella 3.2:** Caratteristiche delle matrici dei materiali compositi [Schede Tecniche BASF]

MATRICI			
	<i>ALBARIA STRUTTURA</i>	<i>EMACO R955M</i>	<i>MBrace Saturant Adesivo</i>
<b>Resistenza a compressione</b>	18 MPa Classe M15	1 g > 10 MPa 7 gg > 27 MPa 28 gg > 38 MPa	7 gg > 80 MPa
<b>Resistenza a trazione per flessione</b>		1 g > 2 MPa 7 gg > 5 MPa 28 gg > 7 MPa	>45MPa
<b>Modulo elastico</b>	16.000 MPa	16.000 MPa	3100-3300 MPa
<b>Coefficiente di assorbimento capillare</b>	0,2 Kg·m <sup>-2</sup> ·min <sup>-0,5</sup>	<0,5 Kg·m <sup>-2</sup> ·min <sup>-0,5</sup>	/

**Tabella 3.3:** Caratteristiche delle fibre dei materiali compositi [Schede Tecniche BASF]

FIBRE			
	<i>Fibre Net CF 200B</i>	<i>MBrace High Strength Carbon Fibres</i>	<i>MBrace Glass Fibres</i>
<b>Modulo elastico caratteristico a trazione</b>	230.000 MPa	230.000 MPa	65.000 MPa
<b>Deformazione ultima</b>	1,4 %	1,3%	2,5%
<b>Resistenza caratteristica a trazione</b>	2500 MPa	2.500 MPa	1.300 MPa
<b>Coefficiente dilatazione termica</b>	$10^{-7} \text{ K}^{-1}$	$10^{-7} \text{ K}^{-1}$	$5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
<b>Resistività elettrica</b>	$1,6 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$	$1,6 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$	isolante

### 3.6 Applicazione dei materiali compositi ai pannelli murari in esame

Nei giorni 2 e 3 Aprile si sono applicati i materiali compositi, sopra descritti, ai pannelli A4 e B4 dei modelli a scala reale del cantiere ESEM di Milano. In Tabella 3.4 sono riportate le temperature e l'umidità relativa delle due giornate.

**Tabella 3.4:** dati ambientali delle giornate del 2-3 Aprile 2013.

Data	Temperature	U.R.
2 Aprile 2013	10°C-14°C	72 %
3 Aprile 2013	10°C-16°C	74 %

Prima dell'applicazione i modelli si presentavano come in Figura 3.6. I compositi sono stati applicati secondo gli schemi di Figura 3.8 e Figura 3.9: per i compositi a matrice inorganica (TRM ALBARIA e TRM EMACO) sono state realizzate due strisce da 50 cm per composito, aventi altezza di 150 cm da terra; mentre per i compositi a matrice epossidica (CFRP e GFRP) sono state realizzate due strisce larghe 60 cm e di 160 cm di altezza. Lo schema di applicazione è valido per entrambi i pannelli A4 e B4.

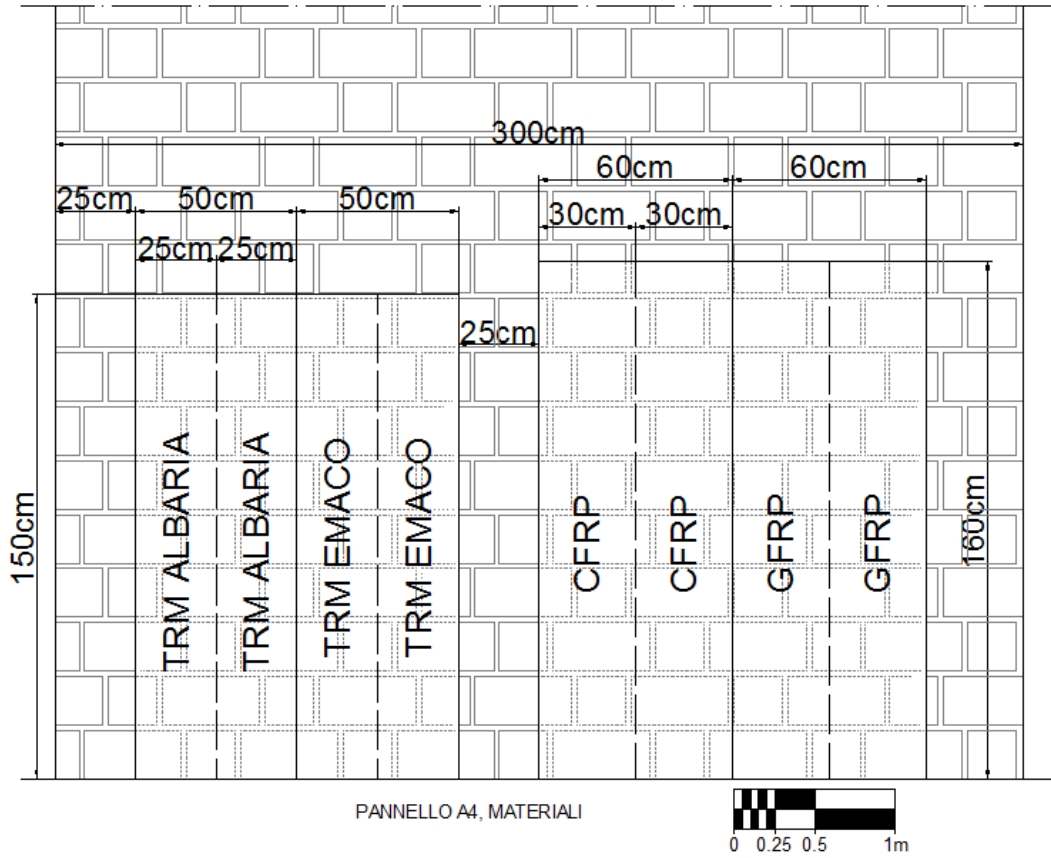


Figura 3.8: schema rappresentativo della distribuzione dei compositi sul pannello A4.

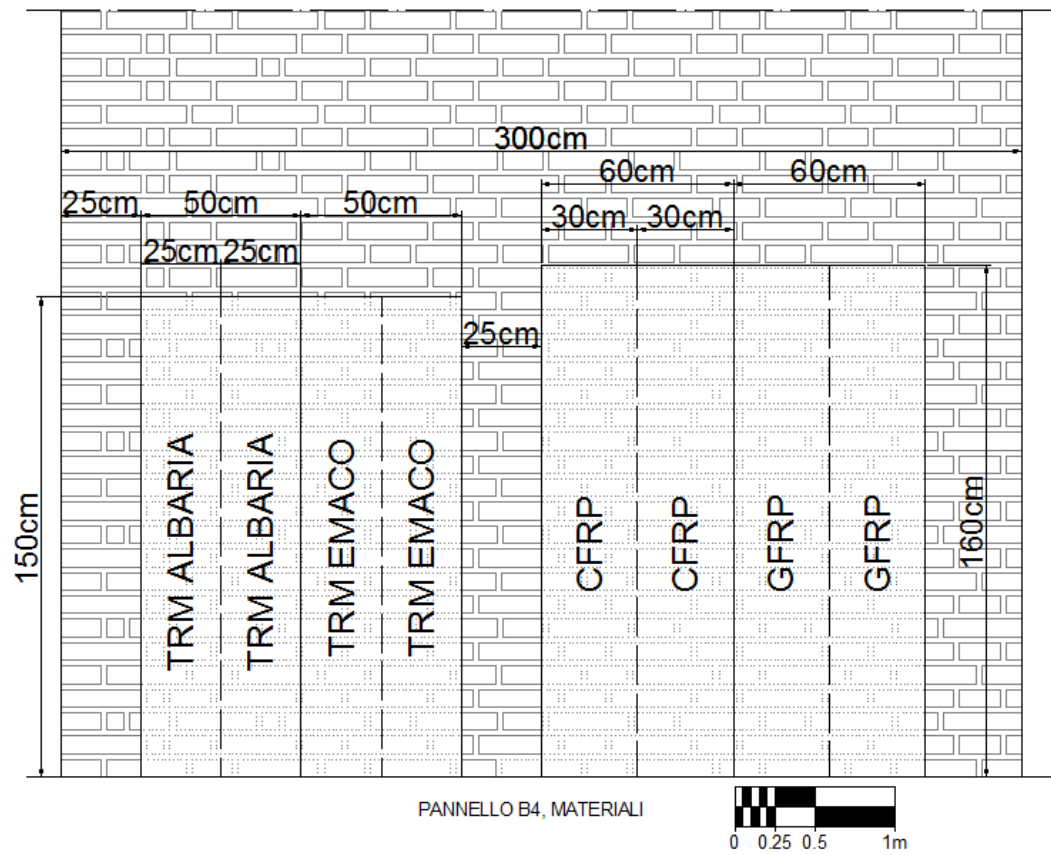


Figura 3.9: schema rappresentativo della distribuzione dei compositi sul pannello B4.

Per prima cosa si sono preparati i supporti per l'applicazione dei compositi a base inorganica (Figura 3.10). Si è poi proceduto con l'applicazione di due strisce di *ALBARIA STRUTTURA* con rete in carbonio *MBrace Fibre Net CF 200B* per ciascuno dei supporti in pietra e mattone (Figura 3.11 e Figura 3.12).

Prima dell'applicazione della malta, il supporto è stato pulito e saturato con acqua, questo per impedire al supporto di sottrarre acqua alla malta; *ALBARIA STRUTTURA* è stata applicata a cazzuola: prima si è applicato un sottile strato di 2÷3 mm di rinzaffo, eseguito con lo stesso materiale, a consistenza semi liquida, così da uniformare l'assorbimento della muratura e migliorarne l'aderenza, si è poi proceduto all'applicazione del rinforzo e a strati successivi (di spessore pari a 1 - 1,5 cm) di malta.



**Figura 3.10:** supporti per i compositi a matrice inorganica per il modello in pietra A4 e quello in mattoni B4.





**Figura 3.11:** fasi di applicazione di ALBARIA STRUTTURA + MBrace Fibre Net CF 200B sul pannello A4 del modello in pietra.



**Figura 3.12:** fasi di applicazione di ALBARIA STRUTTURA + MBrace Fibre Net CF 200B sul pannello B4 del modello in mattoni.

Successivamente si è proceduto alla preparazione dei supporti per l'applicazione dei compositi a matrice epossidica. Data la differenza di supporto, sulla muratura in pietra, più liscia e regolare, è stata data direttamente una mano di Primer, mentre sulla muratura in mattoni si è dovuto attendere il recupero avvenuto il giorno successivo di un rasante epossidico (Concresive) direttamente dalla sede Basf di Treviso.

In data 3 Aprile si è continuato con la realizzazione di due strisce di *EMACO R955M* con rete in fibre di carbonio *MBrace Fibre Net CF 200B* per ciascun pannello di muratura, a fianco di quelle realizzate con Albaria Struttura. *EMACO R955M* è stato applicato manualmente a cazzuola (Figura 3.13).



**Figura 3.13:** fasi di applicazione di *EMACO R955M + MBrace Fibre Net CF 200B* sul pannello B4 del modello in mattoni.

Col recupero del rasante epossidico, è stato possibile stuccare i piccoli difetti e mancanza di materiale sulla muratura in pietra e creare un sottofondo sulla muratura in mattoni, più irregolare, per l'applicazione della resina epossidica *MBrace Saturant Adesivo* (Figura 3.14). Su questa sono state applicate due strisce di fibre di carbonio e due strisce di fibre di vetro per ciascuna delle due tipologie di muratura. Prima si è miscelato

meccanicamente il componente A dell'adesivo, poi si è aggiunto il componente B e si è mescolato con un trapano a frusta a bassa velocità fino ad ottenere un impasto di colorazione uniforme (Figura 3.15).

Dopo avere applicato il primo strato di adesivo, mediante rullo, si è steso il tessuto unidirezionale avendo cura di premerlo per due o tre volte nella direzione longitudinale della fibra per eliminare l'aria dallo strato di resina. Per congiungere più strisce nella direzione longitudinale della fibra è stato necessario sovrapporle per una lunghezza di 20 cm. La seconda mano di *MBrace Saturant Adesivo* è stata stesa sulla superficie del foglio (Figura 3.16 e Figura 3.18).



**Figura 3.14:** a destra la stuccatura dei piccoli difetti sul pannello A4 in pietra; a sinistra la preparazione del sottofondo per l'applicazione della resina sul pannello B4 in mattoni;



Figura 3.15: preparazione e miscelazione di *MBrace Saturant Adesivo*;



Figura 3.16: applicazione del composito a matrice epossidica *MBrace Saturant Adesivo + MBrace High Strength Carbon Fibres* sul pannello A4 in pietra.



**Figura 3.17** applicazione del composito a matrice epossidica *MBrace Saturant Adesivo + MBrace Glass Fibres* sul pannello A4 in pietra.



**Figura 3.18:** applicazione del composito a matrice epossidica *MBrace Saturant Adesivo + MBrace High Strenght Carbon Fibres* sul pannello B4 in mattoni.



**Figura 3.19:** applicazione del composito a matrice epossidica *MBrace Saturant Adesivo + MBrace Glass Fibres* sul pannello B4 in mattoni.

Alla fine dell'applicazione i pannelli murari A4 e B4 risultavano come in Figura 3.20.



**Figura 3.20:** pannelli A4 in pietra e B4 in mattoni al termine della fase di applicazione dei materiali compositi.

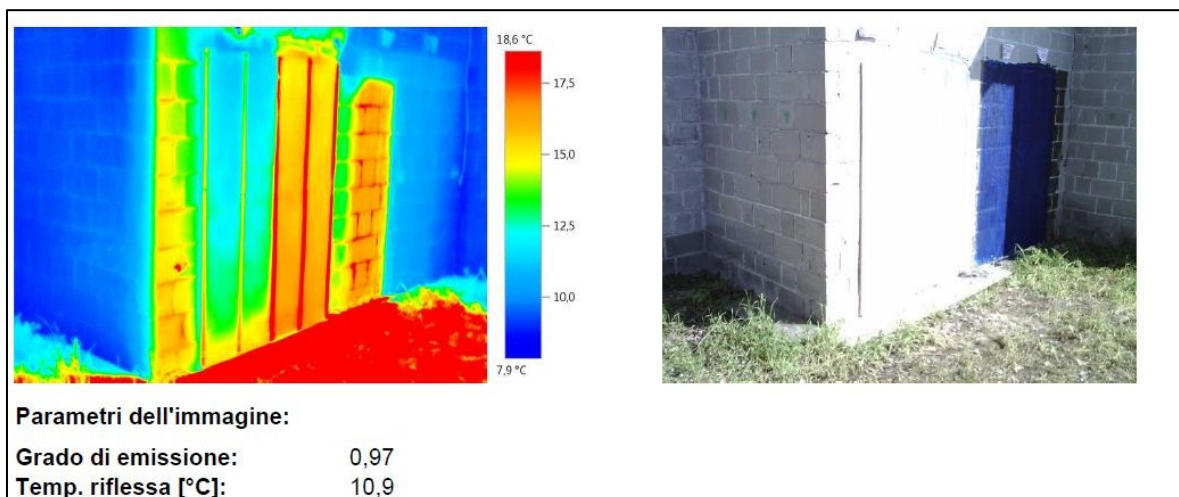
Un ulteriore pannello murario in pietra (pannello A2) è stato soggetto all'applicazione di una striscia di *MBrace Saturant Adesivo* con fibre di carbonio, con la finalità di verificarne l'aderenza in presenza di un precedente trattamento superficiale protettivo idrorepellente in resina epossidica. In questo caso, dato l'evidente degrado della pietra nei corsi inferiori, è stata data una mano preventiva di rasante epossidico.



**Figura 3.21:** applicazione del composito a matrice epossidica *MBrace Saturant Adesivo* + *MBrace High Strenght Carbon Fibres* sul pannello A2 in pietra.

### 3.6.1 Termografie

Di seguito si riportano le immagini termografiche dei pannelli A4 e B4 eseguite il 10 aprile 2013 (una settimana dopo l'applicazione dei compositi).



**Figura 3.22:** immagine termografica pannello A4 in pietra del 10/04/2013 (TRM).

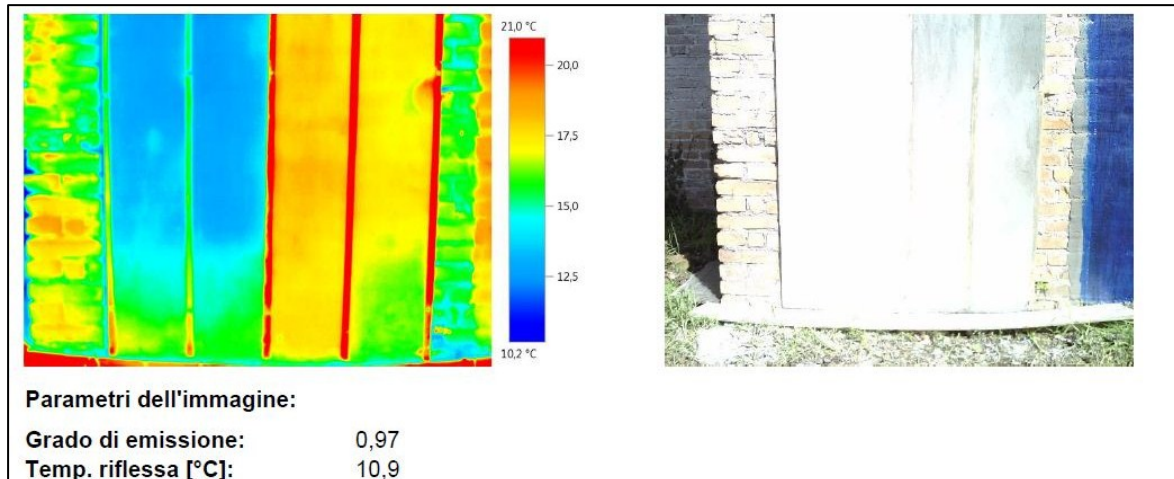


Figura 3.23: immagine termografica pannello B4 in mattoni del 10/04/2013 (TRM).

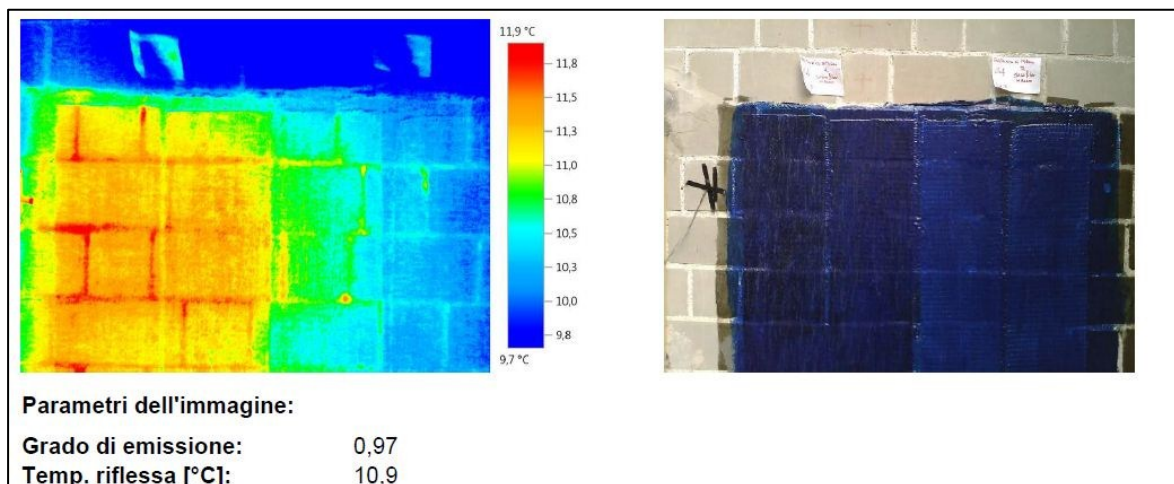


Figura 3.24: immagine termografica pannello A4 in pietra del 10/04/2013 (TRM).

Si nota che, su entrambi i supporti, il composito TRM ALBARIA ha, dopo una settimana, un contenuto d'acqua molto maggiore del TRM EMACO, a testimonianza del fatto che la matrice a base di malta impiega più tempo a maturare rispetto alla matrice cementizia. Inoltre si vede la differenza di temperatura tra fibre di carbonio e di vetro, queste ultime molto più fredde.



### 3.7 Fase preliminare alle prove di pull-off

L'applicazione dei compositi è avvenuta a secco. Per simulare in processo di risalita capillare e di cristallizzazione salina, dopo la maturazione delle matrici inorganiche (1 mese c.a.), a maggio si è proceduto con l'apertura dell'acqua all'interno delle vasche di raccolta sotto i modelli. Il ciclo di cristallizzazione è durato due mesi, l'acqua è stata chiusa qualche giorno prima la data prevista per le prove pull-off.

Erano previste per le date del 25 e 26 giugno le prove di adesione condotte con il sistema "a strappo" (prove di pull-off), quale metodo semplice ed immediato per una misura semplificata dell'aderenza.

Poiché si sono verificati alcuni imprevisti (furto di cavi di rame nel cantiere con conseguente impossibilità di collegarsi alla rete elettrica e limiti dovuti della strumentazione) solo la prima fase di preparazione della prova pull-off è stata portata a termine.

In Figura 3.25 e Figura 3.26 si riportano le foto dei rinforzi applicati, prima dell'inizio delle operazioni preliminari all'esecuzione delle prove di pull-off.



**Figura 3.25:** modulo A4 in pietra dopo l'applicazione dei materiali compositi; a sinistra l'applicazione di *ALBARIA STRUTTURA* e *EMACO R955M*, a destra l'applicazione di *MBrace Saturant Adesivo con fibre di carbonio e con fibre di vetro*;



**Figura 3.26:** modulo B4 in mattone dopo l'applicazione dei materiali compositi; a sinistra l'applicazione di *ALBARIA STRUTTURA* e *EMACO R955M*, a destra l'applicazione di *MBrace Saturant Adesivo con fibre di carbonio e con fibre di vetro*;

In Tabella 3.5 sono riportate le temperature e l'umidità relativa delle due giornate.

**Tabella 3.5:** dati ambientali delle giornate del 25-26 Giugno 2013.

Data	Temperature	U.R.
25 Giugno 2013	22°C-28°C	40-30 %
26 Giugno 2013	21°C-26°C	43-35 %

Nel seguito si riportano le diverse fasi di lavoro:

Si è iniziato con la marcatura delle impronte dei *dolly* (tasselli per il pull-off) per definire le zone di incisione. Con *dolly* si intende la piastrina di alluminio con alloggiamento filettato per il perno che andrà poi inserito nel dinamometro. Per poter valutare l'influenza delle condizioni ambientali sull'adesione fibra-supporto murario si è scelto di eseguire le prove pull-off a tre livelli di altezza; si individuano così tre zone per ogni striscia di materiale composito:

- zona di risalita dell'acqua e dei sali;
- zona di transizione;
- zona non interessata dalla cristallizzazione salina;

Uno schema delle zone di degrado è riportato in Figura 3.27 e Figura 3.28.

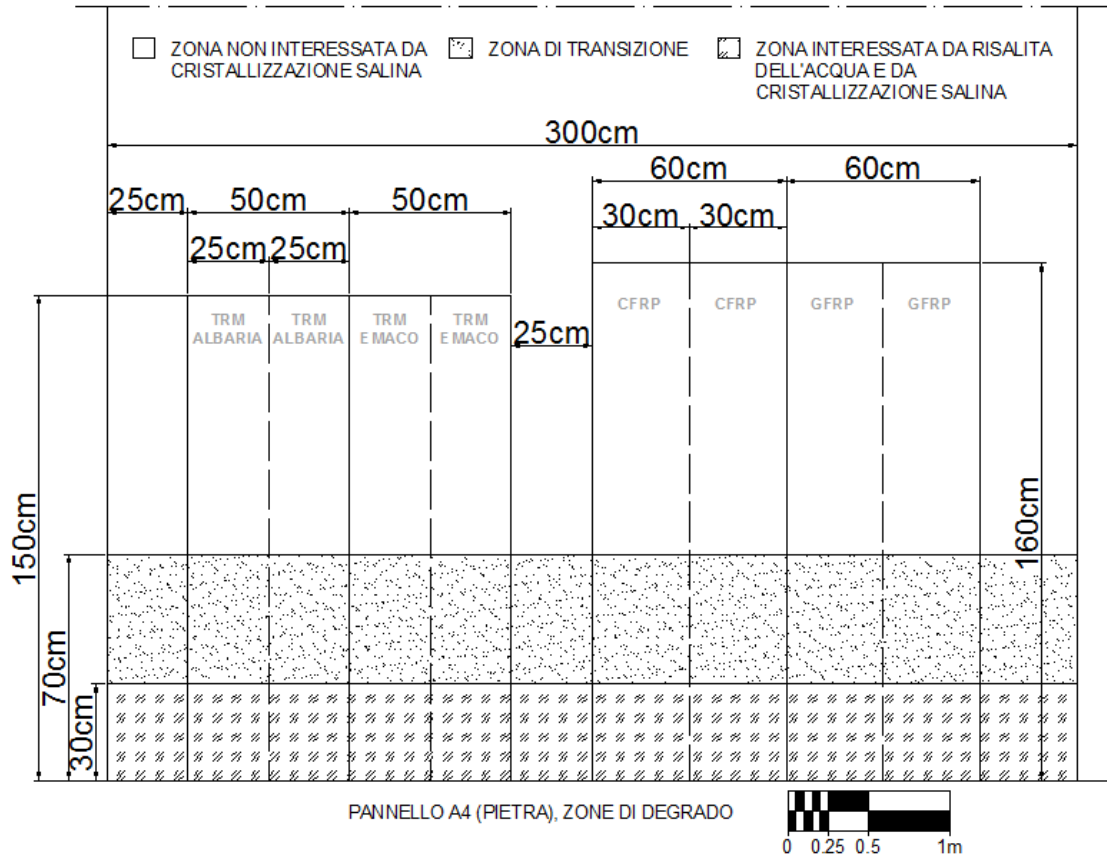


Figura 3.27: tre livelli di altezza per il pannello A4 in pietra, corrispondenti alle tre zone di degrado.

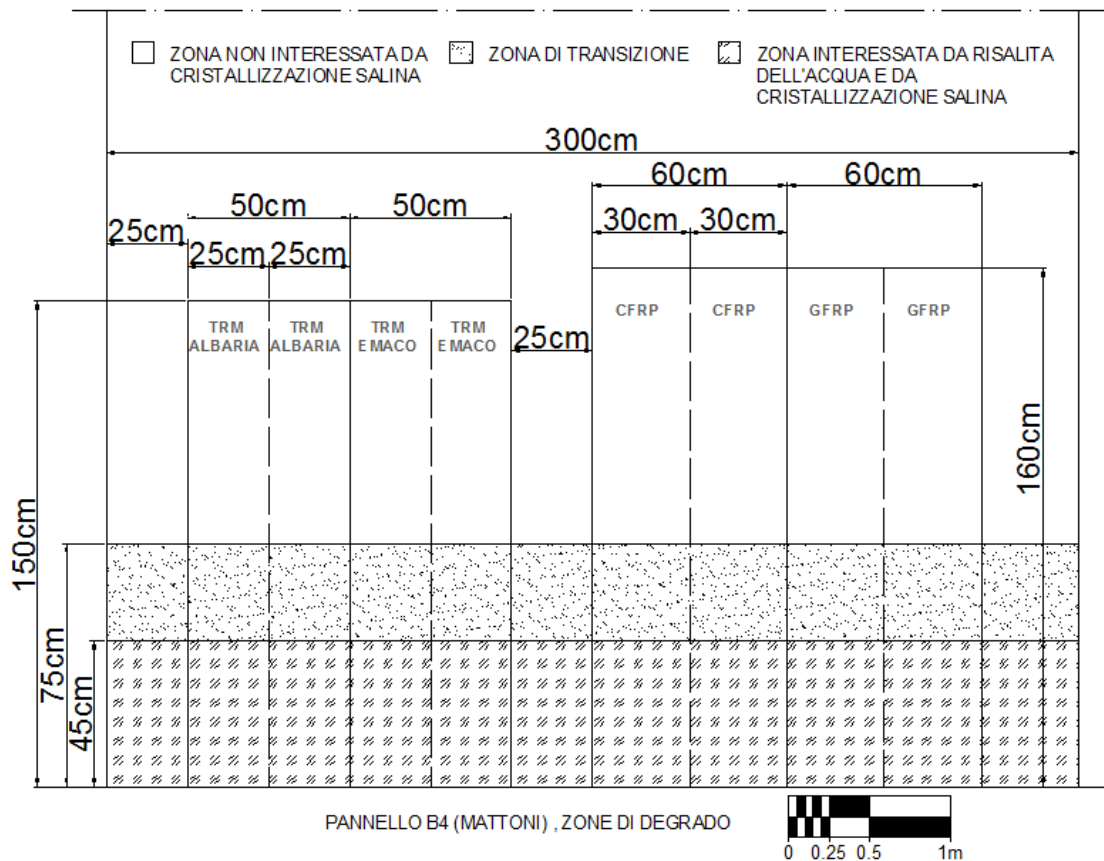


Figura 3.28: tre livelli di altezza per il pannello B4 in mattoni, corrispondenti alle tre zone di degrado.

Per ogni zona saranno eseguite due prove, una in posizione corrispondente all'elemento pieno (pietra o mattone) e una in posizione attraversata da giunto di malta, come si può vedere dallo schema di Figura 3.29. Si sono quindi marcate sei impronte per ogni striscia di materiale, due per ogni zona, di cui una con interessamento di giunto e una senza (Figura 3.32 e Figura 3.34); avendo due strisce per materiale, abbiamo un totale di novantasei impronte ( Figura 3.31 e Figura 3.33)

In Figura 3.30 si riportano alcune fasi del lavoro di marcatura. In Figura 3.35 e Figura 3.36 si riportano invece le foto dei moduli A4 e B4 sui quali sono state marcate le impronte dei *dolly*.

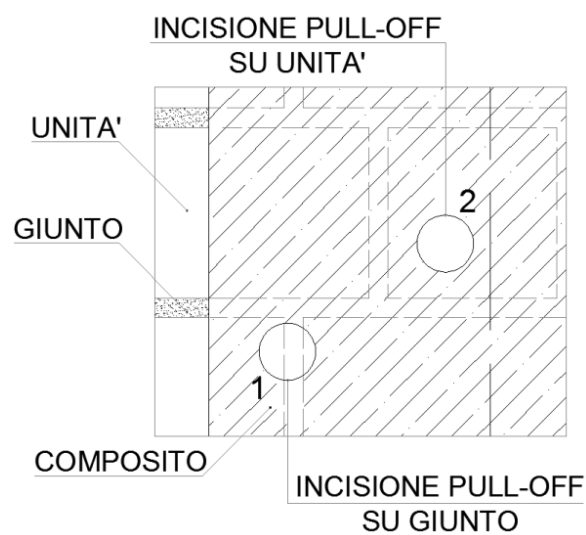


Figura 3.29: schema descrittivo delle posizioni di incisione delle prove pull-off.



Figura 3.30: fasi di marcatura delle impronte dei dolly;

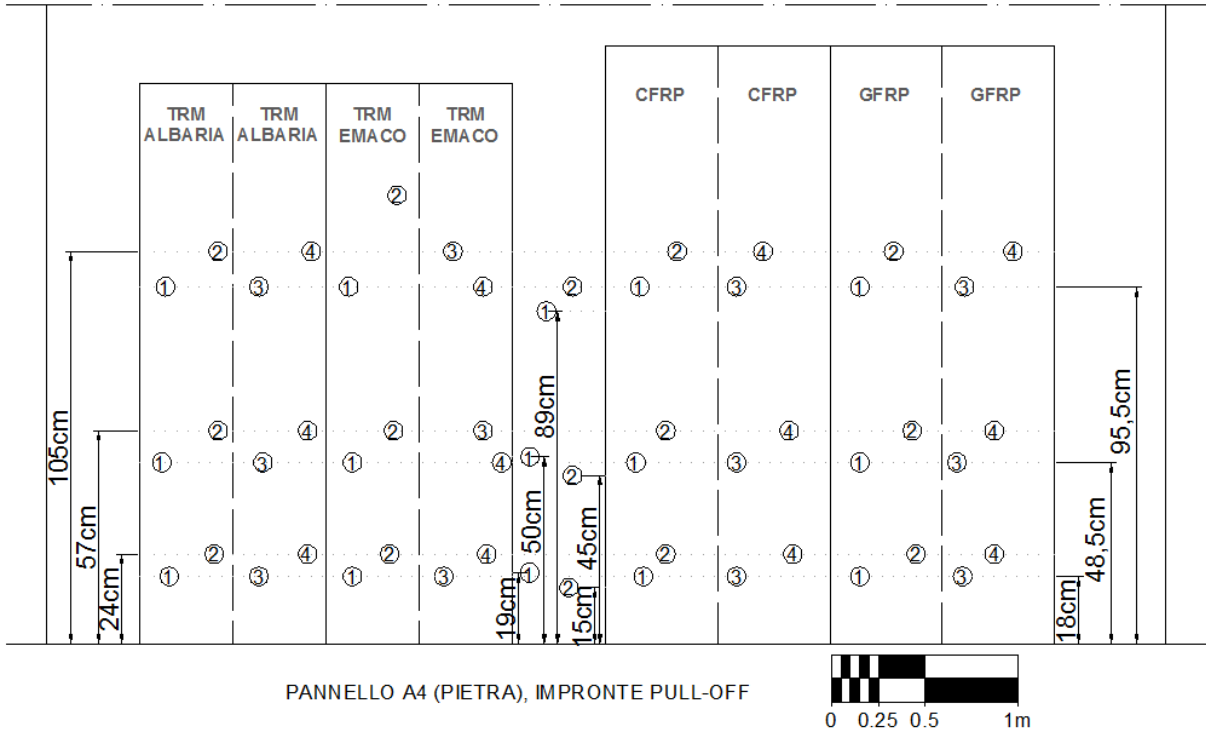


Figura 3.31: schema delle impronte pull-off per il pannello A4 in pietra.

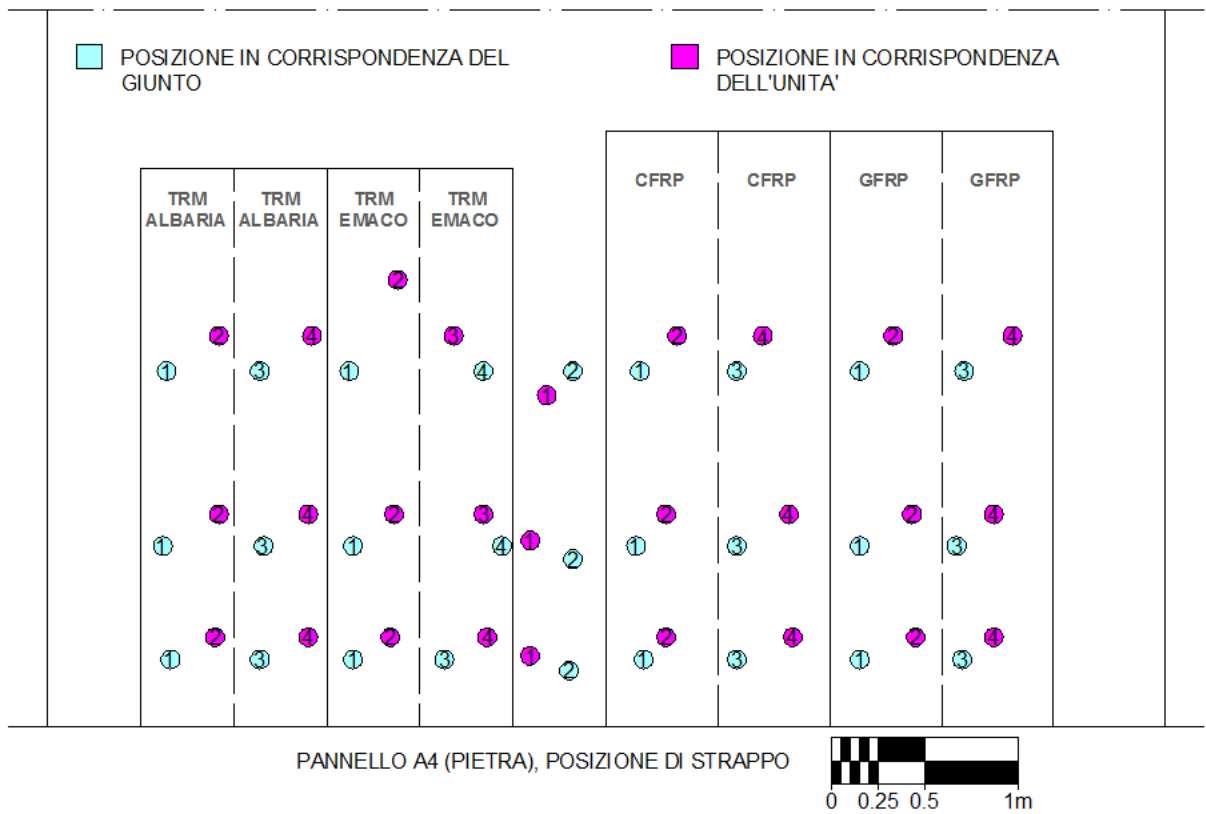


Figura 3.32: posizione di strappo per il pannello A4 in pietra.

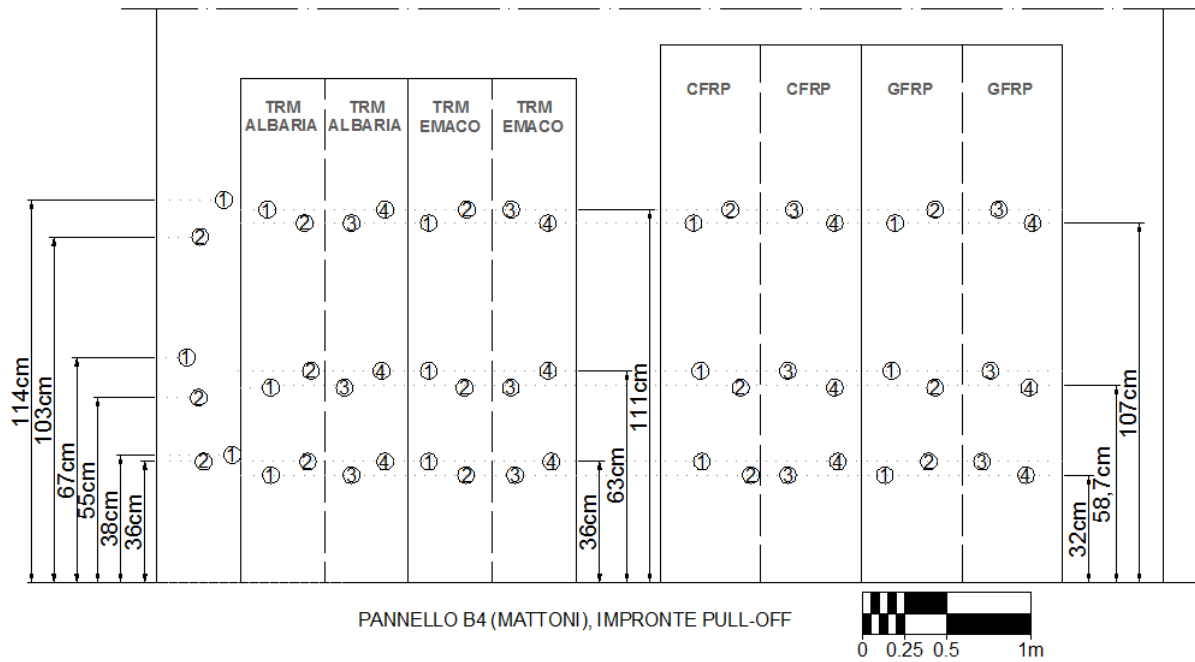


Figura 3.33: schema delle impronte pull-off per il pannello B4 in mattoni.

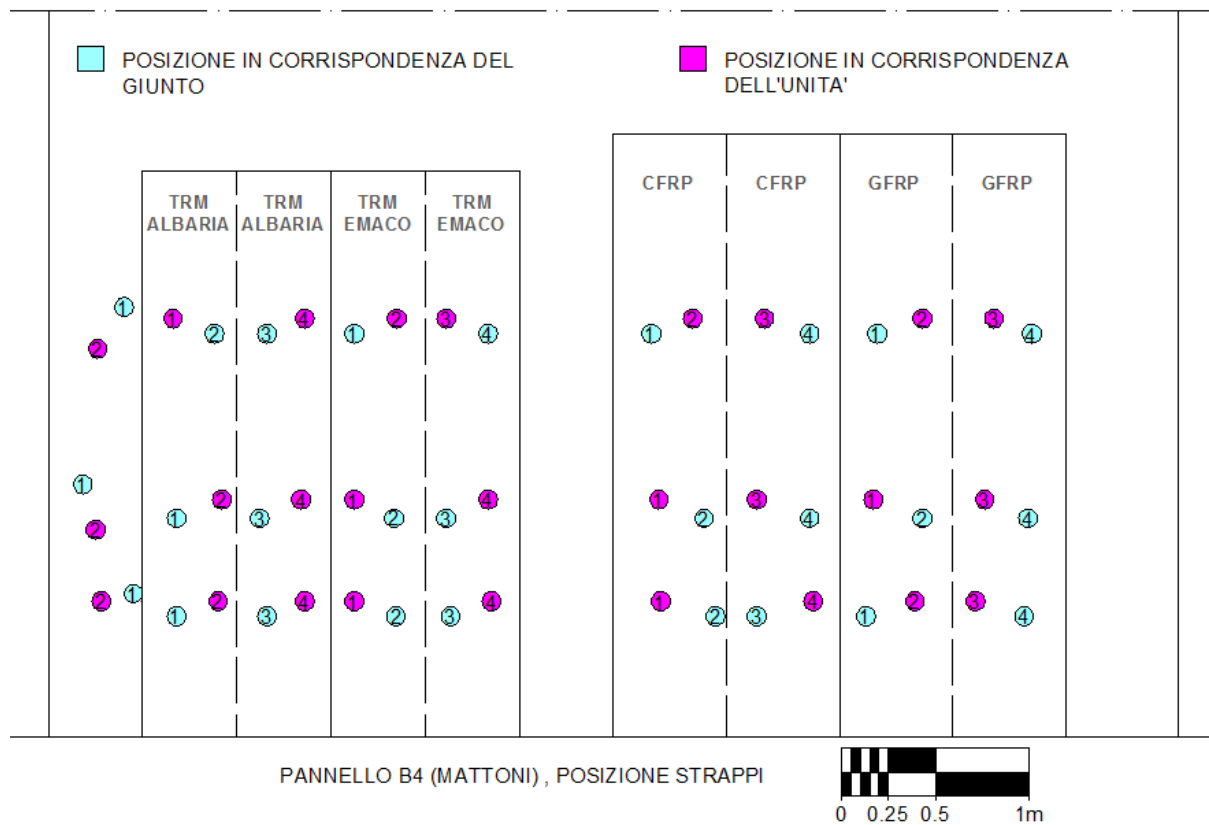


Figura 3.34: posizione di strappo per il pannello B4 in mattoni.



