



**Università Politecnica delle Marche**

**Facoltà di Ingegneria**

**Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Edile**

Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Architettura - DICEA

**“Materiali Compositi nel Rinforzo Strutturale”**

**“Composite Materials in the Strengthening of Structures”**

Relatore:

**Prof. Ing. Roberto Capozucca**

Tesi di Laurea di:

**Luca Mazzocchi**

ANNO ACCADEMICO 2019/2020



# Indice

---

<b>PREMESSA .....</b>	<b>1</b>
<b>1. I MATERIALI COMPOSITI .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1 CARATTERISTICHE GENERALI.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2 MATERIALI COSTITUENTI.....</b>	<b>5</b>
1.2.1 MATRICI.....	5
1.2.2 RINFORZI .....	6
<b>1.3 CAMPI DI UTILIZZO .....</b>	<b>7</b>
1.3.1 APPLICAZIONI AERONAUTICHE.....	7
1.3.2 CAMPO AEROSPAZIALE.....	8
1.3.3 SETTORE AUTOMOBILISTICO E MOTORISTICO .....	8
1.3.4 SETTORE NAUTICO .....	8
<b>2. MATERIALI COMPOSITI IN EDILIZIA .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 I MATERIALI COMPOSITI UTILIZZATI NELLE COSTRUZIONI.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 COMPOSITI FIBRORINFORZATI A MATRICE CEMENTIZIA (FRCM).....</b>	<b>10</b>
<b>2.3 COMPOSITI FIBRORINFORZATI A MATRICE POLIMERICA (FRP).....</b>	<b>11</b>
<b>2.4 LE FIBRE DI RINFORZO.....</b>	<b>12</b>
2.4.1 LE FIBRE DI CARBONIO .....	13
2.4.2 FIBRE DI VETRO.....	16
2.4.3 LE FIBRE ARAMIDICHE.....	19
2.4.4 LE FIBRE DI PBO .....	22
2.4.5 TESSUTI E LAMINE.....	24
2.4.5.1 Tessuti unidirezionali .....	24
2.4.5.2 Tessuti bidirezionali .....	25
2.4.5.3 Tessuti multiassiali.....	27
2.4.5.4 Tessuti ibridi.....	27
2.4.5.5 Lamine.....	28
<b>2.5 LE MATRICI.....</b>	<b>29</b>
2.5.1 MATRICI POLIMERICHE TERMOINDURENTI .....	30
2.5.1.1 Le resine epossidiche .....	31
2.5.2 MATRICI CEMENTIZIE.....	32
2.5.3 CARATTERISTICHE TECNICHE .....	33

<b>3. CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI COMPOSITI .....</b>	<b>34</b>
<b>3.1 CONTROLLI DI ACCETTAZIONE .....</b>	<b>34</b>
3.1.1 CAMPIONI DI PROVA .....	36
<b>3.2 VERIFICA DELLE CARATTERISTICHE FISICHE DEI MATERIALI.....</b>	<b>38</b>
3.2.1 PROVA T1 – DENSITA’ DELLE FIBRE .....	38
3.2.2 PROVA T2 – MASSA DEL TESSUTO PER UNITA’ DI AREA .....	39
3.2.3 PROVA T3 – DENSITA’ DELLA RESINA.....	40
3.2.4 PROVA T4 – DETERMINAZIONE DELL’AREA E DELLO SPESSORE EQUIVALENTI.....	40
3.2.5 PROVA T5 – DETERMINAZIONE DELLA FRAZIONE PONDERALE E VOLUMETRICA DELLE FIBRE .....	42
3.2.6 PROVA T6 – DETERMINAZIONE DELLA PERCENTUALE DEI VUOTI NEL COMPOSITO .....	43
<b>3.3 CARATTERISTICHE MECCANICHE DI UN LAMINATO .....</b>	<b>44</b>
3.3.1 CARATTERISTICHE MECCANICHE DEL FILATO.....	45
3.3.2 CARATTERISTICHE MECCANICHE DI UN TESSUTO .....	45
3.3.3 CARATTERISTICHE MECCANICHE DI UN LAMINATO .....	46
3.3.4 VALORI DI PROGETTO E VERIFICHE DI ACCETTAZIONE .....	48
<b>3.4 PROVA T7 – POVA DI TRAZIONE .....</b>	<b>49</b>
<b>4. APPLICAZIONE DI FRP PER STUTTURE IN MURATURA.....</b>	<b>52</b>
<b>4.1 INQUADRAMENTO NORMATIVO .....</b>	<b>52</b>
<b>4.2 VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA .....</b>	<b>54</b>
4.2.1 VERIFICHE DI SICUREZZA .....	55
<b>4.3 VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA NEI CONFRONTI DEL DISTACCO DAL SUPPORTO (DELAMINAZIONE) .....</b>	<b>58</b>
4.3.1 MODALITÀ DI COLLASSO .....	59
4.3.2 RESISTENZA ALLA DELAMINAZIONE RADENTE ALLO STATO LIMITE ULTIMO .....	60
4.3.3 RESISTENZA ALLA DELAMINAZIONE IN PRESENZA DI AZIONE NORMALE AL PIANO DI ADESIONE .....	64
4.3.4 SISTEMI DI ANCORAGGIO MECCANICO .....	64
<b>4.4 VERIFICHE DI ELEMENTI STRUTTURALI RICORRENTI.....</b>	<b>65</b>
4.4.1 RINFORZO DI PANNELLI MURARI.....	65
4.4.1.1 Verifiche per azioni fuori dal piano .....	65
4.4.1.1.1 Verifica per ribaltamento semplice.....	65

4.4.1.1.2	Verifica per flessione della striscia muraria verticale .....	67
4.4.1.1.3	Verifica per flessione della striscia muraria orizzontale .....	70
4.4.1.2	Verifiche per azioni nel piano .....	72
4.4.1.2.1	Verifica a pressoflessione nel piano .....	72
4.4.1.2.2	Verifica a taglio .....	72
4.4.2	ARCHITRAVE E FASCIA DI PIANO.....	76
4.4.2.1	Verifica per funzionamento ad architrave.....	78
4.4.2.2	Verifica per funzionamento a fascia di piano.....	78
<b>4.5</b>	<b>RINFORZO DI ELEMENTI A SEMPLICE E DOPPIA CURVATURA .....</b>	<b>79</b>
4.5.1	ARCHI .....	80
4.5.1.1	Schema ad arco.....	80
4.5.1.2	Schema a portale .....	82
4.5.2	VOLTE A SEMPLICE CURVATURA: VOLTE A BOTTE .....	82
4.5.3	VOLTE A DOPPIA CURVATURA: CUPOLE.....	83
4.5.3.1	Regime membranale.....	83
4.5.3.2	Regime flessionale .....	83
4.5.4	VOLTE A DOPPIA CURVATURA SU PIANTA QUADRATA .....	85
<b>4.6</b>	<b>CONFINAMENTO DI COLONNE DI MURATURA .....</b>	<b>85</b>
4.6.1	RESISTENZA DI PROGETTO A COMPRESSIONE CENTRATA NELL'ELEMENTO CONFINATO .....	86
4.6.2	CONFINAMENTO DI COLONNE CIRCOLARI.....	88
4.6.3	CONFINAMENTO DI COLONNE QUADRATE O RETTANGOLARI .....	90
<b>4.7</b>	<b>PRINCIPI GENERALI DI INTERVENTO PER COSTRUZIONI IN ZONA SISMICA .....</b>	<b>94</b>
4.7.1	PRINCIPI GENERALI DI INTERVENTO .....	95
<b>4.8</b>	<b>INSTALLAZIONE E PARTICOLARI COSTRUTTIVI.....</b>	<b>97</b>
4.8.1	CONTROLLO E PREPARAZIONE PREVENTIVA DEL SUBSTRATO.....	97
4.8.1.1	Valutazione del deterioramento del substrato .....	98
4.8.1.2	Rimozione e ricostruzione del substrato .....	99
4.8.1.3	Preparazione del substrato.....	99
4.8.2	RACCOMANDAZIONI PER L'ESECUZIONE A REGOLA D'ARTE .....	100
4.8.2.1	Condizioni di umidità e temperatura dell'ambiente e del substrato.....	100
4.8.2.2	Particolari costruttivi e norme di esecuzione .....	101
4.8.2.3	Protezione del sistema di rinforzo .....	101

<b>4.9 PROCEDURA PER LA POSA IN OPERA</b> .....	<b>102</b>
4.9.1 CERCHIATURA DI EDIFICIO IN MURATURA TRAMITE FASCE DI FRP .	102
4.9.2 RINFORZO DI VOLTE IN MURATURA CON FASCE DI FRP .....	108
<b>5. APPLICAZIONE DI FRP PER STRUTTURE IN CALCESTRUZZO</b>	
<b>ARMATO</b> .....	<b>113</b>
5.1 INQUADRAMENTO NORMATIVO .....	114
5.2 VERIFICHE DI RESISTENZA.....	115
5.3 VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA NEI CONFRONTI DEL DISTACCO	
DAL SUPPORTO (DELAMINAZIONE) .....	117
5.3.1 VERIFICHE DI SICUREZZA NEI CONFRONTI DELLA DELAMINAZIONE	
.....	118
5.3.2 RESISTENZA ALLO STATO LIMITE ULTIMO PER DELAMINAZIONE DI	
ESTREMITÀ (Modalità 1).....	120
5.3.3 RESISTENZA ALLO STATO LIMITE ULTIMO PER DELAMINAZIONE	
INTERMEDIA (Modalità 2).....	120
5.3.4 VERIFICA DELLE TENSIONI DI INTERFACCIA ALLO STATO LIMITE DI	
ESERCIZIO .....	121
5.4 RINFORZO A FLESSIONE .....	124
5.4.1 ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO.....	124
5.4.1.1 Resistenza di progetto a flessione dell'elemento rinforzato con FRP.....	126
5.4.1.2 Resistenza di progetto a flessione dell'elemento rinforzato con FRP in presenza	
di forza assiale (pressoflessione).....	128
5.4.1.3 Collasso per distacco di estremità .....	129
5.4.2 ANALISI DEL COMPORTAMENTO AGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO .	131
5.4.2.1 Verifica delle tensioni .....	132
5.4.2.2 Verifica delle frecce .....	133
5.4.2.3 Verifica dell'apertura delle fessure .....	134
5.4.3 DUTTILITÀ .....	135
5.5 RINFORZO A TAGLIO.....	135
5.5.1 CONFIGURAZIONI PER IL RINFORZO A TAGLIO .....	135
5.5.2 RESISTENZA DI PROGETTO A TAGLIO DELL'ELEMENTO RINFRZATO	
CON FRP .....	137
5.5.2.1 Resistenza di progetto a taglio .....	137
5.5.2.2 Resistenza efficace di progetto del rinforzo .....	139
5.6 RINFORZO A TORSIONE.....	141

5.6.1 CONFIGURAZIONI PER IL RINFORZO A TORSIONE.....	141
5.6.2 RESISTENZA DI PROGETTO A TORSIONE DELL'ELEMENTO RINFORZATO CON FRP .....	141
5.6.2.1 Resistenza di progetto a torsione.....	142
<b>5.7 CONFINAMENTO .....</b>	<b>143</b>
5.7.1 RESISTENZA DI PROGETTO A COMPRESSIONE CENTRATA O CON PICCOLA ECCENTRICITÀ DELL'ELEMENTO CONFINATO .....	145
5.7.1.1 Stima della pressione laterale di confinamento.....	146
5.7.1.1.1 Sezioni circolari.....	148
5.7.1.1.2 Sezioni quadrate e rettangolari .....	149
5.7.2 DUTTILITÀ DI ELEMENTI PRESSOINFLESSI CONFINATI CON FRP .....	150
<b>5.8 RINFORZO A FLESSIONE DI STRUTTURE IN C.A.P.....</b>	<b>151</b>
5.8.1 ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO.....	151
5.8.2 ANALISI DEL COMPORTAMENTO AGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO .	152
<b>5.9 INTERVENTI IN ZONA SISMICA.....</b>	<b>153</b>
5.9.1 PRINCIPI GENERALI DI INTERVENTO .....	153
5.9.1.1 Eliminazione dei meccanismi di collasso di tipo fragile.....	154
5.9.1.1.1 Crisi per taglio .....	154
5.9.1.1.2 Crisi dei pilastri per perdita di aderenza delle barre.....	154
5.9.1.1.3 Crisi nei pilastri per svergolamento delle barre.....	155
5.9.1.1.4 Crisi per trazione dei pannelli dei nodi trave – pilastro.....	156
5.9.1.2 Eliminazione dei meccanismi di collasso di piano.....	156
5.9.1.3 Incremento della capacità deformativa globale di una struttura .....	156
5.9.1.3.1 Incremento della capacità deformativa locale degli elementi .....	156
5.9.1.3.2 Rilocalizzazione delle potenziali cerniere plastiche.....	157
5.9.1.3.3 Rotazione ultima degli elementi rinforzati .....	157
<b>5.10 INSTALLAZIONE, MONITORAGGIO E CONTROLLO .....</b>	<b>157</b>
5.10.1 CONTROLLO E PREPARAZIONE PREVENTIVA DEL SUBSTRATO.....	158
5.10.1.1 Valutazione del deterioramento del substrato .....	158
5.10.1.2 Rimozione e ricostruzione del substrato ed eventuale trattamento delle barre metalliche .....	159
5.10.1.3 Preparazione del substrato.....	159
5.10.2 RACCOMANDAZIONI PER L'ESECUZIONE A REGOLA D'ARTE .....	160
5.10.2.1 Condizioni di umidità e temperatura dell'ambiente e del substrato.....	160

5.10.2.2 Particolari costruttivi e norme di esecuzione .....	161
5.10.2.3 Protezione del sistema di rinforzo .....	161
<b>5.10.3 CONTROLLO DI QUALITÀ DELL'ESECUZIONE .....</b>	<b>162</b>
5.10.3.1 Prove semi-distruttive .....	162
5.10.3.2 Prove non distruttive .....	163
<b>5.10.4 QUALIFICA DEGLI OPERATORI PER L'ESECUZIONE DELLE PROVE ..</b>	<b>164</b>
<b>5.10.5 MONITORAGGIO DELL'INTERVENTO DI RINFORZO .....</b>	<b>165</b>
<b>5.11 PROCEDURA PER LA POSA IN OPERA .....</b>	<b>166</b>
5.11.1 CONFINAMENTO DI PILASTRO IN C.A. ....	166
<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>171</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>174</b>
<b>Allegato 1 .....</b>	<b>178</b>
<b>Allegato 2 .....</b>	<b>182</b>





# PREMESSA

---

Il presente lavoro di tesi si propone di presentare e studiare, in linea generale, i materiali compositi utilizzati in edilizia e nell'ingegneria civile, per il rinforzo, il consolidamento ed il miglioramento delle prestazioni sismiche di edifici preesistenti.

La tesi si soffermerà in particolare sulle tecniche di applicazione, sui campi di utilizzo e sui materiali utilizzati nella realizzazione di interventi di consolidamento e rinforzo di edifici o parti di edifici tramite posa in opera di FRP (*Fiber Reinforced Polymer*). La presentazione avrà quindi come oggetto i soli materiali compositi a matrice polimerica e rinforzati tramite fibre di materiali di rinforzo, con particolare attenzione riservata ai CFRP, ovvero ai *materiali compositi a matrice polimerica rinforzati tramite fibre di carbonio*.