**Figura 3.35:** modulo A4 in pietra con tracciate le impronte dei dolly; a sinistra le impronte sull'applicazione di ALBARIA STRUTTURA e EMACO R955M, a destra sull'applicazione di MBrace Saturant Adesivo con fibre di carbonio e con fibre di vetro;



**Figura 3.36:** modulo B4 in mattoni con tracciate le impronte dei dolly; a sinistra le impronte sull'applicazione di ALBARIA STRUTTURA e EMACO R955M, a destra sull'applicazione di MBrace Saturant Adesivo con fibre di carbonio e con fibre di vetro;

Si è poi proceduto con l'incisione delle impronte dei *dolly* mediante tazza diamantata (diametro nominale 60mm), applicata ad un comune trapano portatile, collegato ad un apposito supporto vincolato alla parete con due tasselli in plastica  $\phi 8$ . In Figura 3.37 si possono vedere alcuni momenti riguardanti le fasi di incisione delle impronte dei *dolly*. In Figura 3.38 sono riportate le foto dei moduli A4 e B4 con applicazione di *MBrace Saturant Adesivo con fibre di carbonio e con fibre di vetro* su cui sono state eseguite le incisioni.



**Figura 3.37:** fasi di incisione mediante tazza diamantata applicata a trapano portatile;



**Figura 3.38:** incisioni su i moduli A4 e B4 con applicazione di *MBrace Saturant Adesivo con fibre di carbonio e con fibre di vetro*.



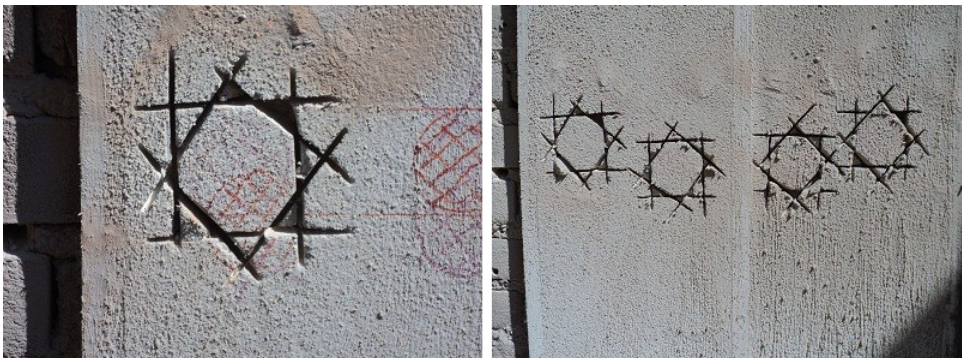
Per le strisce di materiali *ALBARIA STRUTTURA* e *EMACO R955M* si sono presentati problemi riguardanti limiti tecnici della strumentazione. La corsa della colonnina di supporto del trapano è risultata troppo corta, perciò la tazza diamantata non riusciva ad arrivare fino all'interfaccia con il supporto murario, di conseguenza non si poteva eseguire una incisione adatta alla prova di pull-off. Il problema non è stato risolto nemmeno cambiando il tipo di trapano. Inoltre, come si può vedere in Figura 3.39, durante un tentativo di incisione sul modulo A4 in pietra, si è staccato un tassello di supporto (semberebbe sia stato rimosso un sottile strato superficiale di pietra). Perciò per tali incisioni si è usata una smerigliatrice di piccole dimensioni (comunemente detta flessibile) con disco diamantato, il cui utilizzo si può vedere in Figura 3.40. Come si può vedere in Figura 3.41, la superfici di incisione sono risultate quindi ottagonali.



**Figura 3.39:** a sinistra il tentativo di incisione sulla striscia di *ALBARIA STRUTTURA* applicata al modulo A4 in pietra, a destra il tassello che si è staccato dal supporto.



**Figura 3.40:** fase di incisione mediante smerigliatrice con disco diamantato su ALBARIA STRUTTURA applicato su supporto in mattoni.



**Figura 3.41:** dettagli delle incisioni mediante smerigliatrice con disco diamantato;

Subito dopo si sono pulite le incisioni. Per quanto concerne le incisioni sulle applicazioni di *MBrace Saturant Adesivo con fibre di carbonio e con fibre di vetro*, sono state protette con scotch di carta per evitare che il materiale di sostegno del dolly aderisse anche nelle fessure, come è illustrato in Figura 3.42. In Figura 3.43 sono presentate la fase di pulizia

dei dolly con diluente e le fasi di preparazioni di resina epossidica in pasta *Concresive* per l'incollaggio dei *dolly*.



Figura 3.42: protezione con scotch delle incisioni eseguite sul modulo A4 in pietra;



Figura 3.43: fasi di pulizia dei dolly e di preparazione del *Concresive*;

Per l'incollaggio dei dolly si è steso su questi un sottile strato di *Concresive* e si sono applicati in corrispondenza delle incisioni. Le diverse fasi sono illustrate in Figura 3.44.

Nelle figure Figura 3.45 e Figura 3.46 si possono vedere le foto dei moduli A4 in pietra e B4 in mattoni dopo l'incollaggio dei *dolly*.

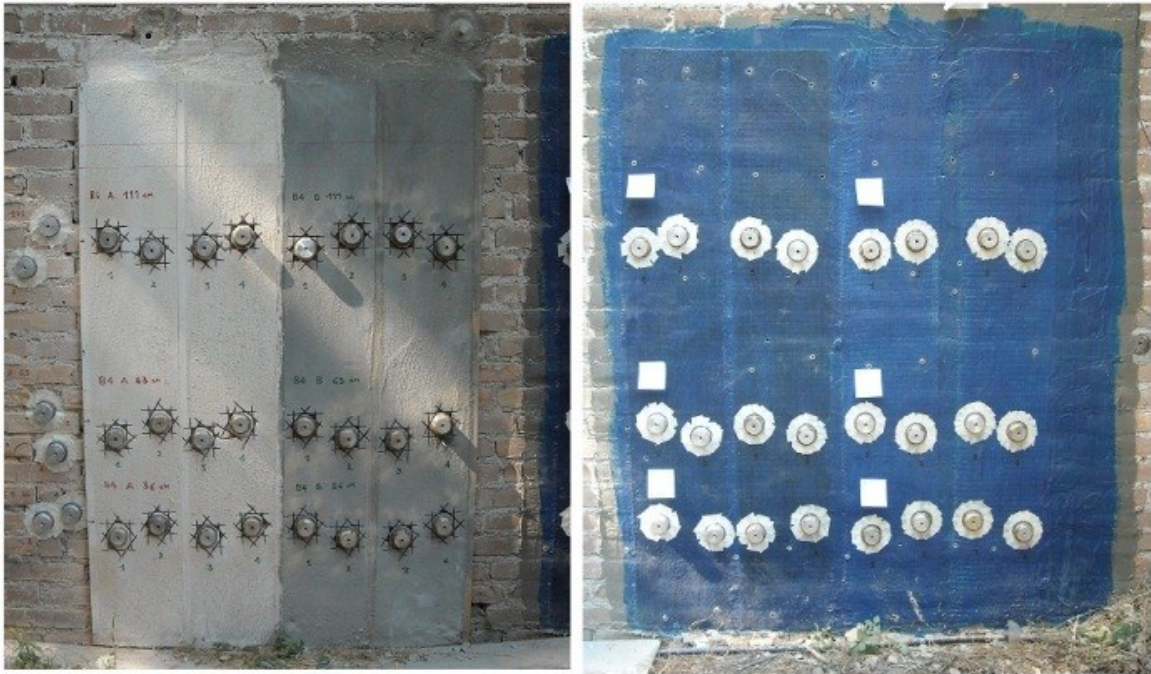
Anche su parti di moduli A4 e B4 non trattati con materiali compositi si sono eseguite le incisioni delle tracce e l'incollaggio dei *dolly*, come mostra la Figura 3.47.



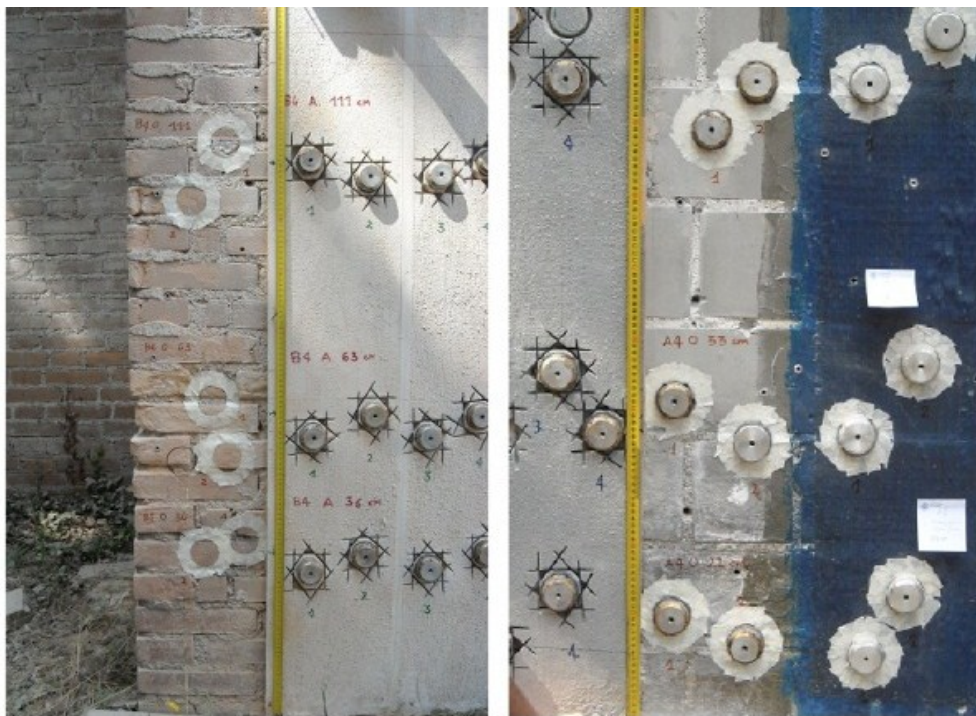
Figura 3.44: fasi di incollaggio dei *dolly* mediante *Concresive*;



Figura 3.45: modulo A4 in pietra con i *dolly* incollati; a sinistra i *dolly* incollati sull'applicazione di ALBARIA STRUTTURA e EMACO R955M, a destra sull'applicazione di MBrace Saturant Adesivo con fibre di carbonio e con fibre di vetro;



**Figura 3.46:** modulo B4 in mattoni con i *dolly* incollati; a sinistra i *dolly* incollati sull'applicazione di ALBARIA STRUTTURA e EMACO R955M, a destra sull'applicazione di MBrace Saturant Adesivo con fibre di carbonio e con fibre di vetro;



**Figura 3.47:** parti di moduli B4 e A4, rispettivamente a sinistra e a destra, non trattati con materiale composito su cui sono stati incollati i *dolly* successivamente all'incisione delle tracce;

Poiché un ulteriore pannello murario in pietra è stato soggetto all'applicazione di una striscia di *MBrace Saturant Adesivo con fibre di carbonio*, con la finalità di verificarne l'aderenza in presenza di un precedente trattamento superficiale protettivo idrorepellente in resina epossidica (applicato nel 1991), anche in questa zona si è deciso di eseguire la prova pull-off; si sono quindi incise le tracce e incollati i dolly sul modulo B2 in pietra, come si può vedere in Figura 3.48.



**Figura 3.48:** modulo B2 in pietra con applicazione dei *dolly*;

Al termine delle operazioni preliminari all'esecuzione delle prove di pull-off si è proceduto con il rilievo geometrico e il rilievo fotografico del lavoro concluso.

### 3.8 Prove di pull-off

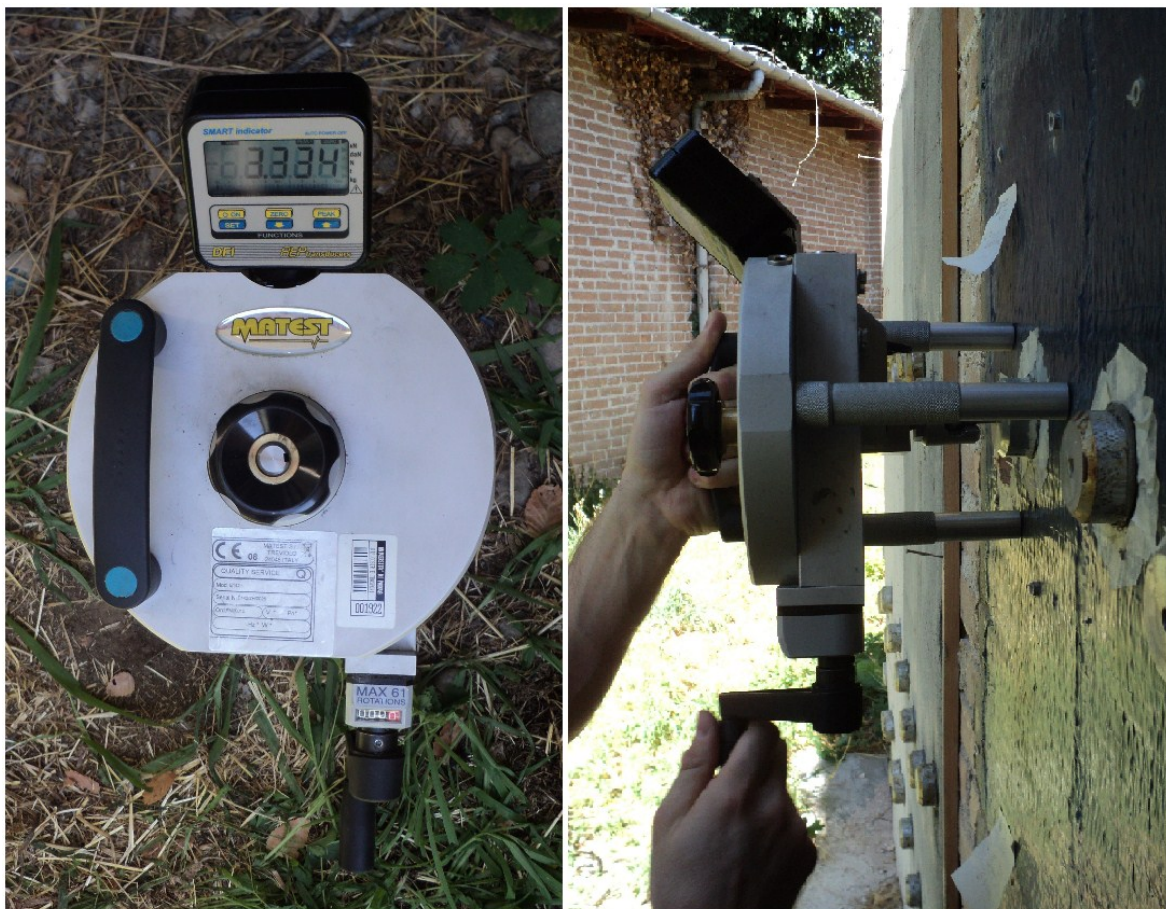
Le prove pull-off sono state eseguite in data 30 luglio 2013.

In Tabella 3.6 sono riportate le temperature e l'umidità relativa.

**Tabella 3.6:** dati ambientali del 30 Luglio 2013.

Data	Temperature	U.R.
30 luglio 2013	28°C-30°C	23-30 %

Si sono "strappati" i dolly precedentemente incollati, si sono annotati i risultati su apposite tabelle e si sono catalogati i tasselli staccati. In Figura 3.49 sono riportati il dinamometro portatile Matest, e l'esecuzione della prova pull-off.



**Figura 3.49:** a sinistra il dinamometro portatile Matest, a destra l'esecuzione della prova pull-off;

Quindi si è proceduto a:

- contrassegnare i vari tasselli con sigle designanti il pannello di provenienza, il materiale composito in esame, l'altezza dello strappo e il numero del dolly;
- annotare il carico rilevato dal dinamometro Matest e la modalità di rottura per ogni tassello;
- misurare il diametro per i tasselli circolari (cioè quelli strappati dai pannelli trattati con materiale composito a matrice resinosa);
- fotorilievo: ogni tassello è stato posizionato su una griglia scalata, e fotografato (sia il lato con i dolly, sia il lato "strappato") per ricavare in seguito quanti più dati possibili per l'analisi dei fattori che influenzano l'aderenza supporto-composito.



## Capitolo 4

# Risultati delle campagna sperimentale

### 4.1 Risultati delle prove pull-off

Tabella 0.1 (in Appendice) vengono riportati i risultati delle 112 prove pull-off effettuate sui pannelli A4 e B4, trattati con i diversi compositi della sperimentazione. Si riportano i carichi di rottura e le relative modalità di rottura.

Le prime colonne della tabella riportano il tipo di supporto (pietra o mattone) e la tipologia di composito per ogni campione.

Per quanto riguarda la colonna "ALTEZZA" i dati si riferiscono all'altezza dello strappo da terra. Per il pannello in pietra le altezze di riferimento sono 103 cm, che corrisponde alla zona non interessata dalla cristallizzazione salina, 53 cm, zona di transizione, e 22 cm che corrisponde alla fascia di risalita dell'acqua e dei sali. Per il pannello in mattoni le altezze di riferimento sono rispettivamente 111, 63 e 36 cm.

Nella colonna "POSIZIONE" viene indicato se lo strappo è avvenuto in corrispondenza del giunto o in corrispondenza della sola unità (pietra o mattone). Per quanto riguarda i tasselli strappati sul supporto mattone, visto che la tazza diamantata aveva diametro nominale di 60 mm, era molto improbabile riuscire a incidere la sola unità visto che l'altezza del mattone è di 55mm. Si è quindi scelto di considerare come "unità" i tasselli aventi una percentuale di giunto generalmente inferiore al 10%, e di considerare invece tutti gli altri tasselli come "giunto". Per quanto riguarda invece il supporto in pietra questo problema non si presentava, visto che l'altezza del modulo in pietra era abbondantemente maggiore del diametro della tazza per le incisioni.

Il "NOME DEL CAMPIONE" è stato assegnato mediante sigle di 4 termini; il primo termine si riferisce al supporto: A per il supporto in pietra, B per quello in mattoni, seguito dal

numero di pannello dei quattro costituenti il modello totale; il secondo termine si riferisce al tipo di composito:

- A = ALBARIA STRUTTURA + MBrace Fibre Net CF 200B;
- B = EMACO R955M + MBrace Fibre Net CF 200B;
- C = MBrace Saturant Adesivo + MBrace High Strenght Carbon Fibres;
- D = MBrace Saturant Adesivo + MBrace Glass Fibres;

Il terzo termine si riferisce all'altezza di strappo, e il quarto termine, un numero progressivo da 1 a 4, indica il numero di strappo per ogni altezza.

Da qui in avanti per semplificare la trattazione dei risultati verranno utilizzate le seguenti abbreviazioni: i compositi a matrice inorganica saranno identificati con TRM ALBARIA e TRM EMACO, mentre quelli a matrice organica saranno identificati con CFRP e GFRP.

In Figura 4.1 si può vedere la distribuzione delle modalità di rottura per il pannello A4 in pietra, mentre in Figura 4.2 è presentata la distribuzione delle modalità di rottura per il pannello B4 in mattoni.

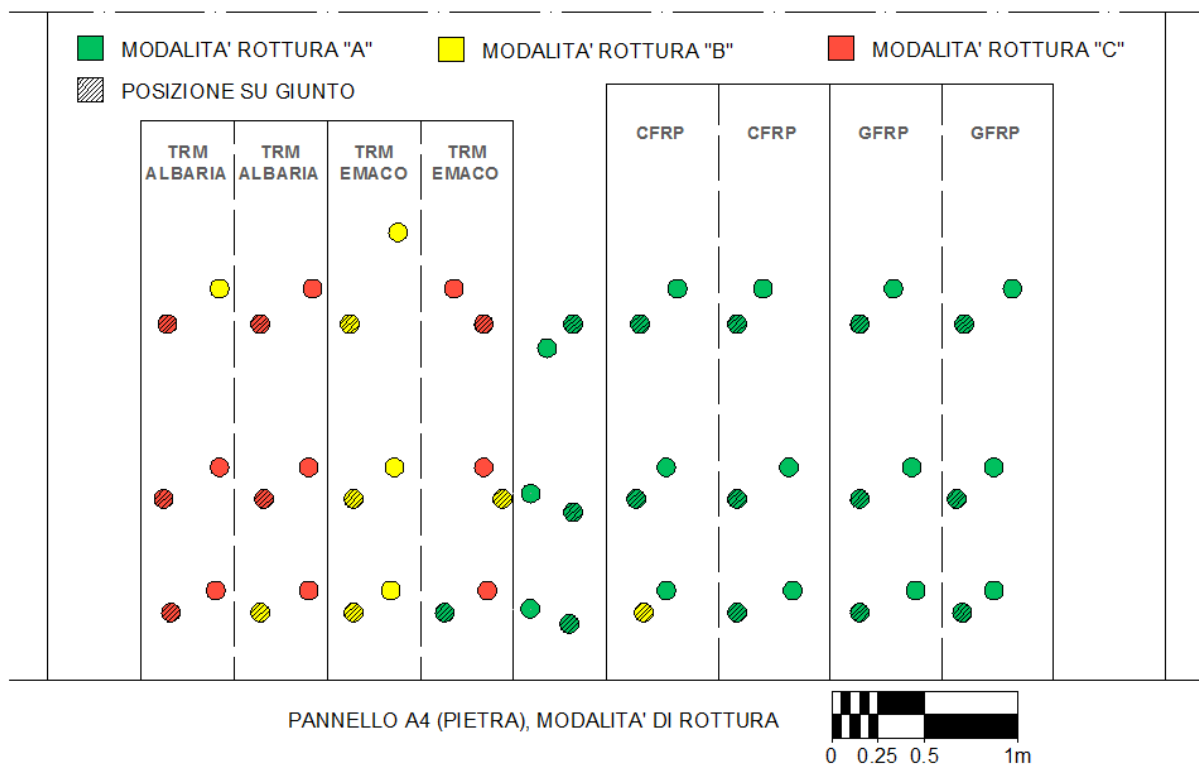


Figura 4.1: distribuzione delle modalità di rottura per il pannello A4 in pietra.

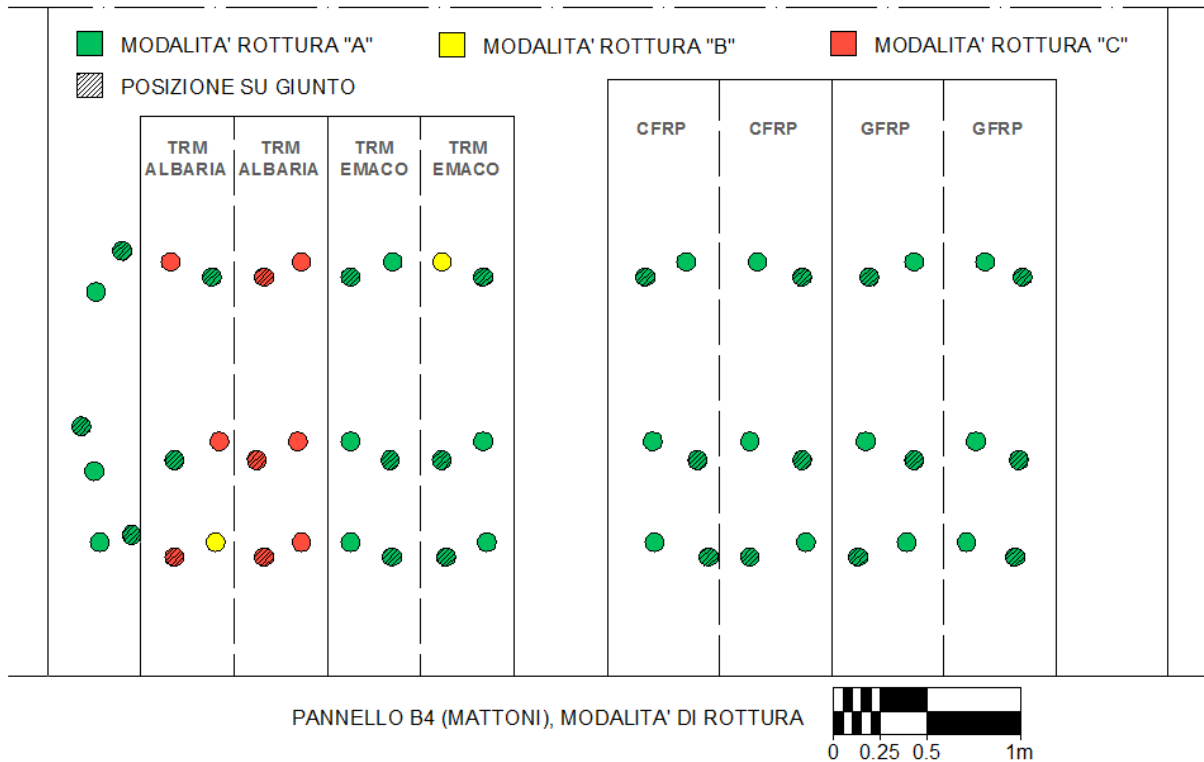


Figura 4.2: distribuzione delle modalità di rottura per il pannello B4 in mattoni.

## 4.2 Trattamento dati

Dopo la fase sperimentale a Milano si è proceduto con il trattamento dei dati delle prove pull-off e l'elaborazione delle foto ricavate in cantiere.

Per calcolare la tensione di pull-off è necessario conoscere l'area di strappo. L'equazione di seguito riportata identifica la resistenza a trazione nominale ( $f_{p-o}$ ) come rapporto tra il carico applicato ( $P_u$ ) e l'area isolata del campione ( $A_{p-o}$ ) [UNI-EN 1015-12, 2002; ASTM C1583,2004].

$$f_{p-o} = \frac{P_u}{A_{p-o}}$$

Per quanto riguarda i tasselli circolari l'area di strappo è stata facilmente calcolata in quanto, già in cantiere, si era preso nota del diametro dei tasselli.

Per quanto riguarda i tasselli strappati dai materiali compositi a matrice inorganica il computo dell'area risultava più complicata, perché si trattava di tasselli ottagonali non regolari. Quindi si è proceduto con il calcolo delle aree ottagonali utilizzando le foto fatte in cantiere.

#### 4.2.1 Utilizzo di *Gimp*

Ogni foto è stata modificata tramite il programma *Gimp*, bilanciando i colori e migliorando la sfocatura per consentirne una più facile lettura.

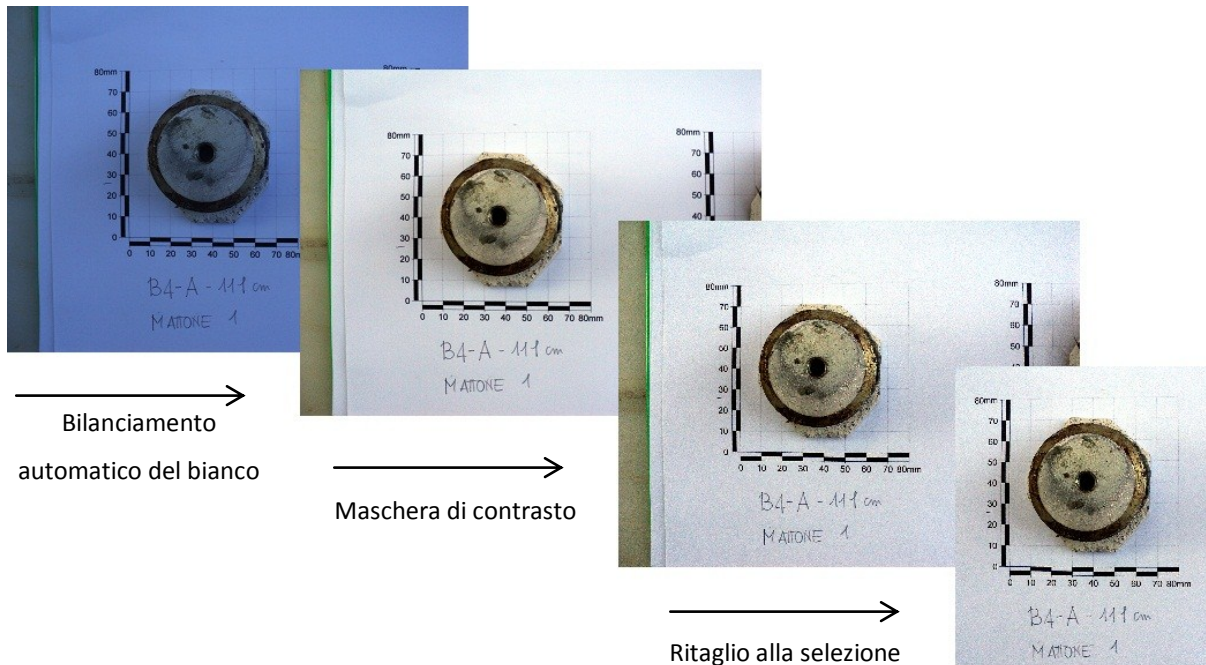
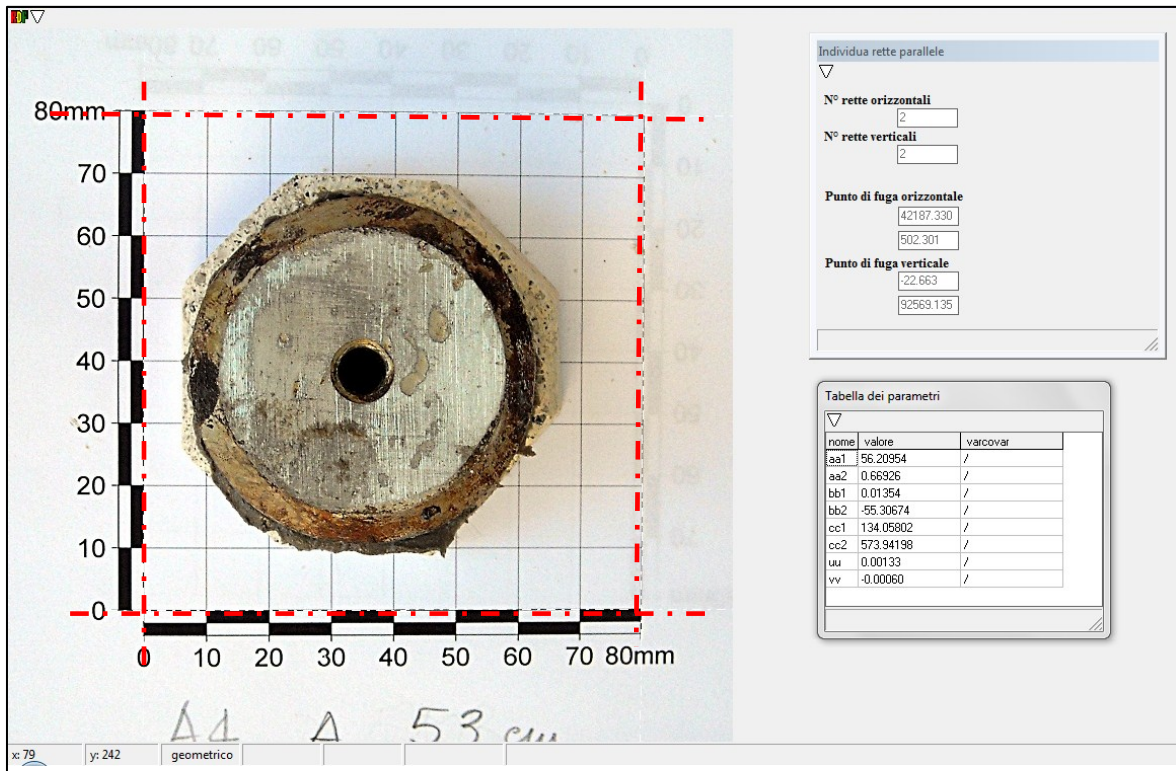


Figura 4.3: esempio delle fasi di modifica di una foto con il programma *Gimp*;

#### 4.2.2 Utilizzo di *RDF*

Poiché le foto erano soggette a forte prospettiva si è ritenuto necessario un raddrizzamento digitale fotogrammetrico geometrico tramite il programma *RDF*.

Dopo aver richiamato l'immagine nella schermata iniziale di *RDF*, il programma, attraverso il tracciamento di segmenti sopra le linee che nella foto dovrebbero essere orizzontali e verticali, consente di calcolare i punti di fuga e i parametri dell'immagine (Figura 4.4).



**Figura 4.4:** esempio della schermata di RDF in cui vengono riconosciute attraverso il tracciamento di segmenti (rossi) le linee orizzontali e verticali della foto, calcolati i punti di fuga e i parametri della foto;

Successivamente è necessario indicare “l’area di ricampionamento” cioè l’area che si vuole raddrizzare (Figura 4.5). Poi, attraverso il comando RDF del menù a tendina, si devono identificare, sempre attraverso il tracciamento di segmenti, una larghezza e una altezza di cui si conoscono le misure effettive per permette al programma di scalare la foto. Nel nostro caso era sufficiente che le due misure (larghezza e altezza della griglia) risultassero uguali, perché le foto venivano scalate successivamente in AutoCAD. I parametri riguardanti i pixel e dpi servono per la definizioni delle dimensioni e della risoluzione dell’immagine corretta (Figura 4.6). In Figura 4.7 l’immagine corretta restituita da RDF.



Figura 4.5: esempio di selezione dell'area di ricampionamento;



Figura 4.6: esempio di schermata RDF per la definizione dei parametri della foto corretta;

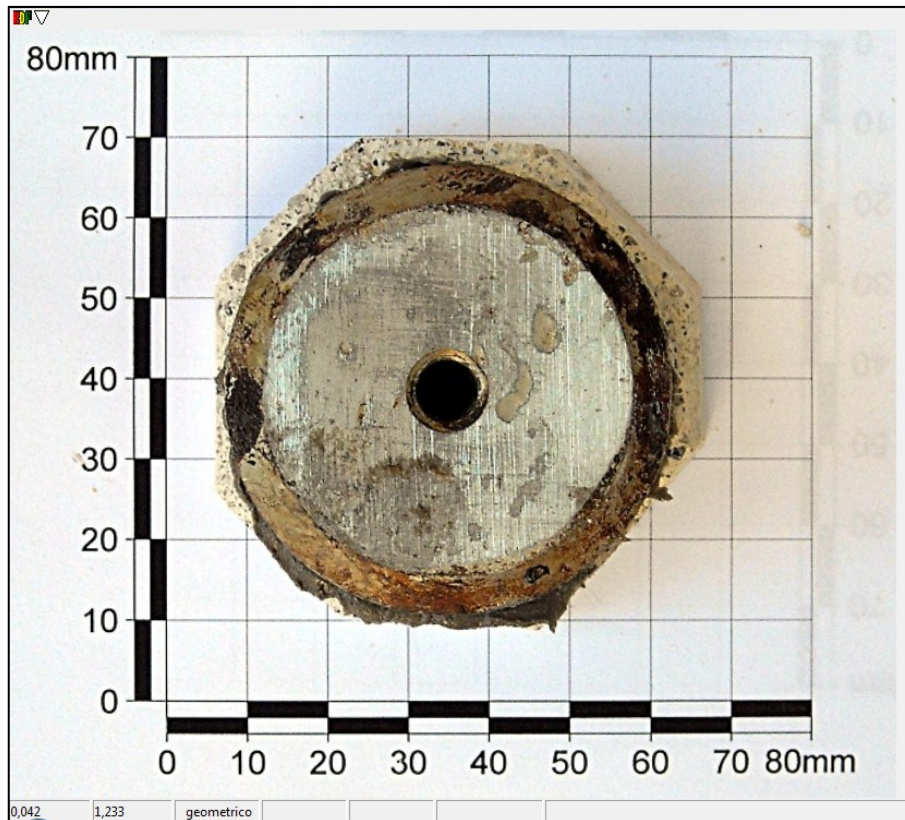


Figura 4.7: foto corretta restituita dal programma RDF;

#### 4.2.3 Calcolo delle aree e inserimento del coefficiente correttivo

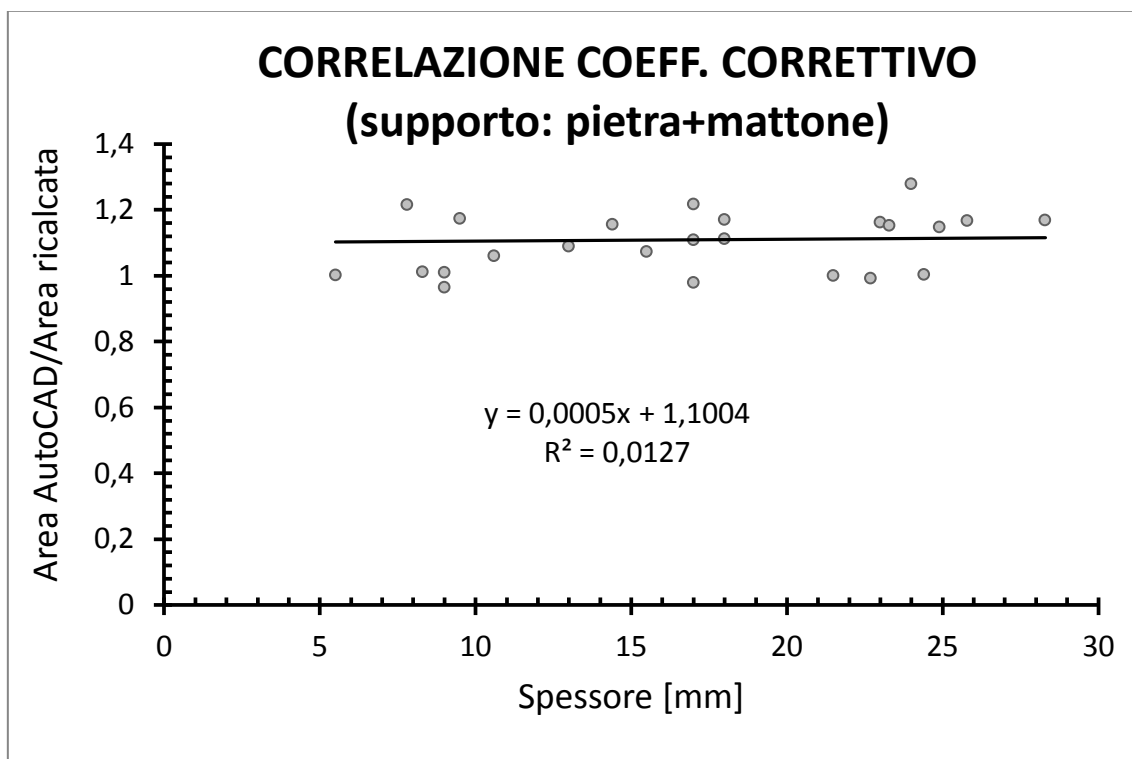
Le foto trattate con *Gimp* e *RDF* sono poi state inserite in *AutoCAD* e scalate grazie alla griglia su cui erano stati appoggiati i provini, pensata proprio per dare un riferimento geometrico alle foto.

In *AutoCAD* è stato così possibile calcolare le aree di strappo dei tasselli ottagonali.

Visto che i provini erano stati fotografati anche dalla parte “strappata”, dalle foto si è riusciti a individuare e calcolare anche le aree corrispondenti alle parti di tassello con solo mattone o pietra e alla parte con il giunto.

Poiché nel calcolo delle aree per i tasselli ottagonali con matrice inorganica si sono utilizzate le foto fatte in cantiere, affette da forte prospettiva (anche se foto-raddrizzate con appositi programmi), si sono presi i calchi di alcuni tasselli con il relativo spessore, per ricercare, tramite il confronto tra l'area calcolata in *AutoCAD* e quella ricalcata, un coefficiente correttivo da applicare alle aree di tutti i tasselli ottagonali, così che si abbiano dei risultati il più possibile aderenti alla realtà. Le aree ricalcate sono state scannerizzate, e quindi direttamente utilizzabili in *AutoCAD* perché prive di distorsioni.

Per ricercare il coefficiente correttivo si è cercata una relazione tra lo spessore del tassello e il rapporto tra area ricavata dalle foto (per mezzo di *AutoCAD*) e l'area ricalcata. Lo spessore del tassello è indicativo della distanza tra l'area ricavabile con *AutoCAD* e la griglia scalata, quindi maggiore è lo spessore, maggiore si pensa possa essere la distorsione della foto dovuta dalla prospettiva. Nel Grafico 4.1 si può vedere la distribuzione quasi lineare dei dati, approssimabile con una retta pressoché orizzontale. Per tale motivo si è preso il valore medio tra i valori dei rapporti Area AutoCAD/Area ricalcata, il quale risulta circa 1.1, il che significa che l'area presa dalla foto risulta in media il 10% superiore a quella presa dal calco. Perciò a tutte le aree ottagonali calcolate dalle foto è stato applicato il coefficiente correttivo pari a  $1/1.1$ , così da ridurle e approssimarle il più precisamente possibile alle aree reali. Le aree così ricavate sono state identificate come aree nominali, e sono state utilizzate per tutti i calcoli successivi.



**Grafico 4.1:** distribuzione dei dati relativi al coefficiente correttivo.

Si è quindi proceduto al calcolo delle resistenze nominali, le cui distribuzioni sono descritte nelle figure Figura 4.8, Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11.