L'intento della discussione è quello di illustrare l'innovazione portata nel campo dell'edilizia dall'utilizzo di questi materiali, andando ad analizzare le diverse applicazioni in ambito strutturale, i vari prodotti disponibili sul mercato, l'apporto, per quanto riguarda l'aumento delle caratteristiche meccaniche e strutturali, che i rinforzi in FRP sono in grado di conferire a strutture classiche in muratura o calcestruzzo armato, le modalità di posa dei vari sistemi di rinforzo con FRP relazionate alle condizioni e alle caratteristiche della struttura su cui vanno applicati e le procedure da seguire per effettuare una valutazione ed una verifica attendibili delle sollecitazioni che le strutture sono in grado di sostenere, quando rinforzate con materiali compositi idonei, identificate e definite dalle Normative vigenti e dalle Istruzioni e Linee Guida redatte dal *Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)*, dal *CEN (Comité Européen de Normalisation)* e dall'*ACI (American Concrete Institute)*.

La discussione si svilupperà in diversi capitoli:

- Il primo capitolo descrive in maniera generale le caratteristiche principali dei materiali compositi, la loro composizione e i diversi campi di utilizzo.
- Il secondo capitolo si propone di presentare le principali tipologie di materiali compositi utilizzati in campo edile, descrivendo le caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali utilizzati per la fabbricazione delle fibre di rinforzo e delle matrici e individuando alcune delle principali soluzioni proposte dal mercato.
- Il terzo capitolo espone e descrive le comprovate modalità di caratterizzazione dei materiali compositi utilizzati in edilizia, le modalità di esecuzione dei controlli di accettazione dei materiali e delle verifiche delle caratteristiche fisiche e meccaniche.
- Il quarto capitolo introduce il discorso dell'applicazione di rinforzi con materiali compositi fibrorinforzati FRP per il consolidamento strutturale di edifici a struttura muraria. All'interno del capitolo vengono descritte le principali modalità di crisi e di collasso delle più comuni strutture in muratura e le tecniche di realizzazione degli interventi di rinforzo tramite FRP, con relative procedure per la valutazione e la verifica della resistenza di questi ultimi al collasso. Vengono inoltre individuati i principi di intervento in zona sismica e le procedure esecutive per la realizzazione a regola d'arte dell'intervento, concludendo con la presentazione di due esperienze dirette a titolo di esempio di quanto descritto nell'intero capitolo.
- Il quinto capitolo riprende e ripercorre gli argomenti del quarto capitolo, incentrando il discorso attorno agli interventi di rinforzo e consolidamento di elementi strutturali in calcestruzzo armato e calcestruzzo armato precompresso. Il capitolo analizza le modalità di esecuzione delle verifiche di resistenza degli elementi strutturali rinforzati tramite FRP agli Stati Limite Ultimo e di Esercizio, andando ad individuare i principali meccanismi di crisi e di collasso dei principali elementi strutturali di una costruzione

in calcestruzzo armato. Vengono inoltre descritte le procedure per la realizzazione di un intervento a regola d'arte, le modalità di installazione dei sistemi di rinforzo con FRP, fornendo un esempio pratico descritto in base ad una esperienza diretta in cantiere.

# 1. I MATERIALI COMPOSITI

---

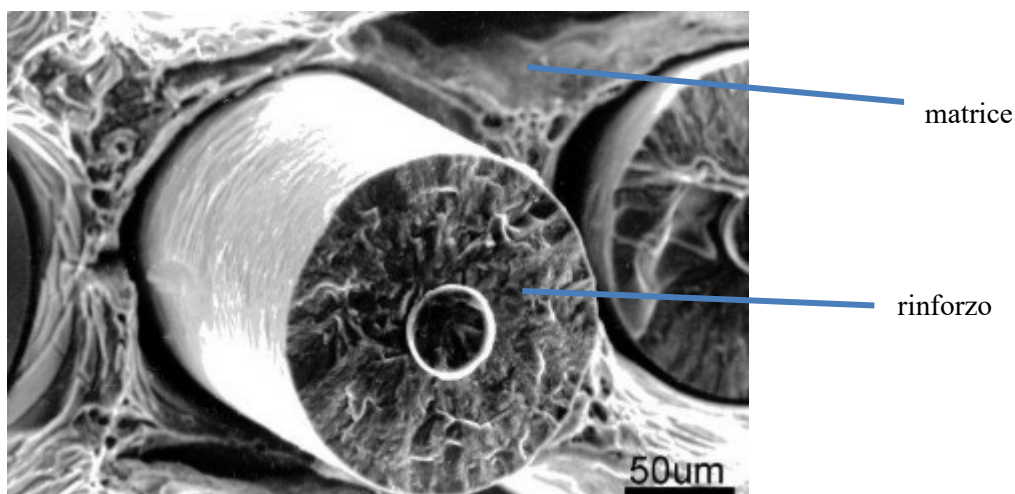
## 1.1 CARATTERISTICHE GENERALI

Generalmente per materiale composito si intende un materiale eterogeno, ovvero costituito da due o più componenti, anche dette *fasi*, aventi proprietà fisiche distinte, di natura differente e macroscopicamente distinguibili, che presenta caratteristiche fisiche e meccaniche di lunga superiori a quelle dei suoi singoli costituenti.

Ciascun costituente mantiene le proprie caratteristiche fisiche all'interno del composto senza fondersi o dissolversi completamente nell'altro, dando origine ad un materiale non omogeneo, ma estremamente prestazionale.

Fondamentalmente i componenti principali costituenti un materiale composito sono due:

- Una *matrice*, anche detta *fase continua*, con caratteristiche meccaniche deboli, che ha il compito di assicurare la coesione del materiale composito e di racchiudere il rinforzo garantendone la giusta dispersione ed impedendo la segregazione, dando forma e geometria al materiale finito.
- Il *rinforzo*, anche detto *fase dispersa*, che presenta elevate caratteristiche meccaniche e che, disperso uniformemente nella massa della matrice, ha il compito di assicurare la rigidità e la resistenza meccanica del materiale composito, rappresentando la parte veramente soggetta agli sforzi.



**Figura 1.1** – Osservazione di materiale composito al microscopio elettronico a scansione (SEM).

## 1.2 MATERIALI COSTITUENTI

Le caratteristiche meccaniche del rinforzo devono essere largamente superiori a quelle della matrice, in particolare si richiede che la fase dispersa possieda modulo elastico almeno cinque volte superiore a quello della fase continua. Solo se quest'ultima condizione è verificata si può parlare di materiale composito “*rinforzato*”, altrimenti si tratta di materiale composito “*modificato*”.

### 1.2.1 MATRICI

Il materiale costituente la matrice può essere di diversa natura, purché consenta di mantenere le caratteristiche di omogeneità e di isotropia: le caratteristiche meccaniche e le proprietà fisiche del materiale composito finale dipendono strettamente dal tipo di sostanza utilizzato per comporne la matrice.

Dalla scelta della matrice dipendono infatti caratteristiche quali la resistenza agli agenti chimici e all'aggressione degli agenti atmosferici, la resistenza al fuoco, la conducibilità elettrica e la temperatura di esercizio. In particolare è possibile distinguere:

- PMC (Polymer-Matrix Composite), compositi a matrice polimerica, come termoplastici (Nylon) o termoindurenti (resine epossidiche).
- MMC (Metallic-Matrix Composite), compositi a matrice metallica, come alluminio o titanio.
- CMC (Ceramic-Matrix Composite), compositi a matrice ceramica, come carburo di silicio o allumina.

Nella Tabella 1.1 sono state riportate le caratteristiche fisiche e meccaniche di alcune delle matrici polimeriche (PMC), metalliche (MMC) e ceramiche (CMC) più utilizzate nella realizzazione di materiali compositi.

Di particolare rilievo risulta essere il dato riguardo la conducibilità termica, ovvero la capacità di trasmettere calore attraverso la propria massa, che risulta essere di entità trascurabile per le matrici polimeriche a confronto con le matrici metalliche e ceramiche; allo stesso modo risulta significativa l'entità del coefficiente di dilatazione termica, elevata per le matrici polimeriche e limitata per le matrici metalliche e ceramiche, un dato che giustifica le diverse temperature limite di esercizio dei diversi materiali.

Proprietà	Polimeri		Metalli		Ceramiche	
	Nylon	Resine Epossidiche	Alluminio	Titanio	Carburo di Silicio	Allumina
Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	1140	1110 ÷ 1400	2700	4500	3220	3980
Modulo Elastico [GPa]	3,8	2,3 ÷ 3,9	70	110	400	375
Resistenza a Trazione [MPa]	60 ÷ 80	28 ÷ 91	160	800 ÷ 2000	340	350
Conducibilità Termica [W/mK]	0,27	0,21	200	26	110	31
Coefficiente di dilatazione termica [ $\cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	50 ÷ 70	50 ÷ 70	24	8,4	3,8	7,4
Massima Temperatura di Esercizio [°C]	< 250	< 250	< 1000	< 1000	> 1000	> 1000

**Tabella 1.1** – Principali caratteristiche fisiche e meccaniche di alcune delle principali matrici per materiali compositi.

Solitamente le matrici polimeriche garantiscono la leggerezza del materiale finito, grazie alla loro bassa densità, ma accusano un calo drastico delle performance all'aumentare della temperatura.

## 1.2.2 RINFORZI

I rinforzi, come le matrici, possono essere di diversi tipi, in base alla natura del materiale di cui sono composti, alla forma e alle dimensioni. Un rinforzo si definisce in base a diverse proprietà, quali:

- *Geometria*, ovvero ciò che riguarda forma, dimensioni e distribuzione delle dimensioni. La fase dispersa può essere composta da *particelle* di forma sferoidale, prismatica o lamellare, che conferiscono al materiale finito caratteristiche di omogeneità e isotropia, oppure da particelle di forma cilindrica, dette *fibre*, che sono caratterizzate da un elevato rapporto lunghezza/diametro e che rendono un materiale finito omogeneo e anisotropo, ovvero avente caratteristiche di resistenza differenti in base alla direzione lungo la quale si sviluppano le sollecitazioni. In base alle dimensioni, le fibre si possono classificare come *continue* o *discontinue*, di lunghezza compresa tra i 10 e i 50 mm.
- *Disposizione*, ovvero l'orientazione rispetto agli assi di simmetria del materiale composito. Quando questa è casuale nello spazio, il materiale finito avrà caratteristiche isotrope, in caso contrario il materiale presenta proprietà anisotrope, fino al caso limite di orientazione monodirezionale.

- *Concentrazione*, che viene misurata in frazione di volume e dispersione della massa di rinforzo immerso nella massa di matrice.

I rinforzi comunemente più utilizzati nella realizzazione di materiali compositi sono fibre di vetro e fibre di carbonio.

Nella Tabella 1.2 sono riportate alcune caratteristiche fisiche e meccaniche delle principali fibre di rinforzo utilizzate nei materiali compositi, confrontate con le caratteristiche fisiche e meccaniche del comune acciaio utilizzato nelle costruzioni.

Proprietà	Fibre di Vetro E	Fibre di Vetro S	Fibre di Carbonio		Acciaio da Costruzione
			Alto Modulo	Alta Resistenza	
Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	2500 ÷ 2600	2460 ÷ 2490	1850 ÷ 1900	1750	7800
Modulo di Elasticità [GPa]	70 ÷ 80	85 ÷ 90	390 ÷ 760	240 ÷ 280	206
Resistenza a Trazione [MPa]	2000 ÷ 3500	3500 ÷ 4800	2400 ÷ 3400	4100 ÷ 5100	350 ÷ 600
Deformazione a Rottura [%]	3,50 ÷ 4,50	4,50 ÷ 5,50	0,50 ÷ 0,80	1,60 ÷ 1,73	20 ÷ 30
Coefficiente di Dilatazione termica [*10 <sup>-6</sup> /°C]	5,00 ÷ 5,40	1,60 ÷ 2,90	- 1,45	- 0,60 ÷ - 0,90	10,40

**Tabella 1.2** – Principali caratteristiche fisiche e meccaniche di alcune delle principali fibre di rinforzo per materiali compositi.

## 1.3 CAMPI DI UTILIZZO

Grazie alla loro leggerezza, alla lavorabilità, alla possibilità di creare forme complesse, mantenendo comunque prestazioni meccaniche elevate, i materiali compositi trovano applicazione in diversi campi.

### 1.3.1 APPLICAZIONI AERONAUTICHE

Resistenti, robusti e durevoli, i materiali compositi, in particolare a matrice polimerica e fibre di carbonio, aramidiche e di vetro, rappresentano una valida alternativa ai materiali metallici, in quanto consentono una consistente riduzione di peso e, conseguentemente, un notevole risparmio di carburante.



**Figura 1.2** – Aereo da caccia con fusoliera in materiale composito



### 1.3.2 CAMPO AEROSPAZIALE



**Figura 1.3** – Shuttle rivestito in GRP.

I materiali compositi si dimostrano estremamente efficaci anche nel campo aerospaziale, grazie al peso ridotto e alla capacità di lavorare a temperature elevate. Plastiche rinforzate con fibre di vetro (GRP) vengono utilizzate per l'isolamento termico.

### 1.3.3 SETTORE AUTOMOBILISTICO E MOTORISTICO

Nelle autovetture da competizione, così come nelle comuni utilitarie, i materiali compositi vengono utilizzati per realizzare componenti di carrozzeria, telaio, scocca, rivestimenti interni e persino parti meccaniche, quali molle per sospensioni e organi di trasmissione.



**Figura 1.4** – Vettura sportiva con carrozzeria in CFRP.

### 1.3.4 SETTORE NAUTICO



**Figura 1.5** – Imbarcazione con scafo in vetroresina.

L'utilizzo di materiali compositi ha influenzato anche il settore nautico: imbarcazioni a motore, barche a vela, catamarani, yacht e traghetti, grazie a scafi in vetroresina, vedono incrementare le prestazioni, sia in velocità che in resistenza, e allo stesso tempo riducono il proprio peso, limitando i consumi.

### 1.3.5 SETTORE DELLE COSTRUZIONI

Nel settore delle costruzioni i materiali compositi trovano diversi impieghi, che vanno dal rinforzo e consolidamento strutturale di edifici in muratura portante, alla prefabbricazione di elementi strutturali in calcestruzzo, fino alla realizzazione di interi edifici, completamente in materiali compositi, dal design moderno e quasi impensabile per qualsiasi altro materiale da costruzione.



**Figura 1.6** – Sheraton Hotel di Milano

# 2. MATERIALI COMPOSITI IN EDILIZIA

---

## 2.1 I MATERIALI COMPOSITI UTILIZZATI NELLE COSTRUZIONI

L'applicazione e l'utilizzo delle tecnologie dei materiali compositi nel campo delle costruzioni ha fatto la sua prima comparsa negli anni '80 e, a seguito di diversi studi e sperimentazioni, negli ultimi venti anni ha raggiunto un importante sviluppo.

L'Europa, ed in particolare l'Italia, con il suo patrimonio edilizio estremamente vario e che negli ultimi anni ha subito pesantemente i fenomeni tellurici scatenatisi nelle regioni centrali del Paese, hanno dato un importante impulso alla ricerca e allo sviluppo di materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) e materiali compositi fibrorinforzati a matrice cementizia (FRCM).

I materiali compositi utilizzati in edilizia sono rinforzati tramite fibre e vengono applicati principalmente in interventi di recupero, consolidamento e miglioramento sismico di edifici in muratura e in calcestruzzo armato.

## 2.2 COMPOSITI FIBRORINFORZATI A MATRICE CEMENTIZIA (FRCM)

I materiali compositi fibrorinforzati a matrice cementizia, anche detti *a matrice inorganica*, sono il risultato dell'accoppiamento di reti di fibre di diversi materiali (generalmente acciaio, aramide, basalto, carbonio, vetro o PBO) inglobate all'interno di una matrice a base di cemento o calce.

La matrice inorganica, oltre ad incorporare le reti di rinforzo, svolge la funzione di aderire alla struttura interessata dall'intervento di rinforzo e può contenere al suo interno più strati di rinforzo, opportunamente distanziate.



**Figura 2.1** – Applicazione di FRCM su struttura in muratura

Generalmente vengono impiegate malte cementizie, aeree, idrauliche, bastarde e malte a base di calce naturale.

Gli FRCM sono molto utilizzati per il rinforzo di strutture esistenti, in quanto le matrici a basi cementizie risultano particolarmente affini a supporti in muratura ed in calcestruzzo armato.

Tra i tanti vantaggi offerti da questa tecnologia sono di rilievo la resistenza al fuoco, paragonabile a quella del substrato in muratura o in calcestruzzo, e la permeabilità, che permette gli scambi termoigrometrici della struttura con l'esterno consentendo la fuoriuscita dell'umidità interna agli elementi strutturali. Inoltre la matrice cementizia consente l'adesione su superfici umide e irregolari.

### 2.3 COMPOSITI FIBRORINFORZATI A MATRICE POLIMERICA (FRP)

I materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica sono costituiti da una matrice polimerica di natura organica che al proprio interno incorpora rinforzi in fibra continua dalle elevate proprietà meccaniche.



**Figura 2.2** – Applicazione di FRP su struttura in calcestruzzo armato

Gli FRP presentano comportamento anisotropo ed eterogeneo, ma che si mantiene prevalentemente elastico lineare fino al collasso. Sono molto utilizzati negli interventi di rinforzo di strutture esistenti in quanto estremamente leggeri, resistenti alla corrosione e in grado di resistere a sollecitazioni molto intense, inoltre presentano importanti proprietà dielettriche e amagnetiche oltre che coibenti.

Le fibre di rinforzo che sono maggiormente utilizzate per questa tecnologia sono le fibre di carbonio, ad alta resistenza e ad alto modulo elastico, le fibre di vetro, di tipo E ed S, e le fibre di aramide.

## 2.4 LE FIBRE DI RINFORZO

Le fibre compongono la parte resistente del materiale, queste possono essere continue o discontinue: nel primo caso sono disposte in maniera allineata a formare dei nastri, dei tessuti e delle lamine; nel secondo caso le fibre sono corte e disposte in maniera casuale all'interno della massa della matrice.

I materiali compositi maggiormente utilizzati nelle costruzioni sono quelli fibrorinforzati a fibra lunga, che possono essere distinti in due tipologie principali, a prescindere dalla tecnologia di fabbricazione:

- Materiali compositi monostrato, anche detti *lamine*, costituiti da un solo strato di rinforzo, sono materiali anisotropi, le loro caratteristiche meccaniche dipendono quindi dalla direzione secondo la quale vengono posati in opera.
- Materiali compositi multistrato, anche detti *laminati*, sono costituiti dalla sovrapposizione di strati dello spessore di qualche decimo di millimetro (ovvero le lamine); nel caso più semplice le fibre sono contenute nel piano della lamina, non sono cioè presenti fibre perpendicolari a tale piano. Esiste inoltre una particolare classe di materiali multistrato, detti *laminati ibridi*, in cui le singole lamine sono costituite da fibre di diversa natura o materiali diversi. Il vantaggio dei laminati è quello di consentire un miglior controllo dell'orientazione delle fibre e, di conseguenza, delle proprietà meccaniche del materiale.

Le fibre sono costituite da filamenti continui molto sottili e sono disponibili in commercio in diversi formati, tra cui i più comuni sono riportati nella Tabella 2.1.

Combinando assieme alcune centinaia di *tows* o di *yarns* si ottiene il *tape*, in cui *tows* e *yarns* possono essere semplicemente affiancati oppure cuciti tra loro o fissati su un supporto. I filamenti sono caratterizzati dalla composizione chimica e dalla massa per unità di lunghezza: secondo la norma ISO 2974:2000, l'unità di misura della massa lineare, o *titolo*, è il Tex, equivalente a 1 grammo per chilometro di lunghezza della fibra  $[1 \text{ Tex} = 1 \text{ g/km}]$ .


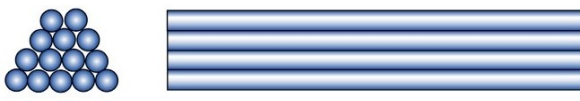
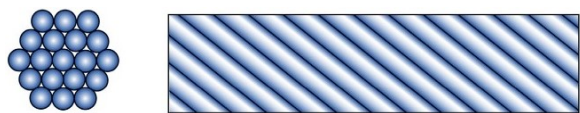

TIPOLOGIA	DESCRIZIONE	PROFILO	
<b>Filamento</b>	Elemento di base di diametro pari a circa 10 µm		
<b>Cavo di filatura (tow)</b>	Fascio composto da un gran numero di filamenti, senza torsione		
<b>Filo o Filato (spun yarn)</b>	Filo composto da filamenti tenuti insieme da torsione		
<b>Filo assemblato (roving)</b>	Fascio costituito da filati assemblati parallelamente e senza torsione		

Tabella 2.1 – Esempio delle tipologie di fibre di rinforzo presenti sul mercato

### 2.4.1 LE FIBRE DI CARBONIO

Il termine “fibra di carbonio” sta ad indicare fibre in cui sia contenuta una percentuale di carbonio variabile tra l’80% e il 95%. Queste si ottengono tramite un processo detto *pirolisi*, un processo industriale di lavorazione ad alta temperatura di particolari polimeri detti *precursori*, tra cui il più utilizzato è il *poliacrilonitrile*, generalmente indicato con l’acronimo PAN, e si distinguono per il loro caratteristico colore nero, oltre che per l’alto modulo di elasticità normale e per l’elevata resistenza. Esibiscono un comportamento a rottura intrinsecamente fragile caratterizzato da un assorbimento di energia relativamente modesto, anche se le tensioni di rottura sono elevate.

Il PAN subisce il suo percorso di trasformazione in carbonio attraversando tre stadi:

1. **Stabilizzazione**, fase durante la quale le fibre vengono sottoposte ad un trattamento termico a 200-240°C per circa 24 h, in modo che la struttura molecolare subisca un’orientazione preferenziale nella direzione del carico applicato;
2. **Carbonizzazione**: durante questa fase le temperature a cui sono sottoposte le fibre di PAN crescono fino a 1500°C in atmosfera inerte, in questo lasso di tempo la maggior parte degli elementi chimici diversi dal carbonio sono eliminati;
3. **Grafitizzazione**: nel corso di questa ultima fase, mantenendo le fibre in atmosfera inerte, la temperatura viene portata a 3000°C, grazie a queste particolari condizioni la

struttura cristallina delle fibre può svilupparsi completamente avvicinandosi a quella della grafite.

I processi produttivi possono dare vita a materiali più o meno puri, questo è il motivo per cui sul mercato sono presenti diversi tipi di fibre di carbonio caratterizzate da parametri di elasticità e resistenza molto diversi tra loro. La resistenza specifica delle fibre di carbonio (circa 40 volte superiore al comune acciaio da c.a., FeB44K) è il parametro che maggiormente caratterizza le scelte di mercato, nelle applicazioni edilizie si prediligono le fibre ad alto modulo elastico a trazione e ad alta resistenza.

Le tipologie di fibre di carbonio più diffuse sono denominate come carbonio ad *alta tenacità* (HT), ad *alto modulo* (HM) e ad *altissimo modulo* (UHM). Le caratteristiche meccaniche delle tipologie di fibre di carbonio appena presentate sono state riportate in Tabella 2.2 e messe a confronto con acciaio FeB44K ed acciaio armonico.

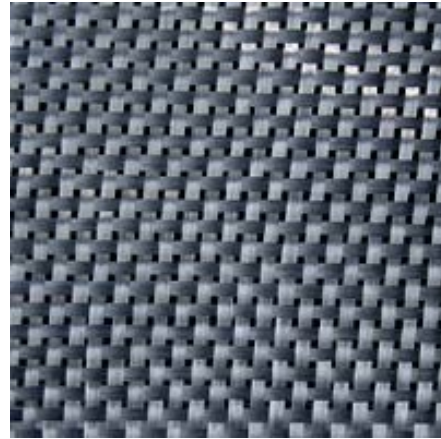
TIPOLOGIA	Fibre di carbonio			Acciaio	
	Alta Tenacità	Alto Modulo	Altissimo Modulo	FeB44K	Acciaio armonico
Modulo elastico [GPa]	230	400	700	210	210
Resistenza a trazione [Mpa]	5000	3000	1500	540	1000 ÷ 2000
Deformazione ultima [%]	2,0	0,9	0,3	20	5
Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	1800	1850	2100	7850	7850
Resistenza specifica [Mpa*m <sup>3</sup> /kg]	2,68	1,62	0,71	0,07	0,12 ÷ 0,15

**Tabella 2.2** – Classificazione fibre di carbonio in funzione del modulo elastico e confronto con acciai da costruzione

Nelle applicazioni dell'ingegneria civile ed edile le fibre di carbonio più utilizzate sono le tipologie standard, o ad alta tenacità, con modulo elastico non superiore ai 250 GPa; le altre tipologie vengono utilizzate in casi particolari: il modulo elastico elevato comporta un aumento del prezzo del materiale, e conseguentemente del costo di quest'ultimo.



**Figura 2.3** – Tessuto monodirezionale di rinforzo in fibra di carbonio



**Figura 2.4** – Tessuto bidirezionale di rinforzo in fibra di carbonio

Le fibre di carbonio hanno un diametro compreso tra i 5  $\mu\text{m}$  e i 10  $\mu\text{m}$ , rispetto alle fibre di vetro e alle fibre aramidiche risultano essere molto meno sensibili ai fenomeni di scorrimento viscoso (*creep*) e di fatica, inoltre sono contraddistinte da una modesta riduzione della resistenza a lungo termine, anche in ambienti umidi e caldi. Posseggono un coefficiente di espansione termica quasi totalmente nullo nella direzione longitudinale, sono però conduttrici elettriche e termiche.

Per le fibre di carbonio si classificano solitamente i filati in termini di “k”, dove il simbolo, k, sta per “migliaia” ed indica il numero di filamenti di cui è costituito un filato. I valori tipici che si trovano in commercio sono: 0,5k, 1k, 3k, 6k, 12k, 18k, 24k, 48k. Un filato da 3k è quindi costituito da 3000 filamenti.

Oltre che in forma *yarn* e *roving*, le fibre sono anche disponibili in composizioni opportunamente arrangiate in modo da formare una grande varietà di tessuti (*fabric*). In questo caso la disposizione delle fibre può essere tale da conferire ai corrispondenti compositi le caratteristiche di quasi isotropia nel piano.

Gli FRP a base di fibre di carbonio si denotano usualmente con l’acronimo CFRP.



## 2.4.2 FIBRE DI VETRO

Le fibre di vetro vengono comunemente utilizzate in campo navale ed industriale per la fabbricazione di compositi con prestazioni medio-alte. Si caratterizzano per la loro elevata resistenza.

Il vetro è composto principalmente da silice ( $\text{SiO}_2$ ) in struttura tetraedrica ( $\text{SiO}_4$ ). Sono aggiunti in varie proporzioni ossidi di alluminio ed altri ioni metallici per facilitare le operazioni di lavorazione o per modificare alcune proprietà.

La designazione tecnica delle fibre di vetro viene effettuata secondo le norme ISO 1139/1973 e ISO 2078/1993. Le fibre di vetro hanno un modulo di Young (E) inferiore a quello delle fibre di carbonio e di aramide, offrono una resistenza all'abrasione relativamente modesta, che richiede una certa cura nella manipolazione durante la messa in opera; questo tipo di fibra ha un'elevata attitudine allo scorrimento viscoso ed una modesta resistenza a fatica. Le fibre di vetro, se non preventivamente trattate, sono vulnerabili all'azione basica della matrice cementizia

Le fibre di vetro sono prodotte per fusione, trafilatura e veloce raffreddamento di particolari tipi di vetro; in Tabella 2.3 sono riportate le composizioni percentuali delle differenti tipologie di fibra di vetro.

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

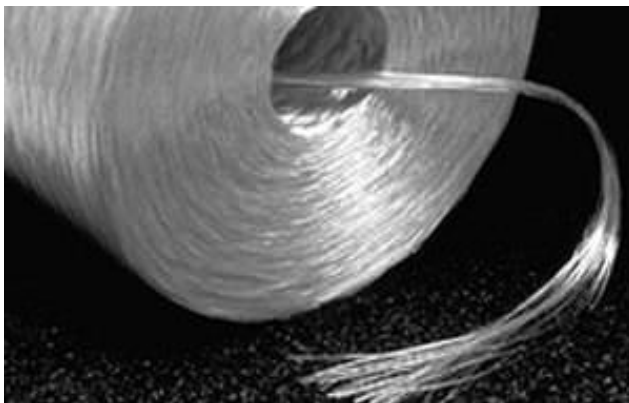


Figura 2.5 – Treccia di filamenti in fibra di vetro

a formare una treccia o fibra (*strand* o *end*), tipicamente costituita da 204 filamenti. I singoli filamenti presentano un diametro medio dell'ordine dei  $10\ \mu\text{m}$  e sono ricoperti da un legante o bozzima (*binder* o *size*). I filati sono raccolti, perlopiù senza ritorcitura, in *roving*. I valori della massa lineare tipici del roving per applicazioni nel settore civile sono superiori a 2000 Tex.

Gli FRP a base di fibre di vetro si denotano usualmente con l'acronimo GFRP.

Componenti	COMPOSIZIONE TIPICA [%]							
	Vetro standard	Vetro resistente all'azione degli acidi			Vetro resistente agli alcali	Vetro ad alta resistenza meccanica		Vetro ad alte caratteristiche dielettriche
	E	A	C	E-CR	AR	S	R	D
SiO <sub>2</sub>	53 ÷ 55	70 ÷ 72	60 ÷ 65	58	60	60 ÷ 65	60	73 ÷ 74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14 ÷ 15,5	0 ÷ 2,5	2 ÷ 6	12 ÷ 13	0,7	20 ÷ 25		
CaO	20 ÷ 25	5 ÷ 9	14	21	5			0,5 ÷ 0,6
MgO			1 ÷ 3	4,5		10		
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			2 ÷ 7	< 0,1		0 ÷ 1,2		22 ÷ 23
F	0 ÷ 0,7			< 0,15				
Na <sub>2</sub> O		12 ÷ 15	8 ÷ 10	0,6	14			
ZrO <sub>2</sub>					18			

**Tabella 2.3** – Classificazione fibre di vetro in funzione della composizione percentuale

Le tipologie più comuni sono il vetro E ed il vetro S, le quali caratteristiche fisiche e meccaniche sono riportate in Tabella 2.4 e messe a confronto con l'acciaio da costruzione.

PROPRIETA'	MATERIALE		
	Fibre di vetro tipo E	Fibre di vetro tipo S	Acciaio FeB44K
Modulo elastico [GPa]	70	90	210
Resistenza a trazione [Mpa]	3500	4700	540
Deformazione ultima [%]	3,8	5,5	20
Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	2550	2500	7850
Resistenza specifica [Mpa*m <sup>3</sup> /kg]	1,37	1,88	0,07

**Tabella 2.4** – Proprietà fisico- meccaniche delle fibre di vetro comuni a paragone con l'acciaio da costruzione

La designazione tecnica delle fibre di vetro viene effettuata secondo le norme ISO 1139:1973 e ISO 2078:1993 e consta dei seguenti elementi:

- Una lettera che identifica il tipo di vetro utilizzato;
- Una seconda lettera che indica il tipo di fibra utilizzato:
  - C (iniziale di “Continuo”, per i filamenti);

- D (iniziale di “Discontinuo”, per le fibre discontinue);
- Un numero che indica il diametro nominale (in  $\mu\text{m}$ ) del filamento;
- Un numero, separato da uno spazio, che indica la massa lineare della fibra in Tex;
- Il senso e il valore di torsione (Figura 2-4), espresso in giri/m (opzionale);
- Il numero di fili costituenti i ritorti (opzionale);
- Un codice del produttore contenente tutte quelle informazioni, non codificate, ritenute indispensabili per caratterizzare il prodotto (opzionale).