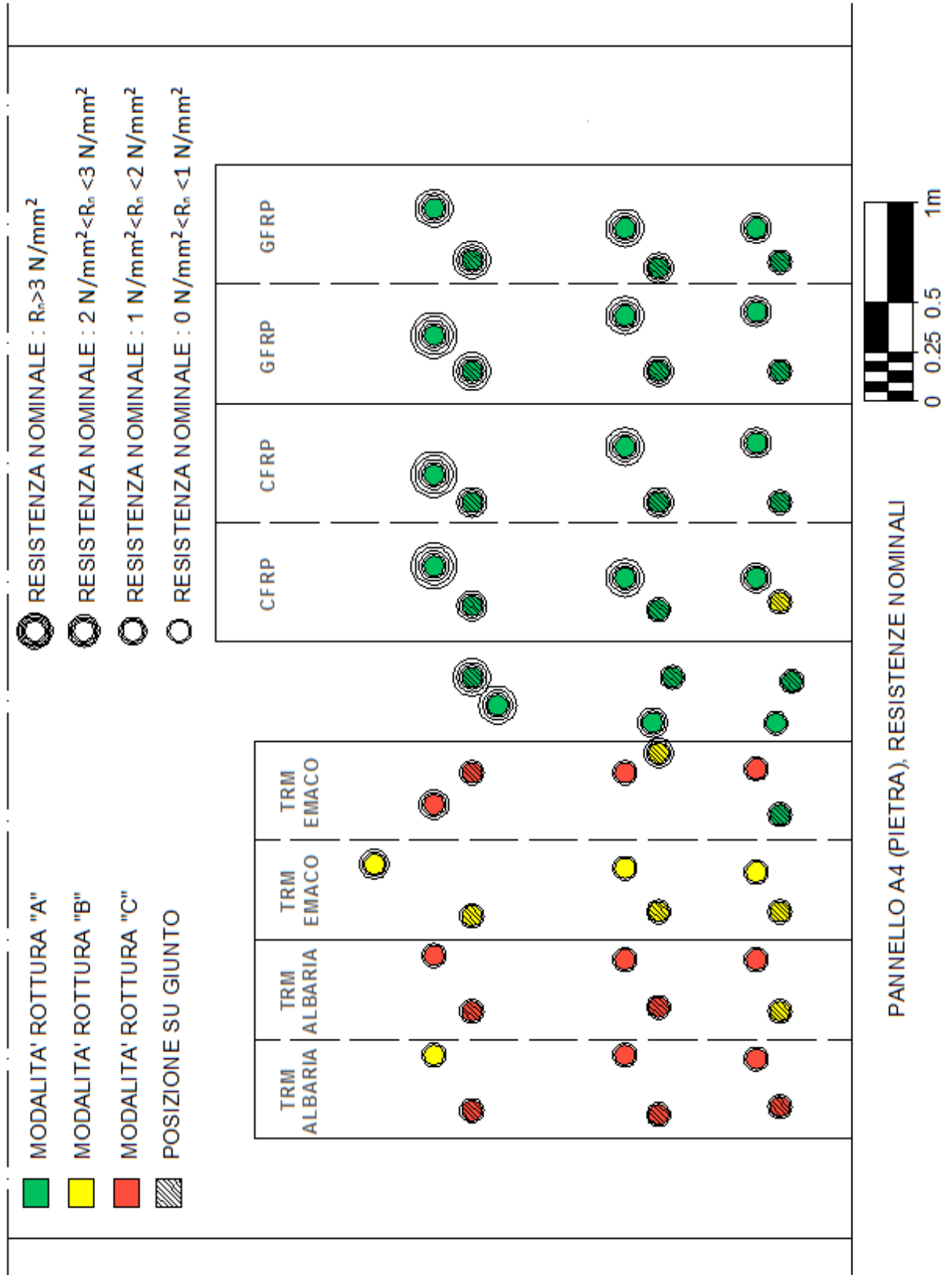


Figura 4.8: distribuzione delle modalità di rottura e delle resistenze nominali per il pannello A4 in pietra.

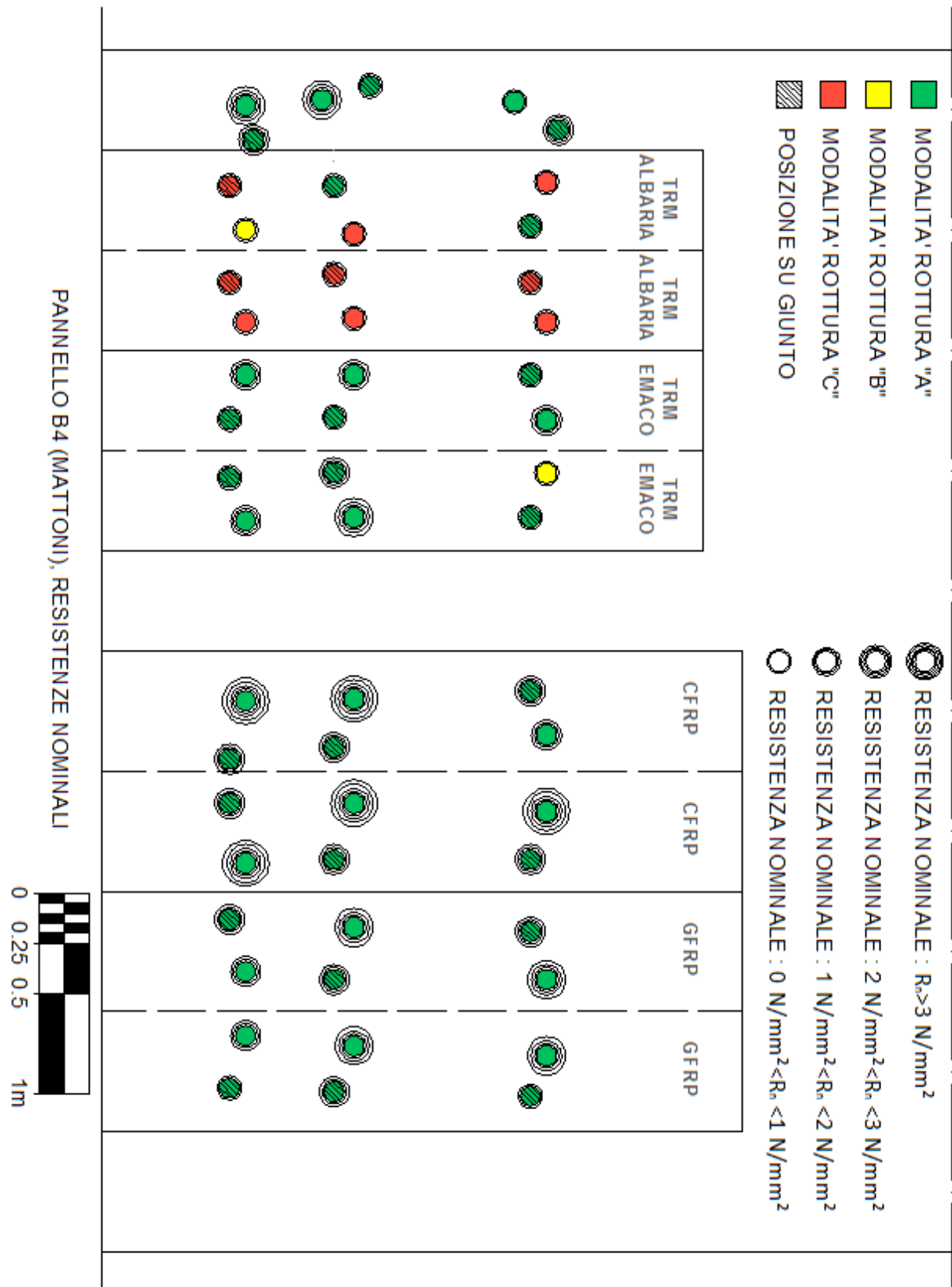


Figura 4.9: distribuzione delle modalità di rottura e delle resistenze nominali per il pannello A4 in pietra.

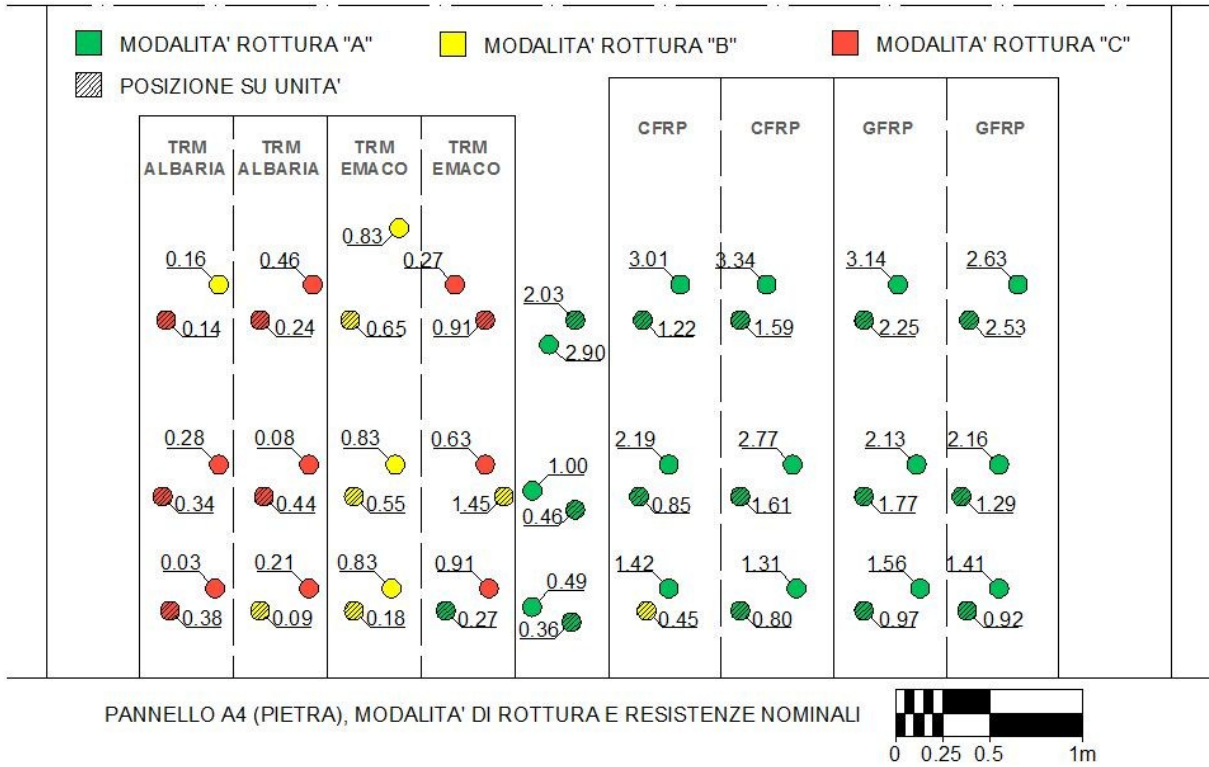


Figura 4.10: valori delle resistenze nominali per il pannello B4 in mattoni.

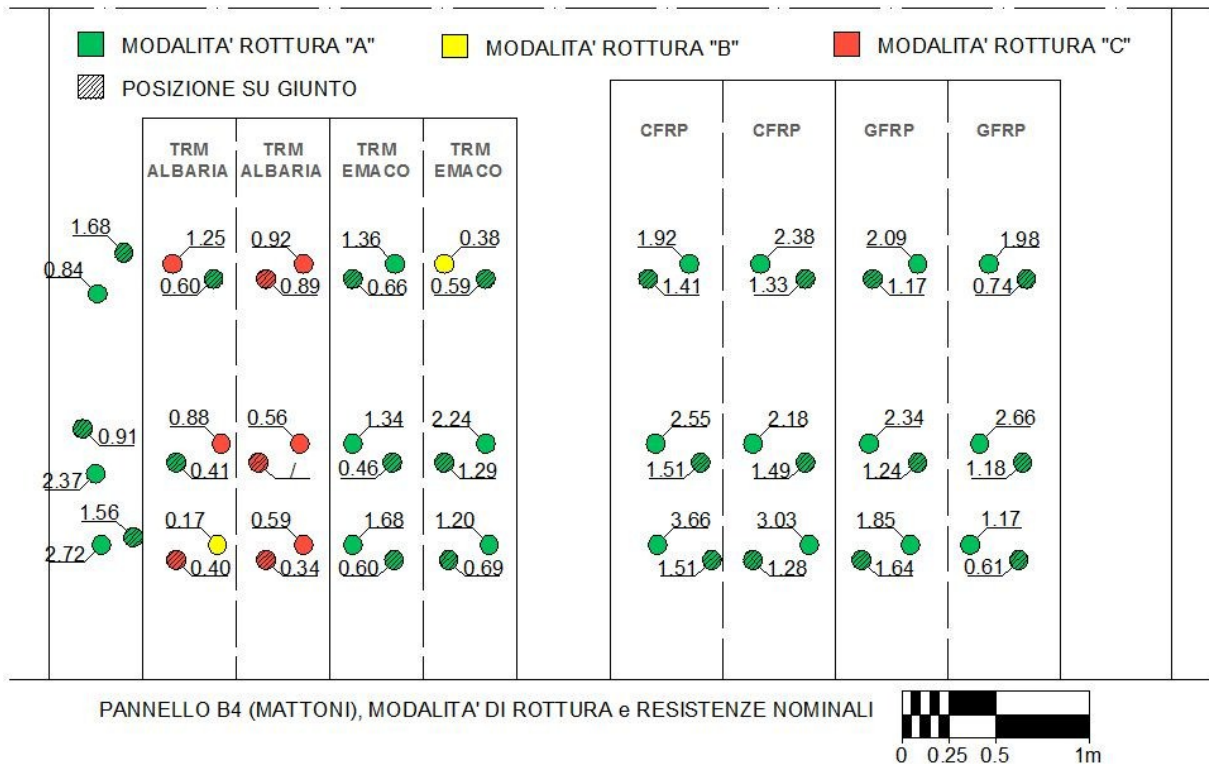


Figura 4.11: valori delle resistenze nominali per il pannello B4 in mattoni.

### 4.3 Il pannello in pietra A2

Si riportano in questo paragrafo i dati relativi al pannello A2 in pietra, che è stato soggetto all'applicazione di una striscia di *MBrace Saturant Adesivo con fibre di carbonio*, con la finalità di verificarne l'aderenza in presenza di un precedente trattamento superficiale protettivo idrorepellente in resina epossidica. Lo schema di applicazione del composito e delle impronte pull-off è riportato in Figura 4.12.

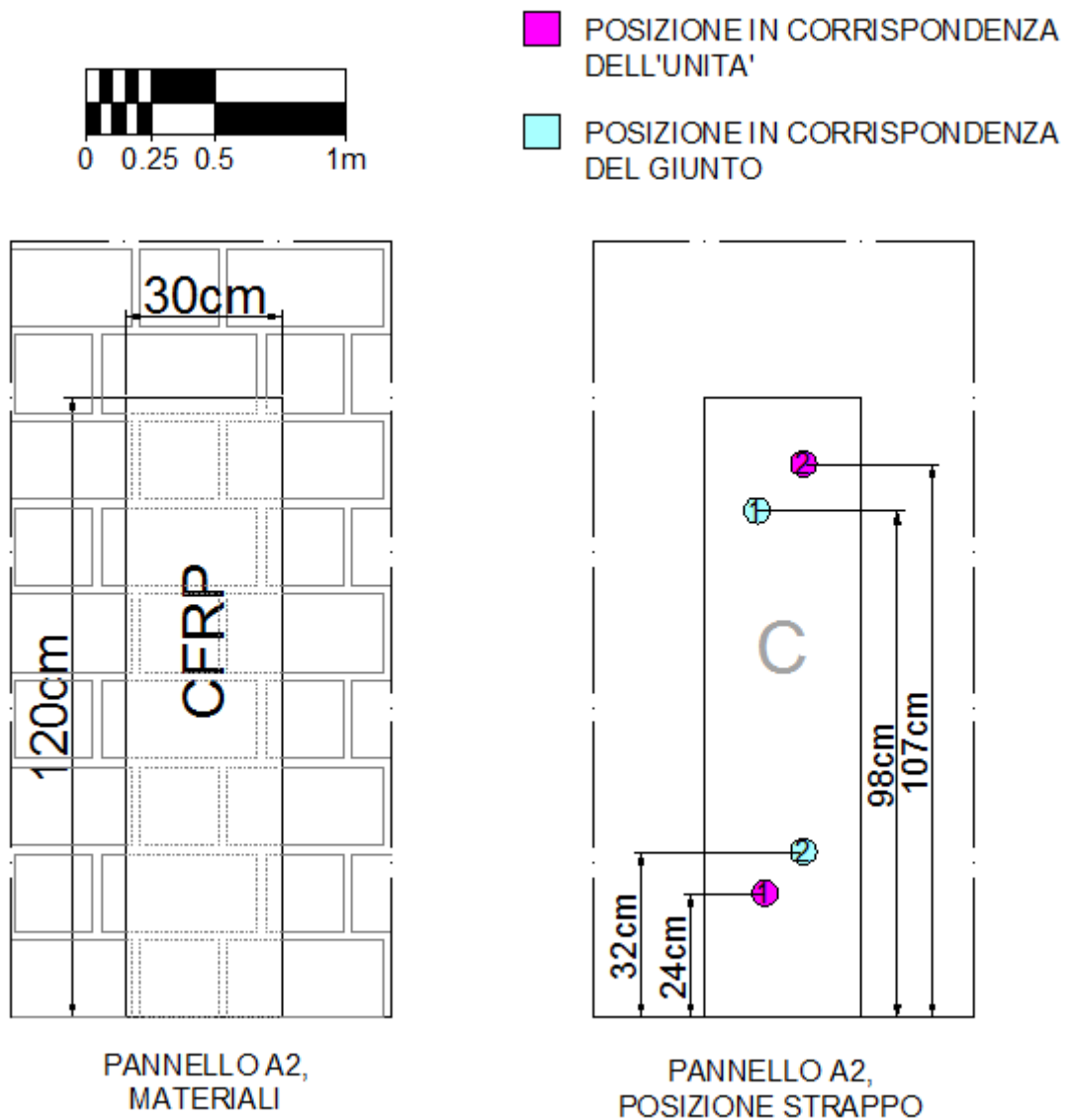
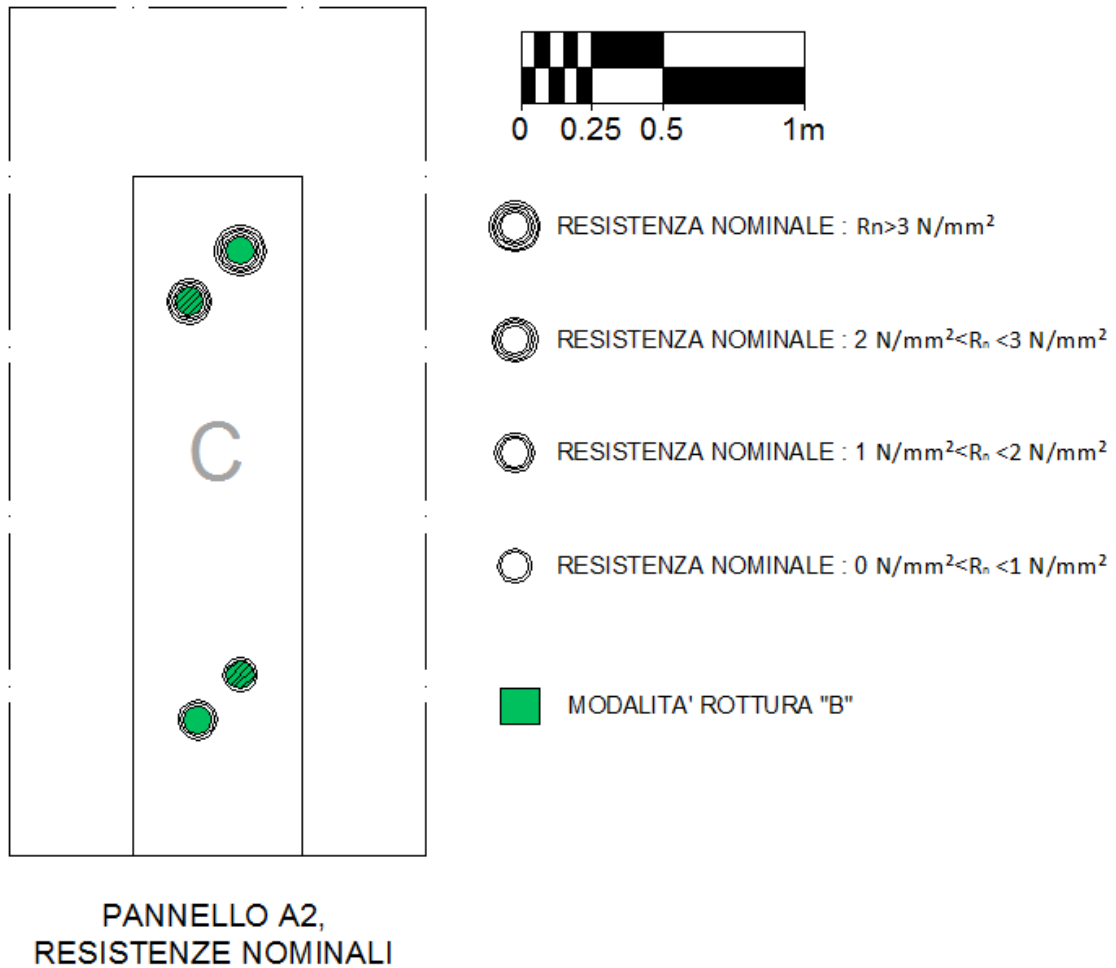


Figura 4.12: schema di applicazione del CFRP e delle posizioni delle impronte pull-off per il pannello A2 in pietra.

Come si nota dalla Figura 4.13 la modalità di rottura che si verifica è solamente quella di tipo A, e inoltre le resistenze presentano la stessa distribuzione del pannello A4 trattato con lo stesso composito e senza trattamento idrorepellente. Per tale motivo si è tralasciata l'analisi dei risultati di tale test nel seguito della tesi.



**Figura 4.13:** distribuzione delle resistenze nominali per il pannello A2 in pietra trattato con idrorepellente.

#### 4.4 Confronto tra supporti

Si è voluto indagare la performance dei diversi compositi in funzione del supporto sui quali sono stati applicati. In primo luogo si analizzano le modalità di rottura senza distinzione tra composito né altezza.

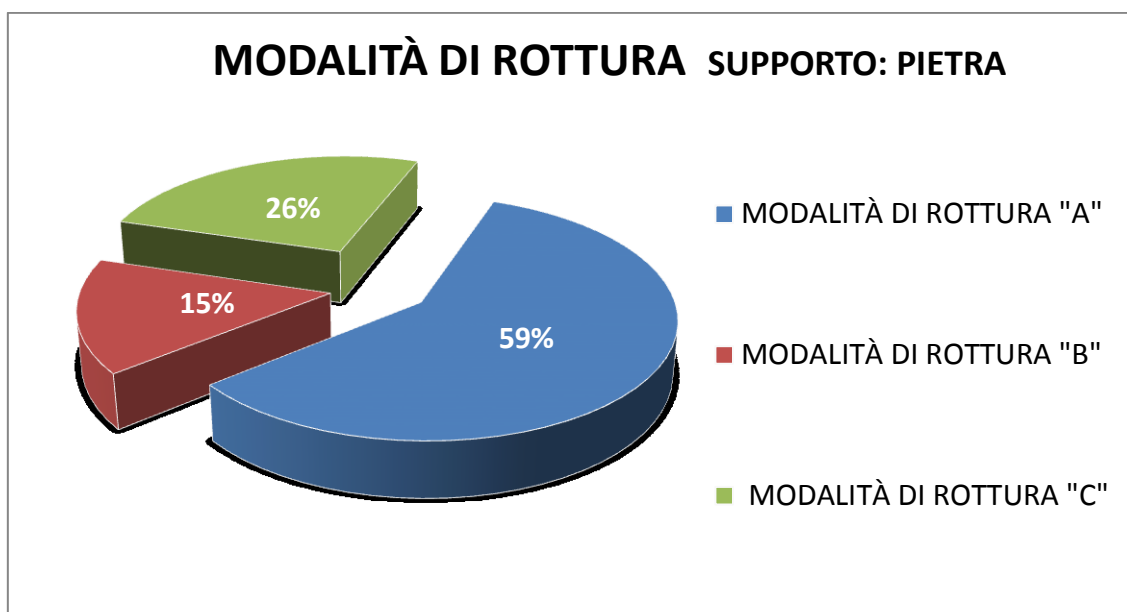


Grafico 4.2: percentuali per tipologia di rottura sul supporto in pietra.

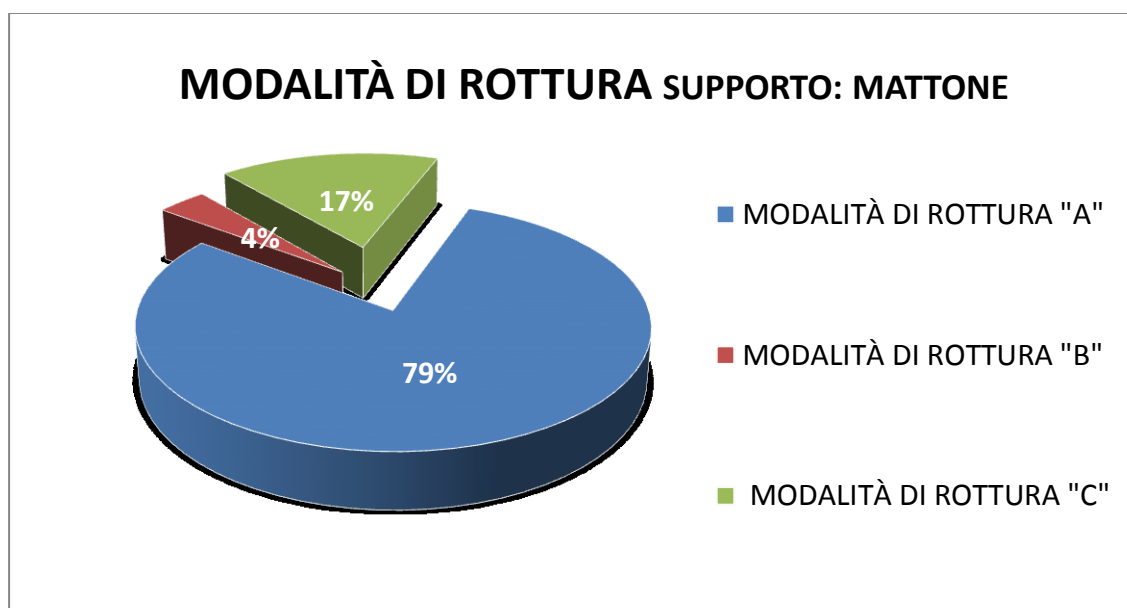
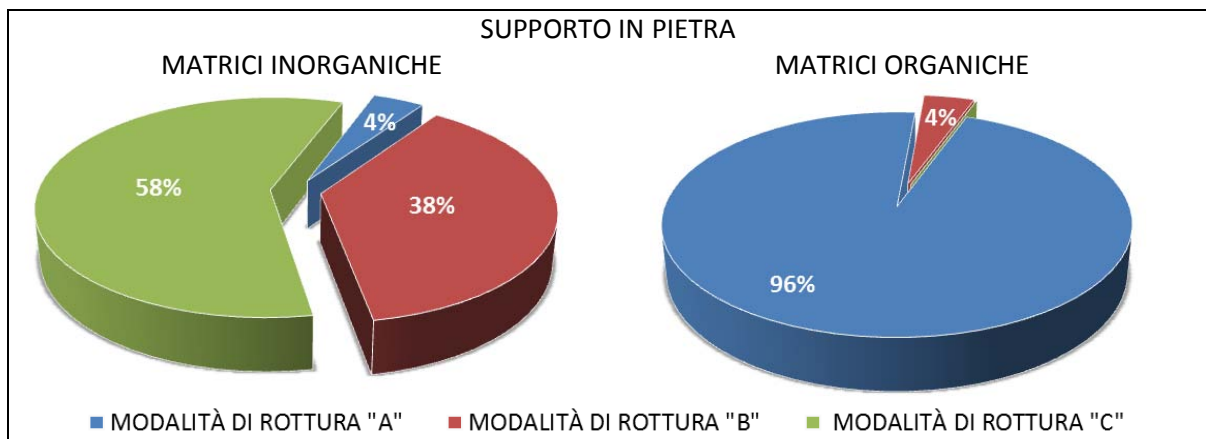


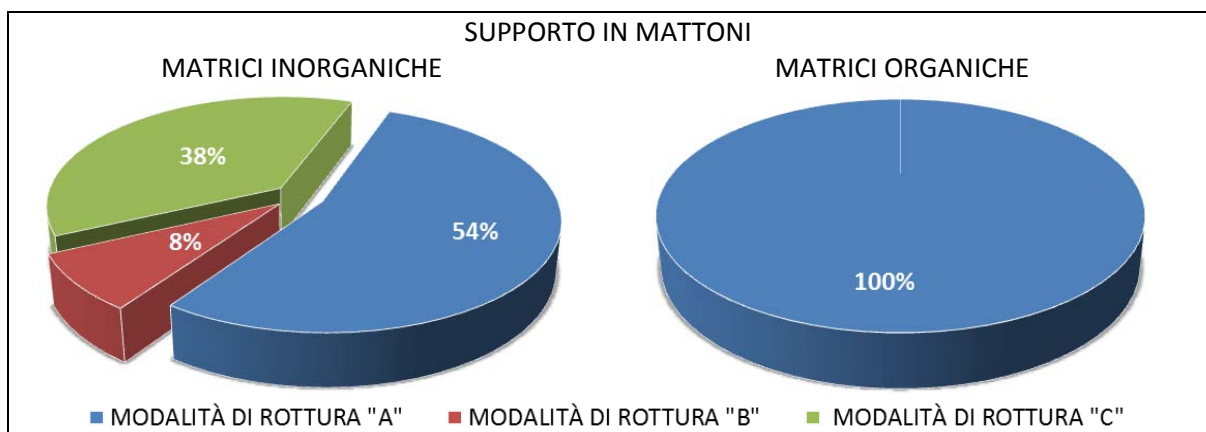
Grafico 4.3: percentuali per tipologia di rottura sul supporto in mattoni;

Come evidenziato dal Grafico 4.2 e dal Grafico 4.3 la modalità di rottura più numerosa è quella di tipo "A", rottura coesiva al livello del supporto; si nota che il supporto in mattone risulta più debole rispetto a quello in pietra, per il quale si ha una percentuale del 59% di rotture coesive, rispetto al 79% del supporto in mattoni. Per la pietra si ha una percentuale considerevole anche di rotture "B" e "C", che stanno ad indicare che il fallimento avviene meno frequentemente nel supporto.

Si confrontando ora le modalità di rottura tra supporti ma distinguendo la rottura tra le matrici organiche e quelle inorganiche. Si vede dal Grafico 4.4 che per le matrici inorganiche si hanno rotture miste con prevalenza per la rottura "C", mentre per le matrici inorganiche si ha una netta predominanza di rotture di tipo "A". Per le matrici organiche si mantiene la stessa tendenza anche per il supporto in mattoni, per le matrici inorganiche invece aumentano notevolmente le rottura di tipo "A" rispetto a quello che succede per il supporto in pietra.



**Grafico 4.4:** percentuali per tipologia di rottura sul supporto in pietra, differenziato per superfici inorganiche e organiche.



**Grafico 4.5:** percentuali per tipologia di rottura sul supporto in mattoni, differenziato per superfici inorganiche e organiche.

Studiando la resistenza nominale per ogni provino data dal rapporto tra il carico, ricavato dalla prova pull-off, e l'area nominale, ricavata come esposto al capitolo 4.2.3, ne è risultato che i due supporti si comportavano in maniera diversa in base alla zona del pannello e in funzione del composito con il quale venivano trattati. Nei grafici seguenti si vuole mettere in evidenza proprio il diverso comportamento dei compositi in base al supporto di applicazione, e per facilitare la comparazione si sono analizzate separatamente le tre fasce di degrado. Nel Grafico 4.6, riguardante la zona del pannello non interessata dalla cristallizzazione salina, si può osservare che la resistenza del supporto in mattoni, rispetto a quello in pietra, risulta maggiore, o al più comparabile, per i compositi a matrice inorganica. La tendenza cambia per CFRP e GFRP, per i quali risulta una resistenza maggiore per quanto riguarda il supporto in pietra. Per quanto riguarda la zona di transizione, risulta una resistenza nominale del supporto mattone maggiore per quasi tutti i tasselli senza differenziazione sul tipo di composito.

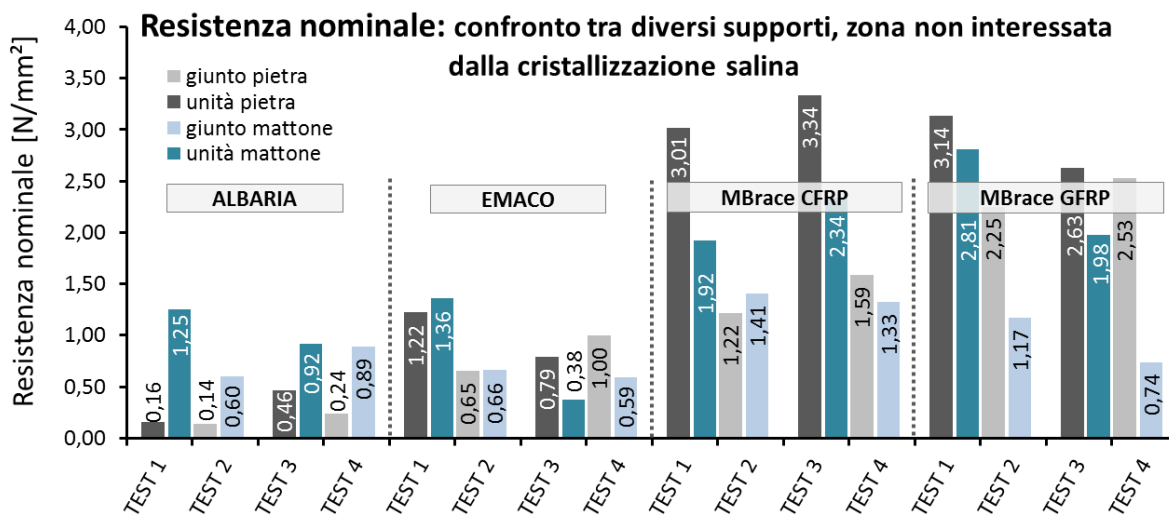
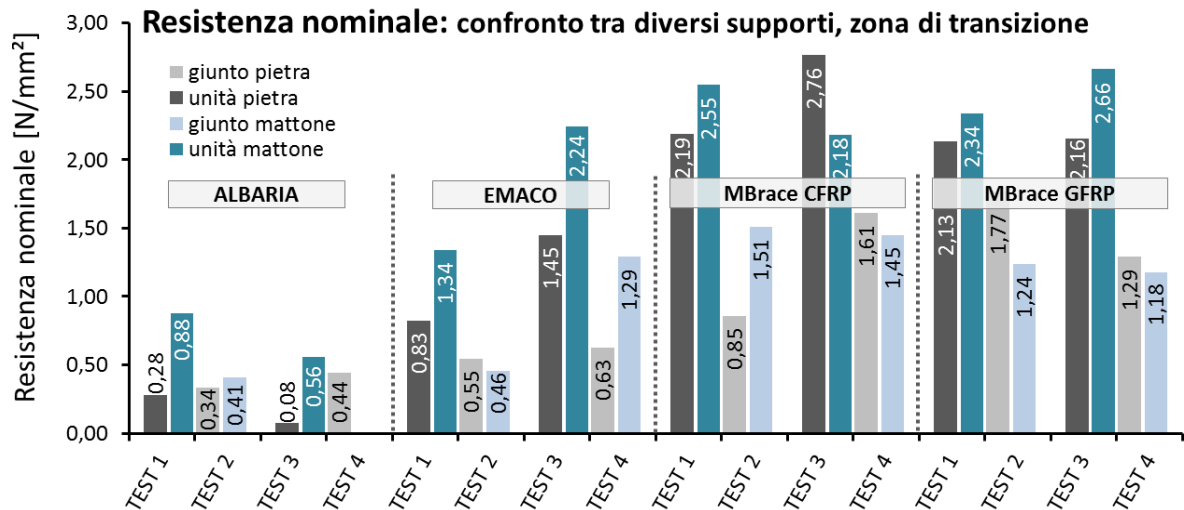


Grafico 4.6: Resistenza nominale: confronto tra diversi supporti, zona non interessata dalla cristallizzazione salina;





**Grafico 4.7:** Resistenza nominale: confronto tra diversi supporti, zona di transizione;

Il Grafico 4.8 illustra i risultati riguardanti la zona più bassa del pannello, in cui si manifesta la cristallizzazione salina. Anche in questo caso le resistenze nominali offerte dal mattone risultano in genere maggiori rispetto a quelle offerte dalla pietra. Si nota un picco interessante riguardante le resistenze nominali riguardanti tasselli strappati dal supporto in mattoni rinforzato con CFRP, superiori di gran lunga rispetto a tutte le resistenze della fascia di altezza minore, e maggiori o comparabili con quelle della fascia indisturbata. Risulta chiaramente da tutti e tre i grafici che le resistenze offerte in corrispondenza del giunto sono nettamente minori rispetto a quelle in corrispondenza delle unità mattone e pietra, senza distinzione tra i supporti o i compositi. Anche se verrà analizzato in seguito, è immediato osservare che le prestazioni di CFRP e GFRP sono migliori rispetto agli TRM, senza distinzione tra supporti o altezze.

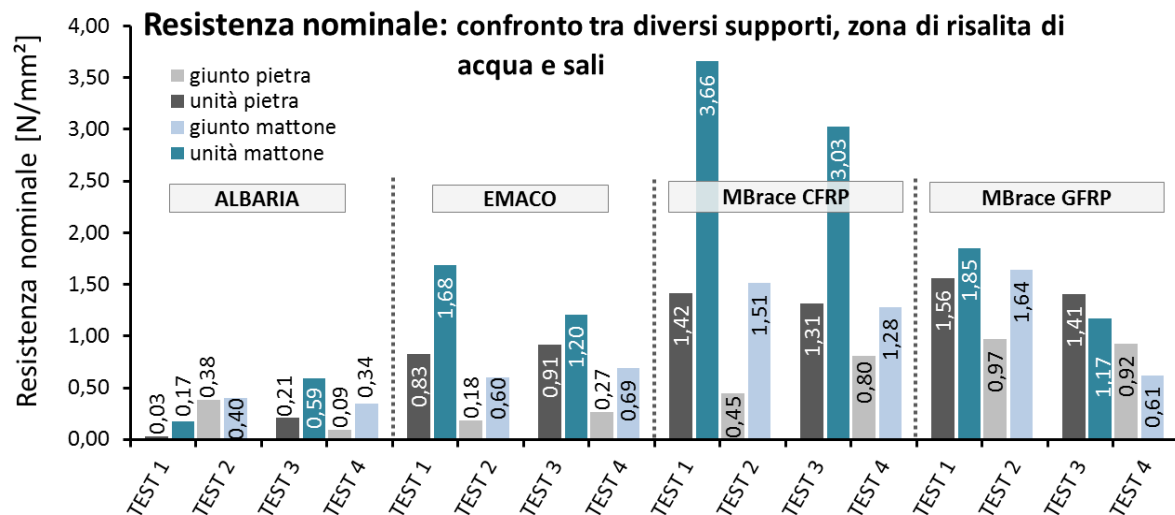


Grafico 4.8: Resistenza nominale: confronto tra diversi supporti, zona di risalita di acqua e sali;

Riassumendo, come si può vedere dal Grafico 4.9, per l'altezza maggiore abbiamo che la resistenza nominale per l'unità pietra è superiore del 14% rispetto all'unità mattone, e del 30% tra giunto pietra e giunto mattone. Scendendo con l'altezza la tendenza si inverte, le resistenze nominali dell'unità mattone risultano maggiori a quelle dell'unità pietra del 20% e del 42%, rispettivamente per la zona di transizione e quella della risalita di acqua e sali. Anche per le resistenze in corrispondenza del giunto risultano superiori quelle sul supporto in mattone del 14% per l'altezza intermedia, e circa del 43% per l'altezza inferiore.

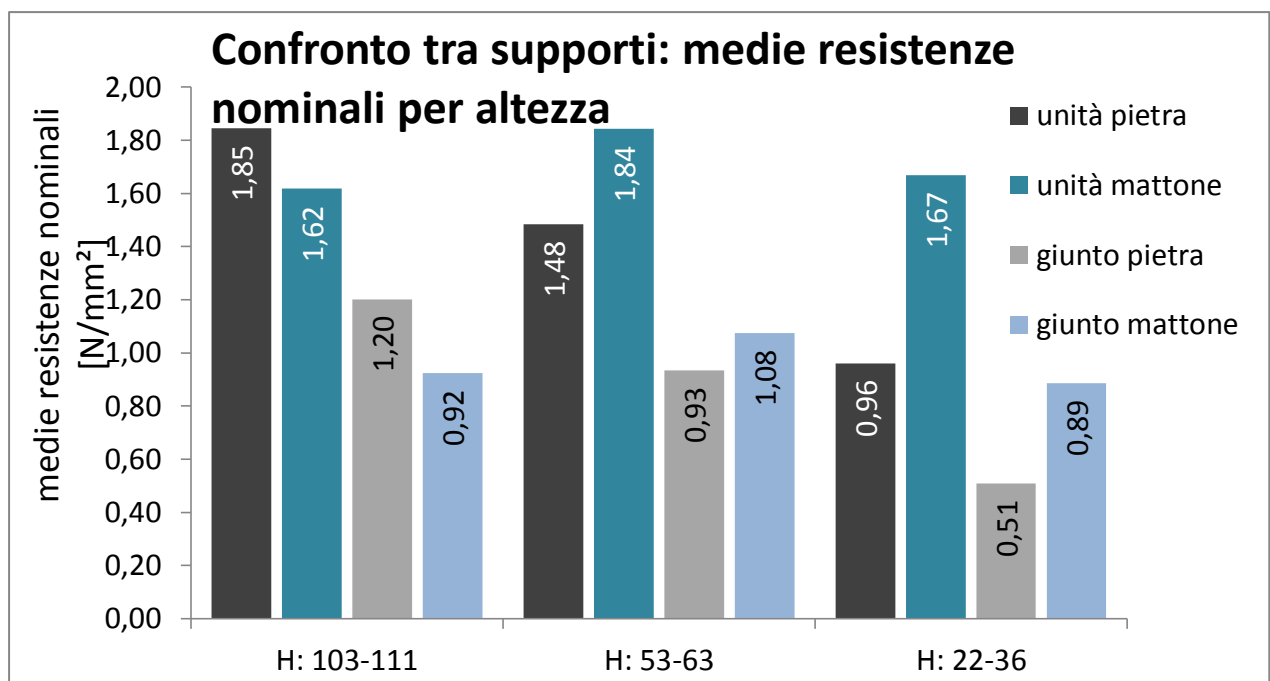


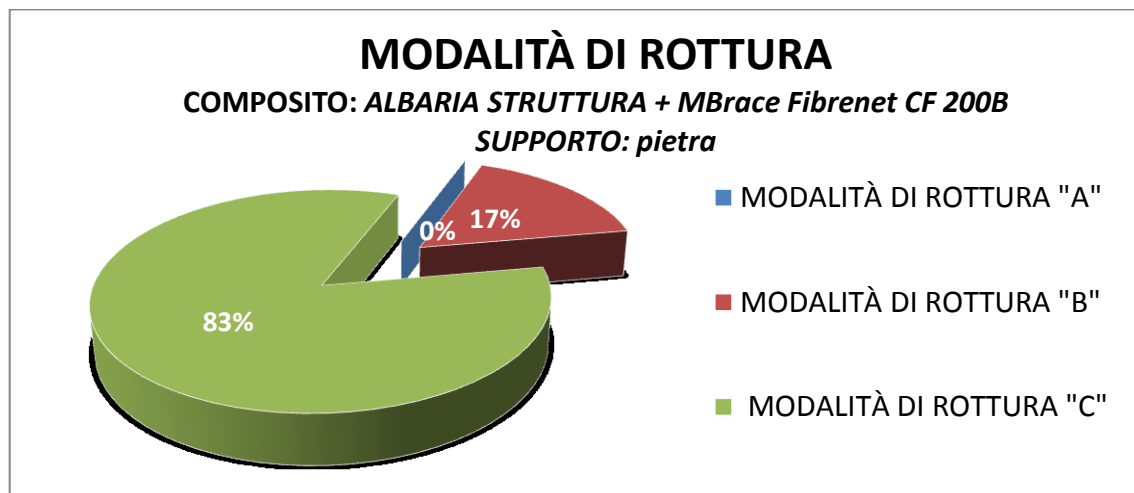
Grafico 4.9: confronto tra le resistenze nominali medie per i due diversi supporti.