Esempio: EC9 34 Z 160 x 4 S 150: la lettera “x” indica che si tratta di un filo costituito da più filamenti identici. La sigla che precede la “x” identifica le caratteristiche dei filamenti: filamento continuo (C) di vetro E, di 9  $\mu\text{m}$  di diametro, di massa lineare pari a 34 Tex e ritorto positivamente (Z) a 160 giri al metro (EC9 34 Z 160). Il numero successivo alla “x” (4) indica il numero di filamenti, la lettera S indica una torsione negativa eseguita a 150 giri al metro (150). Più semplicemente si può denominare come EC9 x 4 S 150.

Le fibre di vetro sono anche disponibili in forma di fogli sottili, denominati *mat*. Un *mat* può essere costituito sia da fibre lunghe continue che da fibre corte (cioè fibre discontinue di lunghezza tipica compresa tra 25 e 50 mm) disposte casualmente nel piano (Figura 2-5) e tenute assieme da un legante chimico. La larghezza dei *mat* è variabile tra 5 cm e 2 m; la loro densità di massa è dell'ordine di 0.5 kg/m<sup>2</sup>.



**Figura 2.6** – Rotolo di mat in fibra di vetro



**Figura 2.7** – Rotolo di rete in fibra di vetro

### 2.4.3 LE FIBRE ARAMIDICHE

Le fibre aramidiche sono di natura organica e sono caratterizzate da elevatissime prestazioni meccaniche. Il termine aramide indica delle poliammidi aromatiche e deriva da *aramid*, contrazione dell'inglese ***AR*omeric poly-*AMID*es**.

Meglio note in commercio col nome *Kevlar*<sup>®</sup>, le prime fibre di aramide furono messe a punto e brevettate dai ricercatori della DuPont<sup>™</sup> nel 1971; esse si distinguono per l'elevata tenacità e per la loro resistenza alle operazioni di manipolazione, oltre che per la loro caratteristica colorazione gialla. La tecnologia di produzione si basa sull'estrusione ad alta temperatura ed alta velocità del polimero in soluzione con successivo raffreddamento veloce ed essiccamento. La sintesi del polimero viene effettuata a monte dell'apparecchiatura di estrusione con l'impiego di soluzioni fortemente acide, segue il trattamento di orientazione a caldo delle fibre per avvolgimento su bobine rotanti a forte velocità al fine di incrementare le caratteristiche meccaniche.



**Figura 2.8** – Rotolo di fibra di aramide

Il modulo di elasticità normale e la resistenza a trazione delle fibre di aramide 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: infatti, a causa dell'anisotropia della struttura della fibra, i carichi di compressione favoriscono lo snervamento localizzato con conseguente instabilità e formazione di piegature (*kinks*). Le fibre aramidiche possono degradarsi per esposizione prolungata alla luce solare, con perdita della resistenza a trazione fino al 50%. Inoltre possono risultare sensibili all'umidità. Il comportamento viscoso (*creep*) 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.

Il punto di forza delle fibre aramidiche sta nel fatto che la loro rottura avviene con la formazione di microfibrille, questo fenomeno consente una grande dissipazione di energia di frattura, conferendo al Kevlar® una grande resistenza all’impatto che la rende ideale per la produzione di vari prodotti: viene difatti utilizzato in applicazioni aerospaziali e militari, per la realizzazione di giubbotti balistici o celle antiuragano.

Differenziando la struttura chimica del Kevlar® durante la sintesi si possono ottenere diverse prestazioni meccaniche: in Tabella 2.5 sono riportate le caratteristiche fisiche e meccaniche di alcune delle fibre aramidiche più comuni, messe a confronto con quelle dell’acciaio da costruzione.

PROPRIETA’	MATERIALI			
	Kevlar® 29	Kevlar® 39	Kevlar® 149	Acciaio FeB44K
Modulo elastico [GPa]	70	140	160	210
Resistenza a trazione [Mpa]	3600	3600	3200	540
Deformazione ultima [%]	3,6	1,9	1,5	20
Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	1440	1450	1470	7850
Resistenza specifica [Mpa*m <sup>3</sup> /kg]	2,50	2,48	2,18	0,07

**Tabella 2.5** – Proprietà fisico- meccaniche delle fibre di aramide comuni a paragone con l’acciaio da costruzione

Le fibre aramidiche sono disponibili in commercio sotto forma di yarn, roving e di tessuti.

L’applicazione di queste fibre nel campo delle costruzioni avviene sotto forma di materiale composito, normalmente come tessuto impregnato in opera con resine epossidiche, che garantiscono l’adesione delle fibre al supporto, o, più raramente, sotto forma di barre o profilati. L’utilizzo principale è attualmente quello per il consolidamento di strutture esistenti. Le fibre aramidiche vengono applicate più alle murature e al legno che al cemento armato, a causa del loro modulo elastico non elevatissimo e della loro elevata duttilità, caratteristiche molto utili specie nel campo dei rinforzi sismici.

Per contro, le fibre aramidiche presentano maggiore assorbimento di acqua (che provoca, a sua volta, fenomeni viscosi) e maggiore sensibilità a variazioni di PH e radiazioni UV, per cui devono essere adeguatamente protette o eventualmente applicate in combinazione con altri tipi di fibre (rinforzi ibridi).

Gli FRP a base di fibre aramidiche si denotano usualmente con l'acronimo AFRP.



**Figura 2.9** – Rotolo di tessuto in fibra di aramide



**Figura 2.10** – Rete di rinforzo in fibra di aramide

#### 2.4.4 LE FIBRE DI PBO

Le fibre di PBO (*Poliparafenilenbenzobisoxazolo*) costituiscono l'ultima innovazione nel campo dei rinforzi strutturali. Sviluppate dalla TOYOBO Co. giapponese precisamente con il nome di Pbo Zylon® sono state inizialmente introdotte nel campo militare (vestiario antiproiettile) nel 1998 e solo negli ultimi anni è iniziata la sperimentazione nel campo dell'ingegneria civile andandola a sostituire all'ormai classica fibra di carbonio.

Questa fibra presenta tenacità, modulo, resistenza all'abrasione, al taglio ed ai raggi UV di gran lunga superiori a qualsiasi fibra aramidica oltre ad avere anche una elevata resistenza alla fiamma ed al calore. Tutte queste eccezionali caratteristiche meccaniche e fisiche si arricchiscono ancora di più per il fatto che la fibra in PBO possiede una ottima stabilità ed un bassissimo assorbimento in ambiente umido (0.6%). Nonostante queste caratteristiche rimane una fibra morbida e molto malleabile, di peso leggerissimo ma di costo elevato.



**Figura 2.11** – Rotolo di filamenti in fibra PBO

La particolare formulazione chimica delle fibre in PBO nel campo dei rinforzi strutturali le rende particolarmente adatte all'utilizzo in abbinamento ad una matrice cementizia: questo polimero di sintesi presenta una struttura molecolare con numerosi siti attivi (atomi di azoto, etc) in grado di stabilire legami chimici covalenti con i composti idrati della matrice inorganica a reazione idraulica alla quale viene abbinata nella realizzazione del composito.

In Tabella 2.6 sono riportate le principali caratteristiche fisiche e meccaniche delle fibre in PBO.

MATERIALE	PROPRIETA'				
	Modulo elastico [GPa]	Resistenza a trazione [Mpa]	Deformazione ultima [%]	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	Temperatura di decomposizione [°C]
PBO	270	5800	2,15	1560	650

**Tabella 2.6** – Proprietà fisico- meccaniche delle fibre di PBO (*Poliparafenilenbenzobisoxazolo*)

Per via della loro compatibilità con matrici di tipo inorganico, i rinforzi in fibra PBO vengono utilizzati nel rinforzo strutturale di edifici in muratura o in calcestruzzo armato tramite compositi FRCM.



**Figura 2.12** – Rete di rinforzo in fibra PBO



**Figura 2.13** – Esempio di posa in opera di rete di rinforzo in fibra PBO



## 2.4.5 TESSUTI E LAMINE

Come detto in precedenza i materiali compositi che hanno maggiore applicazione nel campo delle costruzioni sono quelli fibrorinforzati a fibra lunga, venduti principalmente sotto forma di tessuti o lamine. I tessuti sono disponibili in nastri di varia larghezza oppure in teli di grandi dimensioni e vengono impregnati direttamente in situ. I teli differiscono dai nastri essenzialmente per le loro dimensioni, essendo i nastri di larghezza compresa tra i 20 e i 30 cm e i teli di larghezze superiori ai 30 cm e fino a 120 o 130 cm.

Generalmente, un laminato ottenuto a partire da un tessuto ha una frazione in fibre minore rispetto a quella di un laminato composto da lamine unidirezionali a causa dell'ondulazione (*crimp*) delle fibre nel tessuto.

Il tessuto non impregnato di resina è comunemente contraddistinto dall'attributo "secco".

Nei tessuti si distingue una direzione principale, detta ordito (*warp*), ed una trasversale ortogonale alla prima, detta trama (*welf*).

### 2.4.5.1 Tessuti unidirezionali

Una prima tipologia di tessuto è quella costituita da fibre disposte in una sola direzione ed allineate in un piano; bisogna fare presente che i tessuti unidirezionali realizzati con fibre di carbonio contengono sottili filamenti in fibra di vetro o materiale plastico disposti in direzione trasversale che hanno la funzione di mantenere il parallelismo tra le varie fibre.

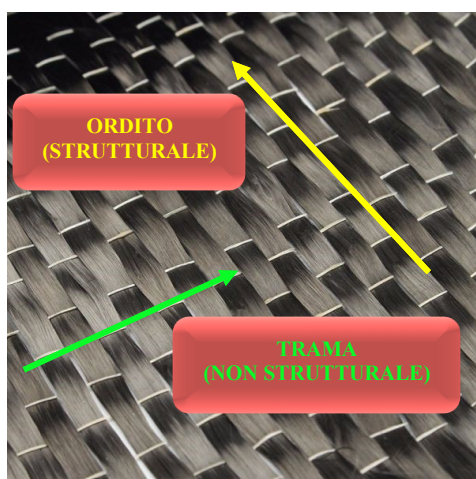


Figura 2.14 – Esempio di tessuto unidirezionale in fibra di carbonio

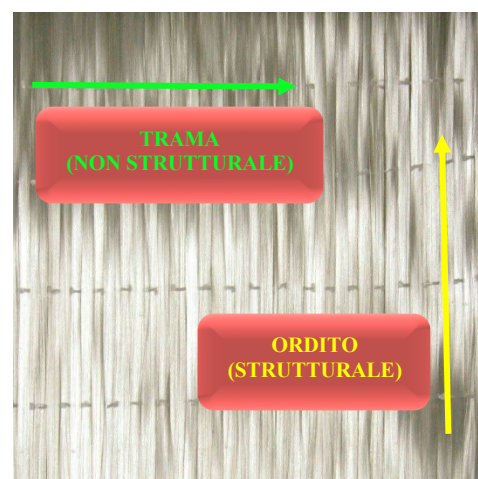


Figura 2.15 – Esempio di tessuto unidirezionale in fibra di vetro

Dato il loro comportamento monoassiale, questi sistemi sono impiegati in genere come rinforzi a flessione e quindi, per esempio, applicati su intradossi di travi e solai; molto ricorrente è però anche il loro utilizzo per la fasciatura esterna di elementi compressi o presso inflessi come i pilastri e le pile da ponte, con lo scopo di contenere le deformazioni trasversali.

### 2.4.5.2 Tessuti bidirezionali

Nei tessuti bidirezionali, le fibre sono orientate secondo due direzioni preferenziali, in modo da realizzare una tessitura *trama – ordito* ortogonale, che conferisce all'elemento caratteristiche di resistenza uniformi nelle due direzioni principali.

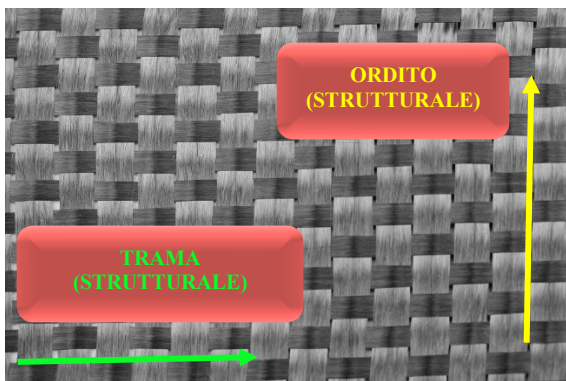


Figura 2.16 – Esempio di tessuto bidirezionale in fibra di carbonio

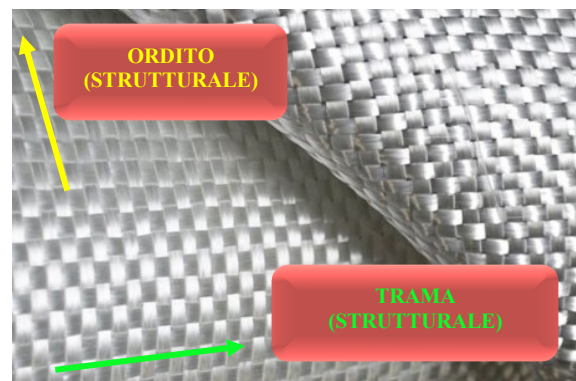
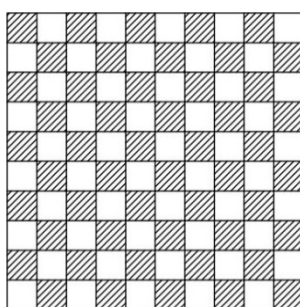


Figura 2.17 – Esempio di tessuto bidirezionale in fibra di vetro

I tessuti bidirezionali possono essere classificati, in base alla loro tessitura, in:

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



- ▨ Filo di trama sopra filo di ordito
- Filo di trama sotto filo di ordito

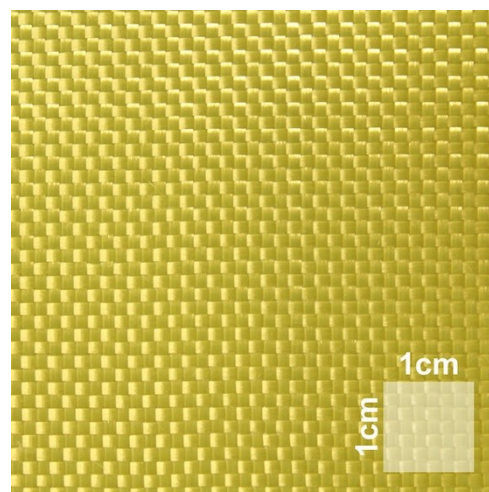
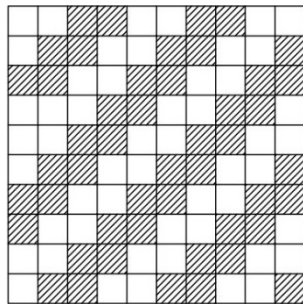


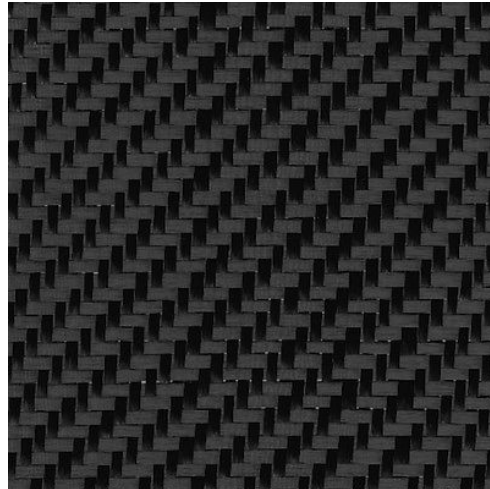


Figura 2.18 – Schematizzazione ed esempio di tela in fibre di aramide

- Batavia (*twill*): presenta due fili sopra e due fili sotto, è più facile da impregnare rispetto alla tela presentando una minore ondulazione, ha però lo svantaggio di essere più difficile da maneggiare.

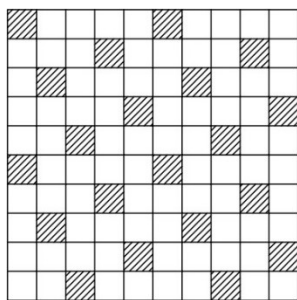




 Filo di trama sopra filo di ordito  
 Filo di trama sotto filo di ordito



**Figura 2.19** – Schematizzazione ed esempio di batavia in fibre di carbonio

- Raso (*satin*): presenta più fili sopra e uno sotto, è ancora più efficace del batavia presentando un'ondulazione minima, e quindi la massima rigidità nel piano, è però più delicato da maneggiare in fase di realizzazione del laminato.



 Filo di trama sopra filo di ordito  
 Filo di trama sotto filo di ordito

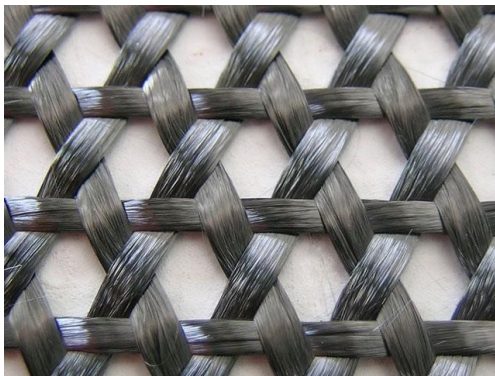
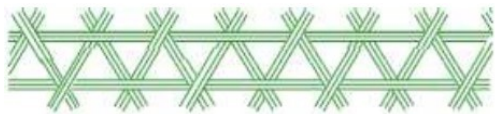


**Figura 2.20** – Schematizzazione ed esempio di raso in fibre di aramide

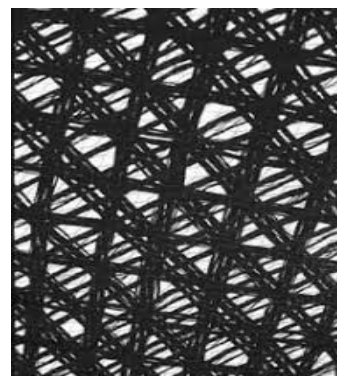
### 2.4.5.3 Tessuti multiassiali

Nei tessuti multiassiali le fibre sono orientate secondo diverse direzioni del piano senza una direzione preferenziale. Essi possono essere costituiti da fili intessuti o semplicemente cuciti tra di loro.

Un esempio di tessuto intrecciato su più assi è quello triassiale, nel quale i filamenti sono intrecciati con angoli di circa  $60^\circ$ , oppure quadriassiale, che oltre alla disposizione di trama e ordito, possiede due ulteriori sviluppi nelle direzioni oblique.



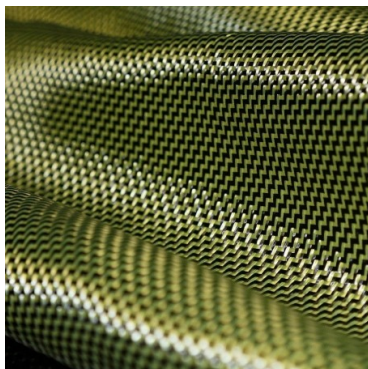
**Figura 2.21** – Tessuto triassiale in fibra di carbonio



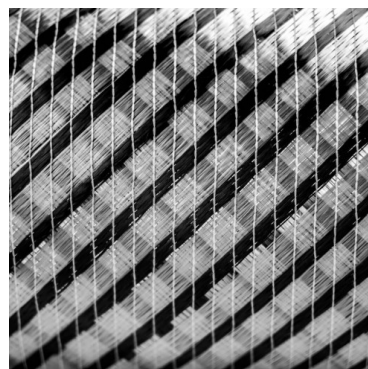
**Figura 2.22** – Tessuto quadriassiale in fibra di carbonio

### 2.4.5.4 Tessuti ibridi

I tessuti ibridi sono tessuti in cui ordito e trama sono costituiti da fibre di materiali di diversa natura. In commercio sono disponibili diversi accoppiamenti, come tessuti carbon/kevlar<sup>®</sup>, tessuti vetro/carbonio, tessuti kevlar<sup>®</sup>/vetro.



**Figura 2.23** – Tessuto ibrido carbon/kevlar<sup>®</sup>



**Figura 2.24** – Tessuto ibrido vetro/carbonio

#### 2.4.5.5 Lamine

L'altra tipologia di prodotto disponibile in commercio è costituita dalle lamine: elementi rigidi già impregnati con la resina, ottenuti per mezzo di laminazione manuale o semiautomatica, seguita da consolidamento in autoclave, per mezzo di avvolgimento o per mezzo di un processo industriale di estrusione sotto trazione che prende il nome di *pultrusione*.

Si tratta di rinforzi a lamina con spessore superiore a 1 mm, costituiti da fibre allineate in una matrice di resina epossidica; queste lamine possono avere resistenza a trazione e modulo elastico particolarmente elevati, grazie alla possibilità di inserire al loro interno una percentuale di filamenti molto alta.

Vista la loro rigidità in genere si applicano, tramite incollaggio, unicamente su superfici piane: risultano, quindi, particolarmente adatte per rinforzi a flessione all'intradosso di travi in cemento.



**Figura 2.25** – Lamine in carbonio pultruso



**Figura 2.26** – Esempio di rinforzo strutturale tramite applicazione di lamine in carbonio pultruso

## 2.5 LE MATRICI

Come già precedentemente annunciato, la matrice, o fase continua, costituisce l'altro componente fondamentale dei materiali compositi. Sebbene le sue caratteristiche meccaniche siano notevolmente inferiori rispetto a quelle del rinforzo, la matrice ha un ruolo essenziale all'interno del composito fibrorinforzato. Infatti ha la funzione di proteggere le fibre dall'ambiente esterno, fissarne l'orientazione ed impregnarle, ma soprattutto di trasferire in modo omogeneo a tutto il composito le sollecitazioni subite dal manufatto. Inoltre la matrice può anche servire a conferire tenacità al materiale poiché, rispetto alle fibre, che generalmente sono molto fragili, questa fase, deformandosi, è maggiormente capace di assorbire energia; infine, la fase continua deve fornire al rinforzo l'adeguata resistenza a compressione per contenere la deformazione trasversale, caratteristica della quale in genere le fibre sono sprovviste.

In conclusione, la matrice deve essere un materiale che in fase di esercizio sia consistente, rigida e priva di difetti, ma che in fase di produzione del composito sia di facile applicazione; quest'ultimo requisito si traduce nella necessità di avere una bassa viscosità ed una bassa tensione superficiale, caratteristiche che permettono di ottenere una buona bagnabilità delle fibre.

La matrice, infatti, deve fluire in interstizi molto piccoli al fine di impregnare completamente tutte le fibre senza lasciare parti del composito con fibre secche.

Nel campo dell'ingegneria edile e civile i materiali compositi dall'utilizzo più diffuso sono *compositi fibrorinforzati a matrici polimeriche (FRP) e cementizie (FRCM)*.

Le principali matrici polimeriche utilizzate nell'industria dei materiali compositi si differenziano essenzialmente in due gruppi: resine termoplastiche e resine termoindurenti. Le ultime sono quelle maggiormente utilizzate poiché hanno basse temperature di esercizio, e quindi a temperatura ambiente possiedono una bassa viscosità che ne facilita l'utilizzo, la gestione e la possibilità di adoperarle senza particolari accorgimenti sulla linea produttiva. Tuttavia queste resine, una volta solidificate per reazione chimica, non possono più essere riutilizzate, poiché il processo di polimerizzazione che le caratterizza è irreversibile: questo pone un forte limite per quanto riguarda la possibilità di riciclo del composito stesso e ne impedisce anche interventi di riparazione. Inoltre queste resine tendono ad avere una scarsa

tenacità e quindi a essere soggette a fratture di tipo fragile, e possiedono anche una certa tendenza ad assorbire l'umidità.

Nonostante questi difetti, le resine termoindurenti continuano a essere preferite alle termoplastiche nella fabbricazione di compositi fibrorinforzati perché, grazie alla facilità di posa, permettono un migliore controllo sull'orientazione delle fibre durante il processo produttivo.

Le resine termoindurenti più diffuse nel settore civile sono le epossidiche che, oltre a presentare ottime capacità adesive, sono caratterizzate da una buona resistenza all'umidità e agli agenti chimici. La temperatura massima di esercizio dipende dalla formulazione e dalla temperatura di reticolazione, al contrario non esistono limitazioni per la temperatura minima di esercizio. Per quanto riguarda la composizione, il reagente principale è costituito da liquidi organici a basso peso molecolare che contengono un certo numero di gruppi epossidici, cioè anelli composti da un atomo di ossigeno e da due atomi di carbonio.

Le matrici cementizie sono tutt'ora in fase di studio e di sperimentazione, ma il loro utilizzo nella realizzazione di compositi fibrorinforzati in ambito civile sta diffondendosi progressivamente.

### 2.5.1 MATRICI POLIMERICHE TERMOINDURENTI

Le matrici più utilizzate in edilizia sono le resine polimeriche termoindurenti, generalmente solo parzialmente polimerizzate e con consistenza fluida o pastosa. Grazie all'aggiunta di un reagente si avvia la reazione di polimerizzazione, o reticolazione, che la porta a solidificare assumendo una struttura vetrosa. I principali vantaggi sono la facilità di impregnazione delle fibre, dovuta alla bassa viscosità, la capacità di reticolare a temperatura ambiente, la buona resistenza agli attacchi chimici e l'assenza di una temperatura di fusione. Gli svantaggi sono il comportamento fragile a rottura, la scarsa resistenza alle alte temperature, che hanno un limite nella temperatura di transizione vetrosa, al di sopra della quale la resina prende lo stato solido, la sensibilità alle condizioni igrometriche in fase di messa in opera.

Le resine maggiormente impiegate sono quelle *epossidiche*, seguite da quelle di *poliestere* e *vinilestere*.

### 2.5.1.1 Le resine epossidiche

Le epossidiche sono il tipo di resina maggiormente utilizzato per le applicazioni nel settore edile. Si tratta di polieteri, che assumono il nome di resine epossidiche a causa della presenza di gruppi epossidici prima della reticolazione. I gruppi epossidici sono anelli costituiti da un atomo di ossigeno e due di carbonio.

La loro produzione avviene a partire dalla reazione di policondensazione tra l'epicloroidrina e il defenilpropano, in eccesso di epicloroidrina in modo da garantire la presenza dei gruppi epossidici agli estremi del polimero. Le resine vengono successivamente fatte reagire per condensazione o accoppiamento con vari materiali, quali composti amminici, come poliammine, poliammidi, fenol-formaldeide, urea-formaldeide, acidi e anidridi acide. Per i materiali compositi impiegati in edilizia, la resina epossidica più utilizzata è il diglicidil etero del disfenolo A.

Il reagente principale così prodotto si presenta come un *prepolimero epossidico*, generalmente fluido a temperatura ambiente, la cui viscosità dipende dal grado di polimerizzazione in cui si trova. Al momento dell'impiego, al reagente principale viene aggiunto un agente reticolante, comunemente detto *induritore*, che di solito è costituito da un'ammina alifatica. La reazione non dà luogo a prodotti di scarto e può avvenire a temperatura ambiente o ad alta temperatura, influenzando in tal modo le proprietà del prodotto finale.

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

Una delle criticità dell'applicazione delle resine epossidiche è però la temperatura massima di esercizio: già per temperature superiori ai 60°C si rende necessaria la scelta di resine particolari e occorre tener conto dell'abbassamento delle caratteristiche meccaniche delle resine stesse.

Le proprietà meccaniche delle resine epossidiche sono molto simili a quelle delle altre resine impiegate in edilizia; le ragioni per cui queste sono generalmente preferite alle altre vanno quindi ricercate in caratteristiche come il basso ritiro, sia in fase di reticolazione che nel tempo, e la migliore interfaccia con le fibre, che comporta prestazioni migliori del composito finale.

Una caratteristica che accomuna le resine di natura organica è l'elevata tossicità che comporta la necessità di adottare procedure di sicurezza nell'impiego di questi prodotti.



Gli aspetti negativi caratteristici delle resine termoindurenti hanno portato allo studio di matrici termoplastiche per la realizzazione dei compositi, oltre a quello di matrici cementizie.

Le resine termoplastiche sono caratterizzate da una temperatura di esercizio più alta, una maggiore tenacità rispetto alle resine termoindurenti e una maggiore resistenza agli agenti ambientali. Inoltre, se portate ad una temperatura adeguatamente alta, queste possono essere modellate secondo la forma desiderata e solidificate in un secondo momento per raffreddamento, mantenendo però inalterate le loro proprietà. La limitazione principale per questo tipo di resine è rappresentata dalla difficoltà di impregnazione delle fibre a causa della loro viscosità elevata.

### 2.5.2 MATRICI CEMENTIZIE

Le matrici inorganiche cementizie sono prodotti di recentissima immissione nel campo dei materiali compositi con fibre. Sono costituite da un legante idraulico pozzolanico e da additivi specifici che favoriscono lo sviluppo di caratteristiche meccaniche e fisiche differenti da quelle tipiche degli FRP con matrici organiche a base polimerica, tra cui le più utilizzate sono le resine epossidiche.

Questa tecnologia nasce per ovviare a quei problemi e a quelle limitazioni che si riscontrano nelle fasi di applicazione e di posa in opera dei rinforzi a matrice polimerica. La matrice cementizia è costituita da una malta speciale ottenuta con cementi di tipo pozzolanico, da miscelarsi con la sola aggiunta di acqua.

L'utilizzo di matrici cementizie comporta notevoli vantaggi:

- La migliore operatività in cantiere, essendo prodotti che non richiedono procedure particolari, ma del tutto simili alle malte tradizionali;
- L'elevata resistenza al fuoco e la buona resistenza ai raggi UV;
- La permeabilità, comparabile a quella del supporto: il sistema di rinforzo FRCM permette il normale scambio termico igrometrico della struttura rinforzata con l'esterno;
- L'applicabilità su supporti umidi: l'umidità presente nelle strutture infatti non inficia il normale indurimento della malta cementizia, anzi, come per il calcestruzzo, ne migliora l'adesione;
- L'applicabilità su supporti scabri e irregolari: la malta cementizia è in grado di riempire eventuali irregolarità che possono essere presenti sulla superficie del supporto.

Una caratteristica negativa risiede invece nelle condizioni ambientali della messa in opera, che dovrebbe avvenire in un intervallo di temperatura compresa fra 5°C e 35°C in quanto a temperature più alte si riduce notevolmente la lavorabilità della malta, mentre a temperatura più bassa rallenta la presa. Questa problematica è comunque presente anche nelle resine organiche, che hanno, in linea di massima, lo stesso intervallo di temperatura ottimale per la preparazione e la messa in opera. L'utilizzo di una matrice inorganica riduce significativamente l'impregnazione delle singole fibre nei fasci e di conseguenza riduce la forza di incollaggio. Una malta cementizia polimero-modificata risulta dare un miglior legame fra la matrice e le fibre ed una migliore resistenza durevolezza; essa è quindi la malta inorganica più promettente per il sistema FRCM.