## 4.5 Confronto tra Compositi

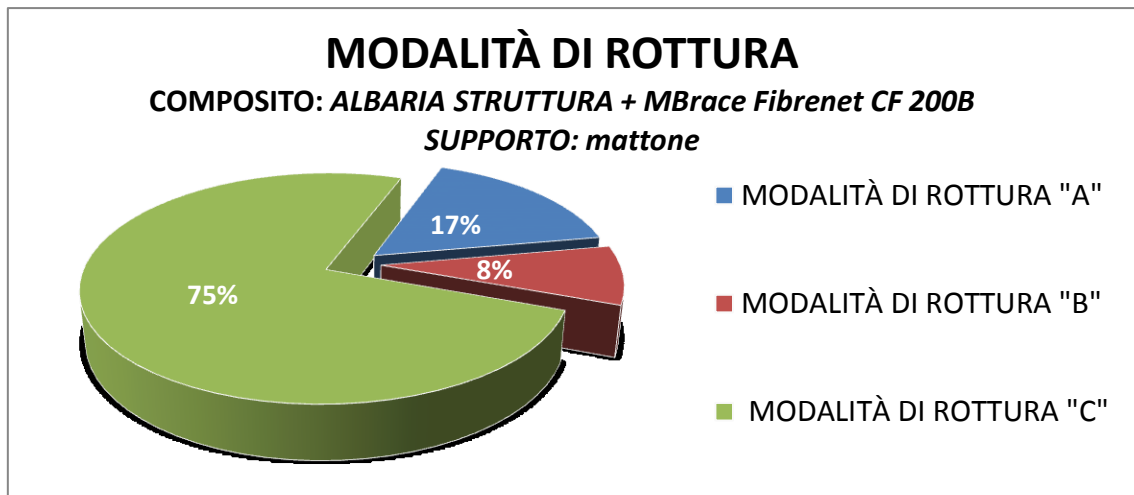
Si andranno ad analizzare le modalità di rottura e le resistenze nominali per singolo composito, e successivamente si andranno a confrontare i risultati tra tutti i compositi.

### 4.5.1 TRM ALBARIA

Le modalità di rottura che si sviluppano maggiormente per il composito a matrice ALBARIA sono di tipo "C", in cui il fallimento avviene all'interno del composito. Per quanto riguarda l'applicazione su pietra (Grafico 4.10) è evidente che il supporto resiste di più del composito, infatti non si è verificata nessuna rottura di tipo "A". Anche per il supporto in mattone (Grafico 4.11) la predominanza di rotture risulta di tipo "C" anche se, qualche rottura si è sviluppata anche in corrispondenza del supporto.

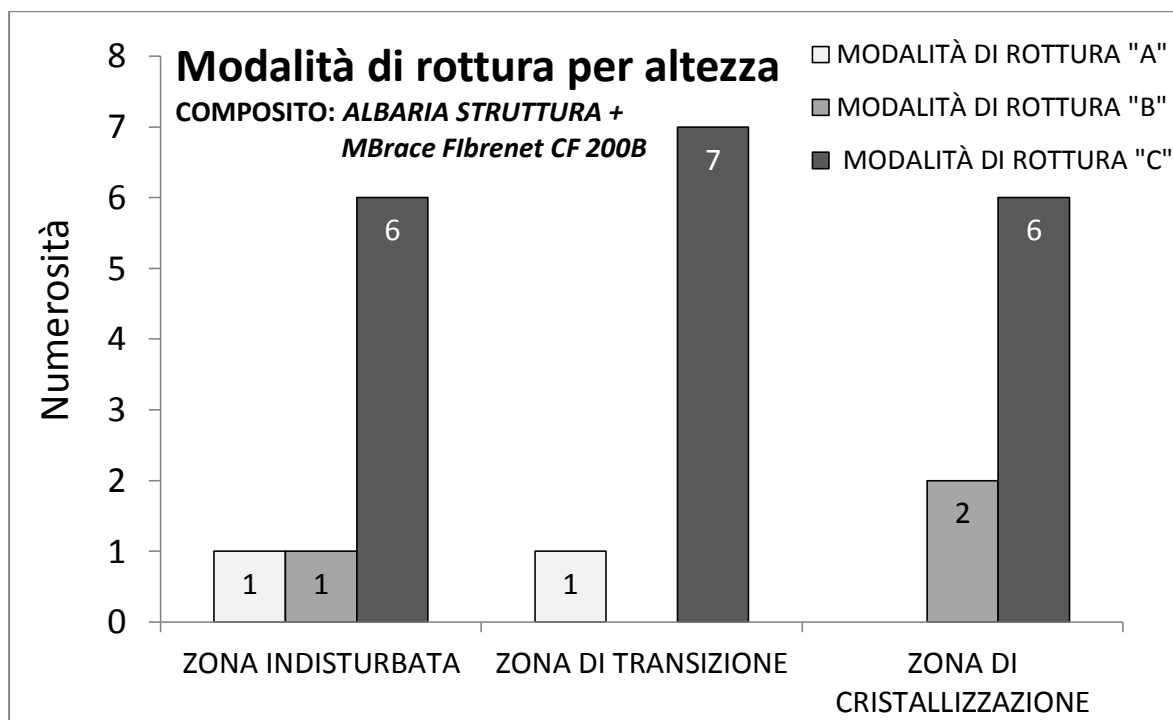


**Grafico 4.10:** modalità di rottura per il composito con matrice ALBARIA applicata al supporto in pietra.



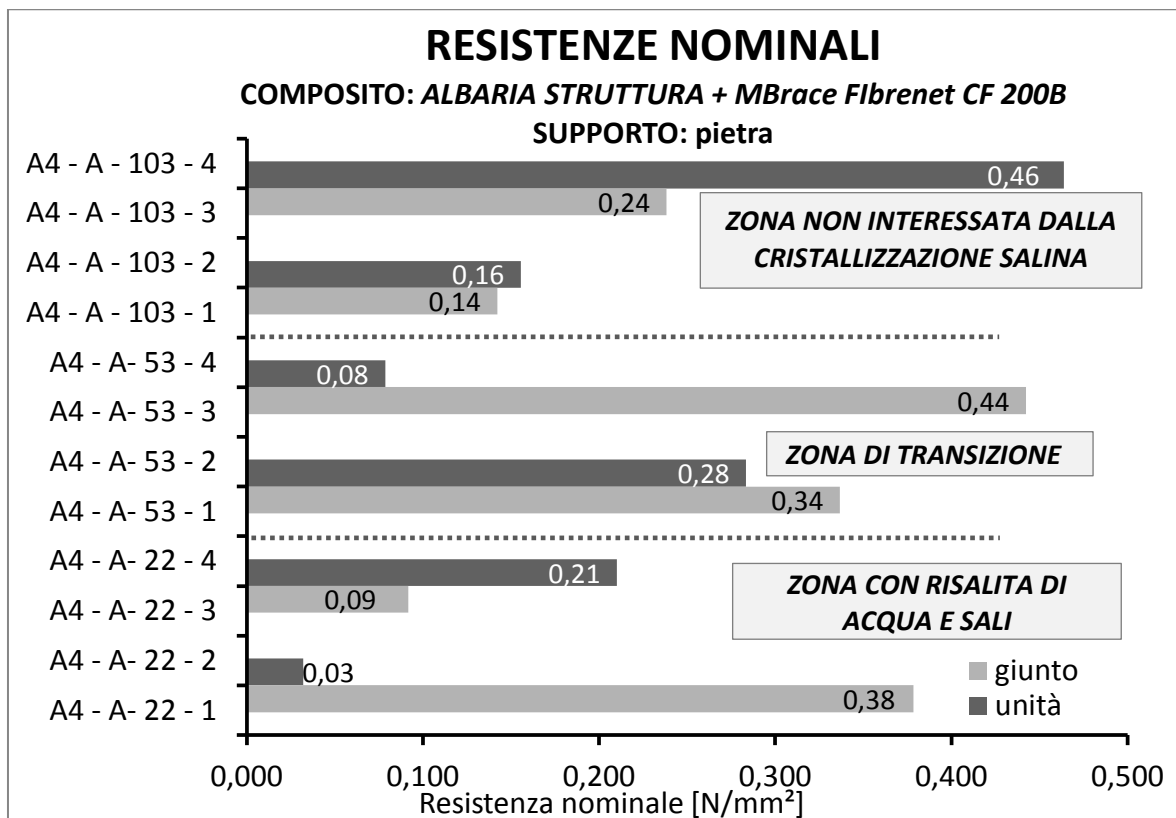
**Grafico 4.11:** modalità di rottura per il composito con matrice ALABARIA applicata al supporto in mattoni.

Nel Grafico 4.12 si può vedere come si distribuiscono le modalità di rottura in funzione dell'altezza. Si può osservare che, come suddetto, la maggior parte delle modalità di rottura avviene all'interno del composito. Solo isolate rotture si sono verificate con altre modalità, ma non si sottolinea nessuna tendenza in funzione della zona del pannello.



**Grafico 4.12:** distribuzione delle modalità di rottura in funzione dell'altezza;

Analizzando le resistenze in funzione del supporto di applicazione, notiamo dal Grafico 4.13, che per il supporto in pietra le resistenze diminuiscono scendendo verso la zona più bassa del pannello. I dati però offrono un confronto inaspettato tra resistenze in corrispondenza del giunto e della sola unità in pietra; sembra infatti che nelle zone di transizione e di risalita dei sali le resistenze offerte dagli strappi in corrispondenza del giunto siano maggiori rispetto a quelle offerte dalla pietra, e addirittura, vi è un incremento al diminuire dell'altezza. Questi dati risultano in controtendenza, soprattutto rispetto al quello che succede per il supporto in mattoni (Grafico 4.14): in questo caso infatti le resistenze dell'unità mattone risultano quasi sempre superiori rispetto a quelle offerte dagli strappi in corrispondenza dei giunti. Vi è una diminuzione del valore delle resistenze man mano che ci avvicina alla zona più bassa del pannello.



**Grafico 4.13:** resistenze nominali per il composito con matrice ALBARIA su pietra.

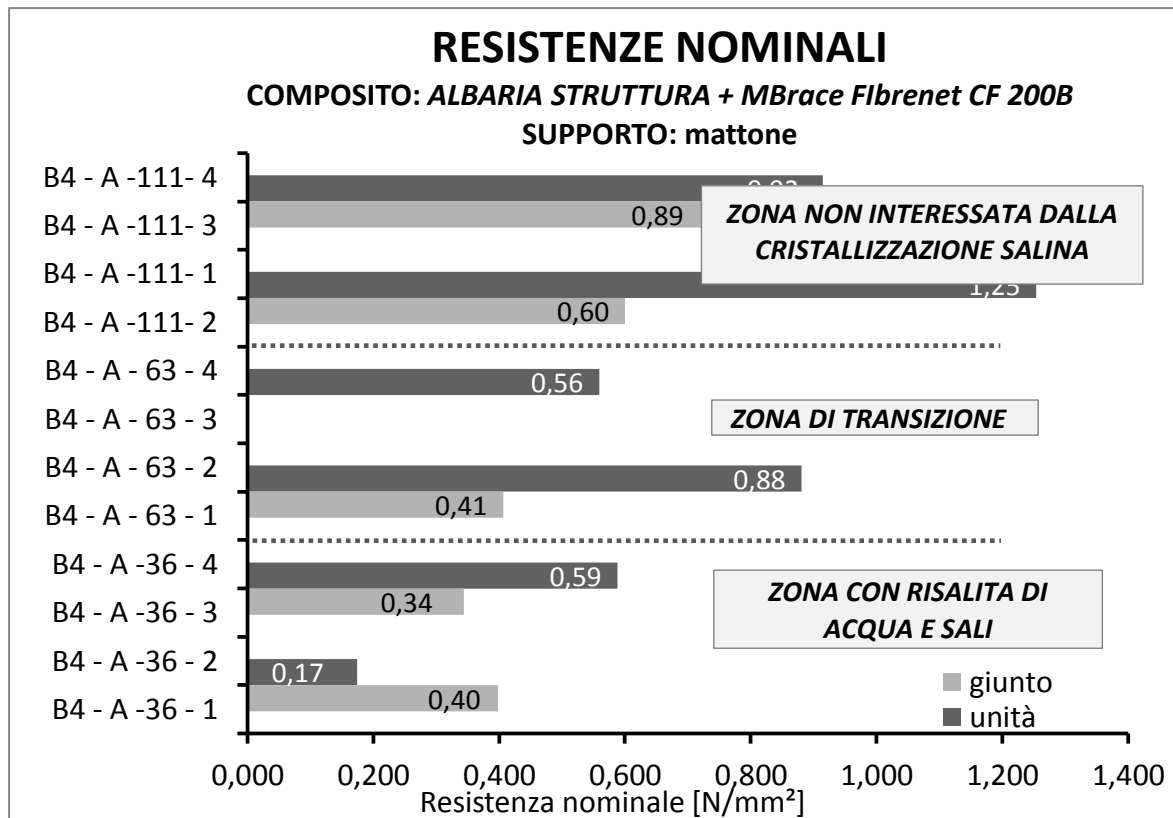


Grafico 4.14: resistenze nominali per il composito con matrice ALBARIA su mattoni.

#### 4.5.2 TRM EMACO

Le modalità di rottura che si sviluppano maggiormente per il composito a matrice EMACO si dividono in funzione del supporto. Per quanto riguarda l'applicazione su pietra (Grafico 4.15) la modalità di rottura prevalente è la "B", il fallimento avviene quindi all'interfaccia supporto composito. Per il supporto in mattone (Grafico 4.16) la quasi totalità delle rotture risulta di tipo "A", a dimostrazione del fatto che il supporto in mattoni è decisamente meno resistente di quello in pietra.

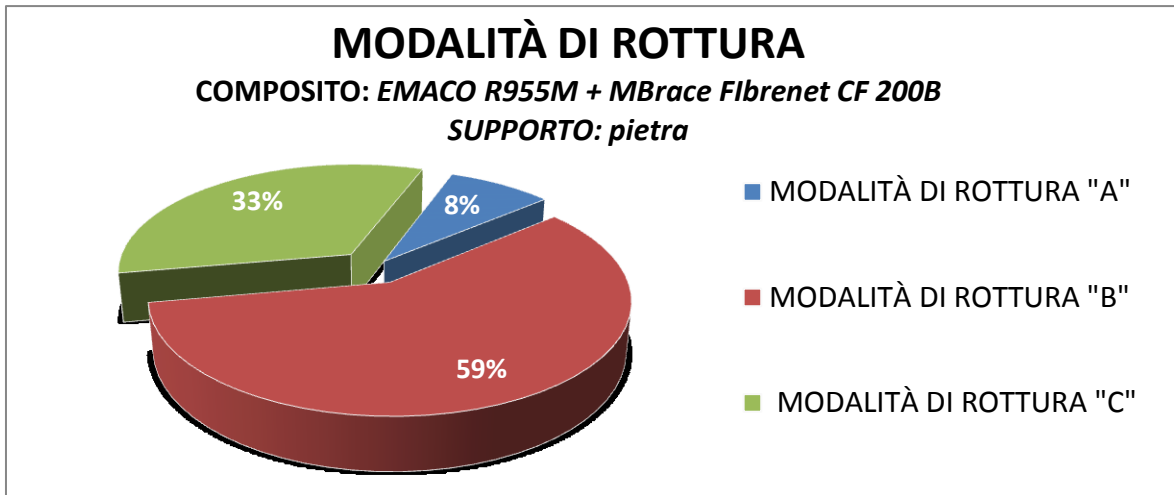


Grafico 4.15: modalità di rottura per il composito con matrice EMACO applicata al supporto in pietra.

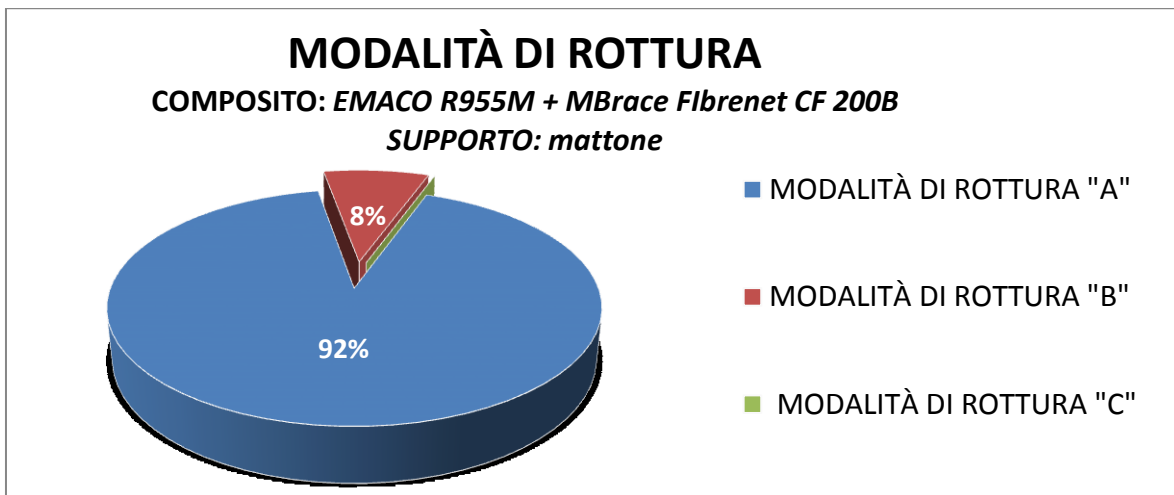


Grafico 4.16: modalità di rottura per il composito con matrice EMACO applicata al supporto in mattoni.

La distribuzione delle modalità di rottura in funzione dell'altezza si possono osservare nel Grafico 4.12. Si nota che le modalità di rottura sono "miste" per tutte le altezze, con aumento progressivo delle modalità di rottura coesivo nel supporto (tipo "A") avvicinandosi alla zona più bassa del pannello caratterizzata dalla cristallizzazione salina, e la diminuzione per quelle che avvengono nel rinforzo (tipo "C"), segno che l'effetto aggressivo dei sali influisce principalmente nel supporto piuttosto che nel rinforzo.

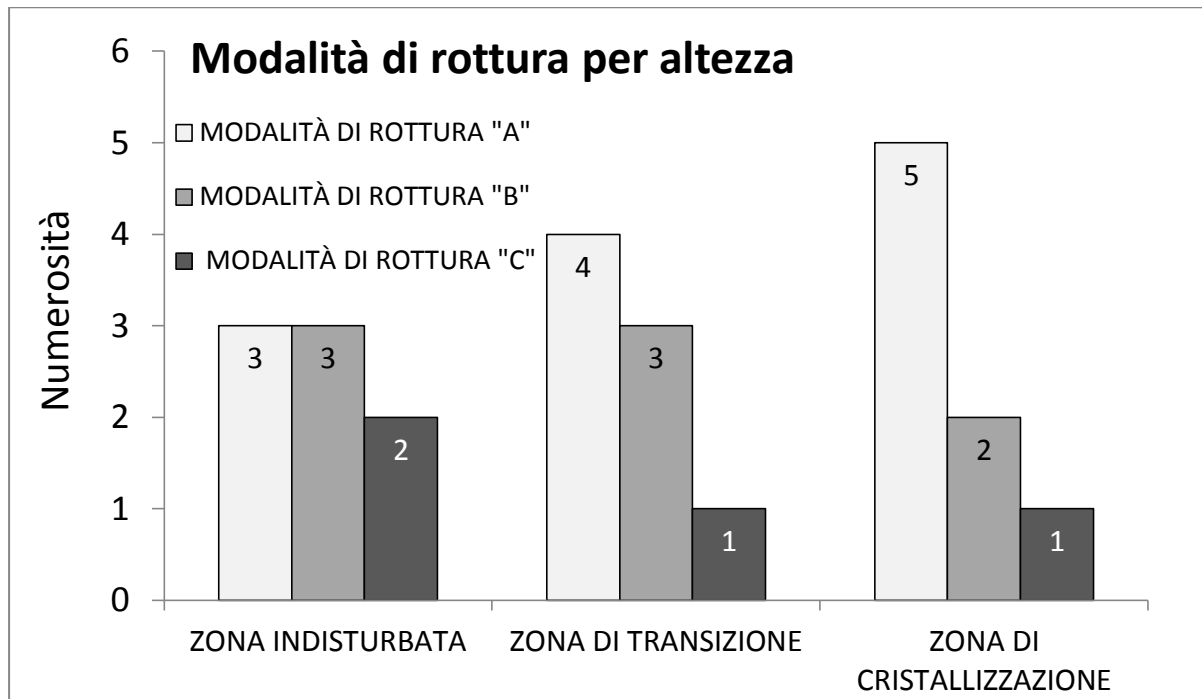


Grafico 4.17: distribuzione delle modalità di rottura in funzione dell'altezza;

Confrontando le resistenze in funzione del supporto di applicazione, si nota dal Grafico 4.18, che per il supporto in pietra le resistenze diminuiscono scendendo verso la zona più bassa del pannello. Per questo tipo di composito, al contrario di quello che avveniva per la matrice ALBARIA, le resistenze offerte dall'unità risultano quasi sempre maggiori a quelle offerte a cavallo del giunto. La stessa tendenza si presenta anche per il supporto in mattoni (Grafico 4.14). Si noti che le resistenze massime per il supporto in mattoni si ottengono per la zona di transizione piuttosto che per quella indisturbata. In generale si verifica una diminuzione del valore delle resistenze man mano che ci avvicina alla zona più bassa del pannello.



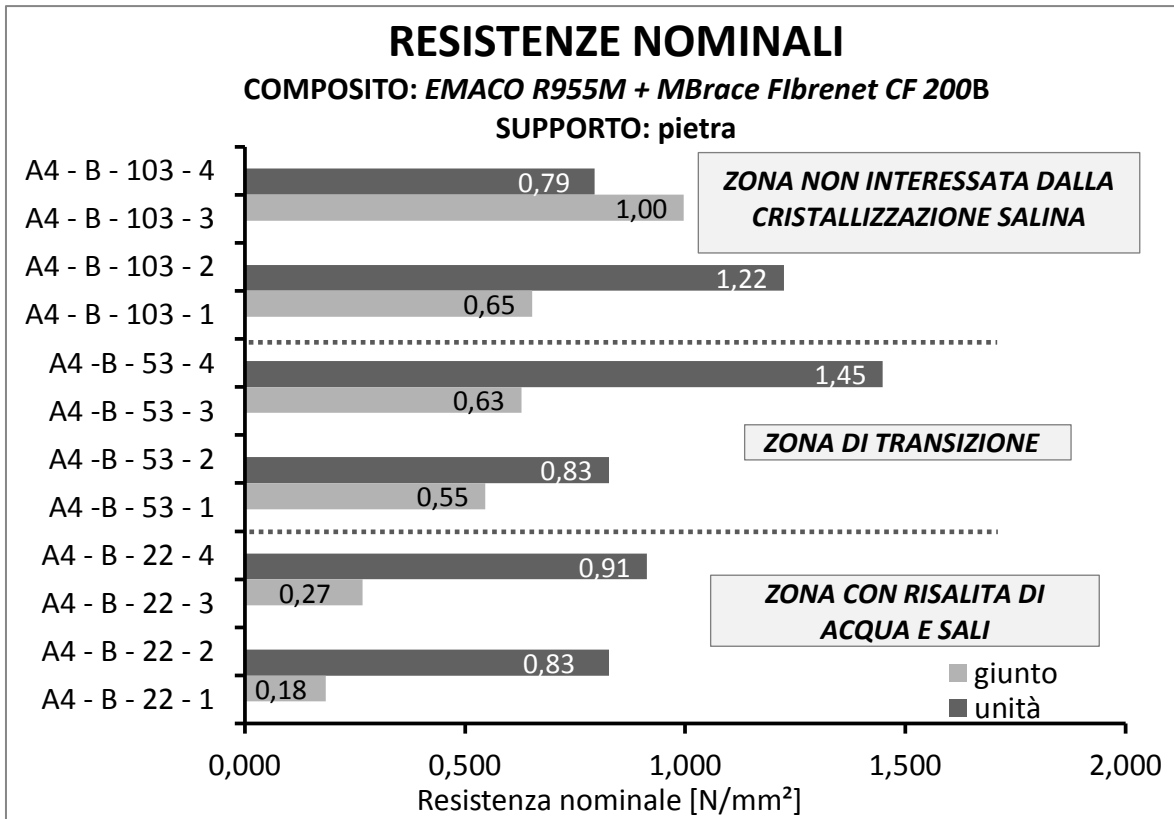


Grafico 4.18: resistenze nominali per il composito con matrice EMACO su pietra.

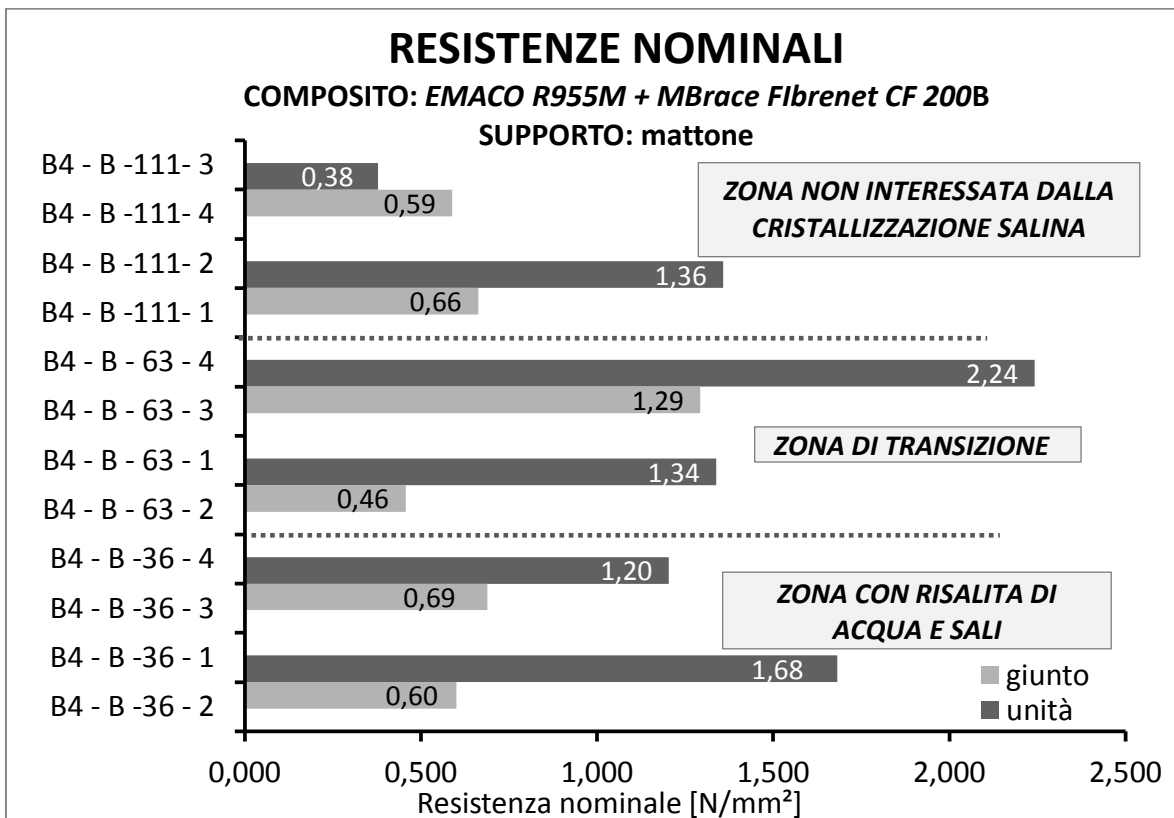


Grafico 4.19: resistenze nominali per il composito con matrice EMACO su mattoni.

### 4.5.3 CFRP

La modalità di rottura che si sviluppano per la quasi totalità dei casi per il composito CFRP è di tipo "A", in cui il fallimento avviene all'interno del substrato. Per quanto riguarda l'applicazione su pietra (Grafico 4.20) si è verificata anche una rottura di tipo "C", ma essendo l'unica si presume sia un caso fortuito. Per il supporto in mattone (Grafico 4.21) la totalità di rotture risulta di tipo "A". Nel caso di composito CFRP non vi è distinzione tra supporti.

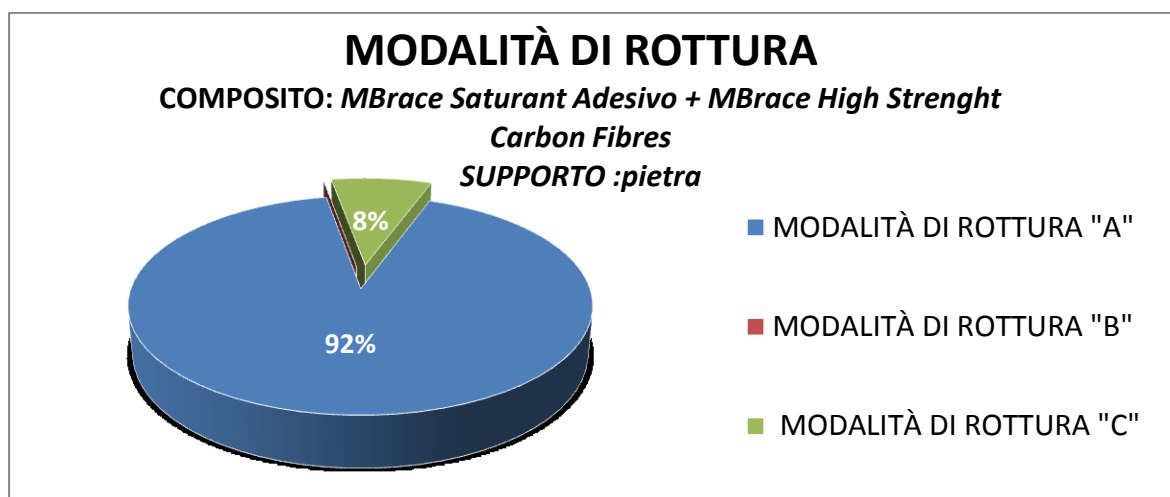


Grafico 4.20: modalità di rottura per il composito con CFRP applicata al supporto in pietra.

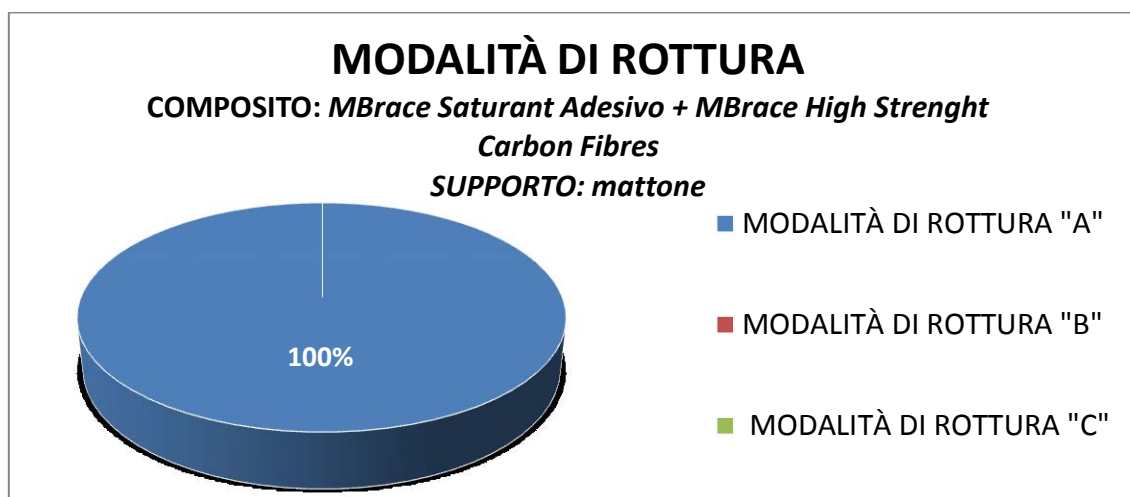


Grafico 4.21: modalità di rottura per il composito con CFRP applicata al supporto in mattoni.

Poiché la quasi totalità delle rotture è di tipo coesivo si ritiene poco significativo, e quindi omettibile, la distribuzione delle modalità di rottura in funzione dell'altezza.

Analizzando le resistenze in funzione del supporto di applicazione, notiamo dal Grafico 4.22, che per il supporto in pietra le resistenze diminuiscono scendendo verso la zona più bassa del pannello, inoltre le resistenze dell'unità risultano sempre superiori rispetto a quelle offerte dagli strappi in corrispondenza dei giunti. I dati risultano in controtendenza per quello che succede per il supporto in mattoni: in questo caso infatti le resistenze dell'unità risultano in aumento avvicinandosi alla parte più bassa del pannello, cioè quella soggetta a cristallizzazione. Per le resistenze a cavallo del giunto si riscontra un andamento costante che perdura avvicinandosi al suolo.

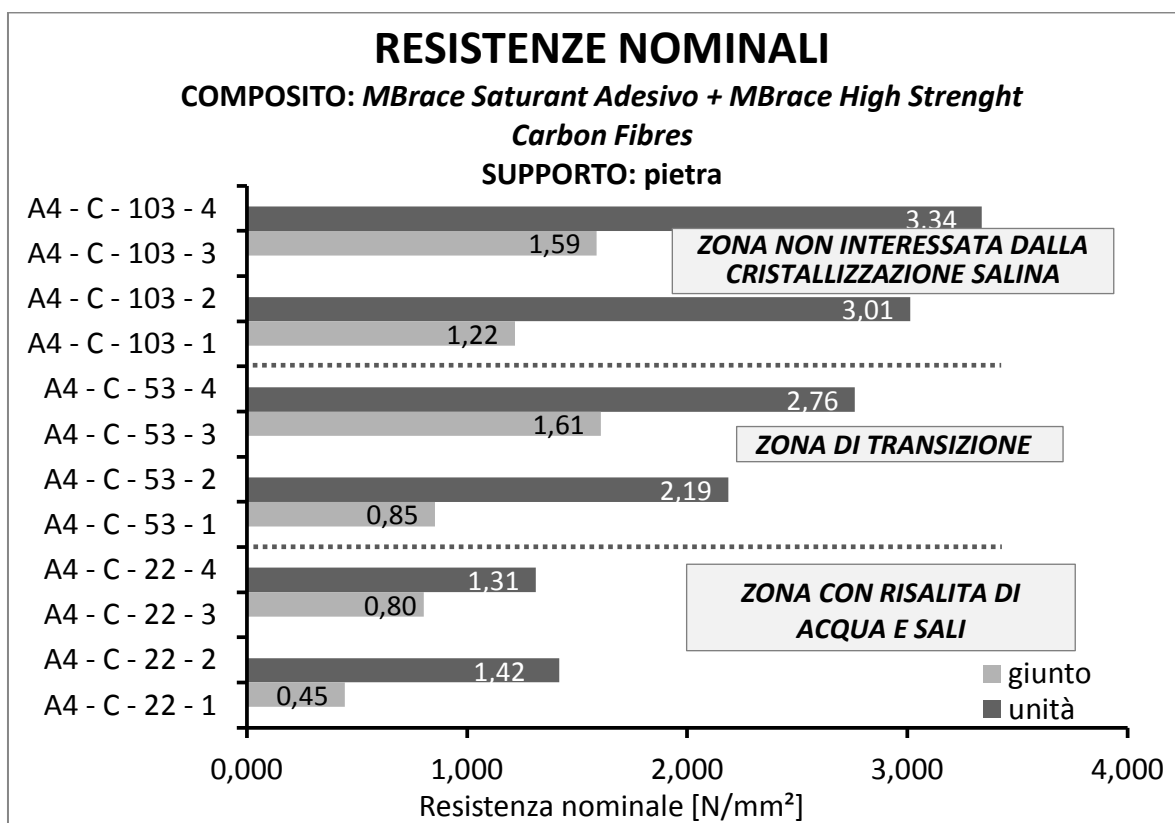


Grafico 4.22: resistenze nominali per il composito CFRP su pietra.

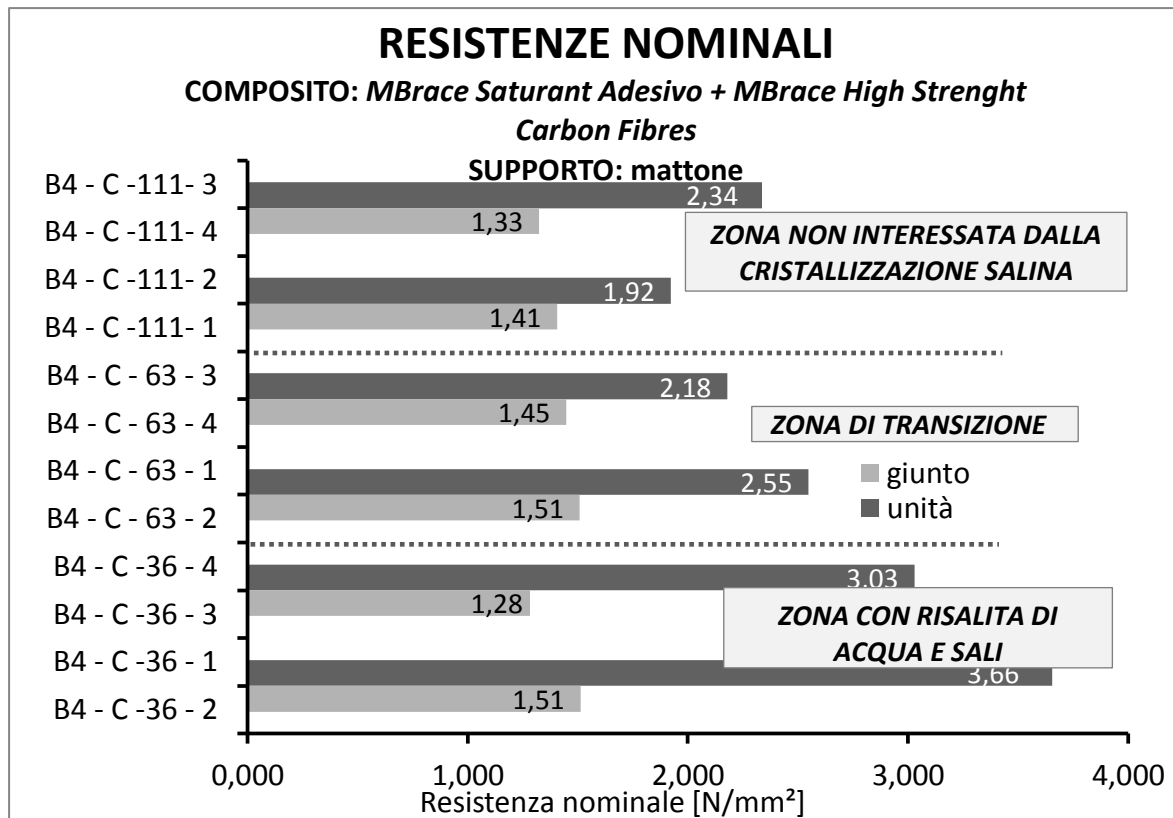


Grafico 4.23: resistenze nominali per il composito CFRP su mattoni.

#### 4.5.4 GFRP

La totalità delle rotture per il composito GFRP avviene con il fallimento all'interno del supporto (modalità di rottura "A"). Sia per il supporto in pietra (Grafico 4.24) che per quello in mattoni (Grafico 4.25) si ha il 100% di rotture coesive.

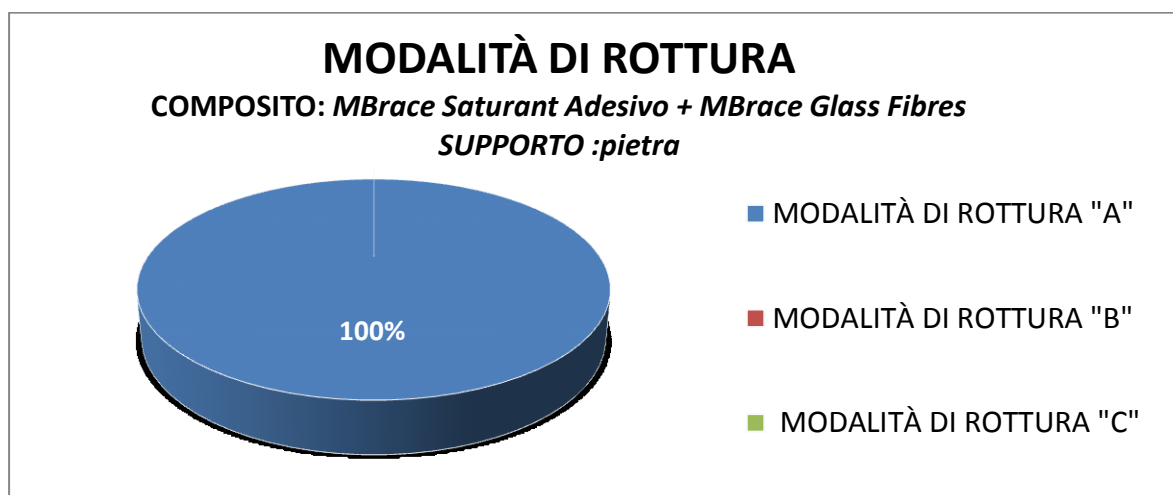
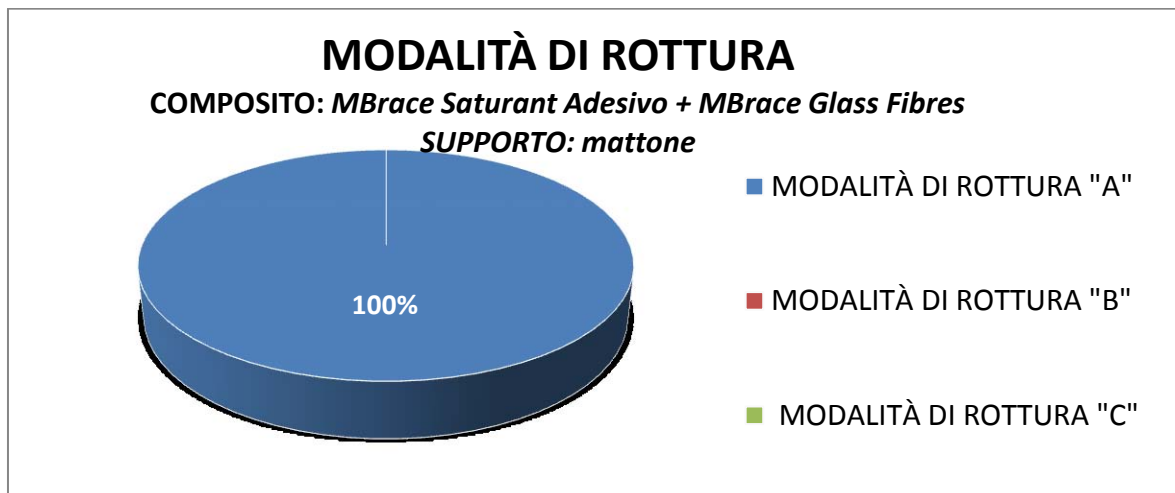


Grafico 4.24: modalità di rottura per il composito con GFRP applicata al supporto in pietra.



**Grafico 4.25** modalità di rottura per il composito con GFRP applicata al supporto in mattoni.

Anche in questo caso, visto la totalità delle rotture di tipo coesivo si ritiene poco significativo, e quindi omettibile, la distribuzione delle modalità di rottura in funzione dell'altezza.

Confrontando le resistenze in funzione del supporto di applicazione, si nota dal Grafico 4.26 e dal Grafico 4.27, che per entrambi i supporti le resistenze diminuiscono scendendo verso la zona più bassa del pannello, e che le resistenze offerte dall'unità risultano quasi sempre maggiori a quelle offerte a cavallo del giunto.

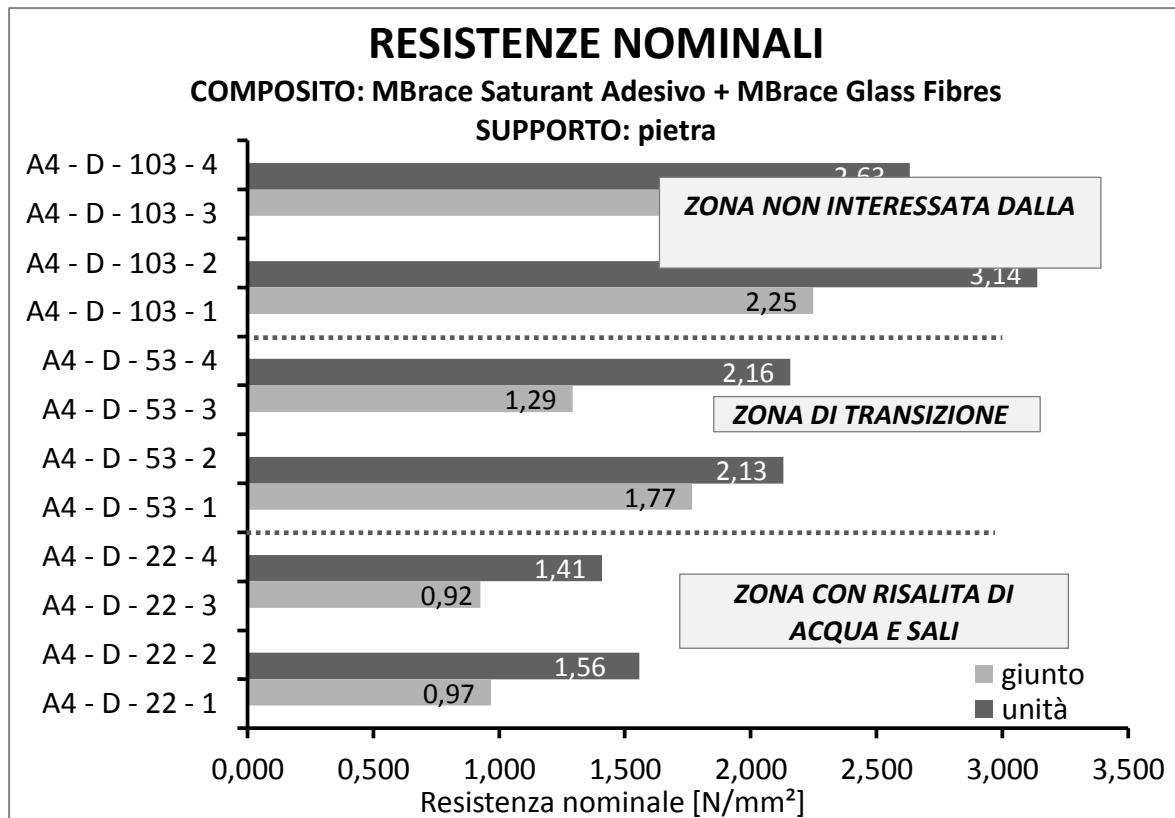


Grafico 4.26: resistenze nominali per il composito GFRP su pietra.

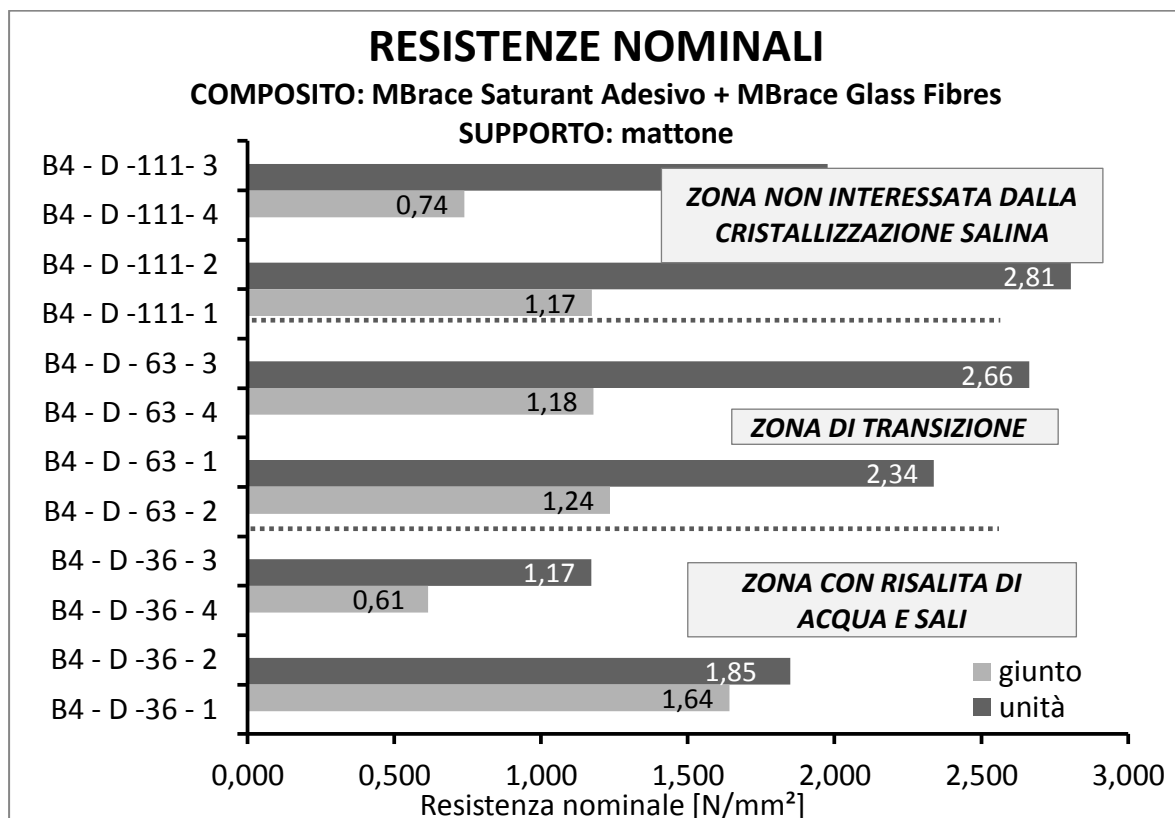


Grafico 4.27: resistenze nominali per il composito GFRP su pietra.

#### 4.5.5 Confronto tra compositi

In prima analisi si confrontano i meccanismi di rottura. In Tabella 4.1 si sono riassunti i risultati riguardanti le distribuzioni delle modalità di rottura.

**Tabella 4.1:** comparazione prestazioni dei diversi compositi.

COMPOSITO	SUPPORTO	MODALITÀ DI ROTTURA
		Prevalenza
TRM ALBARIA	pietra	C
	mattone	C
TRM EMACO	pietra	B
	mattone	A
CFRP	pietra	A
	mattone	A
GFRP	pietra	A
	mattone	A

Per le modalità di rottura si nota una differenza abbastanza netta tra TRM e FRP: i primi presentano tipologie di resistenza miste, mentre i secondi hanno una quasi totale prevalenza di rotture coesive del supporto. Da notare anche che solamente per il TRM con matrice EMACO le modalità di rottura variano avvicinandosi alla parte più bassa del pannello, con l'aumento delle rotture coesive.

Altro confronto che si rende necessario è quello tra le resistenze degli strappi di controllo e le resistenze degli strappi su supporti rinforzati, per indagare l'effettivo aumento di resistenza che dovrebbe verificarsi per supporti rinforzati con compositi.

Per l'altezza di strappo maggiore, come si nota dal Grafico 4.28 e dal Grafico 4.29, sia per il supporto in pietra che per quello in mattoni le resistenze massime si hanno per gli FRP, le quali risultano anche maggiori delle resistenze offerte dai campioni di controllo (senza composito). Gli FRCM invece presentano resistenze minori agli FRP e anche ai campioni di controllo, anche se in riferimento al supporto in mattoni si hanno differenze meno marcate.

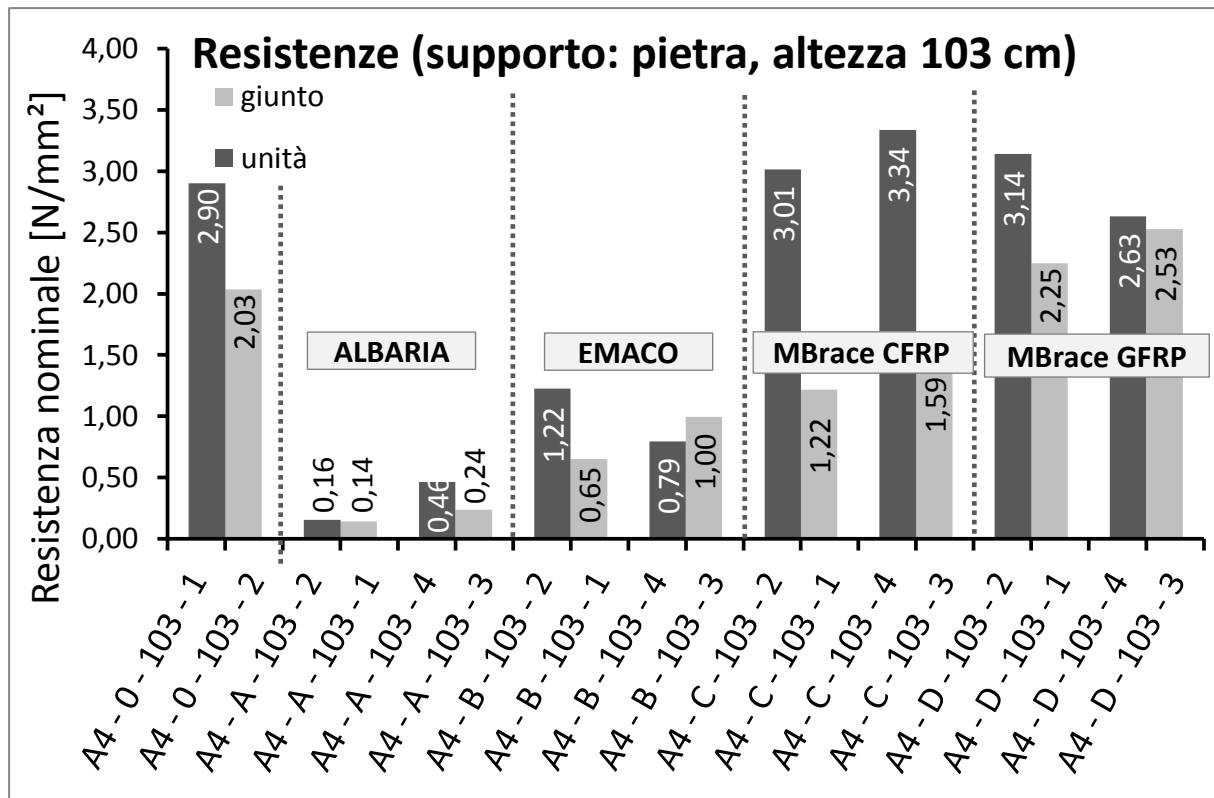


Grafico 4.28: resistenze per la fascia di altezza maggiore sul supporto in pietra.

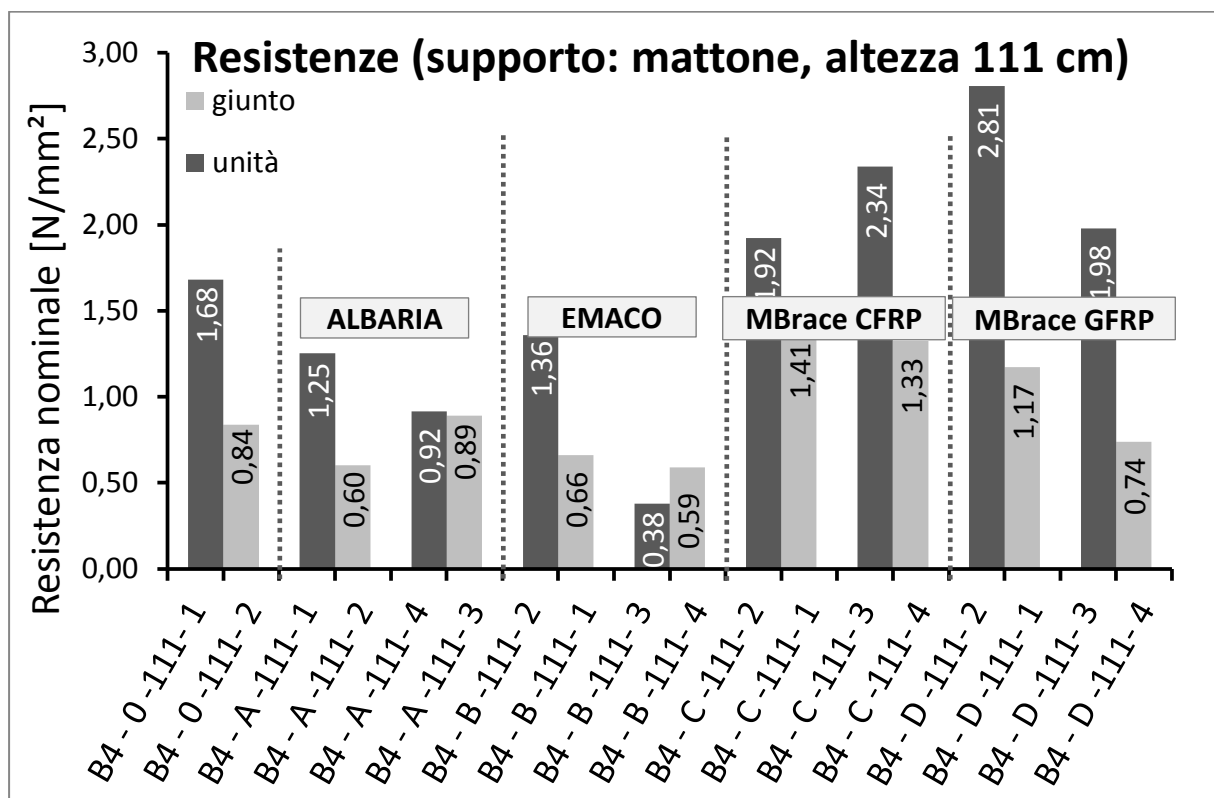


Grafico 4.29 resistenze per la fascia di altezza maggiore sul supporto in mattoni;



Si è voluto calcolare la variazione percentuale della resistenza nominale tra un valore di riferimento e gli strappi su supporti rinforzati. Tale variazione è definita dal seguente rapporto:

$$\text{Variazione } R \% = \frac{R_m - R_{rif}}{R_{rif}} \cdot 100$$

Con  $R_{rif}$  = resistenza nominale di riferimento;

$R_m$  = resistenza nominale media;

Ovviamente i campioni di controllo strappati sulle unità e in corrispondenza del giunto, saranno confrontati rispettivamente con gli strappi rinforzati delle unità e a cavallo del giunto, differenziando per composito e per fasce di altezza. La resistenza nominale media risulta quindi come la media delle resistenze nominali di due tasselli, o due tasselli “unità” o due tasselli “giunto”, in riferimento ad una certa altezza e ad un dato composito. La resistenza nominale di riferimento è la media delle resistenze nominali di tutti i tasselli con rottura di tipo A e di quelli di controllo.

In Tabella 4.2 sono illustrate le variazioni percentuali della resistenza nominale tra strappi di controllo (senza composito) e strappi su supporti rinforzati con compositi per l’altezza massima di strappo.

**Tabella 4.2:** confronto percentuale delle resistenza tra strappi di controllo e strappi su supporti rinforzati (altezza massima).

		TRM ALBARIA	TRM EMACO	CFRP	GFRP
<b>PIETRA</b>	Unità	- 89%	-67%	+3.6%	-5.8%
	Giunto	-90%	-57%	-27%	+24%
<b>MATTONE</b>	Unità	-49%	-59%	-0.7%	+12%
	Giunto	-32%	-43%	+24%	-13%

Nel Grafico 4.30 e Grafico 4.31 sono presentate le resistenze nominali per la zona di transizione tra quella più bassa di cristallizzazione salina e quella più alta indisturbata, rispettivamente per il supporto in pietra e per quello in mattoni. Anche in questo caso le resistenze maggiori sono offerte da CFRP e GFRP, nettamente più alte anche delle resistenze di controllo. Parlando di TRM, solo per quanto riguarda quello con la matrice EMACO si può dire ci sia un aumento (molto limitato) della resistenza rispetto a quella di controllo, e solo per il supporto in pietra.

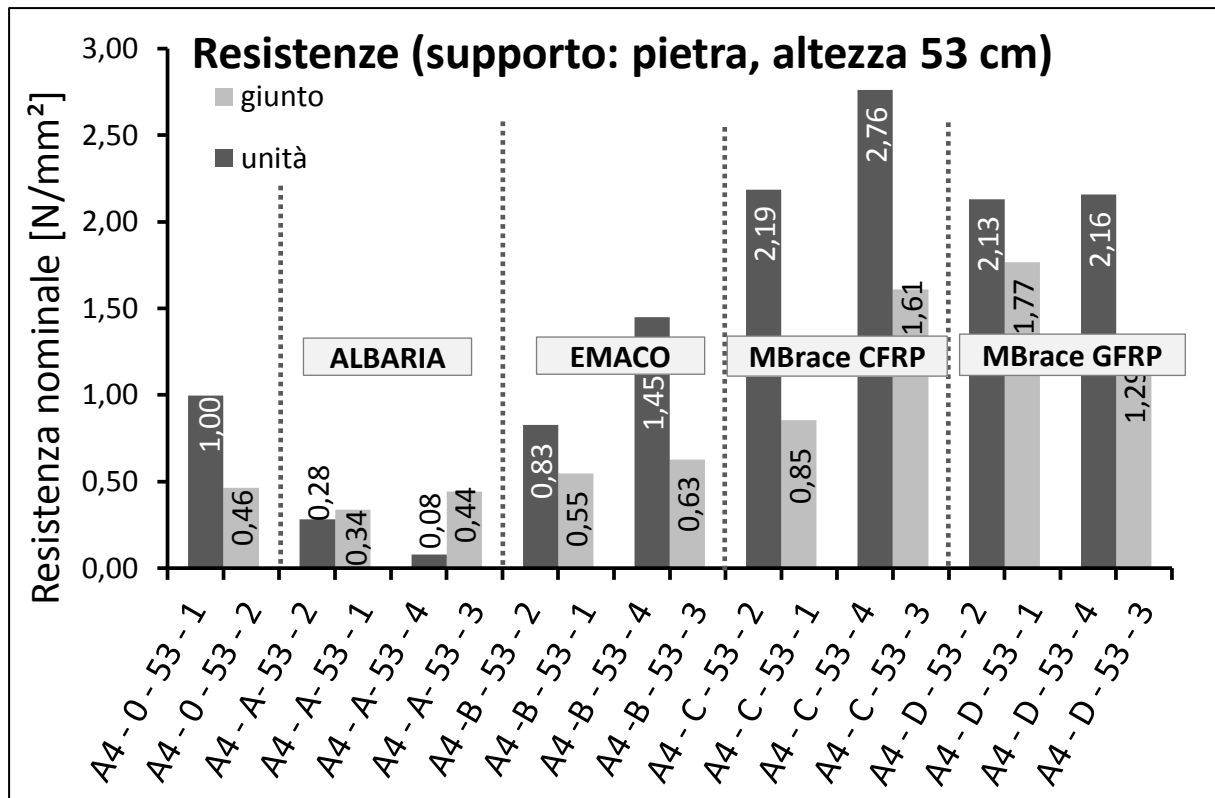


Grafico 4.30: resistenze per la fascia di altezza intermedia sul supporto in pietra.

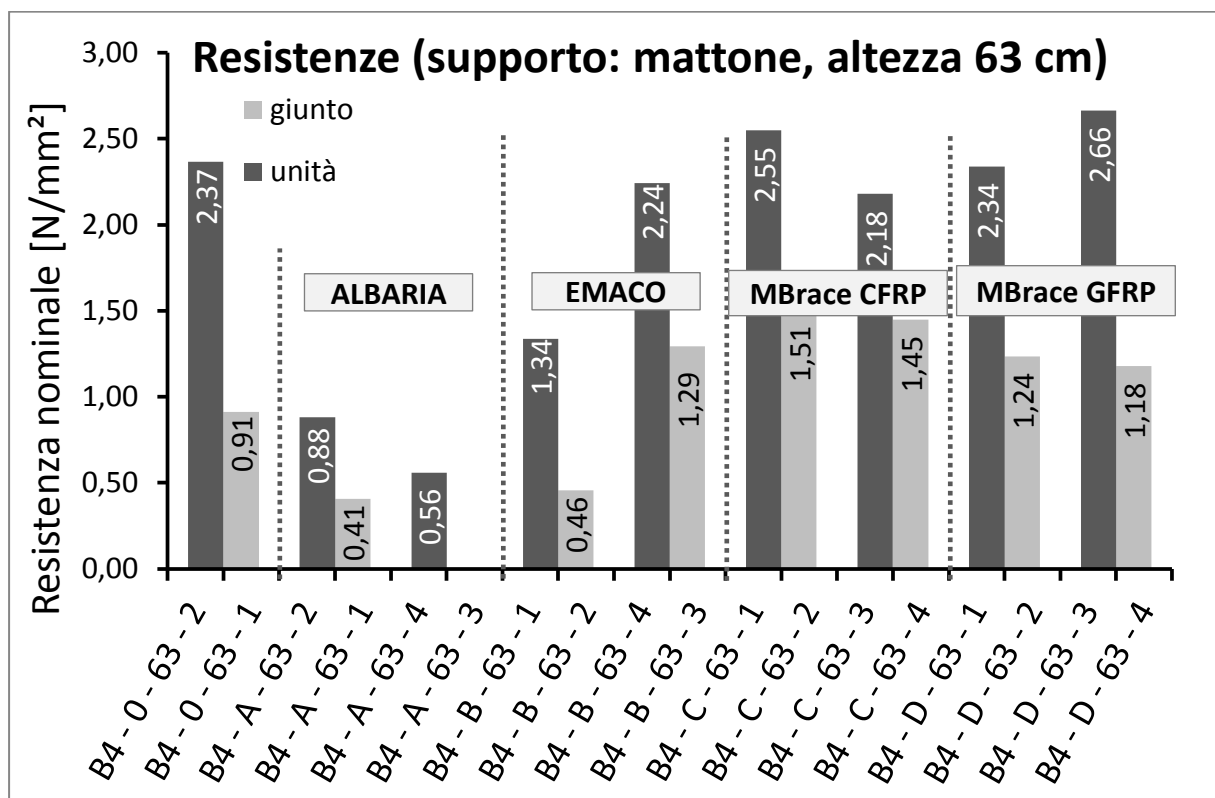


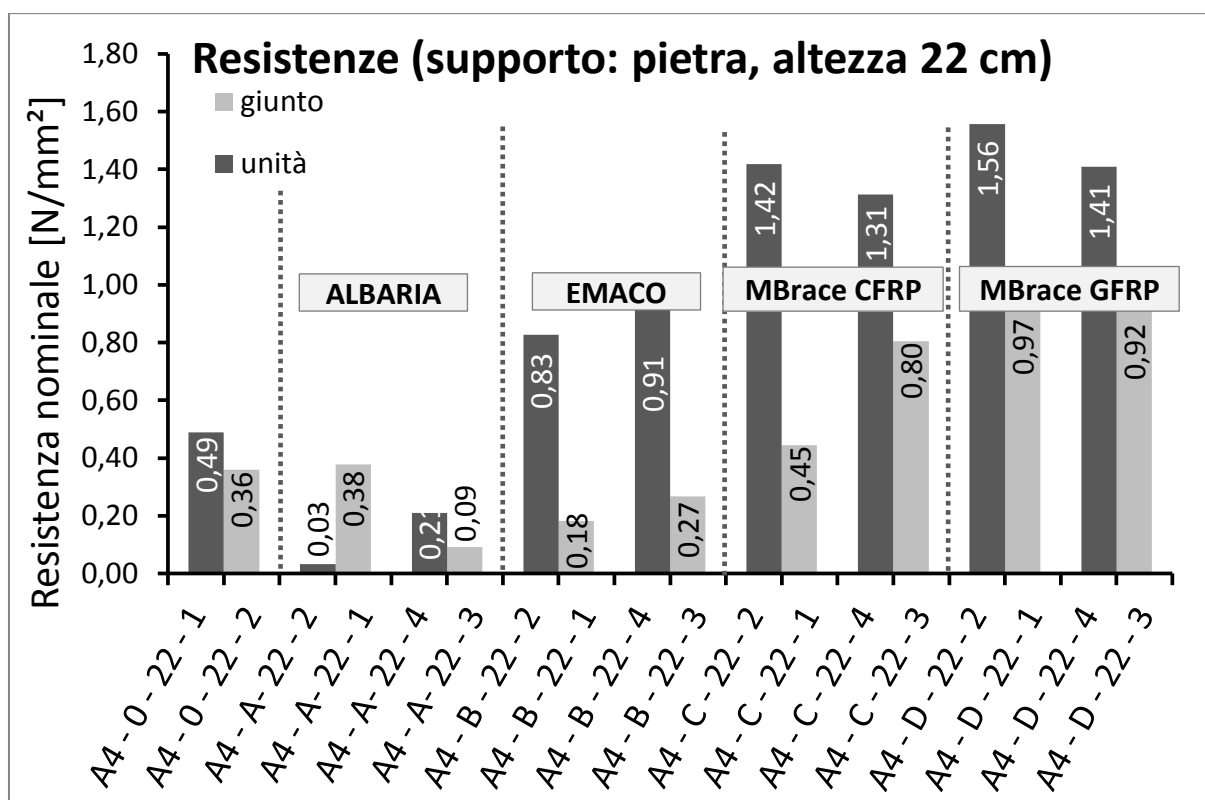
Grafico 4.31: resistenze per la fascia di altezza intermedia sul supporto in mattoni.

In Tabella 4.2 sono illustrate le variazioni percentuali massime della resistenza nominale tra strappi di controllo (senza composito) e strappi su supporti rinforzati con compositi per l'altezza massima di strappo.

**Tabella 4.3:** confronto percentuale delle resistenza tra strappi di controllo e strappi su supporti rinforzati (altezza intermedia).

		TRM ALBARIA	TRM EMACO	CFRP	GFRP
PIETRA	Unità	- 91%	-44%	+21%	+4.7%
	Giunto	-67%	-51%	+2.8%	+23%
MATTONE	Unità	-70%	-26%	-2.3%	+3.3%
	Giunto	-65%	-27%	+23%	+1.3%

Anche per l'altezza minima di strappo abbiamo le performance offerte dagli FRP sono migliori, anche se nel caso di GFRP la resistenza scende per il supporto in mattoni.



**Grafico 4.32:** resistenze per la fascia di altezza minima sul supporto in pietra.

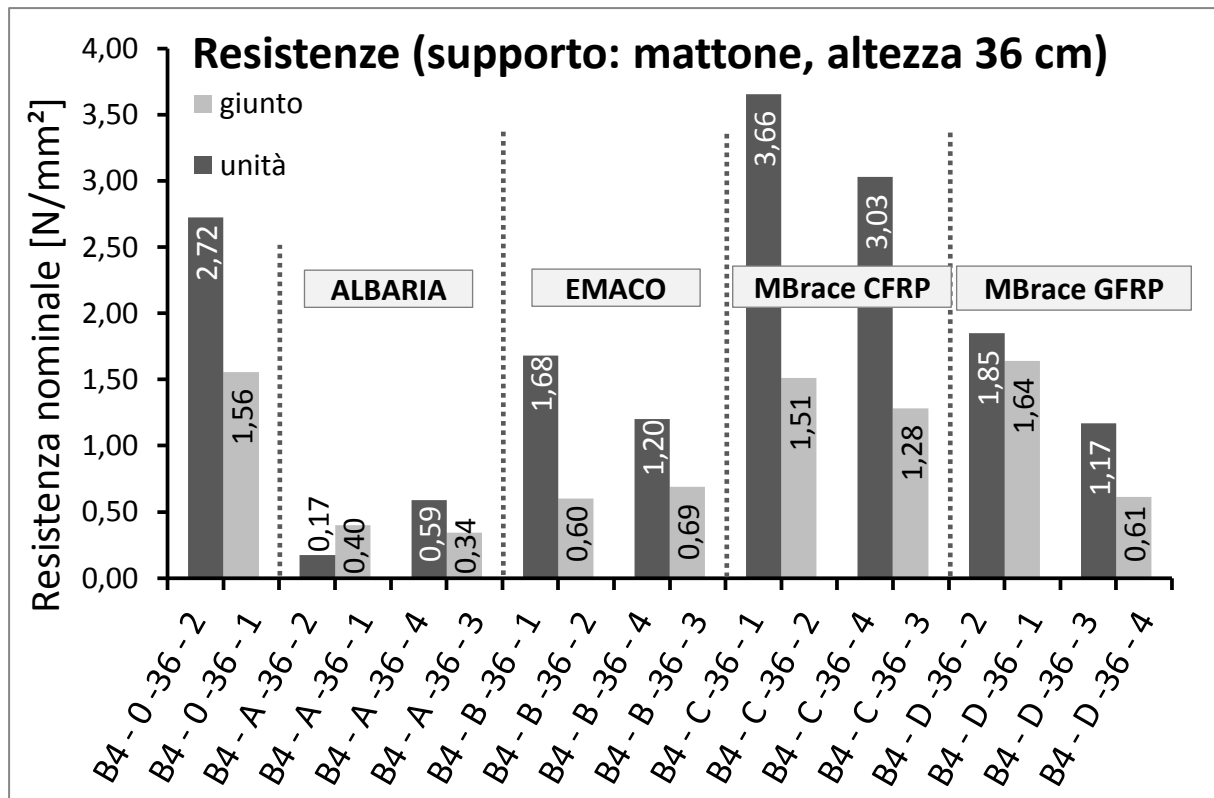


Grafico 4.33: resistenze per la fascia di altezza minima sul supporto in mattoni.

Le variazioni percentuali massime della resistenza nominale tra strappi di controllo (senza composito) e strappi su supporti rinforzati con compositi per l'altezza massima di strappo sono illustrate in Tabella 4.4.

Tabella 4.4 confronto percentuale delle resistenza tra strappi di controllo e strappi su supporti rinforzati (altezza minima).

		TRM ALBARIA	TRM EMACO	CFRP	GFRP
PIETRA	Unità	-90%	-30%	+10%	+20%
	Giunto	-33%	-68%	-11%	+35%
MATTONE	Unità	-85%	-42%	+35%	-39%
	Giunto	-72%	-51%	+5.7%	-14%

Come si nota le diminuzioni massime si hanno sempre per il TRM con matrice ALBARIA. Mentre le prestazioni migliori si hanno per il CFRP senza distinzione tra il supporto, come per esempio avviene per il GFRP che offre ottime prestazioni su pietra, e scarse su mattone.

		TRM ALBARIA	TRM EMACO	CFRP	GFRP	
PIETRA	Unità	- 89%	-67%	+3.6%	-5.8%	Zona indisturbata
	Giunto	-90%	-57%	-27%	+24%	
MATTONE	Unità	-49%	-59%	-0.7%	+12%	
	Giunto	-32%	-43%	+24%	-13%	
PIETRA	Unità	- 91%	-44%	+21%	+4.7%	Zona di transizione
	Giunto	-67%	-51%	+2.8%	+23%	
MATTONE	Unità	-70%	-26%	-2.3%	+3.3%	
	Giunto	-65%	-27%	+23%	+1.3%	
PIETRA	Unità	-90%	-30%	+10%	+20%	Zona di risalita di acqua e sali
	Giunto	-33%	-68%	-11%	+35%	
MATTONE	Unità	-85%	-42%	+35%	-39%	
	Giunto	-72%	-51%	+5.7%	-14%	
<b>Medie</b>		<b>-69%</b>	<b>-47%</b>	<b>+7%</b>	<b>+4%</b>	

Dalle variazioni delle resistenze nominali medie possiamo affermare che in generale i compositi a matrice inorganica offrono minori resistenze nominali.

#### 4.6 Confronto tra altezze

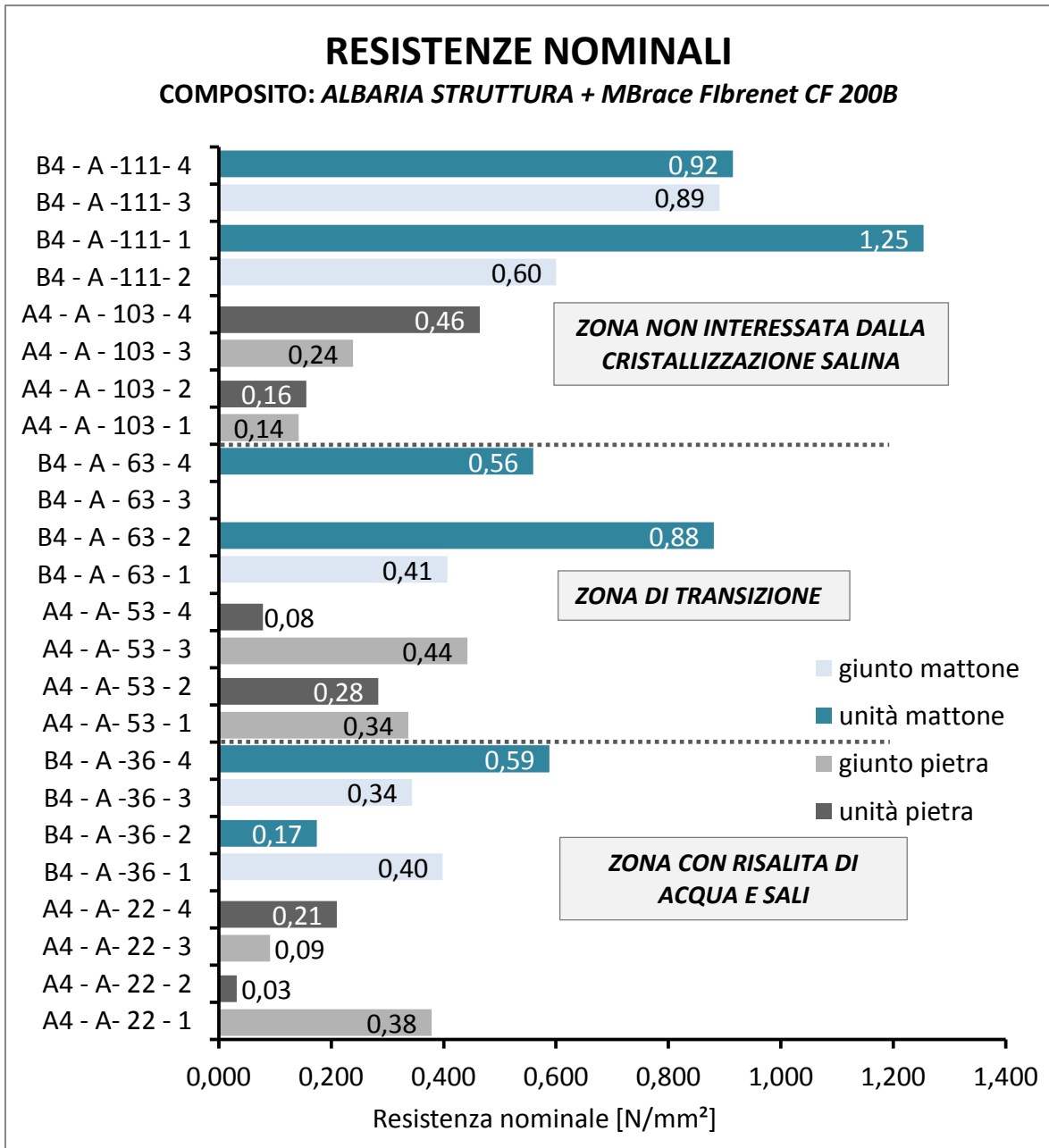
Per ogni pannello si sono individuate tre fasce di strappo, la più bassa è caratterizzata dalla risalita di acqua e sali, la zona intermedia è una zona di transizione tra quella degradata e quella più alta indisturbata. In questo paragrafo si andranno ad analizzare le resistenze in funzione delle varie zone. Per il supporto in pietra l'altezza massima di strappo corrisponde ad una altezza di 103 cm, mentre per il supporto in mattoni ad un'altezza di 111 cm.

La zona di transizione corrisponde ad una altezza di 53 cm per il supporto in pietra, e ad un'altezza di 63 cm per il supporto in mattoni. L'altezza di strappo per la zona degradata è pari a 22 cm per il modello in pietra e di 36 cm per quello in mattoni

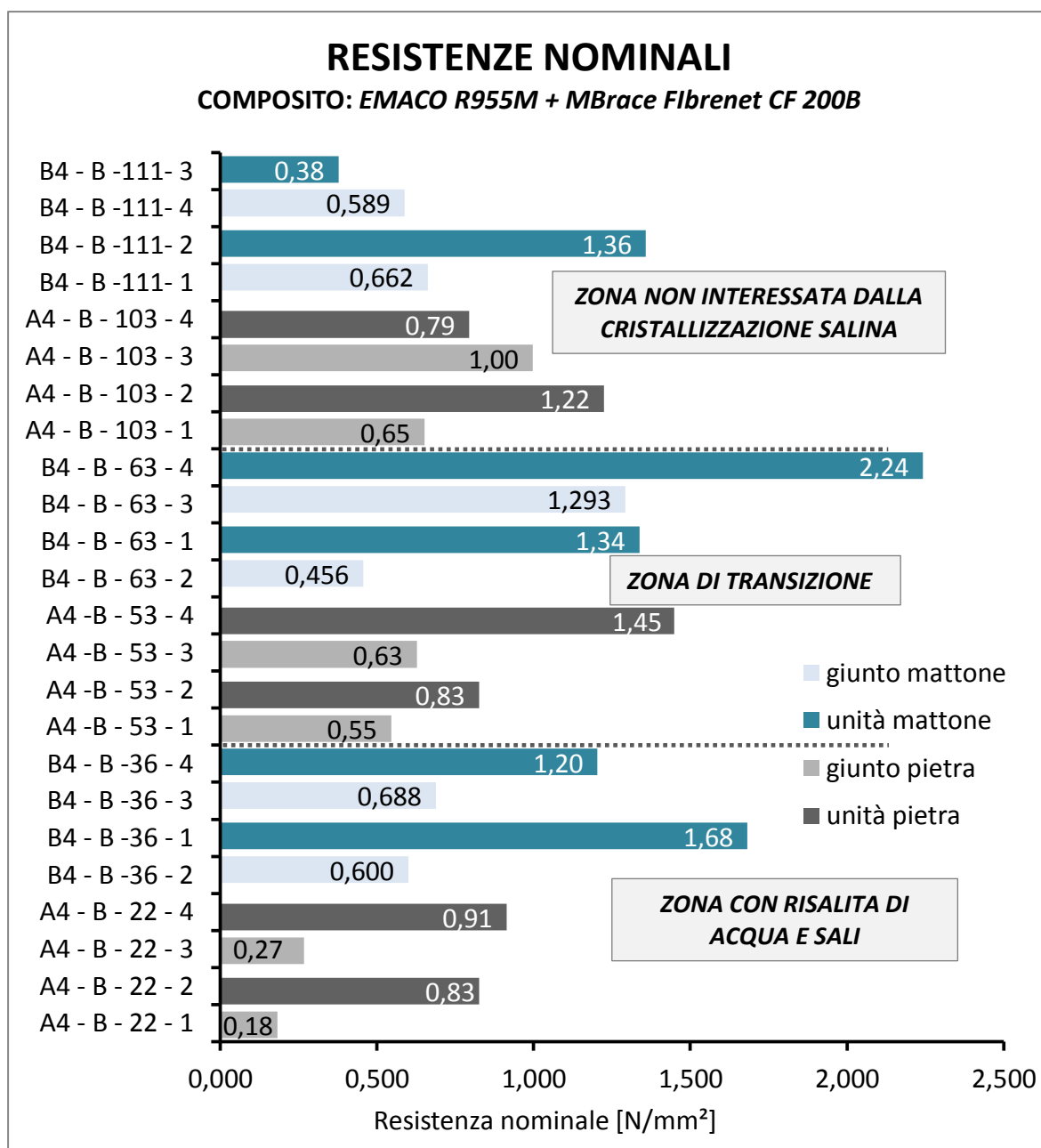
Nel Grafico 4.34 sono messe a confronto le resistenze nominali del composito con matrice ALBARIA in funzione della fascia del pannello e del supporto. Come si nota la tendenza

della resistenza è in diminuzione in funzione dell'altezza. In funzione dell'altezza le resistenze del composito hanno un decremento medio dell'65% e del 50% rispettivamente per le resistenze su unità mattone e in corrispondenza del giunto. Per il supporto pietra di ha un decremento medio del 61% per resistenze dell'unità e un aumento de 12% a cavallo del giunto. Per quanto riguarda la comparazione tra i supporti si nota che il composito offre maggiori prestazioni se applicato su mattoni piuttosto che su pietra.

Un confronto tra le resistenze nominali del composito con matrice EMACO in funzione della fascia del pannello e del supporto è presentato nel Grafico 4.35. Come si nota la zona che presenta valori di resistenza massima per entrambi i supporti è la zona di transizione, al di sotto della quale avviene comunque una diminuzione di resistenza. I valori della zona di transizione sono quindi stati considerati come massimi per calcolare le variazioni percentuali. In funzione dell'altezza le resistenze del composito hanno un decremento medio del 19% e del 24% rispettivamente per le resistenze su unità mattone e in corrispondenza del giunto. Per il supporto pietra di ha un decremento medio del 23% per resistenze dell'unità e del 80% a cavallo del giunto. Il decremento è quindi maggiore per il supporto in pietra, cosa che accadeva anche per l'altro composito FRCM.