### 2.5.3 CARATTERISTICHE TECNICHE

In Tabella 2.7 sono state riportate le principali caratteristiche fisiche e meccaniche delle matrici maggiormente utilizzate in edilizia per la realizzazione di materiali compositi fibrorinforzati: resine epossidiche e matrice cementizia.

MATRICE	Modulo elastico [GPa]	Resistenza a trazione [MPa]	Resistenza alle alte temperature	Comportamento a rottura	Viscosità	Tossicità	Pulizia attrezzi utilizzati per la posa
<b>Cementizia</b>	6	3,5 (a 28 gg)	Identica a quella del supporto in calcestruzzo	Duttile	Alta allo stato fluido: difficile impregnazione delle fibre	Nulla	Con semplice acqua
<b>Resina epossidica</b>	2,7 ÷ 3,6	40 ÷ 82	Perdita di caratteristiche strutturali e di adesione intorno agli 80°C	Fragile	Bassa allo stato fluido: facile impregnazione delle fibre	Pericolosa per contatto e per inalazione	Con prodotti solventi e acetone

**Tabella 2.7** – Proprietà fisico- meccaniche di matrici organiche e inorganiche a confronto

# 3. CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI COMPOSITI

---

Con la presente tesi si intende andare a studiare e ad analizzare l'utilizzo di materiali compositi fibrorinforzati nel campo dell'ingegneria civile ed edile, soffermandosi in particolar modo sui materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP).

In questo capitolo verranno analizzati i parametri e le caratteristiche fisiche e meccaniche che consentono una classificazione delle diverse tipologie di compositi fibrorinforzati utilizzati in edilizia.

## 3.1 CONTROLLI DI ACCETTAZIONE

Nell'utilizzo di materiali compositi per il rinforzo strutturale risulta essere di fondamentale importanza la verifica delle caratteristiche meccaniche e fisiche dei materiali impiegati e la loro relativa certificazione.

I progettisti possono fare riferimento alle schede tecniche dei materiali componenti il composito, in cui sono elencate tutte le proprietà fisico-chimiche e meccaniche che dovrebbero accompagnare ogni fornitura, fornite dai produttori, considerando comunque tutti i fattori riduttivi tipici di tali materiali. L'obiettivo è quindi quello di verificare le caratteristiche fisiche del tessuto utilizzato e le caratteristiche meccaniche del composito preparato in cantiere.

I direttori dei lavori dovranno invece verificare, mediante un prelievo eseguito in cantiere, che le caratteristiche meccaniche del prodotto installato soddisfino i requisiti indicati dal progettista. La produzione in cantiere dei provini da sottoporre alle prove di certificazione deve essere effettuata sotto la supervisione del Direttore dei Lavori che, successivamente, potrà consegnare i provini ad un laboratorio qualificato per effettuare le prove sperimentali del caso.

Le Norme Tecniche per le Costruzioni attualmente vigenti in Italia sono dettagliate per i materiali tradizionalmente utilizzati nell'ambito delle costruzioni, ma non danno indicazioni, per il momento, relativamente ai materiali fibrorinforzati, per i quali la caratterizzazione meccanica risulta decisamente più complessa a causa della marcata anisotropia. A questo scopo si farà riferimento nella presente tesi ad un documento pubblicato dal Politecnico di Milano in collaborazione con Assocompositi (*Associazione Italiana compositi e affini*), all'interno del quale sono contenute le descrizioni delle modalità di prova delle diverse caratteristiche fisiche

e meccaniche dei materiali componenti di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica. Tale documento presenta inoltre un sistema da utilizzare in cantiere per la preparazione di provini da sottoporre a prove di accettazione, sulla base di uno specifico protocollo sperimentale, denominato *CoKit*, acronimo di “**K**it per la caratterizzazione di **C**ompositi utilizzati nell’ambito delle costruzioni”.

Il Kit consiste in un insieme di strumenti raccolti in una valigetta da utilizzarsi in cantiere per il prelievo e la preparazione di campioni con l’obiettivo di verificare:

- Le caratteristiche fisiche del tessuto utilizzato;
- Le caratteristiche meccaniche del laminato composito preparato in cantiere;
- Le proprietà meccaniche dell’adesivo strutturale impiegato per l’incollaggio del rinforzo.

Nella seguente tabella riassuntiva (Tabella 3.1) sono elencate le prove più comuni e significative effettuate sui materiali compositi, riguardanti proprietà fisiche (1-6) e meccaniche (7) del composito, accompagnate dalle relative normative di riferimento.

Test	Proprietà	Simbolo	Unità di misura	Normativa di riferimento
<b>T1</b>	Densità delle fibre	$\rho_{fib}$	[g/cm <sup>3</sup> ]	ASTM D792 ISO 1183 - 1
<b>T2</b>	Massa del tessuto per unità di area	$p_x$	[g/m <sup>2</sup> ]	ISO 3374
<b>T3</b>	Densità della resina	$\rho_m$	[g/cm <sup>3</sup> ]	ISO 1675
<b>T4</b>	Area equivalente Spessore equivalente	$A_{rt}$ $t_{eq}$	[mm <sup>2</sup> /m] [mm]	-
<b>T5</b>	Frazione in peso delle fibre nel composito Frazione in volume delle fibre nel composito	$P_{fib}$ $V_{fib}$	- -	ISO 11667 ISO 1172
<b>T6</b>	Percentuale di vuoti nel composito	$V_v$	-	ASTM D2734
<b>T7</b>	Modulo elastico del laminato Resistenza del laminato Deformazione a rottura del laminato Modulo elastico del laminato riferito alle fibre Resistenza del laminato riferita alle fibre Deformazione a rottura delle fibre	$E_f$ $f_f$ $\epsilon_f$ $E_{fib}$ $f_{fib}$ $\epsilon_{fib}$	[MPa] [MPa] [%] [MPa] [MPa] [%]	ISO 527 - 4 ISO 527 - 5

**Tabella 3.1** – Tabella riassuntiva prove principali eseguite su componenti di materiali compositi

### 3.1.1 CAMPIONI DI PROVA

Per l'esecuzione delle prove devono essere confezionati dei campioni che riproducano esattamente le caratteristiche dell'applicazione reale, pertanto la loro preparazione deve essere eseguita con molta attenzione. Generalmente si prepara un laminato all'incirca di dimensioni 20 x 30 cm dal quale poi verranno tagliati i campioni da sottoporre a prove di laboratorio. I risultati di prove effettuate su campioni di materiali fibrorinforzati possono essere influenzati in modo significativo da molti fattori che comportano una diminuzione della resistenza, quali:

- Errato allineamento delle fibre durante la laminazione;
- Presenza nel campione di agenti contaminanti indesiderati, intrappolati durante il processo di laminazione;
- Elevata frazione di vuoti residua (scarso *debulking*);
- Errore di allineamento, che va evitato nella fase finale di taglio del laminato (non perfetto parallelismo tra la linea di taglio e la direzione principale del provino).

Risulta necessario, durante la fase di preparazione dei campioni in cantiere, tenere in considerazione:

- *La planarità e regolarità* delle superfici: è dunque opportuno che il tessuto da impregnare venga steso su una superficie piana sufficientemente regolare e liscia;
- *L'orientazione degli strati (plies)*: i diversi strati vanno stesi seguendo la sequenza di laminazione stabilita nel progetto, assicurando che siano presenti almeno 3 strati del tessuto;
- *L'eliminazione dei vuoti* all'interno del laminato: deve essere eseguita con le stesse modalità previste dal progettista per i compositi di rinforzo ed a temperatura ambiente;
- *La protezione delle superfici*: una volta laminati i tre strati di composito è necessario eliminare la resina in eccesso e proteggere la superficie del laminato stesso in modo da evitare il contatto accidentale con altri oggetti;
- *Il contenuto di resina*: è importante che i provini siano realizzati con la stessa tecnica utilizzata per l'intervento e possibilmente con la stessa quantità di resina, proprio per riprodurre le caratteristiche del materiale composito;
- *La polimerizzazione della resina (curing)*: deve avvenire con le stesse modalità seguite per l'intervento reale.

Una volta preparato il laminato si procede con la realizzazione e la preparazione dei provini da sottoporre alle prove sperimentali di caratterizzazione in laboratorio, per cui occorre considerare diversi fattori:

- *Il taglio del campione*: eseguibile con vari strumenti (taglierini, lame diamantate, water jet, ecc.), la cui scelta va fatta sulla base delle proprietà del materiale ed in funzione delle dimensioni del campione. A volte può rendersi necessaria un'ulteriore operazione di finitura superficiale, che può essere eseguita con carta abrasiva o mediante strumenti opportuni. È inoltre importante ricordare che un errato allineamento delle fibre, anche di pochi gradi, può condurre a risultati decisamente inferiori rispetto alle previsioni.
- *La dimensione dei provini*: le dimensioni dei provini devono essere tali da presentare una parte centrale sufficientemente lontana dagli afferraggi e di dimensioni adeguate per l'applicazione degli strumenti di misura previsti (estensometri mono o biassiali, estensimetri).
- *Il condizionamento*: se richiesto, deve essere effettuato immediatamente prima dell'esecuzione della prova secondo quanto indicato nella normativa di riferimento specifica;
- *Gli afferraggi*: è indispensabile l'uso di appositi talloni (*tabs*), ovvero di elementi con la funzione di agevolare l'afferraggio del provino durante la prova di trazione senza provocare indesiderate lesioni locali. È opportuno che siano costituiti di materiali con una deformabilità superiore a quella del provino da testare. La soluzione più affidabile ma che comporta un tempo significativo per la preparazione, è quella di utilizzare talloni in composito rinforzato con fibra di vetro.



**Figura 3.1** – Tallone in composito rinforzato in fibra di vetro

Una soluzione alternativa a costi più limitati è quella di adottare placchette in alluminio. La lunghezza dei talloni deve essere definita in base alle proprietà di resistenza a taglio dell'adesivo impiegato per incollare i talloni stessi.

L'esecuzione delle prove di trazione senza l'utilizzo di talloni non è in grado di fornire risultati attendibili, in quanto gli afferraggi non riescono a trasmettere il carico al campione coinvolgendo tutte le fibre.

- *La strumentazione:* le misure da effettuare sono le classiche delle prove di caratterizzazione meccanica, ovvero è necessario misurare il carico applicato, lo spostamento e le deformazioni in una zona del provino indisturbata (mediante estensometri od estensimetri); la misura delle deformazioni in un provino in materiale composito è particolarmente importante al fine della determinazione delle proprietà meccaniche e non può essere sostituita dalla sola lettura dello spostamento della macchina di prova. È utile controllare anche altri parametri quali la temperatura e l'umidità relativa dell'ambiente in cui vengono eseguite le prove.

## 3.2 VERIFICA DELLE CARATTERISTICHE FISICHE DEI MATERIALI

All'interno del "Quaderno Tecnico" sono descritte brevemente le prove per la determinazione delle caratteristiche fisiche dei compositi precedentemente indicate con i codici T1 – T6 in Tabella 3.1.

### 3.2.1 PROVA T1 – DENSITA' DELLE FIBRE

I valori della *densità delle fibre* sono di solito riportati sulle schede tecniche. Nel caso fosse necessario determinarlo o verificarlo, è possibile fare riferimento alle norme ASTM D 792 e ISO 1183-1, in cui vengono suggeriti tre metodi alternativi:

- *Metodo di immersione*, per materiali plastici allo stato finito;
- *Metodo con picnometro*, per materiali plastici in polvere o ridotti in particelle;
- *Metodo a titolazione*, per materiali plastici allo stato finito.

Fibre	Densità [g/cm <sup>3</sup> ]
Carbonio	1,76 ÷ 1,90
Vetro E	2,54 ÷ 2,59
Vetro S	2,46 ÷ 2,49
Aramidica (Kevlar®)	1,44 ÷ 1,47

**Tabella 3.2** – Densità delle fibre utilizzate nelle applicazioni strutturali

Solitamente la densità delle fibre comunemente utilizzate nelle applicazioni strutturali è compresa tra i valori definiti in Tabella 3.2.

### 3.2.2 PROVA T2 – MASSA DEL TESSUTO PER UNITA' DI AREA

Per ogni tipo di tessuto è possibile verificare la *massa per unità di area* mediante la tecnica della pesata diretta di un campione. Quest'ultimo deve avere dimensioni sufficientemente regolari tali da poterne facilmente determinare l'area. Per ottenere la massa per unità di superficie è sufficiente dividere la massa del campione di tessuto per la rispettiva superficie misurata.

Nel caso di tessuti uniassiali la massa di tessuto per unità di area,  $p_x$ , si può esprimere come risultato della relazione (3.1):

$$p_x = \frac{p_t}{A_t} \cdot 10^6 \quad (3.1)$$

dove  $p_x$  è il valore della massa del concio di tessuto espressa in grammi e  $A_t$  è l'area del concio di tessuto espressa in mm<sup>2</sup>.

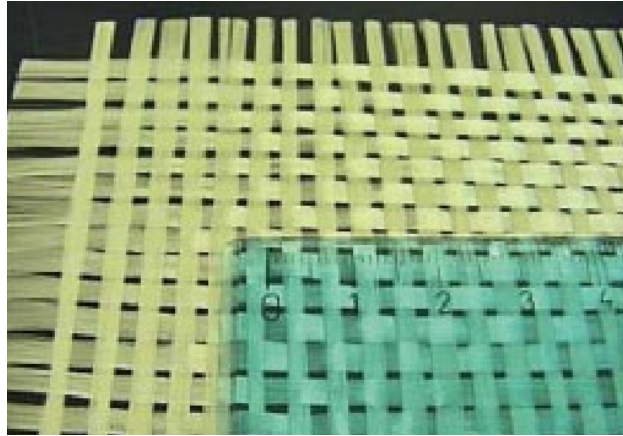
Nel caso in cui siano forniti solo il titolo del filato e la geometria, la determinazione della massa per unità di superficie delle fibre in una determinata direzione può essere eseguita attraverso la relazione (3.2):

$$p_x = \frac{T_x \cdot N_f}{10} \quad (3.2)$$

dove  $T_x$  è il titolo del filato, espresso in Tex, e  $N_f$  è il numero di filati per unità di larghezza nella direzione presa in esame.

Nel caso di tessuti trama - ordito, la scheda tecnica fornita dal produttore dovrebbe riportare il valore della massa dei filati per unità di superficie in ognuna delle due direzioni. L'espressione (3.2) si applica distintamente per le due direzioni ortogonali. Il valore ottenuto di  $p_x$  indica la massa per unità di superficie della componente del tessuto nella direzione interessata ovvero della sola trama o del solo ordito.





**Figura 3.2** – Verifica di geometria e orientamento di tessitura

### 3.2.3 PROVA T3 – DENSITA' DELLA RESINA

La misura della *densità della resina* può essere effettuata su campioni di sola resina che siano privi di bolle e abbiano fatto presa in condizioni di temperatura, pressione e per un tempo simile a quello per la preparazione del composito. È altresì possibile adottare i valori di densità forniti dal produttore purché questi siano stati ottenuti su base statistica da una serie di lotti di produzione e possano quindi essere rappresentativi del processo di produzione.