**Grafico 4.34:** confronto resistenze nominali del composito con matrice ALBARIA al variare dell'altezza e del supporto;



**Grafico 4.35** confronto resistenze nominali del composito con matrice EMACO al variare dell'altezza e del supporto;

I comportamenti contrari del CFRP in funzione del supporto, osservati nel paragrafo precedente, si osservano anche nel Grafico 4.36, nel quale sono messe a confronto le resistenze nominali del composito CFRP in funzione della fascia del pannello e del supporto. In funzione dell'altezza le resistenze del composito hanno un aumento medio del 36% e dell'1.8% rispettivamente per le resistenze su unità mattone e in corrispondenza del giunto. Per il supporto pietra di ha un decremento medio del 57% per resistenze dell'unità e del 55% a cavallo del giunto. Nel Grafico 4.37 sono invece messe a confronto le resistenze nominali del composito GFRP. Come si nota la tendenza della



resistenza è in diminuzione in funzione dell'altezza. In funzione dell'altezza le resistenze del composito hanno un decremento medio del 34% per le resistenze su unità mattone e un aumento del 15% per le resistenze in corrispondenza del giunto. Per il supporto pietra si ha un decremento medio del 48% per resistenze dell'unità e del 60% a cavallo del giunto.

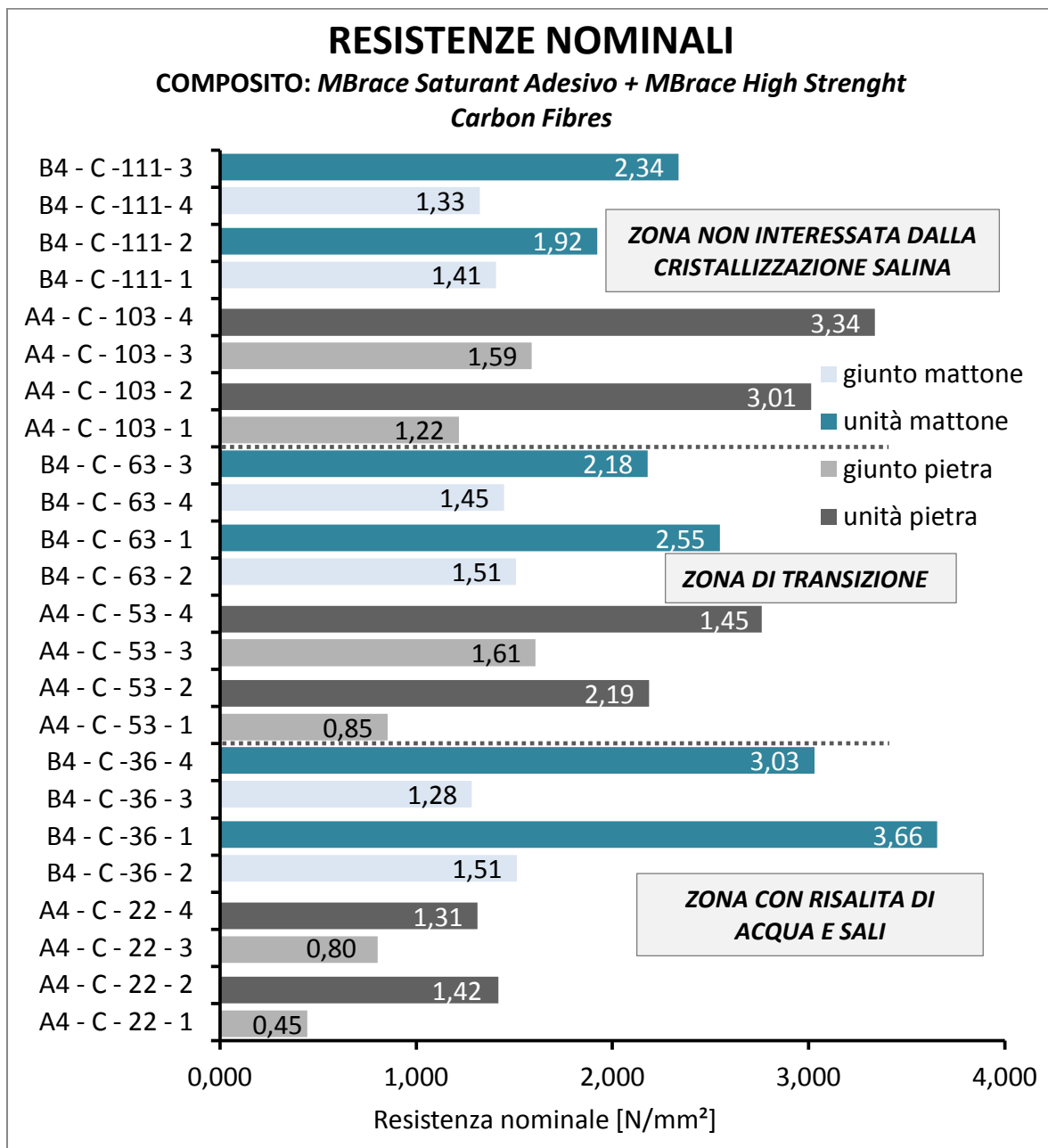
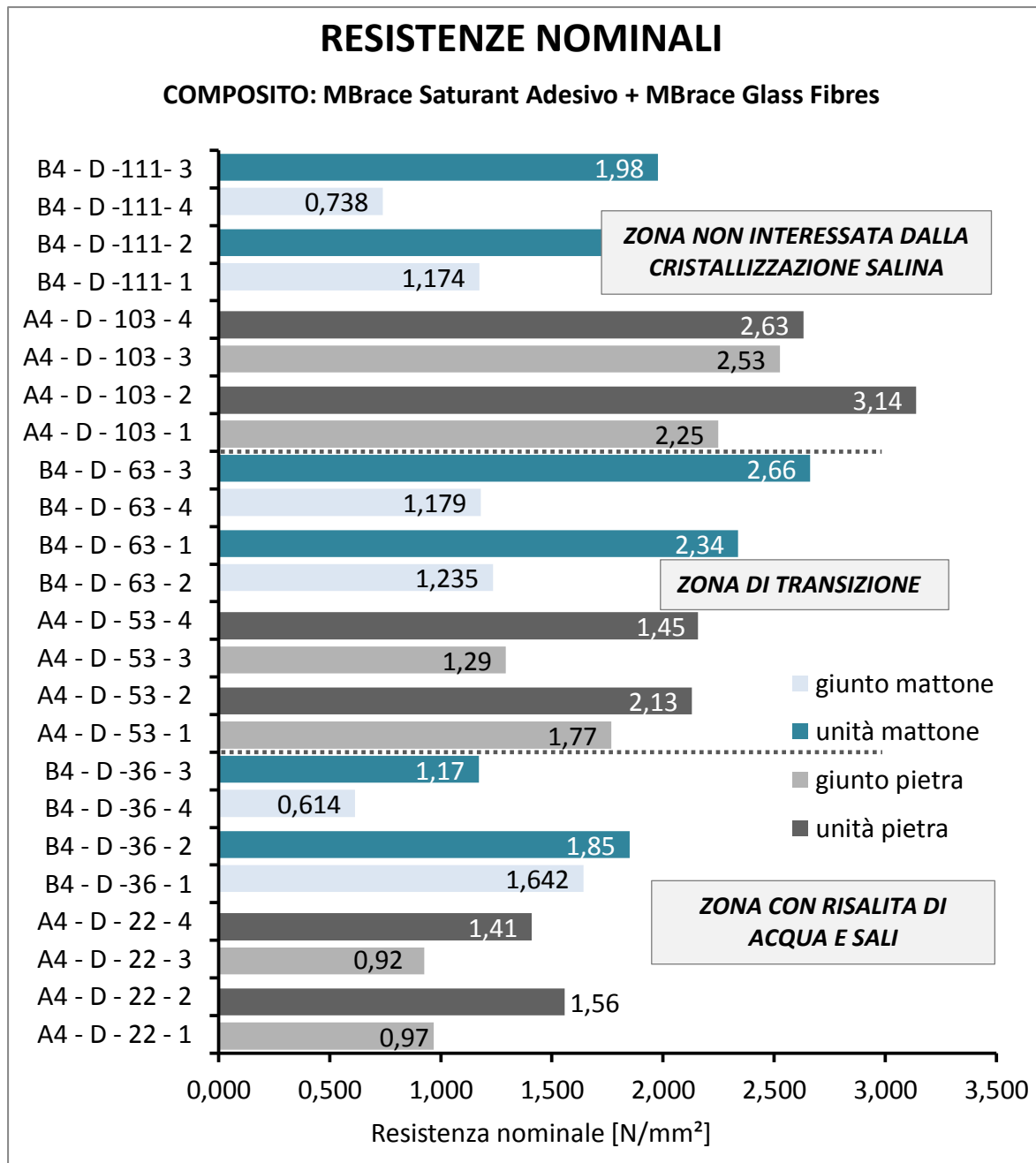


Grafico 4.36: confronto resistenze nominali del composito CFRP al variare dell'altezza e del supporto;



**Grafico 4.37:** confronto resistenze nominali del composito GFRP al variare dell'altezza e del supporto;

Per meglio sintetizzare le maggiori differenze tra le performance dei compositi ci si serve della Tabella 4.5, in cui si comparano le variazioni percentuali delle resistenze nominali in funzione dell'altezza. La voce della tabella "funzione dell'altezza" sta ad indicare la presenza o meno di un legame tra il parametro in esame e la diminuzione dell'altezza, cioè in funzione dell'avvicinamento alla parte soggetta a cristallizzazione.

Tabella 4.5: variazioni percentuali della resistenza nominale in funzione dell'altezza;

COMPOSITO	SUPPORTO	RESISTENZE NOMINALI					
		Unità		Giunto		Unità > giunto	Unità < giunto
		Funzione dell'altezza	Variazione % MAX	Funzione dell'altezza	Variazione % MAX		
TRM ALBARIA	Pietra	SI	-61%	SI	+12%		X
	Mattone	SI	-65%	SI	-50%	X	
TRM EMACO	Pietra	SI *	-23%	SI *	-80%	X	
	Mattone	SI *	-19%	SI *	-24%	X	
CFRP	Pietra	SI	-57%	SI	-55%	X	
	Mattone	SI	+36%	SI	+1.8%	X	
GFRP	Pietra	SI	-48%	SI	-60%	X	
	Mattone	SI	-34%	SI	+12%	X	

\* Zona di transizione con valori massimi;

Sono state evidenziate in tabella i risultati che si distaccano maggiormente da tutti gli altri. Per esempio il fatto che per il TRM ALBARIA risultino valori di resistenza maggiori per i giunti piuttosto che per le unità, con addirittura un aumento di queste resistenze scendendo con l'altezza verso la zona di cristallizzazione salina. In secondo luogo si evidenzia il comportamento delle resistenze del CFRP per il supporto in mattoni, le quali presentano un incremento considerevole avvicinandosi alla zona degradata.

In generale si può comunque affermare che avvicinandosi alla zona caratterizzata dalla risalita di acqua e sali (quella più bassa) si ha un decremento delle resistenze, sia per quelle in corrispondenza del giunto che per quelle sull'unità. Il composito con variazione percentuale maggiore è il TRM con matrice ALBARIA.



# Conclusioni

La tesi si propone di fornire un contributo all'indagine degli effetti della cristallizzazione salina agente su substrati murari nei confronti dell'adesione di materiali compositi ad essi applicati. Una delle caratteristiche innovative della sperimentazione risiede nel fatto che lo studio della durabilità è condotto su modelli in scala reale all'aperto: i modelli sono stati edificati negli anni '90 dal Politecnico di Milano presso il cantiere di scuola edile (ESEM) e sono sempre esposte all'interazione con l'ambiente esterno, e non in condizioni riprodotte in laboratorio. La sperimentazione prende in esame quattro tipologie di compositi, due a matrice inorganica, una malta di calce idraulica e una malta cementizia accoppiate ad una rete in fibra di carbonio (TRM), e due a matrice organica, costituiti da resina epossidica accoppiata a tessuto unidirezionale in fibra di carbonio (CFRP) e in fibra di vetro (GFRP). Tali materiali si sono applicati ad pannello in mattoni pieni in laterizio e uno in blocchi di pietra Serena, i quali, dopo un periodo di due mesi, necessario alla maturazione delle matrici inorganiche, sono stati sottoposti a cicli di cristallizzazione. Come risultato di questi cicli i pannelli murari si presentavano divisi in tre fasce: la zona più bassa (di circa 30-45 cm a partire dal livello del terreno) caratterizzata da risalita di acqua e cristallizzazione salina, una zona di transizione immediatamente soprastante, ampia circa 30-40 cm, e la fascia più alta risultata pressoché indisturbata. Il supporto in mattoni presentava una zona di degrado più estesa del supporto in pietra, questo fenomeno è da imputare alla porosità del substrato: il mattone più poroso permette un assorbimento e una risalita capillare maggiore.

Come metodo di misura e qualificazione dell'adesione si è utilizzata la prova di pull-off, mediante la quale si possono valutare modalità di rottura e la resistenza nominale a trazione per strappo in direzione perpendicolare alla superficie. Le prove pull-off sono state eseguite su i quattro diversi tipi di composito, in relazione alla loro applicazione su un supporto in pietra o in mattoni, e in funzione delle fasce di degrado di tali supporti.

Per quanto riguarda la modalità di rottura se ne possono presentare di quattro tipi: può avvenire una rottura coesiva nel supporto, una rottura adesiva all'interfaccia supporto/rinforzo, una rottura all'interno del rinforzo oppure una rottura all'interfaccia rinforzo/adesivo. Osservando i dati ottenuti ne risulta una sostanziale differenza tra matrici inorganiche e organiche. Le matrici organiche presentano, nella quasi totalità dei casi, rotture di tipo coesivo che avvengono nel substrato, senza distinzione tra tipologia di supporto o tipologia di fibre (carbonio o vetro), a conferma dell'ottima aderenza offerta da questi compositi. Per le matrici inorganiche invece è necessario distinguere le due tipologie di matrice e anche il tipo di supporto.

Per il TRM con matrice a base di malta (ALBARIA) applicato al supporto in pietra le rotture si sono verificate quasi sempre all'interfaccia fibre/matrice. Anche in riferimento al supporto in mattoni le modalità di rottura più frequenti si sono verificate all'interfaccia fibre/matrice, in questo caso si presenta però anche una bassa percentuale di rotture miste nel supporto e all'interfaccia composito/substrato. Risultano rotture miste probabilmente perché, essendoci sempre una percentuale di giunto nei tasselli in mattoni, la malta presenta una resistenza nominale inferiore rispetto al mattone.

Per quanto riguarda il TRM a matrice cementizia (EMACO) c'è una netta differenza di comportamento in relazione all'applicazione su pietra e su mattone. Sul supporto in pietra non c'è stata un'adesione ottimale, infatti si sono verificate più frequentemente rotture in corrispondenza dell'interfaccia composito/substrato, con alcuni casi di rottura all'interfaccia fibra/matrice, o rotture miste, imputabili alla presenza del giunto di malta. Sul supporto in mattoni l'adesione è notevolmente migliorata infatti si verificano quasi tutte rotture di tipo coesivo nel substrato.

Se si analizzano le resistenze nominali, risultato del rapporto tra carico di rottura e area nominale, si possono riportare diverse considerazioni. Per quanto riguarda il TRM con matrice a base di malta (ALBARIA) applicato su pietra, i valori delle resistenze sono molto variabili: visto che la modalità di rottura avviene quasi sempre all'interfaccia fibre/matrice, tale variabilità può essere causata dal fatto che la posizione della rete all'interno del composito non è costante, può essere più o meno vicino al substrato. Non è quindi possibile identificare l'influenza della cristallizzazione perché l'interfaccia ha mantenuto l'aderenza, mentre è ceduto il composito. Nel supporto in mattone, probabilmente si è verificata una migliore maturazione della matrice rispetto alla pietra. Il

valore di resistenza nominale media è infatti superiore a quello della pietra, e si nota anche il calare delle resistenze nominali all'aumentare del degrado del substrato. La minore resistenza presentata per la in pietra potrebbe essere influenzata dalla diversa maturazione della matrice. Dalle termografie effettuate una settimana dopo l'applicazione è evidente come la matrice di malta di calce risulti ancora molto umida e fredda, a testimonianza del fatto che ha una maturazione che necessita di molta acqua e piuttosto lenta a confronto della matrice cementizia.

Per il TRM a matrice cementizia (EMACO) l'adesione al supporto in pietra non è delle migliori, confermato anche dalla frequenza della rottura in corrispondenza dell'interfaccia composito/substrato. Confrontando tali rotture si nota una diminuzione della resistenza nominale avvicinandosi alla zona più bassa del pannello, a conferma del fatto che sulla fascia più degradata l'adesione è ancora peggiore. Per il supporto in mattoni l'aderenza è molto buona infatti la modalità di rottura è di tipo coesivo. Nella prima fascia verticale di TRM non si hanno grandi variazioni in funzione dell'altezza, le resistenze nominali risultano comparabili. Nella seconda fascia verticale invece risulta che le resistenze nominali siano maggiori nella fascia intermedia. Questo fatto può essere spiegato da tre ipotesi: la prima è data dal fatto che per i due tasselli della zona intermedia si è strappato uno spessore considerevole di mattone rispetto a quelli delle altre zone e quindi il carico di rottura potrebbe risultare maggiore; in seconda ipotesi potrebbe essere che la matrice cementizia aderisca meglio ai mattoni degradati rispetto ai mattoni "faccia a vista" sabbiati della zona più alta del pannello; come terza considerazione, visto che alcuni prelievi di sali fatti in campagne precedenti riportano valori di concentrazione maggiori di  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sulla fascia alta del pannello rispetto a quella inferiore, è possibile che i sali abbiano influenzato i risultati di adesione, come in effetti ci si aspetterebbe; questa questione andrebbe verificata e approfondita per analizzare anche l'effetto del solfato di sodio sul supporto in mattoni.

Per il CFRP abbiamo due andamenti opposti nelle resistenze: per il supporto in pietra abbiamo un calo sensibile avvicinandosi alla zona più degradata del pannello, cioè la fascia di altezza inferiore; mentre per il supporto in mattoni le resistenze aumentano scendendo con l'altezza (questo vale anche per i campioni di controllo senza compositi). Questo dato potrebbe andare a confermare i dati di concentrazione salina delle

campagne precedenti, i quali risultavano maggiori nella fascia alta del pannello in mattoni, anche se in merito a questa questione si necessitano maggiori approfondimenti. Per il GFRP abbiamo risultati comparabili in termini di resistenza a quelli avuti per il CFRP per quanto riguarda il supporto in pietra, con decremento di valori avvicinandosi alla zona degradata. Risulta controcorrente invece quello che avviene per il supporto in mattoni, in cui le resistenze aumentano diminuendo con l'altezza. Secondo l'andamento delle resistenze per il CFRP e dei campioni di controllo le resistenze dovrebbero aumentare avvicinandosi alla zona inferiore, invece avviene il contrario.

La presenza del giunto influenza negativamente la resistenza nominale.

In conclusione possiamo affermare che per quanto riguarda il TRM con matrice a base di malta di calce non si può riscontrare una corrispondenza tra il degrado del supporto e l'aderenza del composito visto il fallimento in corrispondenza dell'interfaccia matrice/rinforzo, ma possiamo comunque arrivare ad alcune considerazioni. Si è riscontrata una certa difficoltà nella realizzazione di un pacchetto, derivante dalla difficile calibrazione della posizione della rete e dalla fluidità della malta che probabilmente non riesce ad impregnare completamente le fibre. L'anello debole risulta quindi essere il rinforzo e l'interfaccia con la matrice.

Per il composito TRM a matrice cementizia è risultato che l'aderenza è influenzata dalla tipologia di supporto. Per spiegare tale comportamento andrebbero indagate le operazioni preliminari di messa in opera come per esempio la preparazione dei supporti: la difficile aderenza al supporto in pietra potrebbe essere causato da una saturazione non adeguata. Oppure può essere che entri in gioco la porosità del supporto: il mattone essendo più poroso può trattenere una quantità maggiore di acqua e portare ad una maturazione migliore, anche se elevata porosità può portare ad un assorbimento capillare maggiore, a una sottrazione d'acqua e quindi ad una non corretta maturazione della malta.

Per CFRP e GFRP l'adesione risulta ottima senza distinzione di supporto. Visto che le rotture si verificano nel substrato possiamo affermare che i valori delle resistenze sono influenzate soprattutto dal degrado del supporto, senza essere influenzate dalla tipologia di FRP impiegata.

In generale la presenza del giunto tende a far diminuire la resistenza nominale.



Alla luce delle esperienze condotte, risulta auspicabile, in futuro, continuare la sperimentazione su murature all'aperto, caratterizzate dalla continua interazione con l'ambiente esterno; anche un monitoraggio di tali condizioni ambientali potrebbe risultare utile. Altro possibile sviluppo futuro potrebbe riguardare l'indagine sulla messa in opera di TRM con malta di calce, in relazione allo spessore finale del pacchetto, alla posizione e impregnazione delle fibre. Potrebbe essere interessante studiare diversi spessori di pacchetto e varie tipologie di fibre per individuare quali possano essere le condizioni che offrono le migliori prestazioni. Risulta necessario anche indagare il comportamento del composito a matrice cementizia in riferimento all'aderenza su diverse tipologie di supporti, per stabilire quali condizioni (saturazione, porosità del substrato) vanno ad influenzarne l'adesione. Per gli FRP si possono ricercare altri fattori che influiscono sulla durabilità, oppure continuare la sperimentazione per determinare se altre tipologie di sali (come per esempio cloruri, nitrati o nitriti) o la concentrazione di questi possono influenzare diversamente l'adesione.



# Appendice

## TABELLA DEI RISULTATI SPERIMENTALI

**Tabella 0.1:** tabella riassuntiva dei risultati sperimentali derivati dalle prove pull-off.

CAMPIONE	SUPPORTO	TIPOLOGIA MATRICE	COMPOSITO	ALTEZZA [cm]	POSIZIONE	NOME CAMPIONE	MODALITÀ ROTTURA	DIAMETRO [mm]	AREA [mm <sup>2</sup> ]	CARICO MAX [kN]	RESISTENZA [N/mm <sup>2</sup> ]
1	pietra	inorganica	TRM ALBARIA	103	giunto	A4 - A - 103 - 1	C	/	2603	0.370	0.142
2	pietra	inorganica	TRM ALBARIA	103	unità	A4 - A - 103 - 2	B	/	2761	0.429	0.155
3	pietra	inorganica	TRM ALBARIA	103	giunto	A4 - A - 103 - 3	C	/	2983	0.711	0.238
4	pietra	inorganica	TRM ALBARIA	103	unità	A4 - A - 103 - 4	C	/	2699	1.252	0.464
5	pietra	inorganica	TRM ALBARIA	53	giunto	A4 - A - 53 - 1	C	/	2970	1.000	0.337
6	pietra	inorganica	TRM ALBARIA	53	unità	A4 - A - 53 - 2	C	/	3009	0.853	0.283
7	pietra	inorganica	TRM ALBARIA	53	giunto	A4 - A - 53 - 3	C	/	2365	1.046	0.442
8	pietra	inorganica	TRM ALBARIA	53	unità	A4 - A - 53 - 4	C	/	3009	0.236	0.078
9	pietra	inorganica	TRM ALBARIA	22	giunto	A4 - A - 22 - 1	C	/	2986	1.130	0.378
10	pietra	inorganica	TRM ALBARIA	22	unità	A4 - A - 22 - 2	C	/	3018	0.096	0.032
11	pietra	inorganica	TRM ALBARIA	22	giunto	A4 - A - 22 - 3	B	/	2766	0.253	0.091
12	pietra	inorganica	TRM ALBARIA	22	unità	A4 - A - 22 - 4	C	/	2722	0.572	0.210
13	pietra	inorganica	TRM EMACO	103	giunto	A4 - B - 103 - 1	B+C	/	2703	1.762	0.652
14	pietra	inorganica	TRM EMACO	103	unità	A4 - B - 103 - 2	B	/	3155	3.864	1.225
15	pietra	inorganica	TRM EMACO	103	giunto	A4 - B - 103 - 3	C	/	3064	3.054	0.997
16	pietra	inorganica	TRM EMACO	103	unità	A4 - B - 103 - 4	C	/	3068	2.437	0.794
17	pietra	inorganica	TRM EMACO	53	giunto	A4 - B - 53 - 1	B	/	3002	1.639	0.546

## Appendice

18	pietra	inorganica	TRM EMACO	53	unità	A4 - B - 53 - 2	B+C	/	2738	2.264	0.827
19	pietra	inorganica	TRM EMACO	53	unità	A4 - B - 53 - 3	C	/	2897	1.820	0.628
20	pietra	inorganica	TRM EMACO	53	giunto	A4 - B - 53 - 4	B+A	/	2719	3.940	1.449
21	pietra	inorganica	TRM EMACO	22	giunto	A4 - B - 22 - 1	B+A	/	2903	0.531	0.183
22	pietra	inorganica	TRM EMACO	22	unità	A4 - B - 22 - 2	B+A	/	2886	2.386	0.827
23	pietra	inorganica	TRM EMACO	22	giunto	A4 - B - 22 - 3	A	/	2700	0.722	0.267
24	pietra	inorganica	TRM EMACO	22	unità	A4 - B - 22 - 4	C	/	2495	2.279	0.913
25	pietra	epossidica	CFRP	103	giunto	A4 - C - 103 - 1	A	56.6	2516	3.062	1.217
26	pietra	epossidica	CFRP	103	unità	A4 - C - 103 - 2	A	56.6	2516	7.582	3.013
27	pietra	epossidica	CFRP	103	giunto	A4 - C - 103 - 3	A	56.1	2472	3.929	1.590
28	pietra	epossidica	CFRP	103	unità	A4 - C - 103 - 4	A	56.6	2516	8.398	3.338
29	pietra	epossidica	CFRP	53	giunto	A4 - C - 53 - 1	A	56.6	2516	2.149	0.854
30	pietra	epossidica	CFRP	53	unità	A4 - C - 53 - 2	A	56.6	2516	5.502	2.187
31	pietra	epossidica	CFRP	53	giunto	A4 - C - 53 - 3	A	56.6	2516	4.048	1.609
32	pietra	epossidica	CFRP	53	unità	A4 - C - 53 - 4	A	56.6	2516	6.950	2.762
33	pietra	epossidica	CFRP	22	giunto	A4 - C - 22 - 1	B+C	56.1	2472	1.100	0.445
34	pietra	epossidica	CFRP	22	unità	A4 - C - 22 - 2	A	56.6	2516	3.571	1.419
35	pietra	epossidica	CFRP	22	giunto	A4 - C - 22 - 3	A	56.6	2516	2.023	0.804
36	pietra	epossidica	CFRP	22	unità	A4 - C - 22 - 4	A+B	56.6	2516	3.303	1.313
37	pietra	epossidica	GFRP	103	giunto	A4 - D - 103 - 1	A	56.6	2516	5.659	2.249
38	pietra	epossidica	GFRP	103	unità	A4 - D - 103 - 2	A	57.0	2552	8.011	3.139
39	pietra	epossidica	GFRP	103	giunto	A4 - D - 103 - 3	A	56.6	2516	6.356	2.526
40	pietra	epossidica	GFRP	103	unità	A4 - D - 103 - 4	A	56.6	2516	6.623	2.632
41	pietra	epossidica	GFRP	53	giunto	A4 - D - 53 - 1	A	56.6	2516	4.446	1.767
42	pietra	epossidica	GFRP	53	unità	A4 - D - 53 - 2	A	56.6	2516	5.361	2.131
43	pietra	epossidica	GFRP	53	giunto	A4 - D - 53 - 3	A	56.6	2516	3.251	1.292
44	pietra	epossidica	GFRP	53	unità	A4 - D - 53 - 4	A	56.6	2516	5.427	2.157
45	pietra	epossidica	GFRP	22	giunto	A4 - D - 22 - 1	A+C	56.6	2516	2.435	0.968
46	pietra	epossidica	GFRP	22	unità	A4 - D - 22 - 2	A	56.6	2516	3.918	1.557
47	pietra	epossidica	GFRP	22	giunto	A4 - D - 22 - 3	A+B	56.6	2516	2.326	0.924

48	pietra	epossidica	GFRP	22	unità	A4 - D - 22 - 4	A	56.6	2516	3.546	1.409
49	pietra	/	/	103	unità	A4 - 0 - 103 - 1	A	53.6	2256	6.550	2.903
50	pietra	/	/	103	giunto	A4 - 0 - 103 - 2	A	57.2	2565	5.217	2.034
51	pietra	/	/	53	unità	A4 - 0 - 53 - 1	A	55.8	2445	2.438	0.997
52	pietra	/	/	53	giunto	A4 - 0 - 53 - 2	A	54.0	2290	1.062	0.464
53	pietra	/	/	22	unità	A4 - 0 - 22 - 1	A+D	52.0	2124	1.037	0.488
54	pietra	/	/	22	giunto	A4 - 0 - 22 - 2	A	52.5	2165	0.780	0.360
55	pietra	epossidica	CFRP	107	giunto	A2 - C - 107 - 1	A	56.6	2516	5.432	2.159
56	pietra	epossidica	CFRP	107	unità	A2 - C - 107 - 2	A	56.6	2516	8.140	3.235
57	pietra	epossidica	CFRP	22	unità	A2 - C - 22 - 1	A	56.6	2516	3.612	1.436
58	pietra	epossidica	CFRP	22	giunto	A2 - C - 22 - 2	A	56.6	2516	1.440	0.572
59	mattone	inorganica	TRM ALBARIA	111	unità	B4 - A - 111 - 1	C	/	2571	3.224	1.254
60	mattone	inorganica	TRM ALBARIA	111	giunto	B4 - A - 111 - 2	A+B	/	3116	1.871	0.600
61	mattone	inorganica	TRM ALBARIA	111	giunto	B4 - A - 111 - 3	C	/	2484	2.212	0.891
62	mattone	inorganica	TRM ALBARIA	111	unità	B4 - A - 111 - 4	C	/	2736	2.504	0.915
63	mattone	inorganica	TRM ALBARIA	63	giunto	B4 - A - 63 - 1	A+B	/	3199	1.300	0.406
64	mattone	inorganica	TRM ALBARIA	63	unità	B4 - A - 63 - 2	C	/	2700	2.378	0.881
65	mattone	inorganica	TRM ALBARIA	63	giunto	B4 - A - 63 - 3	D	/		/	/
66	mattone	inorganica	TRM ALBARIA	63	unità	B4 - A - 63 - 4	C	/	3063	1.712	0.559
67	mattone	inorganica	TRM ALBARIA	36	giunto	B4 - A - 36 - 1	C	/	3250	1.295	0.398
68	mattone	inorganica	TRM ALBARIA	36	unità	B4 - A - 36 - 2	B+A	/	2972	0.518	0.174
69	mattone	inorganica	TRM ALBARIA	36	giunto	B4 - A - 36 - 3	C	/	2720	0.936	0.344
70	mattone	inorganica	TRM ALBARIA	36	unità	B4 - A - 36 - 4	C	/	2823	1.661	0.588
71	mattone	inorganica	TRM EMACO	111	giunto	B4 - B - 111 - 1	A	/	3029	2.006	0.662
72	mattone	inorganica	TRM EMACO	111	unità	B4 - B - 111 - 2	A	/	3138	4.262	1.358
73	mattone	inorganica	TRM EMACO	111	unità	B4 - B - 111 - 3	B+A	/	2878	1.087	0.378
74	mattone	inorganica	TRM EMACO	111	giunto	B4 - B - 111 - 4	A	/	3272	1.927	0.589
75	mattone	inorganica	TRM EMACO	63	unità	B4 - B - 63 - 1	A	/	2989	3.999	1.338
76	mattone	inorganica	TRM EMACO	63	giunto	B4 - B - 63 - 2	A	/	3737	1.704	0.456

## Appendice


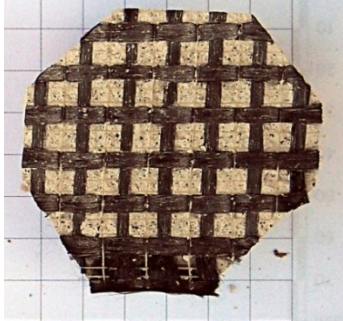






77	mattone	inorganica	TRM EMACO	63	giunto	B4 - B - 63 - 3	A	/	3155	4.080	1.293
78	mattone	inorganica	TRM EMACO	63	unità	B4 - B - 63 - 4	A	/	2989	6.700	2.242
79	mattone	inorganica	TRM EMACO	36	unità	B4 - B - 36 - 1	A	/	3319	5.583	1.682
80	mattone	inorganica	TRM EMACO	36	giunto	B4 - B - 36 - 2	A	/	3160	1.896	0.600
81	mattone	inorganica	TRM EMACO	36	giunto	B4 - B - 36 - 3	A+B	/	3466	2.385	0.688
82	mattone	inorganica	TRM EMACO	36	unità	B4 - B - 36 - 4	A	/	3308	3.981	1.203
83	mattone	epossidica	CFRP	111	giunto	B4 - C - 111 - 1	A	56.6	2516	3.540	1.407
84	mattone	epossidica	CFRP	111	unità	B4 - C - 111 - 2	A	56.6	2516	4.838	1.923
85	mattone	epossidica	CFRP	111	unità	B4 - C - 111 - 3	A	56.6	2516	5.880	2.337
86	mattone	epossidica	CFRP	111	giunto	B4 - C - 111 - 4	A	56.6	2516	3.334	1.325
87	mattone	epossidica	CFRP	63	unità	B4 - C - 63 - 1	A	56.6	2516	6.410	2.548
88	mattone	epossidica	CFRP	63	giunto	B4 - C - 63 - 2	A	56.6	2516	3.798	1.509
89	mattone	epossidica	CFRP	63	unità	B4 - C - 63 - 3	A	56.6	2516	5.483	2.179
90	mattone	epossidica	CFRP	63	giunto	B4 - C - 63 - 4	A	56.6	2516	3.643	1.448
91	mattone	epossidica	CFRP	36	unità	B4 - C - 36 - 1	A	56.6	2516	9.199	3.656
92	mattone	epossidica	CFRP	36	giunto	B4 - C - 36 - 2	A	56.6	2516	3.807	1.513
93	mattone	epossidica	CFRP	36	giunto	B4 - C - 36 - 3	A	56.6	2516	3.229	1.283
94	mattone	epossidica	CFRP	36	unità	B4 - C - 36 - 4	A	56.6	2516	7.622	3.029
95	mattone	epossidica	GFRP	111	giunto	B4 - D - 111 - 1	A	56.6	2516	2.953	1.174
96	mattone	epossidica	GFRP	111	unità	B4 - D - 111 - 2	A	56.6	2516	7.058	2.805
97	mattone	epossidica	GFRP	111	unità	B4 - D - 111 - 3	A	56.6	2516	4.974	1.977
98	mattone	epossidica	GFRP	111	giunto	B4 - D - 111 - 4	A	56.6	2516	1.857	0.738
99	mattone	epossidica	GFRP	63	unità	B4 - D - 63 - 1	A	56.6	2516	5.884	2.339
100	mattone	epossidica	GFRP	63	giunto	B4 - D - 63 - 2	A	56.6	2516	3.108	1.235
101	mattone	epossidica	GFRP	63	unità	B4 - D - 63 - 3	A	56.6	2516	6.700	2.663
102	mattone	epossidica	GFRP	63	giunto	B4 - D - 63 - 4	A	56.6	2516	2.967	1.179
103	mattone	epossidica	GFRP	36	giunto	B4 - D - 36 - 1	A	56.6	2516	4.131	1.642
104	mattone	epossidica	GFRP	36	unità	B4 - D - 36 - 2	A	56.6	2516	4.652	1.849
105	mattone	epossidica	GFRP	36	unità	B4 - D - 36 - 3	A	56.6	2516	2.945	1.170
106	mattone	epossidica	GFRP	36	giunto	B4 - D - 36 - 4	A	56.6	2516	1.546	0.614




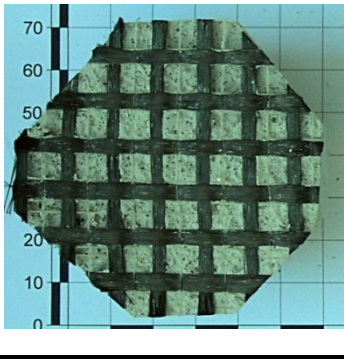

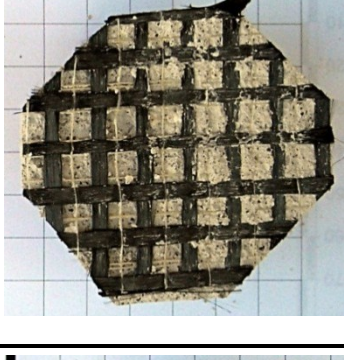


107	mattone	/	/	111	giunto	B4 - 0 -111- 1	A+D	56.6	2516	2.109	0.838
108	mattone	/	/	111	unità	B4 - 0 -111- 2	A	56.6	2516	4.228	1.680
109	mattone	/	/	63	giunto	B4 - 0 - 63 - 1	A+D	56.6	2516	2.298	0.913
110	mattone	/	/	63	unità	B4 - 0 - 63 - 2	A	56.6	2516	5.956	2.367
111	mattone	/	/	36	giunto	B4 - 0 -36 - 1	A	56.6	2516	3.914	1.556
112	mattone	/	/	36	unità	B4 - 0 -36 - 2	A	56.6	2516	6.855	2.724






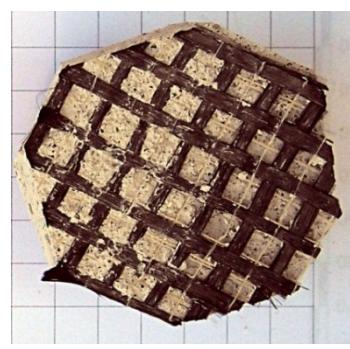









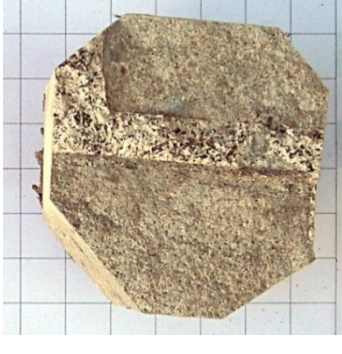





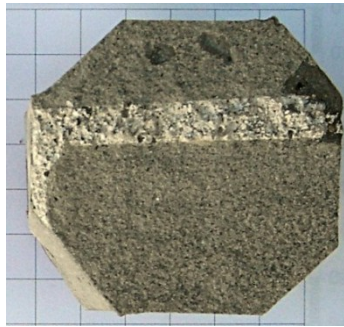



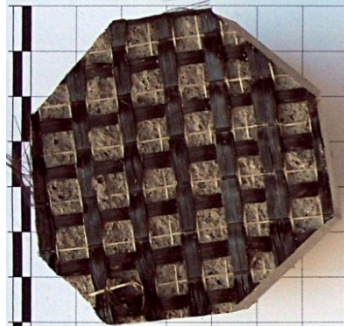

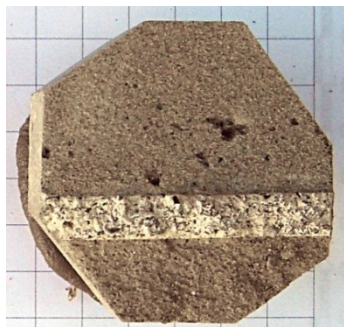
**CATALOGAZIONE CAMPIONI**



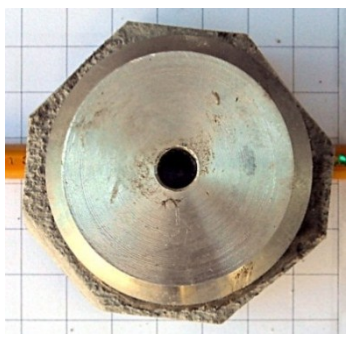
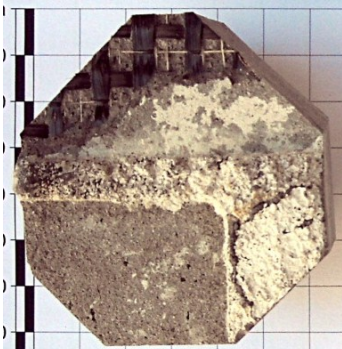




<u>SUPPORTO: PIETRA. pannello A4</u>		
<u>COMPOSITO: TRM ALBARIA</u>		
		<b>Nome:</b> A4-A-22-1 <b>Altezza strappo:</b> 22 cm <b>Posizione:</b> giunto <b>Modalità rottura:</b> C <b>Carico di rottura:</b> 1.130 kN <b>Area:</b> 2986 mm <sup>2</sup> <b>Resistenza nominale:</b> 0.38 kN/mm <sup>2</sup>
		<b>Nome:</b> A4-A-22-2 <b>Altezza strappo:</b> 22 cm <b>Posizione:</b> unità <b>Modalità rottura:</b> C <b>Carico di rottura:</b> 0.096 kN <b>Area:</b> 3018 mm <sup>2</sup> <b>Resistenza nominale:</b> 0.03 kN/mm <sup>2</sup>
		<b>Nome:</b> A4-A-22-3 <b>Altezza strappo:</b> 22 cm <b>Posizione:</b> giunto <b>Modalità rottura:</b> B <b>Carico di rottura:</b> 0.253 kN <b>Area:</b> 2766 mm <sup>2</sup> <b>Resistenza nominale:</b> 0.09 kN/mm <sup>2</sup>
		<b>Nome:</b> A4-A-22-4 <b>Altezza strappo:</b> 22 cm <b>Posizione:</b> unità <b>Modalità rottura:</b> C <b>Carico di rottura:</b> 0.572 kN <b>Area:</b> 2722 mm <sup>2</sup> <b>Resistenza nominale:</b> 0.21 kN/mm <sup>2</sup>





<u>SUPPORTO: PIETRA.</u> pannello A4	
<u>COMPOSITO: TRM ALBARIA</u>	
	
<b>Nome:</b> A4-A-53-1	
<b>Altezza strappo:</b> 53 cm	
<b>Posizione:</b> giunto	
<b>Modalità rottura:</b> C	
<b>Carico di rottura:</b> 1.00 kN	
<b>Area:</b> 2970 mm <sup>2</sup>	
<b>Resistenza nominale:</b> 0.337 kN/mm <sup>2</sup>	
	
<b>Nome:</b> A4-A-53-2	
<b>Altezza strappo:</b> 53 cm	
<b>Posizione:</b> unità	
<b>Modalità rottura:</b> C	
<b>Carico di rottura:</b> 0.853 kN	
<b>Area:</b> 3009 mm <sup>2</sup>	
<b>Resistenza nominale:</b> 0.28 kN/mm <sup>2</sup>	
	
<b>Nome:</b> A4-A-53-3	
<b>Altezza strappo:</b> 53 cm	
<b>Posizione:</b> giunto	
<b>Modalità rottura:</b> C	
<b>Carico di rottura:</b> 1.046 kN	
<b>Area:</b> 2365 mm <sup>2</sup>	
<b>Resistenza nominale:</b> 0.44 kN/mm <sup>2</sup>	
	
<b>Nome:</b> A4-A-53-4	
<b>Altezza strappo:</b> 53 cm	
<b>Posizione:</b> unità	
<b>Modalità rottura:</b> C	
<b>Carico di rottura:</b> 0.078 kN	
<b>Area:</b> 3009 mm <sup>2</sup>	
<b>Resistenza nominale:</b> 0.08 kN/mm <sup>2</sup>	





SUPPORTO: PIETRA. pannello A4		
COMPOSITO: TRM ALBARIA		
		<p><b>Nome:</b> A4-A-103-1</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 103 cm</p> <p><b>Posizione:</b> giunto</p> <p><b>Modalità rottura:</b> C</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 0.037 kN</p> <p><b>Area:</b> 2603 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 0.14 kN/mm<sup>2</sup></p>
		<p><b>Nome:</b> A4-A-103-2</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 103 cm</p> <p><b>Posizione:</b> unità</p> <p><b>Modalità rottura:</b> B</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 0.429 kN</p> <p><b>Area:</b> 2761 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 0.16 kN/mm<sup>2</sup></p>
		<p><b>Nome:</b> A4-A-103-3</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 103 cm</p> <p><b>Posizione:</b> giunto</p> <p><b>Modalità rottura:</b> C</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 0.711 kN</p> <p><b>Area:</b> 2983mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 0.24 kN/mm<sup>2</sup></p>
		<p><b>Nome:</b> A4-A-103-4</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 103 cm</p> <p><b>Posizione:</b> unità</p> <p><b>Modalità rottura:</b> C</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 1.252 kN</p> <p><b>Area:</b> 2699 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 0.46 kN/mm<sup>2</sup></p>

SUPPORTO: PIETRA. pannello A4		
COMPOSITO: TRM EMACO		
		<p><b>Nome:</b> A4-B-22-1</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 22 cm</p> <p><b>Posizione:</b> giunto</p> <p><b>Modalità rottura:</b> B+A</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 0.531 kN</p> <p><b>Area:</b> 2903 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 0.18 kN/mm<sup>2</sup></p>
		<p><b>Nome:</b> A4- B-22-2</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 22 cm</p> <p><b>Posizione:</b> unità</p> <p><b>Modalità rottura:</b> B+A</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 2.386 kN</p> <p><b>Area:</b> 2886 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 0.83 kN/mm<sup>2</sup></p>
		<p><b>Nome:</b> A4- B -22-3</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 22 cm</p> <p><b>Posizione:</b> giunto</p> <p><b>Modalità rottura:</b> A</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 0.722 kN</p> <p><b>Area:</b> 2700 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 0.27 kN/mm<sup>2</sup></p>
		<p><b>Nome:</b> A4- B -22-4</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 22 cm</p> <p><b>Posizione:</b> unità</p> <p><b>Modalità rottura:</b> C</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 2.279 kN</p> <p><b>Area:</b> 2495 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 0.91kN/mm<sup>2</sup></p>





SUPPORTO: PIETRA. pannello A4		
COMPOSITO: TRM EMACO		
		<p><b>Nome:</b> A4-B-53-1</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 53 cm</p> <p><b>Posizione:</b> giunto</p> <p><b>Modalità rottura:</b> B</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 1.639 kN</p> <p><b>Area:</b> 3002 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 0.55 kN/mm<sup>2</sup></p>
		<p><b>Nome:</b> A4-B-53-2</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 53 cm</p> <p><b>Posizione:</b> unità</p> <p><b>Modalità rottura:</b> B+C</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 2.264 kN</p> <p><b>Area:</b> 2738 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 0.83 kN/mm<sup>2</sup></p>
		<p><b>Nome:</b> A4-B-53-3</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 53 cm</p> <p><b>Posizione:</b> giunto</p> <p><b>Modalità rottura:</b> C</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 1.820 kN</p> <p><b>Area:</b> 2897 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 0.63 kN/mm<sup>2</sup></p>
		<p><b>Nome:</b> A4-B-53-4</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 53 cm</p> <p><b>Posizione:</b> unità</p> <p><b>Modalità rottura:</b> B+A</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 3.940 kN</p> <p><b>Area:</b> 2719 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 1.45 kN/mm<sup>2</sup></p>





<b>SUPPORTO: PIETRA. pannello A4</b>		
<b>COMPOSITO: TRM EMACO</b>		
		<b>Nome:</b> A4-B-103-1 <b>Altezza strappo:</b> 103 cm <b>Posizione:</b> giunto <b>Modalità rottura:</b> B <b>Carico di rottura:</b> 1.762 kN <b>Area:</b> 2703 mm <sup>2</sup> <b>Resistenza nominale:</b> 0.65 kN/mm <sup>2</sup>
		<b>Nome:</b> A4-B-103-2 <b>Altezza strappo:</b> 103 cm <b>Posizione:</b> unità <b>Modalità rottura:</b> B + C <b>Carico di rottura:</b> 3.864 kN <b>Area:</b> 3155 mm <sup>2</sup> <b>Resistenza nominale:</b> 1.23 kN/mm <sup>2</sup>
		<b>Nome:</b> A4-B-103-3 <b>Altezza strappo:</b> 103 cm <b>Posizione:</b> giunto <b>Modalità rottura:</b> C <b>Carico di rottura:</b> 3.054 kN <b>Area:</b> 3064 mm <sup>2</sup> <b>Resistenza nominale:</b> 0.99 kN/mm <sup>2</sup>
		<b>Nome:</b> A4-B-103-4 <b>Altezza strappo:</b> 103 cm <b>Posizione:</b> unità <b>Modalità rottura:</b> C <b>Carico di rottura:</b> 2.437 kN <b>Area:</b> 3068 mm <sup>2</sup> <b>Resistenza nominale:</b> 0.79 kN/mm <sup>2</sup>

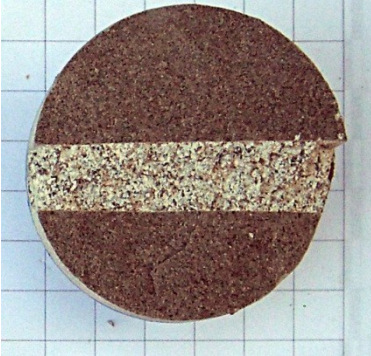



<b>SUPPORTO: PIETRA. pannello A4</b>	
<b>COMPOSITO: CFRP</b>	
	<b>Nome:</b> A4-C-22-1
	<b>Altezza strappo:</b> 22 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> B+C
	<b>Carico di rottura:</b> 1.100 kN
	<b>Area:</b> 2472 mm <sup>2</sup>
<b>Resistenza nominale:</b> 0.45 kN/mm <sup>2</sup>	
	<b>Nome:</b> A4- C-22-2
	<b>Altezza strappo:</b> 22 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 3.571 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
<b>Resistenza nominale:</b> 1.42 kN/mm <sup>2</sup>	
	<b>Nome:</b> A4- C -22-3
	<b>Altezza strappo:</b> 22 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 2.023 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
<b>Resistenza nominale:</b> 0.80 kN/mm <sup>2</sup>	
	<b>Nome:</b> A4- C -22-4
	<b>Altezza strappo:</b> 22 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A+B
	<b>Carico di rottura:</b> 3.303 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
<b>Resistenza nominale:</b> 1.31 kN/mm <sup>2</sup>	



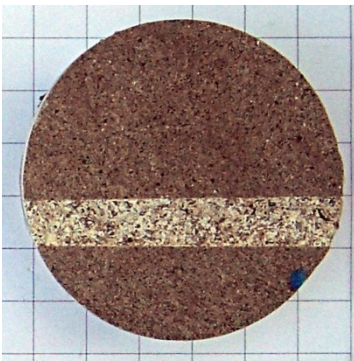

<b>SUPPORTO: PIETRA. pannello A4</b>	
<b>COMPOSITO: CFRP</b>	
	<b>Nome:</b> A4-C-53-1
	<b>Altezza strappo:</b> 53 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 2.149 kN
	<b>Area:</b> 2516mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 0.85 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> A4- C-53-2
	<b>Altezza strappo:</b> 53 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 5.502 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 2.187 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> A4- C -53-3
	<b>Altezza strappo:</b> 53 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 4.048 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 1.61 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> A4- C -53-4
	<b>Altezza strappo:</b> 53 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 6.950 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 2.76 kN/mm <sup>2</sup>









<u>SUPPORTO: PIETRA</u> . pannello A4	
<u>COMPOSITO: CFRP</u>	
	<b>Nome:</b> A4-C-103-1
	<b>Altezza strappo:</b> 103 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 3.065 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
<b>Resistenza nominale:</b> 1.22 kN/mm <sup>2</sup>	
	<b>Nome:</b> A4- C-103-2
	<b>Altezza strappo:</b> 103 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 7.582 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
<b>Resistenza nominale:</b> 3.01 kN/mm <sup>2</sup>	
	<b>Nome:</b> A4- C -103-3
	<b>Altezza strappo:</b> 103 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 3.929 kN
	<b>Area:</b> 2472 mm <sup>2</sup>
<b>Resistenza nominale:</b> 1.59 kN/mm <sup>2</sup>	
	<b>Nome:</b> A4- C -103-4
	<b>Altezza strappo:</b> 103 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 8.398 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
<b>Resistenza nominale:</b> 3.338 kN/mm <sup>2</sup>	


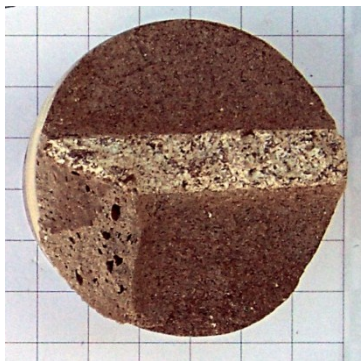
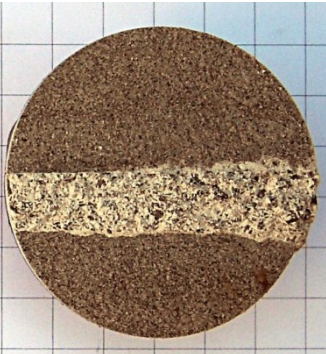

<b>SUPPORTO: PIETRA. pannello A4</b>	
<b>COMPOSITO: GFRP</b>	
	<b>Nome:</b> A4-D-22-1
	<b>Altezza strappo:</b> 22 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A+C
	<b>Carico di rottura:</b> 2.435 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 0.97 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> A4- D-22-2
	<b>Altezza strappo:</b> 22 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 3.918 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 1.56 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> A4- D -22-3
	<b>Altezza strappo:</b> 22 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A+B
	<b>Carico di rottura:</b> 2.326 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 0.92 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> A4- D -22-4
	<b>Altezza strappo:</b> 22 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 3.546 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 1.41 kN/mm <sup>2</sup>









<u>SUPPORTO: PIETRA</u> . pannello A4	
<u>COMPOSITO: CFRP</u>	
	<b>Nome:</b> A4-D-53-1
	<b>Altezza strappo:</b> 53 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 4.446 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 1.77 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> A4- D-53-2
	<b>Altezza strappo:</b> 53 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 5.361 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 2.13 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> A4- D -53-3
	<b>Altezza strappo:</b> 53 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 3.251 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 1.29 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> A4- D -53-4
	<b>Altezza strappo:</b> 53 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 5.427 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 2.157 kN/mm <sup>2</sup>

<b>SUPPORTO: PIETRA. pannello A4</b>	
<b>COMPOSITO: GFRP</b>	
	<b>Nome:</b> A4-D-103-1
	<b>Altezza strappo:</b> 103 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> C+ A
	<b>Carico di rottura:</b> 5.659 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 2.25 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> A4- D-103-2
	<b>Altezza strappo:</b> 103 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 8.011 kN
	<b>Area:</b> 2552 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 3.14 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> A4- D -103-3
	<b>Altezza strappo:</b> 103 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 6.356 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 2.53 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> A4- D -103-4
	<b>Altezza strappo:</b> 103 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A+B
	<b>Carico di rottura:</b> 6.623 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 2.63kN/mm <sup>2</sup>




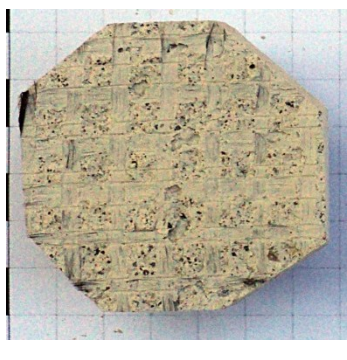



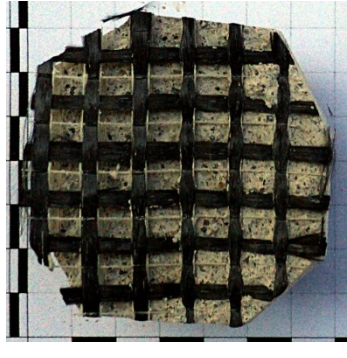
<b>SUPPORTO: PIETRA. pannello A4</b>	
<b>COMPOSITO: /</b>	
	<b>Nome:</b> A4-0-22-1
	<b>Altezza strappo:</b> 22 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A+D
	<b>Carico di rottura:</b> 1.037 kN
	<b>Area:</b> 2124 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 0.49 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> A4- 0-22-2
	<b>Altezza strappo:</b> 22 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 0.780 kN
	<b>Area:</b> 2165 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 0.36 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> A4- 0 -53-1
	<b>Altezza strappo:</b> 53 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 2.438 kN
	<b>Area:</b> 2445 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 0.99 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> A4- 0 -53-2
	<b>Altezza strappo:</b> 53 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 1.062 kN
	<b>Area:</b> 2290 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 0.46 kN/mm <sup>2</sup>






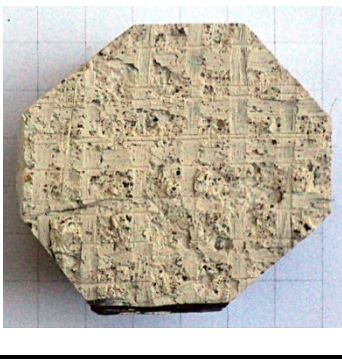


<u>SUPPORTO: PIETRA.</u> pannello A4	
<u>COMPOSITO: /</u>	
	<b>Nome:</b> A4-0-103-1
	<b>Altezza strappo:</b> 103 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> C+ A
	<b>Carico di rottura:</b> 6.550 kN
	<b>Area:</b> 2256 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 2.90 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> A4- 0-103-2
	<b>Altezza strappo:</b> 103 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 5.217 kN
	<b>Area:</b> 2565 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 2.03 kN/mm <sup>2</sup>









<u>SUPPORTO: PIETRA</u> . pannello A4	
<u>COMPOSITO: CFRP</u>	
	<b>Nome:</b> A2-C-22-1
	<b>Altezza strappo:</b> 22 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 3.612 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
<b>Resistenza nominale:</b> 1.44 kN/mm <sup>2</sup>	
	<b>Nome:</b> A2- C-22-2
	<b>Altezza strappo:</b> 22 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 1.440 kN
	<b>Area:</b> 2516mm <sup>2</sup>
<b>Resistenza nominale:</b> 0.57 kN/mm <sup>2</sup>	
	<b>Nome:</b> A2- C -107-1
	<b>Altezza strappo:</b> 107 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 5.43 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
<b>Resistenza nominale:</b> 2.16 kN/mm <sup>2</sup>	
	<b>Nome:</b> A2- C-107-2
	<b>Altezza strappo:</b> 107 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 8.140 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
<b>Resistenza nominale:</b> 3.24 kN/mm <sup>2</sup>	









<b>SUPPORTO: MATTONE. pannello B4</b>		
<b>COMPOSITO: TRM ALBARIA</b>		
		<b>Nome:</b> B4-A-36-1
		<b>Altezza strappo:</b> 36 cm
		<b>Posizione:</b> giunto
		<b>Modalità rottura:</b> C
		<b>Carico di rottura:</b> 1.295 kN
		<b>Area:</b> 3250 mm <sup>2</sup>
		<b>Resistenza nominale:</b> 0.39 kN/mm <sup>2</sup>
		<b>Nome:</b> B4-A-36-2
		<b>Altezza strappo:</b> 36 cm
		<b>Posizione:</b> unità
		<b>Modalità rottura:</b> B+A
		<b>Carico di rottura:</b> 0.518 kN
		<b>Area:</b> 2972 mm <sup>2</sup>
		<b>Resistenza nominale:</b> 0.17 kN/mm <sup>2</sup>
		<b>Nome:</b> B4-A-36-3
		<b>Altezza strappo:</b> 36 cm
		<b>Posizione:</b> giunto
		<b>Modalità rottura:</b> C
		<b>Carico di rottura:</b> 0.936 kN
		<b>Area:</b> 2720 mm <sup>2</sup>
		<b>Resistenza nominale:</b> 0.34 kN/mm <sup>2</sup>
		<b>Nome:</b> B4-A-36-4
		<b>Altezza strappo:</b> 36 cm
		<b>Posizione:</b> unità
		<b>Modalità rottura:</b> C
		<b>Carico di rottura:</b> 1.661 kN
		<b>Area:</b> 2823 mm <sup>2</sup>
		<b>Resistenza nominale:</b> 0.59 kN/mm <sup>2</sup>


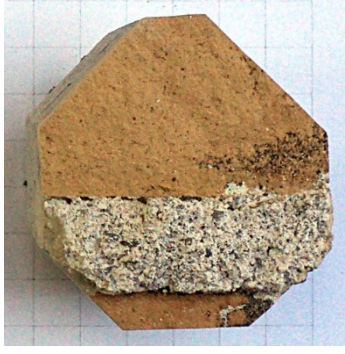












SUPPORTO: <b>MATTONE</b> . pannello B4		
COMPOSITO: <b>TRM ALBARIA</b>		
		<p><b>Nome:</b> B4-A-63-1</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 63 cm</p> <p><b>Posizione:</b> giunto</p> <p><b>Modalità rottura:</b> A+B</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 1.300 kN</p> <p><b>Area:</b> 3199 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 0.41 kN/mm<sup>2</sup></p>
		<p><b>Nome:</b> B4-A-63-2</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 63 cm</p> <p><b>Posizione:</b> unità</p> <p><b>Modalità rottura:</b> C</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 2.378 kN</p> <p><b>Area:</b> 2700 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 0.88 kN/mm<sup>2</sup></p>
		<p><b>Nome:</b> B4-A-63-3</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 63 cm</p> <p><b>Posizione:</b> giunto</p> <p><b>Modalità rottura:</b> D</p> <p><b>Carico di rottura:</b> / kN</p> <p><b>Area:</b> / mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> / kN/mm<sup>2</sup></p>
		<p><b>Nome:</b> B4-A-63-4</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 63 cm</p> <p><b>Posizione:</b> unità</p> <p><b>Modalità rottura:</b> C</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 1.712kN</p> <p><b>Area:</b> 3063 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 0.56 kN/mm<sup>2</sup></p>





SUPPORTO: <b>MATTONE</b> . pannello B4		
COMPOSITO: <b>TRM ALBARIA</b>		
		<b>Nome:</b> B4-A-111-1 <b>Altezza strappo:</b> 111 cm <b>Posizione:</b> unità <b>Modalità rottura:</b> C <b>Carico di rottura:</b> 3.224 kN <b>Area:</b> 2571 mm <sup>2</sup> <b>Resistenza nominale:</b> 1.25 kN/mm <sup>2</sup>
		<b>Nome:</b> B4-A-111-2 <b>Altezza strappo:</b> 111 cm <b>Posizione:</b> giunto <b>Modalità rottura:</b> A+B <b>Carico di rottura:</b> 1.871 kN <b>Area:</b> 3116 mm <sup>2</sup> <b>Resistenza nominale:</b> 0.60 kN/mm <sup>2</sup>
		<b>Nome:</b> B4-A-111-3 <b>Altezza strappo:</b> 111 cm <b>Posizione:</b> giunto <b>Modalità rottura:</b> C <b>Carico di rottura:</b> 2.212 kN <b>Area:</b> 2484 mm <sup>2</sup> <b>Resistenza nominale:</b> 0.89 kN/mm <sup>2</sup>
		<b>Nome:</b> B4-A-111-4 <b>Altezza strappo:</b> 111 cm <b>Posizione:</b> unità <b>Modalità rottura:</b> C <b>Carico di rottura:</b> 2.504 kN <b>Area:</b> 2736 mm <sup>2</sup> <b>Resistenza nominale:</b> 0.92 kN/mm <sup>2</sup>





SUPPORTO: <u>MATTONE</u> . pannello B4		
COMPOSITO: TRM EMACO		
		<p><b>Nome:</b> B4-B-36-1</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 36 cm</p> <p><b>Posizione:</b> unità</p> <p><b>Modalità rottura:</b> A</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 5.583 kN</p> <p><b>Area:</b> 3319 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 1.682</p>
		<p><b>Nome:</b> B4- B-36-2</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 36 cm</p> <p><b>Posizione:</b> giunto</p> <p><b>Modalità rottura:</b> B+A</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 1.896 kN</p> <p><b>Area:</b> 3160 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 0.60 kN/mm<sup>2</sup></p>
		<p><b>Nome:</b> B4- B -36-3</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 36 cm</p> <p><b>Posizione:</b> giunto</p> <p><b>Modalità rottura:</b> A+B</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 2.385 kN</p> <p><b>Area:</b> 3466 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 0.69 kN/mm<sup>2</sup></p>
		<p><b>Nome:</b> B4- B -36-4</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 36 cm</p> <p><b>Posizione:</b> unità</p> <p><b>Modalità rottura:</b> A</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 3.981 kN</p> <p><b>Area:</b> 3308 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 1.20 kN/mm<sup>2</sup></p>

SUPPORTO: <b>MATTONI</b> . pannello B4		
COMPOSITO: <b>TRM EMACO</b>		
		<p><b>Nome:</b> B4-B-63-1</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 63 cm</p> <p><b>Posizione:</b> unità</p> <p><b>Modalità rottura:</b> A</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 3.999 kN</p> <p><b>Area:</b> 2989 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 1.34 kN/mm<sup>2</sup></p>
		<p><b>Nome:</b> B4-B-63-2</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 63cm</p> <p><b>Posizione:</b> giunto</p> <p><b>Modalità rottura:</b> A</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 1.704 kN</p> <p><b>Area:</b> 3737 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 0.46 kN/mm<sup>2</sup></p>
		<p><b>Nome:</b> B4-B-63-3</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 63 cm</p> <p><b>Posizione:</b> giunto</p> <p><b>Modalità rottura:</b> A</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 4.080 kN</p> <p><b>Area:</b> 3155 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 1.29 kN/mm<sup>2</sup></p>
		<p><b>Nome:</b> B4-B-63-4</p> <p><b>Altezza strappo:</b> 63 cm</p> <p><b>Posizione:</b> unità</p> <p><b>Modalità rottura:</b> A</p> <p><b>Carico di rottura:</b> 6.700 kN</p> <p><b>Area:</b> 2989 mm<sup>2</sup></p> <p><b>Resistenza nominale:</b> 2.42 kN/mm<sup>2</sup></p>





<u>SUPPORTO: MATTONE</u> . pannello B4		
<u>COMPOSITO: TRM EMACO</u>		
		<b>Nome:</b> B4-B-111-1 <b>Altezza strappo:</b> 111 cm <b>Posizione:</b> giunto <b>Modalità rottura:</b> A <b>Carico di rottura:</b> 2.006 kN <b>Area:</b> 3029 mm <sup>2</sup> <b>Resistenza nominale:</b> 0.66 kN/mm <sup>2</sup>
		<b>Nome:</b> B4-B-111-2 <b>Altezza strappo:</b> 111 cm <b>Posizione:</b> unità <b>Modalità rottura:</b> A <b>Carico di rottura:</b> 4.262 kN <b>Area:</b> 3138 mm <sup>2</sup> <b>Resistenza nominale:</b> 1.36 kN/mm <sup>2</sup>
		<b>Nome:</b> B4-B-111-3 <b>Altezza strappo:</b> 111 cm <b>Posizione:</b> unità <b>Modalità rottura:</b> B+A <b>Carico di rottura:</b> 1.087 kN <b>Area:</b> 2878 mm <sup>2</sup> <b>Resistenza nominale:</b> 0.38 kN/mm <sup>2</sup>
		<b>Nome:</b> B4-B-111-4 <b>Altezza strappo:</b> 111 cm <b>Posizione:</b> giunto <b>Modalità rottura:</b> A <b>Carico di rottura:</b> 1.927 kN <b>Area:</b> 3272 mm <sup>2</sup> <b>Resistenza nominale:</b> 0.59 kN/mm <sup>2</sup>





<b>SUPPORTO: MATTONE. pannello B4</b>	
<b>COMPOSITO: CFRP</b>	
	<b>Nome:</b> B4-C-36-1
	<b>Altezza strappo:</b> 36 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 9.199 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 3.66 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> B4- C-36-2
	<b>Altezza strappo:</b> 36 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 3.807 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 1.51 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> B4- C -36-3
	<b>Altezza strappo:</b> 36 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 3.229 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 1.28 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> B4- C -36-4
	<b>Altezza strappo:</b> 36 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 7.622 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 3.03 kN/mm <sup>2</sup>





<b>SUPPORTO: MATTONE. pannello B4</b>	
<b>COMPOSITO: CFRP</b>	
	<b>Nome:</b> B4-C-63-1
	<b>Altezza strappo:</b> 63 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 6.410 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 2.55 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> B4- C-63-2
	<b>Altezza strappo:</b> 63 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 3.798 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 1.51 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> B4- C -63-3
	<b>Altezza strappo:</b> 63 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 5.483 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 2.18 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> B4- C -63-4
	<b>Altezza strappo:</b> 63 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 3.643 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 1.45 kN/mm <sup>2</sup>





<b>SUPPORTO: MATTONE. pannello B4</b>	
<b>COMPOSITO: CFRP</b>	
	<b>Nome:</b> B4-C-111-1
	<b>Altezza strappo:</b> 111 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 3.540 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 1.41 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> B4- C-111-2
	<b>Altezza strappo:</b> 111 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 4.838 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 1.92 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> B4- C -111-3
	<b>Altezza strappo:</b> 111 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 5.880 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 2.34 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> B4- C -111-4
	<b>Altezza strappo:</b> 111 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 3.334 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 1.33 kN/mm <sup>2</sup>





<u>SUPPORTO: MATTONE</u> . pannello B4	
<u>COMPOSITO: GFRP</u>	
	<b>Nome:</b> B4-D-36-1
	<b>Altezza strappo:</b> 36 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 4.131 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 1.64 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> B4- D-36-2
	<b>Altezza strappo:</b> 36 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 4.652 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 1.85 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> B4- D -36-3
	<b>Altezza strappo:</b> 36 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 2.945 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 1.17 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> B4- D -36-4
	<b>Altezza strappo:</b> 36 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 1.546 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 0.61 kN/mm <sup>2</sup>

<b>SUPPORTO: MATTONE. pannello B4</b>	
<b>COMPOSITO: CFRP</b>	
	<b>Nome:</b> B4-D-63-1
	<b>Altezza strappo:</b> 63 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 5.884 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 2.339 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> B4- D-63-2
	<b>Altezza strappo:</b> 63 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 3.108 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 1.24 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> B4- D -63-3
	<b>Altezza strappo:</b> 63 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 6.700 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 2.66 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> B4- D -63-4
	<b>Altezza strappo:</b> 63 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 2.967 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 1.18 kN/mm <sup>2</sup>

<u>SUPPORTO: MATTONE</u> . pannello B4	
<u>COMPOSITO: GFRP</u>	
	<b>Nome:</b> B4-D-111-1
	<b>Altezza strappo:</b> 111 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 2.953 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 1.17 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> B4- D-111-2
	<b>Altezza strappo:</b> 111 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 7.058 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 2.81 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> B4- D -111-3
	<b>Altezza strappo:</b> 111 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 4.974 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 1.98 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> B4- D-111-4
	<b>Altezza strappo:</b> 111 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 1.857 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 0.74 kN/mm <sup>2</sup>

<b>SUPPORTO: MATTONE. pannello B4</b>	
<b>COMPOSITO: /</b>	
	<b>Nome:</b> B4-0-36-1
	<b>Altezza strappo:</b> 36 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A+D
	<b>Carico di rottura:</b> 3.91 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 1.56 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> B4- 0-36-2
	<b>Altezza strappo:</b> 36 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 6.855 kN
	<b>Area:</b> 2165 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 2.72 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> B4- 0 -63-1
	<b>Altezza strappo:</b> 63 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A+D
	<b>Carico di rottura:</b> 2.298 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 0.91 kN/mm <sup>2</sup>
	<b>Nome:</b> B4- 0 -63-2
	<b>Altezza strappo:</b> 63 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 5.956 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
	<b>Resistenza nominale:</b> 2.37 kN/mm <sup>2</sup>

<u>SUPPORTO: MATTONE</u> . pannello A4	
<u>COMPOSITO: /</u>	
	<b>Nome:</b> B4-0-111-1
	<b>Altezza strappo:</b> 111 cm
	<b>Posizione:</b> giunto
	<b>Modalità rottura:</b> A+D
	<b>Carico di rottura:</b> 2.109 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
<b>Resistenza nominale:</b> 0.84 kN/mm <sup>2</sup>	
	<b>Nome:</b> B4- 0-111-2
	<b>Altezza strappo:</b> 111 cm
	<b>Posizione:</b> unità
	<b>Modalità rottura:</b> A
	<b>Carico di rottura:</b> 4.228 kN
	<b>Area:</b> 2516 mm <sup>2</sup>
<b>Resistenza nominale:</b> 1.69 kN/mm <sup>2</sup>	

## SCHEDA TECNICA ALBARIA STRUTTURA



The Chemical Company

### ALBARIA™ STRUTTURA

Malta da muratura, di calce pozzolanica priva di cemento, ad alta resistenza, di colore bianco, premiscelata, applicabile a cazzuola, spruzzo o per colaggio. Non rilascia sali idrosolubili e non induce formazione di efflorescenze.

#### Definizione del materiale

ALBARIA STRUTTURA è una malta da muratura di colore bianco, di calce pozzolanica, priva di cemento, confezionata con aggregati silicei naturali aventi diametro massimo 2 mm. Garantisce una resistenza a compressione > 15 MPa ed è quindi classificabile come malta da muratura di tipo M15 secondo la normativa europea UNI EN 998/2.

#### Principali campi di applicazione

ALBARIA STRUTTURA grazie alla sua elevata resistenza meccanica, pur essendo una malta di calce priva di cemento, viene utilizzata per il consolidamento di strutture in muratura in molte situazioni quali ad esempio:

- lastre armate;



- ringrosso di volte, anche armate con barre in fibra di carbonio o aramide della linea MBar;





The Chemical Company



- allettamenti per fondazioni di cortine murarie o per opere in genere che necessitino di malte da muratura ad alta resistenza;
- calcestruzzi PRIVI DI CEMENTO: per spessori superiori a 5 cm ad ALBARIA STRUTTURA si aggiungono degli aggregati di opportuna granulometria, ottenendo così betoncini o calcestruzzi di calce ad alta resistenza;



- giunti armati (ristilature dei giunti di malta armati con barrette in fibra di carbonio MBar Joint).



- piccoli ringrossi di volte;





The Chemical Company

### Caratteristiche

Le caratteristiche peculiari di ALBARIA STRUTTURA sono:

- **assenza di cemento:** l'assenza assoluta di cemento fa di ALBARIA STRUTTURA un prodotto del tutto compatibile con la muratura che si desidera consolidare;
- **elevate prestazioni meccaniche:** le elevate resistenze meccaniche sono requisiti eccezionali per un prodotto di calce, che così coniuga le esigenze storiche e tecnologiche, con quelle strutturali ed esecutive;
- **elevata adesione alla muratura:** sia a taglio (importante per gli allettamenti) che per trazione diretta (importante per le lastre armate e per le volte armate);
- **bassissimo contenuto di sali idrosolubili:** ALBARIA STRUTTURA è infatti caratterizzata da un basso valore di conduttività elettrica, non apporta sali contenenti solfati, cloruri, nitrati, potassio e sodio e non contribuisce ai fenomeni di degrado chimico-fisico legato alla formazione e cristallizzazione dei sali stessi;
- **versatilità e semplicità applicativa:** a cazzuola o a spruzzo è utilizzata per interventi di consolidamento in spessori fino a 5 cm. Per gli interventi di spessore > 5 cm può essere anche utilizzata per colaggio aggiungendo alla malta degli aggregati al fine di ottenere betoncini o calcestruzzi di calce ad alta resistenza;
- **elevata permeabilità al vapore d'acqua:** importante per consentire la normale traspirazione della muratura;
- **basso assorbimento capillare:** importante affinché l'acqua dall'esterno non entri nella muratura;
- **nessuna reazione al fuoco:** il materiale non è combustibile e non produce fumi (Euroclasse A1);
- **materiale con marchio CE:** il prodotto, il processo di produzione e il controllo qualità rispondono ai requisiti indicati dalla UNI EN 998/2.

### Prestazioni

Le prestazioni sotto riportate sono ottenute con consistenza 160-170 mm, secondo UNI EN 1015/3

Resistenza a compressione, UNI EN 1015/11	18 MPa Classe M15
Coefficiente di diffusione del vapore, EN 1745	$\mu < 35$
Contenuto sali idrosolubili (malta indurita), UNI 11087	Conduttività elettrica specifica < $80 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ $\text{SO}_4^{2-} < 0,1 \%$ $\text{Na}^+ < 0,05 \%$ $\text{K}^+ < 0,05 \%$
Coefficiente di assorbimento capillare, UNI EN 1015/18	$0,2 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-0,5}$
Reazione al fuoco, EN 13501/1	Euroclasse A1
Resistenza allo sfilamento barre d'acciaio e della linea MBar, RILEM-CEB-FIP RC6-78	> 6 MPa
Modulo elastico statico, UNI EN 13412	16.000 MPa
Adesione al supporto, - UNI EN 1015/12 (trazione diretta) - UNI EN 1052/3 (per taglio)	> 0,6 MPa, rottura di tipo A (interfaccia malta-supporto) $\tau_0 > 0,80 \text{ MPa}$

Aggiungendo ad ALBARIA STRUTTURA un ghiaietto  $D_{\text{max}} 20 \text{ mm}$ , si ottiene un calcestruzzo di calce avente consistenza S3, UNI EN 206/1, caratterizzato da resistenza a compressione > 15 MPa.





The Chemical Company

 1305
<b>BASF CC Italia spa, Via Vicinale delle Corti, 21 Treviso</b>  Data affissione CE: vedi sacco  1305-CPD-0130
<b>EN 998-2</b> Malta da muratura a prestazione garantita per scopi generali per l'utilizzo esterno in elementi soggetti a requisiti strutturali <b>Resistenza a compressione:</b> Categoria M15 <b>Resistenza a taglio iniziale:</b> 0,15 N/mm <sup>2</sup> (valore tabulato) <b>Contenuto di cloruri:</b> 0,03% <b>Reazione al fuoco:</b> Classe A1 <b>Assorbimento d'acqua:</b> 0,2 Kg/(m <sup>2</sup> ·min <sup>0,5</sup> ) <b>Permeabilità al vapore acqueo:</b> μ <sub>t</sub> 15/35 (valore tabulato) <b>Conducibilità termica:</b> (λ <sub>10, dry</sub> ) 0,83 W/m·K (valore tabulato) <b>Durabilità (al gelo/disgelo):</b> NPD <b>Sostanze pericolose:</b> Conforme DM 10/05/2004 e DM 14/05/1998

#### Consumo e confezione

Consumo:  
 - Malta: 17 kg/m<sup>2</sup> per cm di spessore.  
 - Calcestruzzo: 13 kg/m<sup>2</sup> circa per cm di spessore  
 Confezione: sacco da 25 kg.

## SCHEDA APPLICATIVA

#### Stoccaggio

Conservare il prodotto in luogo asciutto e coperto a temperatura compresa tra +5°C e +35°C.

#### Preparazione del supporto

L'intonaco degradato deve essere rimosso mediante demolizione con martelletti elettrici o ad aria compressa oppure mediante semplice scalpellatura. Devono essere eliminati inoltre eventuali residui di efflorescenze e qualunque altra sostanza che possa pregiudicare la buona adesione al supporto. Prima dell'applicazione della malta, il supporto deve essere pulito e saturato con acqua a bassa pressione. La saturazione è necessaria per impedire al supporto di sottrarre acqua alla malta; una saturazione non accurata potrebbe determinare perdite di aderenza e fessurazione della malta di apporto. Qualora il supporto non possa essere saturato, si consiglia comunque di effettuare una minima bagnatura per consentire un corretto aggrappo della malta.

#### Eventuale applicazione dell'armatura di rinforzo

Nel caso di interventi di rinforzo mediante la tecnica della lastra armata o della volta armata, la rete di rinforzo dovrà avere un copriferro di almeno 2 cm e dovrà essere distaccata dal supporto di almeno 1 cm mediante l'uso di distanziatori. Lo spessore minimo d'intervento in presenza di rete di rinforzo non potrà essere quindi inferiore a 4 cm.

#### Temperatura

ALBARIA STRUTTURA può essere impiegata quando la temperatura dell'ambiente è compresa tra +5°C e +40°C.

#### Miscelazione

Nel caso di applicazione a spruzzo o a cazzuola, ALBARIA STRUTTURA va impastata con acqua pulita, esente da sali o particelle organiche in ragione di 5,5 + 6 litri per sacco (pari al 22+24% sul peso totale). Nel caso di applicazione per colaggio, tipico per le applicazioni di spessori superiori a 5 cm, è necessario confezionare betoncini fluidi aggiungendo alla malta del ghiaietto o pietrischetto (5-20 mm) in quantità pari al 35 % sul peso della malta secca e l'acqua in ragione del 28% circa per raggiungere una consistenza fluida (S3 -S4).

La miscelazione dovrà essere eseguita in betoniera a bicchiere o nel miscelatore dell'intonacatrice e protrarsi fino ad ottenere un impasto plastico, omogeneo e privo di grumi. E' sconsigliata la miscelazione a mano.





The Chemical Company

### Applicazione

L'applicazione di ALBARIA STRUTTURA potrà avvenire a cazzuola od a spruzzo con macchina intonacatrice a pistoni non a ciclo continuo, oppure mediante colaggio. Nel caso di applicazione a mano, si consiglia di applicare con la cazzuola un sottile strato di 2+3 mm di rinforzo, eseguito con lo stesso materiale, a consistenza semi liquida, così da uniformare l'assorbimento della muratura e migliorarne l'aderenza.



Si procederà quindi ad applicare la malta per strati successivi di spessore pari a 1 - 1,5 cm avendo l'accortezza di applicare lo strato successivo quando il precedente non sia completamente indurito.

Se il supporto di applicazione si dovesse presentare molto assorbente, come si ha ad esempio in presenza di pietra tufacea, si consiglia di eseguire l'applicazione del rinforzo con ALBARIA SP2 RINZAFFO SOLFATO RESISTENTE, in modo da contenere l'assorbimento del fondo dell'acqua d'impasto della malta.

Terminata l'applicazione a cazzuola di ALBARIA STRUTTURA, la malta andrà lisciata in modo da ottenere la planarità delle superfici.

Quando il supporto sia costituito da materiali eterogenei (laterizio, pietra, tufo ecc.), caratterizzati da comportamenti termici differenti, si consiglia di inserire una rete in fibra di vetro alcali-resistente, in modo da contrastare il rischio di fessurazione. Tale accorgimento è valido anche in corrispondenza degli spigoli di aperture (porte, finestre ecc.) dove si generano concentrazioni di tensioni che possono causare fenomeni fessurativi.

### Frattezzatura

La frattezzatura di ALBARIA STRUTTURA dovrà eseguirsi, utilizzando un frattazzo di spugna, dopo un tempo opportuno dall'applicazione in funzione delle condizioni climatiche. L'intervallo di tempo tra l'applicazione e la finitura con frattazzo è stabilito in funzione del primo irrigidimento della malta, che si determina quando, appoggiando una mano sulla superficie, le dita non affondano ma lasciano una leggera impronta sull'intonaco. Una corretta frattezzatura sarà indispensabile per contrastare efficacemente la formazione di microfessure derivanti dal ritiro plastico. Per migliorare la stagionatura si consiglia di posare al di sopra di ALBARIA STRUTTURA, qualora fosse possibile come nel caso di realizzazione di massetti e cappe di volte, un telo di polietilene per la durata di circa 1 giorno dall'applicazione, in modo da mantenere una elevata umidità e contenere il ritiro plastico.

### Avvertenze

La combinazione calce e reattivo pozzolanico porta inizialmente, qualora la presa dell'impasto avvenisse in ambiente con scarsa aerazione o in presenza di grandi quantitativi di umidità, ad assumere una cromia tendente al verde scuro. La colorazione è il risultato della reazione chimica dei due composti combinati insieme che porta alla formazione principalmente di silicato di calcio idrato (CSH) e ghelenite idrata ( $C_2ASH_8$ ). Tale cromia a distanza di qualche giorno e a contatto con aria ritornerà del colore chiaro originale.

### Finitura

Dopo l'applicazione di ALBARIA STRUTTURA si consiglia di realizzare una rasatura millimetrica con ALBARIA STABILITURA, in modo da creare il fondo ottimale per realizzare sia finiture a spessore che tinteggi. Le finiture più appropriate saranno quelle che non impediscono la traspirazione del muro e dei materiali precedentemente applicati, quali ad esempio i tonachini ALBARIA SILIMAC TONACHINO, ALBARIA TONACHINO ed i tinteggi ALBARIA SILIMAC TINTEGGIO ed ALBARIA SCIALBO.



The Chemical Company



ALBARIA è un marchio del gruppo.

Dal 16/12/1992 BASF Construction Chemicals Italia Spa opera in regime di Sistema Qualità Certificato conforme alla Norma UNI-EN ISO 9001. Il Sistema di Gestione Ambientale è inoltre certificato secondo la Norma UNI EN ISO 14001.

**BASF Construction Chemicals Italia Spa**

Via Vicinale delle Corti, 21 – 31100 Treviso – Italy  
 T +39 0422 304251 F +39 0422 421802  
[http:// www.basf-cc.it](http://www.basf-cc.it) e-mail: [infomac@basf.com](mailto:infomac@basf.com)

Per maggiori informazioni si consulti il Tecnico di zona della BASF Construction Chemicals Italia Spa.

I consigli tecnici eventualmente forniti, verbalmente o per iscritto, circa le modalità d'uso o di impiego dei nostri prodotti, corrispondono allo stato attuale delle nostre conoscenze scientifiche e pratiche e non comportano l'assunzione di alcuna nostra garanzia e/o responsabilità sul risultato finale delle lavorazioni con impiego dei nostri prodotti. Non dispensano, quindi, il cliente dall'onere e responsabilità esclusivi di verificare l'idoneità dei nostri prodotti per l'uso e gli scopi che si prefigge.

La presente edizione annulla e sostituisce ogni altra precedente.  
 Giugno 2009

## SCHEDA TECNICA EMACO 955 M



The Chemical Company

### EMACO<sup>®</sup> R955 M

Malta cementizia, premiscelata, polimero modificata, bicomponente, tixotropica, indicata per ripristini corticali di strutture in cemento armato per spessori da 5 a 15 mm

#### Definizione del materiale

Malta cementizia, premiscelata, polimero modificata, bicomponente, tixotropica, a granulometria media, resistente agli agenti aggressivi dell'ambiente, contenente inibitore di corrosione organico (disperso nel componente B) e fibre di poliacrilonitrile.