### 3.2.4 PROVA T4 – DETERMINAZIONE DELL'AREA E DELLO SPESSORE EQUIVALENTI

Nei tessuti impregnati in situ non è possibile stimare a priori lo spessore finale del laminato. Si conosce il numero di strati di tessuto impiegati ed il loro contenuto di fibre, ma non è noto il volume della resina utilizzata. Comunemente si fa riferimento alle proprietà meccaniche ed all'area resistente del tessuto secco utilizzando i dati riportati nelle schede tecniche. L'*area resistente* del tessuto,  $A_{rt}$ , generalmente riferita alle direzioni dei filati, è espressa per unità di larghezza del tessuto e si ottiene dalla relazione (3.3):

$$A_{rt} = \frac{T_x \cdot N_f}{10 \cdot \rho_{fib}} \quad (3.3)$$

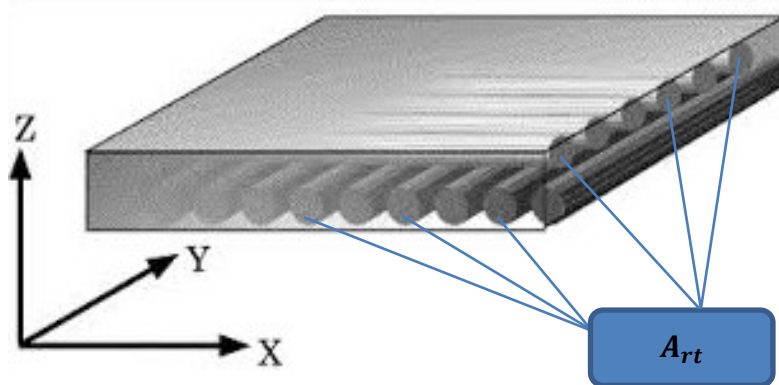
dove  $T_x$  è il titolo del filato riferito alla direzione in esame, espresso in Tex,  $N_f$  è il numero di filati per unità di larghezza riferiti alla direzione in esame,  $\rho_{fib}$  è la densità delle fibre.

Per tessuti uniassiali l'area resistente è data dalla relazione (3.4):

$$A_{rt} = \frac{p_t}{\rho_{fib}} \quad (3.4)$$

Per tessuti biassiali costruiti con lo stesso tipo di fibre (Figura 3.3) e che presentano lo stesso numero di filati nelle direzioni di trama ed ordito, data la massa del tessuto per unità di area,  $p_t$ , è possibile ricavare l'area resistente dalla relazione (3.5):

$$A_{rt} = \frac{p_t}{2 \cdot \rho_{fib}} \quad (3.5)$$



**Figura 3.3** – Area resistente in tessuto biassiale

In alternativa è possibile riferire l'area resistente del tessuto allo spessore di una lastra equivalente costituita dalle sole fibre. Lo *spessore equivalente*,  $t_{eq}$ , espresso in mm, è calcolato attraverso la relazione (3.6):

$$t_{eq} = \frac{A_{rt}}{1000} \quad (3.6)$$

tale semplificazione non è applicabile a tessuti con diverso numero di filati nelle due direzioni ortogonali.

### 3.2.5 PROVA T5 – DETERMINAZIONE DELLA FRAZIONE PONDERALE E VOLUMETRICA DELLE FIBRE

Le proprietà meccaniche del composito sono notevolmente influenzate dal valore della frazione in peso o in volume delle fibre. La *frazione volumetrica* delle fibre,  $V_{fib}$ , è pari al rapporto tra il volume delle fibre ed il volume totale del composito; in maniera analoga la *frazione ponderale* delle fibre,  $P_{fib}$ , è data dal rapporto tra il peso, o massa, delle fibre ed il peso totale, o massa totale, del composito.

La frazione ponderale può essere determinata indifferentemente sulla base del peso o della massa, trattandosi di un rapporto. Il contenuto di fibra in un composito è determinabile sia dissolvendo il materiale in un opportuno solvente (secondo la normativa ISO 11667) che tramite processi di calcinazione (secondo la normativa ISO 1172). In entrambi i casi si richiede di considerare almeno due campioni di materiale quanto più simili per dimensioni e geometria. Nel primo caso, la percentuale di materiale non solubile (fibre ed eventuali cariche) viene ricavata misurando la differenza tra la massa del provino prima e dopo l'estrazione della parte solubile (resina) che è eseguita tramite dissoluzione in un solvente. Sono solitamente solventi appropriati il diclorometano, l'acetone, il metiletilchetone o l'etanolo denaturato. Qualora il campione contenga cariche, la separazione di fibre e cariche avviene tramite reazione delle cariche con acido idrocloridrico oppure tramite filtrazione senza l'uso di acidi. La massa dei campioni deve essere misurata prima della dissoluzione, dopo l'estrazione della resina ed infine dopo la separazione di fibre e cariche. Nel caso in cui si valuti il contenuto di fibre tramite processi di calcinazione il provino deve essere pesato, calcinato in determinate condizioni (ad esempio 700°C per 5 ore) e quindi nuovamente pesato per determinare il contenuto di materiale incombusto (fibre ed eventuali cariche). Qualora il campione contenga cariche, si possono seguire i procedimenti precedentemente descritti per la separazione di fibre e cariche. Qualora siano note le frazioni in peso di fibra e matrice,  $P_{fib}$  e  $P_m$ , assegnate le densità della fibra e della matrice,  $\rho_{fib}$  e  $\rho_m$ , si può scrivere la relazione (3.7):

$$V_{fib} = \frac{\frac{P_{fib}}{\rho_{fib}}}{\frac{P_{fib}}{\rho_{fib}} + \frac{P_m}{\rho_m}} \quad (3.7)$$

Nel caso in cui sia invece nota la frazione volumetrica delle fibre e si desideri ricavare la percentuale in peso è possibile applicare l'espressione (3.8), ricavata nell'ipotesi di un materiale senza presenza di vuoti:

$$P_{fib} = \frac{\rho_{fib} \cdot V_{fib}}{\rho_m + (\rho_{fib} - \rho_m) \cdot V_{fib}} \quad (3.8)$$

### 3.2.6 PROVA T6 – DETERMINAZIONE DELLA PERCENTUALE DEI VUOTI NEL COMPOSITO

Il contenuto di vuoti (*porosità* e/o bolle d'aria) in un laminato composito influisce fortemente sulle caratteristiche meccaniche del prodotto. Valori elevati di vuoti possono causare bassa resistenza a fatica, alla penetrazione di acqua, all'umidità e all'azione di agenti atmosferici. Il contenuto di vuoti in un laminato rispecchia la qualità del processo di fabbricazione ed è funzione della tecnologia di produzione utilizzata.

La misura della percentuale di vuoti può essere effettuata seguendo quanto specificato dalla norma ASTM D2734. Prima di effettuare la prova i provini devono essere mantenuti per almeno 40 ore in un ambiente a 23°C e a 50% di umidità relativa. Il test è basato sulla misura separata della densità delle fibre, della resina e del composito. Successivamente viene misurato il contenuto di resina e calcolata la densità teorica del composito. Il confronto con la densità reale misurata permette la valutazione del contenuto di vuoti.

La densità teorica si determina quindi dall'espressione (3.9):

$$P_{ft} = \frac{1}{\frac{P_m}{\rho_m} + \frac{P_{fib}}{\rho_{fib}}} \quad (3.9)$$

in cui  $\rho_{fib}$  e  $\rho_m$  rappresentano la densità della fibra e della resina, mentre  $P_{fib}$  e  $P_m$  sono la frazione in peso rispettivamente della fibra e della resina. Il contenuto di vuoti viene calcolato con l'espressione (3.10):

$$V_v = \frac{(\rho_{fth} - \rho_f)}{\rho_{fth}} \quad (3.10)$$

dove  $\rho_{fth}$  è la densità teorica del composito mentre  $\rho_f$  è la densità misurata del composito. Alternativamente il contenuto di vuoti può essere determinato tramite la relazione (3.11):

$$V_v = 1 - \rho_{fib} \cdot \left( \frac{P_m}{\rho_m} + \frac{P_{fib}}{\rho_{fib}} \right) \quad (3.11)$$

### 3.3 CARATTERISTICHE MECCANICHE DI UN LAMINATO

Le caratteristiche meccaniche dei materiali compositi utilizzati per il rinforzo non possono essere dedotte semplicemente dalle caratteristiche dei singoli componenti (fibre e matrici) ma devono essere determinate e verificate sperimentalmente. Numerosi sono i fattori dovuti al processo di produzione che influiscono sulle caratteristiche finali del composito. Tali fattori possono essere determinati e costantemente controllati nel caso di produzione industriale di elementi pultrusi, mentre nel caso di tessuti impregnati in cantiere è indispensabile verificare le caratteristiche del prodotto finale per ogni applicazione.

Nei materiali fibrorinforzati è possibile distinguere le caratteristiche meccaniche riferite al filato, al tessuto ed al laminato, riportate in Tabella 3.3. È importante conoscere le differenze tra tali valori al fine di evitare errori interpretativi e possibili contestazioni sia nella fase di progettazione che in quella di accettazione o collaudo.

CARATTERISTICHE MECCANICHE DI FILATO, TESSUTO E LAMINATO	
$f_{filato}, E_{filato}$	Valori riferiti al filato secco fornito in rotoli
$f_{tessuto}, E_{tessuto}$	Valori riferiti al tessuto secco fornito in rotoli o stuoie
$f_f, E_f$	Valori ottenuti per un laminato riferiti all'area del composito (fibra + resina)
$f_{fib}, E_{fib}$	Valori ottenuti per un laminato riferiti alla sola area delle fibre ( $t_{eq}$ )
$f_{fib,nom}, E_{fib,nom}$	Valori nominali forniti dal produttore
$f_{fib,d}, E_{fib,d}$	Valori di progetto per un laminato riferiti alla sola area delle fibre ( $t_{eq}$ )

**Tabella 3.3** – Valori di modulo elastico e resistenza di componenti e laminati

### 3.3.1 CARATTERISTICHE MECCANICHE DEL FILATO

I tessuti utilizzabili per il rinforzo strutturale sono costituiti da fasci di fibre organizzate in fasci paralleli (*tessuti uniassiali*), intrecciati ortogonalmente (*plain weave*) o anche in diverse direzioni (*tessuti multiassiali*). Ogni fascio è a sua volta costituito da un insieme di filati. Ulteriori dettagli relativi alle tipologie dei tessuti sono reperibili nel documento DT200.

La conoscenza delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei singoli componenti è preziosa per una corretta progettazione di un rinforzo strutturale. La scheda tecnica dei filati dovrebbe riportare le caratteristiche fisiche e meccaniche simili a quelle evidenziate nelle schede tipo riprodotte nell'Appendice 1 del "Quaderno tecnico" (Allegato 1).

I valori meccanici dichiarati dal produttore e riportati sulle schede (tra cui la resistenza,  $f_{\text{filato}}$ , ed il modulo elastico,  $E_{\text{filato}}$ ) sono riferiti al filato in bobine, non impregnato con resine ed indisturbato, ovvero che non ha subito alcun trattamento.

Il processo di tessitura cui le fibre vengono sottoposte produce un decadimento della resistenza a causa di vari fattori come il danneggiamento delle fibre durante la lavorazione o la torsione impressa durante la lavorazione. In generale si nota che nei tessuti uniassiali i valori di resistenza e modulo elastico del filato non decadono notevolmente in seguito ai processi di tessitura, mentre nel caso della lavorazione di tessuti biassiali le proprietà meccaniche del tessuto possono risultare considerevolmente più basse rispetto a quelle del filato.

### 3.3.2 CARATTERISTICHE MECCANICHE DI UN TESSUTO

Per ogni tessuto utilizzato risulta fondamentale la disponibilità di una scheda tecnica analoga a quella riportata nell'Appendice 1 del "Quaderno tecnico" (Allegato 1). I valori di resistenza ed il modulo elastico eventualmente riportati in tale scheda sono riferiti al tessuto secco (ovvero non impregnato) e non al composito.

Un'informazione fondamentale è l'area resistente delle fibre: tale valore è quello che il progettista può utilizzare nei calcoli, senza conoscere il quantitativo di resina che verrà impiegata per l'impregnazione durante la messa in opera. L'area delle fibre non potrà essere moltiplicata per la resistenza del filato o del tessuto ma per un valore sicuramente inferiore riferito al composito. Il modulo elastico del tessuto è spesso molto simile a quello del filato, mentre la resistenza a trazione può risultare significativamente inferiore al valore riferito al

filato. Conseguentemente risulta ridotto anche il valore della deformazione ultima corrispondente.

### 3.3.3 CARATTERISTICHE MECCANICHE DI UN LAMINATO

I laminati sono prodotti in stabilimento tramite laminazione, un processo che consente la stretta collaborazione tra filati e resine; è normale quindi aspettarsi che le caratteristiche meccaniche del laminato saranno diverse da quelle del tessuto secco, per via della dell'interazione di quest ultimo con la resina.

Il progettista dovrebbe conoscere i valori delle caratteristiche meccaniche del laminato, che, come noto, sono inferiori a quelli delle fibre.

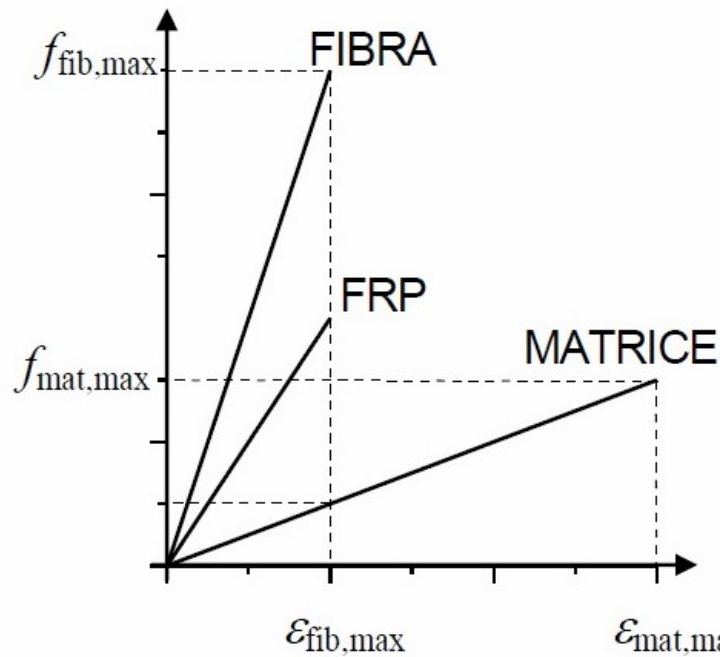
Se per i prodotti preformati tali valori sono comunemente forniti dalle ditte costruttrici, nel caso di tessuti laminati in situ, è possibile avere indicazioni relative ad interventi con un definito valore di frazione volumetrica, ma non sempre tali valori sono disponibili.

Fornitori ed installatori di sistemi di rinforzo possono svolgere delle campagne di prove per ricavare valori statisticamente significativi delle caratteristiche del laminato: in particolare si determineranno i valori medi e minimi delle quantità  $E_f$ ,  $f_f$  (riferite all'area totale del composito) e di  $E_{fib}$ ,  $f_{fib}$  (riferite alla sola area netta delle fibre nel laminato). Queste quantità non devono essere confuse con quelle delle fibre (o del filato) non impregnate: saranno infatti sicuramente inferiori a queste ultime comprendendo tutti i fattori che riducono le caratteristiche meccaniche stesse sia per il processo di tessitura che per il processo di laminazione del composito.

Il processo di laminazione implica l'introduzione di vari fattori riduttivi delle proprietà meccaniche del laminato: non perfetto allineamento delle fibre rispetto alla direzione ideale, presenza di *vuoti interlaminari*, fenomeni locali di *debonding* tra fibre e matrice. Il valore di resistenza e modulo elastico del composito devono quindi essere inferiori ai valori della fibra. I valori del modulo elastico  $E_{fib}$  ottenuti dalle prove di laboratorio sono abitualmente confrontabili con i valori di  $E_{tess}$  ed  $E_{filato}$  presentando differenze inferiori al 5% mentre i valori della resistenza ( $f_{fib}$ ) risultano spesso considerevolmente inferiori ad  $f_{tess}$  ed  $f_{filato}$ .