#### Principali campi di applicazione

EMACO R955 M è indicato per ripristinare corticalmente, mediante applicazione a spruzzo o a cazzuola, elementi in calcestruzzo che:

- presentino imperfezioni esecutive quali vespai, armature a vista, scadente faccia a vista;
- manifestino sulla superficie esterna i primi segni evidenti di degrado;
- richiedano una regolarizzazione della superficie.

#### Caratteristiche

Le caratteristiche peculiari di EMACO R955 M sono:

- facilità di applicazione;
- elevata adesione al supporto;
- resistenza alla cavillatura in fase plastica; per combattere la microfessurazione in fase plastica, EMACO R955 M è arricchito di fibre PAN in poliacrilonitrile;



- risponde ai principi definiti nella UNI EN 1504/9 ("Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture in calcestruzzo: definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità. Principi generali per l'uso dei prodotti e sistemi") quali:

- il ripristino del calcestruzzo;
- il rinforzo strutturale;
- la preservazione e ripristino della passività

ai metodi quali:

- l'applicazione della malta a mano;
- lo spruzzo di malta;
- l'aggiunta di malta;
- l'aumento del copriferro;
- la sostituzione del calcestruzzo carbonatato o contaminato;

e ai limiti di accettazione indicati nella relativa EN 1504/3 ("Structural and non structural repair") per le malte strutturali di tipo R3.

<b>CE</b>	
1305	
BASF Construction Chemicals Italia spa Via Vicinale delle Corti, 21 Treviso 09	
1305-CPD-0805 BC2-563-0013-0002-001	
<b>EN 1504-3</b>	
<b>Malta PCC per ripristini di strutture in calcestruzzo a base di cemento idraulico, polimero modificata</b>	
Resistenza a compressione:	Classe R3
Contenuto di cloruri:	< 0,05%
Adesione al supporto:	> 1,5 MPa
Ritiro:	> 1,5 MPa (adesione dopo la prova)
Compatibilità termica:	
Gelo-disgelo	> 1,5 MPa (adesione dopo i cicli)
Temporali	> 1,5 MPa (adesione dopo i cicli)
Cicli a secco	> 1,5 MPa (adesione dopo i cicli)
Assorbimento capillare:	0,5 Kg/(m <sup>2</sup> ·min <sup>0,5</sup> )
Reazione al fuoco:	Classe E
Sostanze pericolose:	Conforme DM 10/05/2004 e DM 14/05/1998

#### Consumo e confezione

8,3 kg/m<sup>2</sup> spessore 5 mm (A+B).

5 Sacchi (A) da 25 kg + tanica (B) da 25,5 kg.



The Chemical Company

### Prestazioni

Le prestazioni sotto riportate sono ottenute con una consistenza 180-190 mm, UNI EN 13395/1, in assenza di bleeding. La modificazione polimerica richiede che la miscelazione per il confezionamento dei provini sia di tipo lento e continuo.

Requisiti	Limiti di accettazione della EN 1504/3 per le malte di tipo R3	Prestazione
Resistenza a compressione, UNI EN 12190	a 28 gg $\geq$ 25 MPa	1 gg > 10 MPa 7 gg > 27 MPa 28 gg > 38 MPa
Resistenza a trazione per flessione, UNI EN 196/1	--	1 gg > 2 MPa 7 gg > 5 MPa 28 gg > 7 MPa
Adesione al calcestruzzo, UNI EN 1542 su supporto di tipo MC 0,40 (avente rapporto a/c = 0,40) secondo UNI EN 1766	$\geq$ 1,5 MPa	$\geq$ 2 MPa
Resistenza alla carbonatazione accelerata, UNI EN 13295	Profondità di carbonatazione $\leq$ a quella del calcestruzzo di riferimento di tipo MC 0,45 (avente rapporto a/c = 0,45) secondo UNI EN 1766	Specificata superata
Resistenza ai cicli di gelo-disgelo con sali disgelanti misurata come adesione UNI EN 1542 dopo 50 cicli UNI EN 13687/1 su supporto di tipo MC 0,40	$\geq$ 1,5 MPa	$\geq$ 2 MPa
Impermeabilità all'acqua misurata come coefficiente di assorbimento capillare, UNI EN 13057	$\leq$ 0,5 kg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-0,5</sup>	< 0,5 kg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-0,5</sup>
Modulo elastico, UNI EN 13412	$\geq$ 15.000 MPa	16.000 ( $\pm$ 2.000) MPa

## SCHEDA APPLICATIVA

### Stoccaggio

Conservare il prodotto, componente A e B, in luogo asciutto e protetto a temperatura compresa tra 5 e 40°C, nei contenitori originali ermeticamente chiusi. **In caso di congelamento il componente B non potrà più essere riutilizzato.**

### Preparazione del calcestruzzo di supporto

Preparazione mediante sabbatura o idrosabbatura di tutte le superfici da rasare per asportare le parti superficiali incoerenti o contaminate e per garantire un minimo di ruvidità. Nel caso comunque di applicazioni ad elevato spessore, è consigliato preparare il supporto ottenendolo macroscopicamente ruvido.

### Pulizia delle barre d'armatura affioranti

Nel caso ci siano barre d'armatura affioranti (cioè privi di copriferro) sarà fondamentale verificare la condizione del calcestruzzo che li avvolge, con particolare riguardo al grado di carbonatazione ed alla presenza di cloruri. Verificata la coesione e l'assenza di contaminazione di tale calcestruzzo si provvederà alla pulizia delle barre d'armatura preferibilmente mediante sabbatura.

Nel caso in cui il calcestruzzo che avvolge le barre d'armatura risulti contaminato, sarà necessario asportarlo e si dovranno quindi adottare tecnica

d'intervento e materiali congruenti con gli spessori da ripristinare.

### Pulizia del calcestruzzo di supporto

La pulizia del calcestruzzo di supporto si dovrà effettuare mediante lavaggio.

### Temperatura di applicazione

EMACO R955 M può essere applicato quando la temperatura dell'ambiente è compresa tra +5°C e +40°C. Quando la temperatura è di 5 + 10°C lo sviluppo delle resistenze meccaniche è più lento, si consiglia comunque di conservare i sacchi e le confezioni del componente B in un ambiente riscaldato e di applicare la malta nelle ore centrali della mattina. Per applicazioni in climi freddi si consiglia di additivare EMACO R955 M con lo specifico accelerante (liquido privo di cloruri) al dosaggio di 1 litro per ogni tanica di componente B. Si sconsiglia comunque la messa in opera del prodotto se la temperatura raggiunge 0°C al momento dell'applicazione e/o durante la fase di indurimento.

### Preparazione dell'impasto

La miscelazione dovrà essere eseguita preferibilmente mediante betoniera ad asse orizzontale (nel caso di applicazione a spruzzo) aggiungendo gradualmente al componente A in polvere (sacchi) il componente B liquido. Qualora si usi un trapano con frusta è necessario mescolare a



The Chemical Company

bassa velocità, per non favorire l'inglobamento d'aria nella malta. La miscelazione dovrà protrarsi fino ad ottenere un impasto plastico, omogeneo e privo di grumi. E' sconsigliata la miscelazione a mano.

Con una tanica da 25,5 kg si impastano 5 sacchi da 25 kg di componente A (rapporto B/A = 20%). Non è necessaria alcuna aggiunta d'acqua. La quantità di componente B può variare in funzione della temperatura (in generale la domanda di componente B cresce all'aumentare della temperatura) e delle modalità applicative.

### Applicazione

EMACO R955 M deve essere applicato su superfici perfettamente sabbiate, pulite e coerenti, è consentita l'applicazione su superfici umide ma prive di velo d'acqua. Solo nel caso di superfici in cls di supporto particolarmente assorbenti e/o particolarmente esposte ad alte temperature e vento, si consiglia di inumidire il supporto. E' comunque sconsigliata l'applicazione su superfici sature di acqua come avviene per esempio per superfici dove l'acqua ha ristagnato per ore. EMACO R955 M va applicato in spessori da 5 a 15 mm manualmente a cazzuola (piccole superfici) o mediante macchine spruzzatrici (superfici estese) a coclea o a pistone (non a ciclo continuo). Durante le fasi di interruzione dello spruzzo (in funzione anche della temperatura esterna) è necessario prevedere l'accurata pulizia delle tubazioni e della pompa stessa mediante acqua in pressione e palla di gomma morbida pulisci tubi.

### Frattezzatura

La frattezzatura dovrà eseguirsi, utilizzando un frattezzo di spugna, dopo un tempo opportuno dall'applicazione in funzione delle condizioni climatiche. L'intervallo di tempo tra l'applicazione e la finitura con frattezzo è stabilito in funzione del primo irrigidimento della malta, che si determina quando, appoggiando una mano sulla superficie, le dita non affondano ma lasciano una leggera impronta sulla malta. Una corretta frattezzatura sarà indispensabile per contrastare efficacemente la formazione di microfessure derivanti dal ritiro plastico.

### Stagionatura

Per ottenere in opera il massimo delle prestazioni che EMACO R955 M può fornire è necessaria una corretta stagionatura, operazione efficace e semplice con l'uso del prodotto stagionante MASTERSEAL PRIMER, che viene applicato, con rullo o con airless, appena terminata la frattezzatura della malta. MASTERSEAL PRIMER è stato progettato per svolgere, oltre che la funzione di stagionante di EMACO R955 M, anche quella di primer dei sistemi protettivi MASTERSEAL FORMULA.

### Protezione

Per aumentare la durabilità complessiva degli interventi di ripristino è sempre consigliato applicare su tutta la struttura un sistema protettivo elastico che sia in grado di realizzare la continuità delle superfici esterne.

La protezione di EMACO R955 M è realizzata con l'applicazione di MASTERSEAL FORMULA PU (a base di elastomeri poliuretanic) o con MASTERSEAL FORMULA AC (a base di elastomeri acrilici in dispersione acquosa).

---

EMACO e MASTERSEAL sono marchi registrati del gruppo.

Dal 16/12/1992 BASF Construction Chemicals Italia Spa opera in regime di Sistema Qualità Certificato conforme alla Norma UNI-EN ISO 9001. Il Sistema di Gestione Ambientale è inoltre certificato secondo la Norma UNI EN ISO 14001.

**BASF Construction Chemicals Italia Spa**  
Via Vicinale delle Corti, 21 - 31100 Treviso - Italy  
T +39 0422 304251 F +39 0422 421802  
<http://www.basf-cc.it> e-mail: [infomac@basf.com](mailto:infomac@basf.com)

Per maggiori informazioni si consulti il Tecnico di zona della BASF Construction Chemicals Italia Spa.

I consigli tecnici eventualmente forniti, verbalmente o per iscritto, circa le modalità d'uso o di impiego dei nostri prodotti, corrispondono allo stato attuale delle nostre conoscenze scientifiche e pratiche e non comportano l'assunzione di alcuna nostra garanzia e/o responsabilità sul risultato finale delle lavorazioni con impiego dei nostri prodotti. Non dispensano, quindi, il cliente dall'onere e responsabilità esclusivi di verificare l'idoneità dei nostri prodotti per l'uso e gli scopi che si prefigge.

La presente edizione annulla e sostituisce ogni altra precedente.  
Luglio 2009

## SCHEDA TECNICA MBrace Fibre



The Chemical Company

### MBrace® Fibre

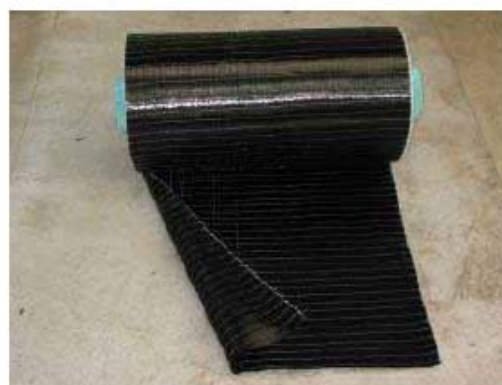
Rinforzo fibroso a base di tessuti unidirezionali in fibra di carbonio, aramide e vetro del sistema MBrace FRP (Fiber Reinforced Polymer)

#### Definizione del materiale

MBrace Fibre è il rinforzo fibroso, a base di tessuti unidirezionali in fibra di carbonio ad alta resistenza e ad alto modulo, aramide e vetro del sistema MBrace FRP.

MBrace Fibre è caratterizzato da:

- grande leggerezza e maneggevolezza. Può essere tagliato e ridotto in strisce con grande facilità (mediante forbice o cutter) sia nel senso longitudinale che trasversale con ridotti valori di sfrido (per la sola MBrace Fibre Aramide è necessaria una speciale forbice);
- fibre continue unidirezionali; ciò consente, segnatamente nei rinforzi flessionali e a taglio, di orientare nel modo ottimale il composito nelle direzioni delle sollecitazioni e di decidere il numero di strati di progetto sezione per sezione;
- durabilità negli ambienti umidi e chimicamente aggressivi.

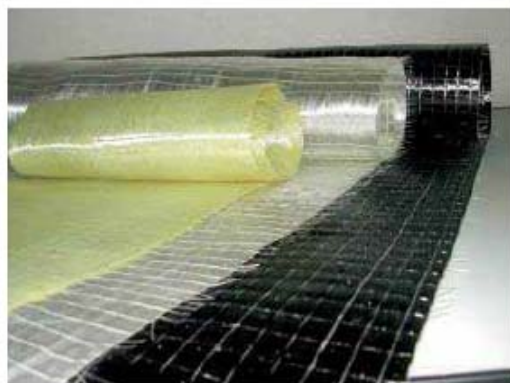


#### Principali campi di applicazione

MBrace Fibre è utilizzato come materiale di rinforzo a flessione, taglio e per confinamento su tutti i supporti per il quale il sistema MBrace è idoneo (c.a, legno, muratura, pietra naturale, acciaio, eccc).

#### Confezione

- MBrace Fibre Alta Resistenza e Aramide: rotolo da 25 m<sup>2</sup> (altezza 50 cm, lunghezza 50 m).
- MBrace Fibre Alto Modulo: rotolo da 25 m<sup>2</sup> (altezza 50 cm, lunghezza 50 m)
- MBrace Fibre Vetro: rotolo da 25 m<sup>2</sup> (altezza 50 cm, lunghezza 50 m)



**MBrace®**



The Chemical Company

**Prestazioni tipiche dei tessuti** (riferite allo spessore di tessuto secco)

	<b>MBrace Fibre Alta resistenza</b>	<b>MBrace Fibre Alto modulo</b>	<b>MBrace Fibre Aramide</b>	<b>MBrace Fibre vetro</b>
Tipo di fibra	Carbonio	Carbonio	Aramidica	Vetro Alcali resistente
Spessore equivalente di tessuto secco, mm	0,165	0,165	0,214	0,230
Modulo elastico medio a trazione, ASTM D3039, MPa	230.000	390.000	105.000	65.000
Deformazione ultima media a trazione, ASTM D3039, %	1,3	0,8	1,7	2,5
Resistenza caratteristica a trazione $f_b$ , ASTM D3039, MPa	2.500	2.500	1.500	1.300
Coefficiente di dilatazione termica, $K^{-1}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$-3,5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Conduttività termica, $J \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$	17	17	Isolante	Isolante
Resistività elettrica, $\Omega \cdot m$	$1,6 \cdot 10^{-5}$ Conduttivo	$1,6 \cdot 10^{-5}$ Conduttivo	----- Isolante	----- Isolante

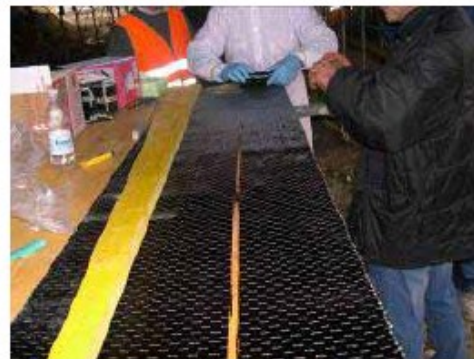
## SCHEDA APPLICATIVA

### Stoccaggio

Conservare il prodotto in luogo coperto, fresco ed asciutto ( $5 + 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ) lontano dal contatto diretto con il sole, fuoco o fiamme libere.

### Applicazione

- Tagliare con forbice o cutter a pié d'opera o in stabilimento MBrace Fibre nelle dimensioni indicate nel progetto. E' consigliabile effettuare questa operazione predisponendo un semplice tavolo da lavoro.



- Dopo avere applicato il primo strato di adesivo, si stenderà il tessuto unidirezionale avendo cura di premerlo per due o tre volte nella direzione longitudinale della fibra usando un rullino a denti smussati e paralleli alla direzione delle fibre per eliminare l'aria dallo strato di resina. Per congiungere più strisce nella direzione longitudinale della fibra è necessario sovrapporre per una lunghezza di 20 cm. In corrispondenza del punto di sovrapposizione si applicherà una ulteriore mano di MBrace Adesivo sulla superficie esterna dello strato di foglio su cui aderirà il tratto sovrapposto. Non è necessaria alcuna sovrapposizione nella direzione laterale della fibra.
- La seconda mano di MBrace Adesivo deve essere stesa sulla superficie del foglio.





The Chemical Company

- Dovendo incollare anche il secondo strato di tessuto, si applicherà lo strato ulteriore di tessuto e quindi una ulteriore mano di adesivo seguente le indicazioni di cui sopra.



#### Stagionatura

MBrace FRP dovrà essere lasciato indurire per un tempo non inferiore alle 24 ore (a 20°C) prima di poter destinare al servizio l'elemento rinforzato. Per

temperature inferiori a 20°C sarà necessario attendere un tempo superiore alle 24 ore.

#### Protezione dai raggi UV

- Proteggere le superfici rinforzate con MBrace FRP mediante un rivestimento della linea MASTERSEAL resistente all'azione degli agenti atmosferici.
- L'applicazione del sistema protettivo:
  - dovrà avvenire dopo l'indurimento dell'ultimo strato di MBrace ADESIVO, a partire da un minimo di 24 ore fino ad un massimo di 48 ore (a 20°C); in tal caso si potrà applicare direttamente il protettivo (ad esempio MASTERSEAL FORMULA PU senza l'utilizzo di primer); temperature differenti da 20°C possono far variare l'intervallo temporale sopra indicato;
  - in caso di attesa di un periodo di tempo superiore alle 48 ore (a 20°C) dall'applicazione di MBrace ADESIVO, si dovrà preliminarmente trattare/irruvidire la superficie dell'adesivo con sabbatura e/o sistema equivalente, depolverare ed applicare successivamente protettivo (ad esempio MASTERSEAL FORMULA PU senza l'utilizzo di primer)

#### Soggezioni ambientali

Applicare MBrace ADESIVO ed il sistema di rinforzo con temperature dell'aria e del supporto comprese tra +10 e +30°C.

L'applicazione a temperature dell'aria e del supporto inferiori a 10°C potrà avvenire adottando speciali accorgimenti, quali ad esempio riscaldare il supporto e l'ambiente di applicazione della resina ad una temperatura compresa tra 10 e 20°C (per un periodo tempo fino ad indurimento della resina avvenuto), utilizzando opportuni riscaldatori.

Non applicare il prodotto a temperature inferiori a 5°C in quanto il tempo di polimerizzazione risulterebbe estremamente allungato.

L'applicazione dovrà avvenire su un supporto asciutto, che presenti un'umidità non superiore al 6% e con un'umidità ambientale relativa non superiore all'85%.

Il rinforzo applicato dovrà essere successivamente protetto dall'eventuale acqua piovana fino al completo indurimento della resina.

Non applicare il sistema quando il supporto è bagnato, quando è prevista pioggia o formazione di rugiada.



The Chemical Company

#### Indicazioni di sicurezza

Durante la miscelazione indossare sempre guanti, occhiali e idonei indumenti da lavoro per evitare il contatto con la pelle.

In caso di contatto accidentale lavare abbondantemente le parti interessate con acqua e sapone o con un detergente appropriato.

Non usare solventi o diluenti.

Non respirare i vapori e gli aerosol; l'applicazione in ambiente chiuso deve avvenire in condizioni di continuo ricambio d'aria.

Durante l'uso è vietato bere, mangiare e fumare.

Osservare le norme di sicurezza per l'utilizzo di prodotti infiammabili e contenenti solventi.

---

MBRACE e MASTERSEAL sono marchi registrati del gruppo

Dal 16/12/1992 BASF Construction Chemicals Italia Spa opera in regime di Sistema Qualità Certificato conforme alla Norma UNI-EN ISO 9001. Il Sistema di Gestione Ambientale è inoltre certificato secondo la Norma UNI EN ISO 14001.

#### BASF Construction Chemicals Italia Spa

Via Vicinale delle Corti, 21 – 31100 Treviso – Italy  
T +39 0422 304251 F +39 0422 421802  
<http://www.basf-cc.it> e-mail: [infomac@basf.com](mailto:infomac@basf.com)

Per maggiori informazioni si consulti il Tecnico di zona della BASF Construction Chemicals Italia Spa.

I consigli tecnici eventualmente forniti, verbalmente o per iscritto, circa le modalità d'uso o di impiego dei nostri prodotti, corrispondono allo stato attuale delle nostre conoscenze scientifiche e pratiche e non comportano l'assunzione di alcuna nostra garanzia e/o responsabilità sul risultato finale delle lavorazioni con impiego dei nostri prodotti. Non dispensano, quindi, il cliente dall'onere e responsabilità esclusivi di verificare l'idoneità dei nostri prodotti per l'uso e gli scopi che si prefigge.

La presente edizione annulla e sostituisce ogni altra precedente.  
Dicembre 2009

## SCHEDA TECNICA Fibre Net



The Chemical Company

### MBrace Fibre Net

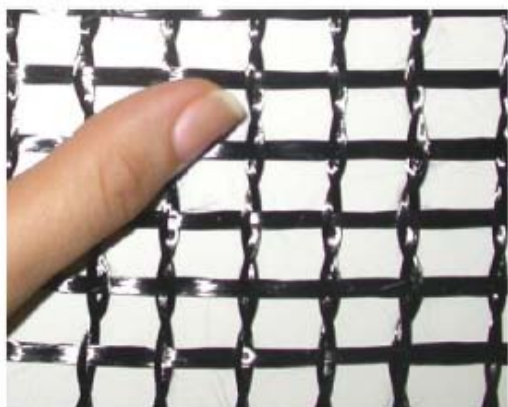
Rete bidirezionale in carbonio ad alta resistenza del sistema MBrace FRP (Fiber Reinforced Polymer)

#### Descrizione e campi di applicazione

MBrace FibreNet è un rinforzo fibroso bidirezionale in fibra di carbonio ad alta resistenza del sistema MBrace FRP. E' raccomandato per il rinforzo strutturale del c.a e della muratura quando completamente impregnato con matrice epossidica MBrace Adesivo. L'impregnazione con matrice polimerica classifica questo prodotto come materiale composito fibroso FRP. Si sconsiglia l'uso della rete MBrace Fibernet con malte, visto che per la loro natura e composizione (ad esempio contenendo sabbie anche finissime) non impregnano completamente tutti i filamenti, riducendo quindi la prestazione potenzialmente ottenibile dal prodotto.

MBrace FibreNet è caratterizzato da:

- grande leggerezza e maneggevolezza;
- elevata resistenza a trazione a fronte di uno spessore ridottissimo ;
- durabilità negli ambienti umidi e chimicamente aggressivi.



MBrace FiberNet dopo il suo incollaggio, può essere facilmente protetto e nascosto alla vista con rasature o intonaci della linea Emaco/Albaria.

#### Prestazioni caratteristiche

	MBrace Fibre Net CF 200 B	MBrace Fibre Net CF 160
Densità superficiale	200 g/m <sup>2</sup>	160 g/m <sup>2</sup>
Tipologia di rete	Bilanciata	Sbilanciata
Spessore equivalente di tessuto secco per ciascuna direzione	0,055 mm 0,055 mm	0,033 mm 0,060 mm
Modulo elastico caratteristico a trazione, ASTM D3039	230 GPa	230 GPa
Deformazione ultima, ASTM D3039	1,4 %	1,4 %
Resistenza caratteristica a trazione, ASTM D3039	2500 MPa	2500 MPa
Coefficiente dilatazione termica	10-7 K-1	10-7 K-1
Resistività elettrica	1,6 · 10 <sup>-5</sup> Ω · m Conduttivo	1,6 · 10 <sup>-5</sup> Ω · m Conduttivo

#### Confezione

Rotoli 50 m<sup>2</sup> (100 cm x 50 m).

**MBrace®**

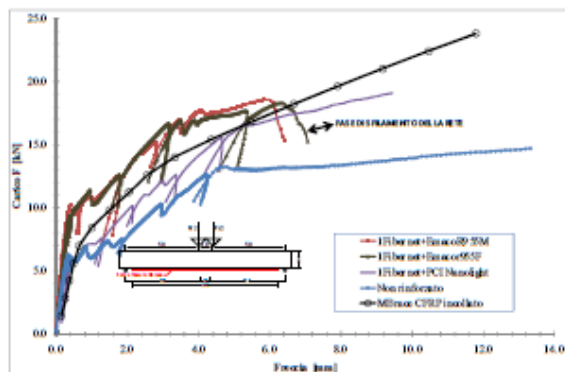


The Chemical Company

## NOTA TECNICA PER L'IMPIEGO DI RETI

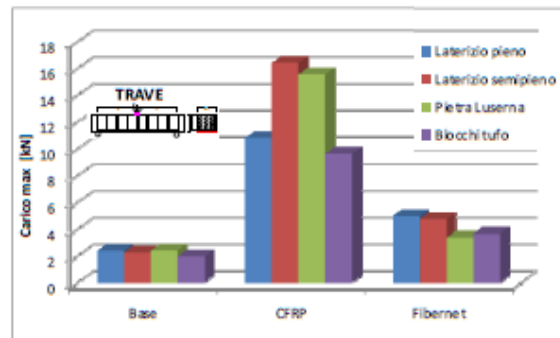
Come indicato in premessa, è importantissimo per il pieno utilizzo della potenzialità del rinforzo, la corretta e completa impregnazione dei filamenti della rete.

Ad esempio per quanto riguarda il **rinforzo di struttura in c.a.**, nel grafico sotto riportato si mostra la risposta carico – freccia di travi in calcestruzzo armato rinforzate interponendo uno strato di rete bilanciata FiberNet CF 200B all'interno di uno strato di matrice cementizia Emaco R955Fall'intradosso e lo si confronta con la risposta ottenibile con uno strato di MBrace CFRP incollato all'intradosso con MBrace Adesivo. Pur operando nei due casi con lo stesso quantitativo di filamento, si nota bene la differenza di comportamento sperimentale: i filati impregnati di adesivo epossidico (MBrace Adesivo) raggiungono la crisi per trazione ad un livello di carico molto elevato rispetto a quello ottenibile dal rinforzo utilizzando rete applicata con malta cementizia. La crisi per quest'ultimo genere di rinforzo è lo sfilamento delle fibre dalla malta che avviene ad una non predefinibile soglia di carico.



Invece per quanto riguarda il **rinforzo di strutture in muratura**, nel grafico sottostante si confrontano invece i carichi massimi ottenuti da prove sperimentali di flessione su travi inflesse in muratura costituite da blocchi di diverso tipo. Si evidenzia in maniera molto chiara come si ottengano carichi sensibilmente più elevati dall'incollaggio di tessuto MBrace CFRP con

resina MBrace Adesivo (o analogamente dall'applicazione di rete MBrace FIBRENET con resina MBrace Adesivo) rispetto all'impiego di rete MBrace Fibernet immersa in malte tradizionali, questo a causa dei limiti di impregnabilità delle stesse.



In modo perfettamente analogo si osservi il grafico sottostante ottenuto con pareti presso-inflesse rinforzate con rete MBrace Fibernet immersa in matrice di calce e con tessuto MBrace CFRP incollato.

Concludendo quindi l'impregnazione di MBrace Fibernet eseguita con resina epossidica MBrace Adesivo garantisce un comportamento ottimale del rinforzo, utilizzandone appieno la potenzialità, mentre nel caso di utilizzo di malte tradizionali il livello reale di rinforzo ottenuto risulta decisamente limitato.



The Chemical Company

## SCHEDA APPLICATIVA

### Stoccaggio

Conservare il prodotto in luogo coperto, fresco ed asciutto (5 + 30 °C) lontano dal contatto diretto con il sole, fuoco o fiamme libere.

### Preparazione del supporto

La preparazione del supporto è un'operazione di fondamentale importanza per la corretta adesione del sistema di rinforzo al supporto e di conseguenza per l'efficace rinforzo della struttura. Preliminarmente alle operazioni di posa si dovrà procedere alla preparazione del supporto mediante sabbiatura (operazione non necessaria nel caso di interventi preliminari di ripristino della struttura con malte della linea EMACO o ALBARIA). Si procederà poi a depolverare e pulire il supporto mediante aria compressa. La superficie finale dovrà presentarsi microscopicamente ruvida (inerte fino in vista), pulita e depolverata, coerente e consistente.

### Applicazione

Si procederà inizialmente a tagliare con forbice o cutter a piè d'opera MBrace Fibre Net nelle dimensioni indicate nel progetto. E' consigliabile effettuare questa operazione predisponendo un semplice tavolo da lavoro mantenendo ben pulita la rete.

A questo punto si applicherà la rete.

Dopo avere applicato il primo strato di adesivo MBrace Adesivo (fare riferimento alla relativa scheda tecnica per le modalità di applicazione dell'adesivo), si stenderà la rete avendo cura di premerla per due o tre volte nelle due direzioni delle fibre usando un rullino a denti smussati per impregnare la rete ed eliminare l'aria dallo strato di resina.

Per congiungere più strisce nella direzione longitudinale della fibra è necessario sovrapporre per una lunghezza di circa 20 cm. In corrispondenza del punto di sovrapposizione si applicherà una ulteriore mano di MBrace Adesivo sulla superficie esterna dello strato di foglio su cui aderirà il tratto sovrapposto. La seconda mano di MBrace Adesivo deve essere stesa sulla superficie del foglio.

Dovendo incollare anche un secondo strato di tessuto, si applicherà lo strato ulteriore di tessuto e quindi una ulteriore mano di adesivo seguente le indicazioni di cui sopra. Una volta completata la fase di incollaggio, è preferibile proteggere il manufatto dalla eventuale pioggia con teli di plastica. MBrace Fibre Net dovrà essere lasciato indurire per un tempo non inferiore alle 24 ore (a 20°C) prima di poter destinare al servizio l'elemento rinforzato. Per temperature inferiori a 20°C sarà necessario attendere un tempo superiore alle 24 ore.

Proteggere le superfici rinforzate con MBrace FRP mediante un rivestimento della linea MASTERSEAL resistente all'azione degli agenti atmosferici.

L'applicazione del sistema protettivo dovrà avvenire dopo l'indurimento dell'ultimo strato di adesivo. Non applicare MBrace Adesivo quando la temperatura ambiente è inferiore a 5°C. Non applicare il sistema quando il supporto è bagnato, quando è prevista pioggia o formazione di rugiada.

MBRACE e MASTERSEAL sono marchi registrati del gruppo

Dal 16/12/1992 BASF Construction Chemicals Italia Spa opera in regime di Sistema Qualità Certificato conforme alla Norma UNI-EN ISO 9001. Il Sistema di Gestione Ambientale è inoltre certificato secondo la Norma UNI EN ISO 14001.

#### BASF Construction Chemicals Italia Spa

Via Vidinale delle Corti, 21 - 31100 Treviso - Italy  
T +39 0422 304251 F +39 0422 421802  
<http://www.basf-cc.it> e-mail: [infomac@basf.com](mailto:infomac@basf.com)

Per maggiori informazioni si consulti il Tecnico di zona della BASF Construction Chemicals Italia Spa.

I consigli tecnici eventualmente forniti, verbalmente o per iscritto, circa le modalità d'uso o di impiego dei nostri prodotti, corrispondono allo stato attuale delle nostre conoscenze scientifiche e pratiche e non comportano l'assunzione di alcuna nostra garanzia e/o responsabilità sul risultato finale delle lavorazioni con impiego dei nostri prodotti. Non dispensano, quindi, il cliente dall'onere e responsabilità esclusivi di verificare l'idoneità dei nostri prodotti per l'uso e gli scopi che si prefigge.

La presente edizione annulla e sostituisce ogni altra precedente. |  
Luglio 2011



---

## Bibliografia

ACI 440.2R-08 (2008). Guide for the design and construction of externally bonded frp systems for strengthening concrete structures. American Concrete Institute.

ACI 440R-96 (1996). State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. American Concrete Institute.

*Aiello M. A., Sciolti M. S.* (2006). "Bond analysis of masonry structures strengthened with cfrp sheets". *Construction and Building Materials*. 420. 90–100.

*Aiello M. A., Sciolti M. S.* (2007). "Analysis of the durability of the bond between masonry and frp sheets". In 8th Int. Symp. on Fiber Reinforced Polymers for Reinforced Concrete Structures - FRPRCS8. Patras (Greece).

*Albert M. A., Elwi A. E., Cheng R. J. J.* (2001). "Strengthening of unreinforced masonry walls using FRPs". *Journal of composites for construction*. ASCE. Vol.5. pp. 76-84.

*Alvaro V.* (2006). "Materiali compositi a matrice cementizia per i rinforzi strutturali". Tesi di Laurea. Università di Bologna.

ASM - Materials Engineering Dictionary

ASTM C1583 (2004). Standard test method for tensile strength of concrete surfaces and the bond strength or tensile strength of concrete repair and overlay materials by direct tension (pull-off method). American Society for Testing and Materials.

*Badalà A., Cuomo .. D'Agata G. (2009). "Analisi limite di volte a botte rinforzate con CFRP". In 19th Conf. Associazione Italiana di Meccanica Teorica e Applicata - AIMETA. Ancona (Italy).*

*Banholzer B., Brockmann T. (2006). "Material and bonding characteristics for dimensioning and modelling of textile reinforced concrete (TRC) elements". Materials and Structures. V. 39. pp. 749 – 763*

*Basilio I., Oliveira D.V., Lourenço P.B. (2005). "Experimental Characterization of FRP-masonry interface behavior". In 5 ° International Conference AMCM. Gliwice. Polonia.*

*Binda L., Baronio G. (1991). "Durabilità delle murature in ambiente aggressivo e delle tecniche di conservazione e protezione". Atti del corso di aggiornamento di ingegneria sismica. 1991. Augusta.*

*Binda L., Tedeschi C., Valluzzi M.R., Garbin E., Panizza M. (2011). "Salt crystallization test on brick masonry reinforced by CFRP textiles". International Conference of Building Materials and Components. Porto.*

*Borri A., Casadei p., Castori G., Hammond J. (2009). "Strengthening of brick masonry arches with externally bonded steel reinforced composites". Journal of composites for construction. 13(6). 468–475.*

*Briccoli Bati S., Rotunno T. (2001). "Environmental durability of the bond between the CFRP composite material and masonry structures". Historical constructions. Guimaraes.*

*Briccoli Bati S., Rovero L., Tonietti U. (2007). "Strengthening masonry arches with composite materials". Journal of Composites for Construction. 11(1). 33–41.*

*Caleca L. (2000). Architettura tecnica. Dario Flaccovio. Palermo.*

*Camata G., Pasquini F., Spacone E. (2007). "High temperature flexural strengthening with externally bonded FRP reinforcement". FRPCS-8 . the 8th International Symposium on*  
200



Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures.16-18 July 2007. Patras.

*Carbone I.* (2010). "Delaminazione di compositi a matrice cementizia su supporti murari". Tesi di Dottorato di Ricerca. University of Roma TRE (Italy).

*Casadei P.; Nanni A.; Alkhrdaji T.; Thomas J.* (2005). "Behavior of double-t prestressed beams strengthened with steel reinforced polymer". *Advances in Structural Engineering an International Journal (ASCE)*. 8(4). 427–442.

*Chin J.W., Nguyen T., Aouadi K.* (1998) . "Sorption and diffusion of water, salt water, and concrete pore solution in composite matrices". National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg. Maryland

CNR DT 200/2004 – "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati"

*Colombi P., Fava G., Poggi C.* (2010). Bond strength of CFRP-concrete elements under freeze-thaw cycles. *Composite Structures*. Elsevier. pag. 973-983.

*Cromwell J.R., Harries K.A., Shahrooz B.M.* (2011). "Environmental durability of externally bonded FRP materials intended for repair of concrete structures". *Construction and Building Materials*. Elsevier. pag. 2528-2539.

*Desiderio P., Feo L.* (2005). "Durability evaluation of EBR CFRP strengthened masonry structures". BBFS 2005.

*Di Tommaso A., Focacci F., Mantegazza G., Gatti A.* (2007). "FRCM vs. FRP composite to strengthen RC beams: a comparative analysis". In: *FRPRCS-8 international symposium proceedings*. Patras July 16-18 Greece.

*Dolan C.W., Ahearn B. (2008). "Durability and accelerated ageing testing of CFRP repair systems". CICE 2008. Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. 22-24 July 2008. Zurich.*

*Faella C., Martinelli E., Nigro E., Paciello S. (2010). "Shear capacity of masonry externally strengthened by a cement-based composite material: An experimental campaign". Construction and Building Materials. 24. pp. 84-93.*

*Faella C., Martinelli E., Paciello S., Perri F. (2009). "Composite materials for masonry structures: the adhesion issue". In: Atti del 3° Convegno Nazionale MuRiCo3: Mechanics of masonry structures strengthened with composite materials. Venezia. 22-24 Aprile. Italia.*

*Focacci F., Mantegazza G. (2009). "Compositi a matrice cementizia per il rinforzo delle murature: aderenza con il supporto". In: Atti del 3° Convegno Nazionale MuRiCo3: Mechanics of masonry structures strengthened with composite materials. Venezia. 22-24 Aprile. Italia.*

*Galati N., Micelli F., Tumialan G. J., La Tegola A., Nanni A. (2006). "Comparison between FRP strengthening techniques on the out-of-plane behaviour of URM masonry walls". Department of Civil Engineering, University of Missouri – Rolla. Department of Innovation Engineering, University of Lecce. Simpson Gumpertz & Heger Inc.*

*Ghiassi B., Marcari G., Oliverira D.V., Lourenço P.B. (2013). "Water degrading effects on the bond behavior in FRP-strengthened masonry". Composites: Part B. Elsevier pag.11-19.*

*Gilstrap J. M., Dolan C. W. (1998) Out-of-plane bending of FRP-reinforced masonry walls; Composites science and technology. Elsevier. pp.1277-1284.*

*Hamoush S., McGinley M., Mlakar P., Terro M. J. (2002). "Out-of-plane behavior of surface-reinforced masonry walls". Construction and building materials. Elsevier. pp. 341-351.*

*Huang X., Birman V., Nanni A., Tunis G. (2005). "Properties and potential for application of steel reinforced polymer and steel reinforced grout composites". Composites Part B:Engineering, 36(1). 73–82.*

*Jasienko J., Di Tommaso A., Bednarz L. (2009). "Experimental investigation into Collapse of Masonry Arches Reinforced Using Different Compatible Technologies". In: Atti del 3° Convegno Nazionale MuRiCo3: Mechanics of masonry structures strengthened with composite materials. Venezia. 22-24 Aprile. Italia.*

*Karbhari V.M., Ghosh K. (2009). "Comparative durability evaluation of ambient temperature cured externally bonded CFRP and GFRP composite system for repair bridges". Composite: Part A. Elsevier. pag. 1353-1363.*

*Kiang Hwee Tan, Patoary M. K. H. (2004). "Strengthening of masonry walls against out-of-plane loads using fiber-reinforced polymer reinforcement". Journal of composites for construction. ASCE. Vol.8. pp.79-87.*

*Kim Y.J., Fam A., Kong A., El-Hacha R. (2005). "Flexural strengthening of RC beams using steel reinforced polymer (SRP) composites". American Concrete Institute (ACI) Special Publication on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures. V. 230. pp. 1647-1664*

*Mantegazza G., Barbieri A. (2002). "Composito fibroso a matrice cementizia (FRCM) per il recupero strutturale delle costruzioni". SAIE 2002 Conferenza AICO. Bologna. 16 Ottobre. Italia.*

*Matana M., Galecki G., Maerz N., Nanni A. (2005). "Concrete substrate preparation and characterization prior to adhesion of externally bonded reinforcement". In: Proceedings of International Symposium on Bond Behavior of FRP in Structures (BBFS). Hong Kong. China.*

*Mitiolidis G.J., Salonikios T.N., Kappos A.J. (2008). "Mechanical and Bond Characteristics of SRP and CFRP Reinforcement – A Comparative Research". The Open Construction and Building Technology Journal. V. 2. pp. 207-216*

*Mukhopadhyaya P., Swamy R.N., Lynsdale C.J. (1998). "Influence of aggressive exposure conditions on the behavior of adhesive bonded concrete-GFRP joints". Construction and Building Materials. Elsevier. pag. 427-446.*

*Myers J.J., Ekenel M. (2004). "Effects of environmental conditions on bond strength between CFRP Laminate and concrete substrate". FRPRCS-7 . the 7th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures. 20 october 2004. New Orleans.*

*Papanicolaou C. G., Triantafyllou T. C., Papathanasiou M., Karlos K. (2007). "Textile reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: out-of-plane cyclic loading". Materials and structures.*

*Prota A., Manfredi G., Nanni A., Cosenza E., Pecce M. (2004). "Flexural Strengthening of RC Beams using Emerging Materials: Ultimate Behavior". International Conference FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2004). Adelaide (Australia). 8-10 December 2004. ed. Seracino. pp. 163-170*

*Prota A., Tan K. Y., Nanni A., Pecce M., Manfredi G. (2006). "Performance of RC shallow beams externally bonded with steel reinforced polymer". ACI Structural Journal. 108(2). 163–170.*

*Silva P. F., El-Domiaty K., Myers J. J., Tumialan J. G., Belarbi A., Nanni A. (2001). "Performance of infill URM wall systems retrofitted with FRP rods and laminates to resist in-plane and out-of-plane loads". Structural faults and repairs.*

*Trapzko T. (2013). "The effect of hight temperature on the performance of CFRP and FRCM confined concrete elements". Composite: Part B. Elsevier pag. 138-145.*

*Triantafillou T. C.* (1998). "Strengthening of masonry structures using epoxy-bonded FRP laminates". *Journal of composites for construction*. 2(2). 96–104.

*Valluzzi M.R., Garbin E., Panizza M., Binda L., Tedeschi C.* (2011). "Moisture and temperature influence on FRP masonry bonding". *International Conference of Building Materials and Components*. Porto.

*Valluzzi M.R., Valdemarca M. e Modena. C.* (2001). "Behaviour of brick masonry vaults strengthened by FRP laminates". Padova : *Journal of composites for construction*. 2001.

*Wobbe E., Silva P.F., Barton B.L., Dharani L.R., Birman V., Nanni A., Alkhrdaji T., Thomas J., Tunis T.* (2004). "Flexural Capacity of RC Beams Externally Bonded with SRP and SRG". In: *Proceedings of Society for the Advancement of Material and Process Engineering Symposium*. Long Beach. Ca.16-20 May 2004.

*Zevi L.* (2001). *Il Manuale del restauro architettonico*. Mancosu editore.