Lo sforzo di rottura di un provino in materiale composito riferito all'area netta delle fibre può risultare infatti anche pari al 50-60% del valore di rottura delle fibre stesse. Il rapporto tra i

valori riferiti al composito e quelli riferiti al filato può essere un indice della qualità del processo produttivo.



**Figura 3.4** – Legame costitutivo di materiale composito e suoi componenti

In Figura 3.4 sono confrontati i legami costitutivi di un materiale composito e dei relativi costituenti: è evidente come il materiale composito si presenti notevolmente meno rigido delle fibre secche e si nota che perviene a rottura in corrispondenza del valore della deformazione massima delle fibre secche ( $\epsilon_{fib,max}$ ): valore oltre il quale le fibre si rompono e non avviene più il completo trasferimento delle tensioni dalla matrice alle fibre.

I valori caratteristici relativi a resistenza e modulo di elasticità del composito ( $f_{nom}$ ,  $E_{nom}$ ) possono essere definiti su base statistica.

I produttori del filato, del tessuto e dei sistemi, con riferimento ai valori riportati nelle schede tecniche, devono riportare le seguenti informazioni:

- La base statistica da cui sono stati ottenuti;
- Le caratteristiche del campionamento o del prelievo dalla produzione;
- La natura dei valori caratteristici ed in questo caso la probabilità di superamento;
- Eventuali coefficienti di sicurezza introdotti;
- Le tipologie di prove sperimentali adottate.



### 3.3.4 VALORI DI PROGETTO E VERIFICHE DI ACCETTAZIONE

Il documento DT200 indica che il valore di calcolo,  $X_d$ , delle proprietà di resistenza e di deformazione di un materiale o di un prodotto utilizzato per il rinforzo può essere valutato mediante l'espressione (3.12):

$$X_d = \eta \cdot \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (3.12)$$

dove  $\eta$  è un fattore di conversione che tiene conto di problemi speciali di progetto (fattori ambientali, viscosità, fatica),  $X_k$  è il valore caratteristico della proprietà in questione e  $\gamma_m$  è un coefficiente parziale di sicurezza che tiene conto del tipo di applicazione.

I valori di  $X_k$  sono quelli nominali riportati nelle schede tecniche, da considerare come proprietà iniziali del materiale e che abitualmente non includono gli effetti dell'esposizione a lungo termine agli agenti atmosferici. Il valore caratteristico della proprietà meccanica  $X_k$  deve essere fornito dal produttore ed essere basato su un'analisi statistica in cui sia definito il numero ed il tipo di prove effettuate e la rielaborazione statistica per la determinazione del valore caratteristico.

Per gli stati limite ultimi, il valore del coefficiente  $\gamma_m$ , che nel caso dei materiali fibrorinforzati viene denotato con  $\gamma_f$ , è suggerito nel documento DT200 e si differenzia per *sistemi di tipo A*, ovvero per quei sistemi di rinforzo certificati in accordo con quanto definito nel Capitolo 2 del documento DT200, e *sistemi di tipo B*, ovvero per quei sistemi di rinforzo non certificati in accordo con il suddetto capitolo del documento DT200. Vengono inoltre distinti i casi in cui il collasso avviene per rottura del materiale o per distacco del materiale di rinforzo dal substrato (*delaminazione*) (Tabella 3.4).

Per gli stati limite di esercizio il DT200 suggerisce di attribuire valore unitario a tutti i coefficienti parziali.

Modalità di collasso	Coefficiente parziale	Applicazione di tipo A	Applicazione di tipo B
Rottura	$\gamma_f$	1,10	1,25
Delaminazione	$\gamma_{f,d}$	1,20	1,50

Tabella 3.4 – Valori dei coefficienti parziali di sicurezza,  $\gamma_f$ , definiti dal documento DT200

Le proprietà a trazione che vengono utilizzate nei calcoli di progetto sono la *tensione ultima del composito*,  $f_f$ , e la *deformazione ultima* corrispondente  $\epsilon_f$ . I valori di progetto sono quindi ottenuti riducendo i valori caratteristici mediante l'espressione (3.12).

Allo stato limite ultimo, i valori del coefficiente  $\gamma_{Rd}$  per i diversi modelli di calcolo sono suggeriti dal DT200 e riportati di seguito in Tabella 3.5.

Modello di resistenza	Coefficiente parziale $\gamma_{Rd}$
Flessione/Pressoflessione	1,00
Taglio/Torsione	1,20
Confinamento	1,10

**Tabella 3.5** – Valori dei coefficienti parziali di sicurezza,  $\gamma_{Rd}$ , definiti dal documento DT200

Essendo il comportamento dei materiali fibrorinforzati lineare fino a rottura se ne deduce che il modulo di elasticità può essere ricavato dal rapporto tra la tensione ultima e la relativa deformazione e non è quindi influenzato dalla presenza di coefficienti riduttivi e da fattori di conversione.

### 3.4 PROVA T7 – POVA DI TRAZIONE

Lo scopo delle prove del sistema *Cokit* è quello di verificare che i risultati ottenuti su campioni prelevati in cantiere, sotto la sorveglianza del direttore dei lavori, siano confrontabili con i valori nominali, e quindi accettabili.

Il laminato preparato in cantiere deve essere costituito almeno da tre strati sovrapposti di tessuto ed avere dimensioni minime di 15cm x 30cm o comunque tali da poter successivamente ricavare, mediante taglio, 3 provini almeno di dimensione 250mm x 20mm. La lunghezza del provino deve essere comunque tale da assicurare una rottura lontana dagli afferraggi. La norma ASTM D3039 suggerisce di utilizzare provini di dimensioni pari a 250mm x 15mm per laminati uniassiali e a 250mm x 25mm per altri tipi di laminati.

Alle estremità dei provini ottenuti è necessario applicare talloni in fibra di vetro, alluminio o altri materiali (*tabs*), per evitare che il laminato venga danneggiato dagli afferraggi della macchina durante la prova. Quando è richiesta la determinazione della tensione di rottura del composito, è necessaria l'applicazione di talloni in fibra di vetro (Figura 3.1), mentre nel caso di determinazione del solo modulo elastico è sufficiente l'utilizzo di talloni in alluminio.

Il laboratorio incaricato di effettuare le prove dovrà valutare la qualità dei talloni da applicare e la strumentazione di prova adeguati per assicurare risultati affidabili.



**Figura 3.5** – Macchinario per l'esecuzione della prova di trazione su provini compositi

È necessario sviluppare almeno le prove di trazione uniassiale al fine di determinare il valore del modulo elastico e del carico di rottura del laminato. Le prove sperimentali vengono effettuate in controllo di spostamento con velocità pari a  $0.2 \frac{mm}{min}$ , utilizzando una macchina di prova adeguata. Al fine di monitorare l'andamento della deformazione durante la prova e di valutare con sufficiente accuratezza il modulo elastico del materiale, i provini possono essere strumentati con un *estensometro* (mono o biassiale) con base di misura di almeno 50mm. L'*estensometro* deve essere mantenuto sul provino almeno fino ad un valore di deformazione pari a 0.3%. In alternativa è possibile applicare i provini degli estensimetri mono o biassiali (*strain gauges*).

Le quantità più significative ottenute da una prova di trazione sono:

- Il carico di rottura,  $F_u$ ;
- La deformazione ultima del composito,  $\epsilon_u$ ;
- Lo sforzo di rottura del composito riferito all'area del provino,  $f_f = \frac{F_u}{A_f}$ ;
- Lo sforzo di rottura del composito riferito all'area netta delle fibre,  $f_{fib} = \frac{F_u}{A_{fib}}$ ;

- Il modulo elastico del composito riferito all'area del provino,  $E_f$ ;
- Il modulo elastico del composito riferito all'area netta delle fibre,  $E_{fib}$ .

Le quantità  $A_f$  e  $A_{fib}$  rappresentano la sezione del composito e la sezione delle sole fibre nel composito e vengono rispettivamente calcolate come prodotto della larghezza per lo spessore del provino e della larghezza per lo spessore equivalente del tessuto indicato dal produttore (o determinato secondo le procedure sopra descritte) moltiplicato per il numero degli strati; tale spessore equivalente è riferito all'area delle fibre presenti nel composito, ma le proprietà meccaniche ritrovate, soprattutto in termini di resistenza ultima, non possono essere simili a quelle del filato o del tessuto nel loro stato originale, ovvero prima di essere impiegati nella realizzazione del composito.

Una volta noti i valori  $f_f$  ed  $E_f$ , determinati sul provino in composito, è possibile determinare le quantità riferite alla sola area di fibre mediante le espressioni (3.13) e (3.14):

$$f_{fib} = \frac{f_f \cdot A_f}{A_{fib}} \quad (3.13)$$

$$E_{fib} = \frac{E_f \cdot A_f}{A_{fib}} \quad (3.14)$$

## 4. APPLICAZIONE DI FRP PER STUTTURE IN MURATURA

---

Le applicazioni di rinforzi strutturali in materiale composito trovano un importante impiego nel recupero, nel consolidamento e nel miglioramento sismico degli edifici esistenti. In un Paese come l'Italia, che presenta uno dei patrimoni storici ed artistici più importanti e più vari del continente Europeo, gli interventi su edifici a struttura muraria hanno un'importanza fondamentale e, a seguito degli sciami sismici che hanno messo in ginocchio il Paese negli ultimi anni, di cui si ricordano in particolare il “*Terremoto dell'Aquila del 2009*” e il “*Terremoto del Centro Italia del 2016-2017*”, le applicazioni di FRP su edifici in muratura rappresentano la soluzione più all'avanguardia, grazie alla loro leggerezza, alla loro facilità di applicazione e al loro ridotto impatto visivo.

### 4.1 INQUADRAMENTO NORMATIVO

La normativa di riferimento per l'applicazione di rinforzi in materiale composito a matrice polimerica è rappresentata dal DT 200 del 2004 “*Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati – Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie*” e dalla sua revisione, il DT 200/R1 del 2013, emanati dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), e dalle “*Linee guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP*”, approvate nel 2009 dall'Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Tali documenti contengono le regole per il dimensionamento e la verifica di elementi strutturali murari rinforzati per il tramite di FRP e specificano come l'intervento di rinforzo abbia lo scopo di conseguire, prioritariamente, per i singoli elementi strutturali e per l'intera costruzione, un incremento di resistenza nei confronti delle azioni sollecitanti e, quando possibile, un aumento dei valori degli spostamenti esibiti all'atto del collasso. Inoltre, qualora il rinforzo strutturale riguardi costruzioni di interesse storico o monumentale, viene richiesta una specifica giustificazione sull'indispensabilità, improrogabilità e compatibilità dell'intervento con le teorie del restauro.

Gli interventi di rinforzo consistono nell'applicazione di lamine, tessuti, reti e barre di FRP sugli elementi strutturali della costruzione, per adesione o mediante dispositivi meccanici di

ancoraggio e possono avvenire sulle superfici esterne della muratura (paramenti murari) o in alloggiamenti e scanalature realizzate all'interno della muratura stessa.

I principali interventi di rinforzo con FRP riguardano:

- La trasmissione di sforzi di trazione all'interno di singoli elementi strutturali o tra elementi contigui;
- Il collegamento tra elementi che collaborano a resistere all'azione esterna;
- L'irrigidimento di solai nel proprio piano per conseguire un funzionamento a diaframma rigido;
- La limitazione dell'apertura di fessure;
- Il confinamento di colonne al fine di incrementare la resistenza del materiale.

La progettazione degli interventi di rinforzo deve essere generalmente mirata ad assicurare uno stato di trazione nei rinforzi di FRP: questi materiali si dimostrano estremamente efficaci quando sottoposti a trazione, mentre risulta nullo il loro contributo alla resistenza a compressione della struttura, in quanto soggetti a possibile *delaminazione* per instabilità locale.

Per le strutture murarie rinforzate con FRP e soggette a sollecitazioni cicliche di trazione e compressione, come quelle causate da eventi sismici e da variazioni termiche, l'adesione tra muratura e rinforzo in FRP può deteriorarsi notevolmente nel corso della vita della struttura, può quindi rendersi necessario l'inserimento del rinforzo in intagli atti a prevenire l'instabilità locale, ovvero l'applicazione di dispositivi meccanici di connessione. Nella progettazione del consolidamento deve essere riposta la massima cura nell'estendere i rinforzi di FRP fino alle zone di muratura compresse.

L'applicazione di rinforzi di FRP deve essere effettuata su elementi strutturali di adeguate proprietà meccaniche. Nel caso in cui la muratura si presentasse danneggiata, disomogenea o viziata da qualsiasi difetto che precluda la corretta trasmissione degli sforzi mutui con il rinforzo, è necessario procedere al suo *preconsolidamento* secondo tecniche tradizionali. Inoltre, la scelta del sistema a base di FRP deve tener conto delle proprietà fisiche e chimiche della muratura allo scopo di scegliere la soluzione più idonea.

Nell'applicazione di tessuti o lamine di FRP su superfici murarie, occorre tener conto della completa assenza di traspirabilità dei materiali compositi. Per tale motivo gli interventi di rinforzo strutturale eseguiti con tali materiali non devono, di norma, interessare estese superfici del paramento murario al fine di preservare un'adeguata traspirabilità del sistema.

L'intervento di rinforzo tramite applicazione di FRP, secondo quanto stabilito dalla normativa di riferimento precedentemente citata, può essere realizzato:

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

## 4.2 VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA

Il progetto degli interventi di consolidamento deve basarsi su uno schema strutturale che rispecchi il comportamento dell'edificio nelle condizioni di futuro esercizio. Per determinare le azioni sui singoli elementi strutturali della costruzione muraria, la modellazione della struttura può essere condotta in campo elastico lineare, ovvero attraverso comprovati modelli non lineari in grado di simulare il comportamento anelastico e la limitata, se non nulla, resistenza a trazione della muratura. Tali analisi sono finalizzate alla valutazione di tutte le componenti di sollecitazione necessarie ai fini delle successive verifiche. Possono anche essere utilizzate schematizzazioni semplificate, sinteticamente rappresentative del comportamento della struttura in esame, purché adeguatamente giustificate. Inoltre, nel caso di strutture con parti regolari o ripetitive, è possibile individuare, all'interno della costruzione, schemi strutturali parziali, idonei per una valutazione più immediata del comportamento globale della struttura rinforzata. Parimenti, per effettuare le verifiche nei confronti di meccanismi di collasso locale, si possono adottare modelli semplificati, purché il loro utilizzo sia correttamente motivato.

Le modalità di crisi dei materiali costituenti la struttura muraria rinforzata con FRP sono:

- La fessurazione per trazione della muratura;
- Lo schiacciamento della muratura;
- Taglio-scorrimento della muratura;
- La rottura del composito fibrorinforzato;
- La *delaminazione* (o decoesione) del rinforzo di FRP dalla muratura.

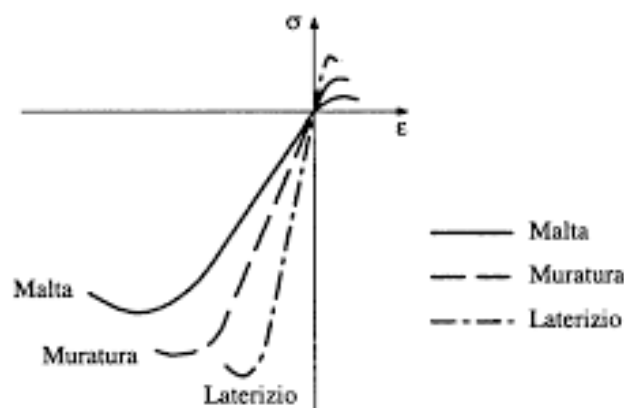
### 4.2.1 VERIFICHE DI SICUREZZA

La muratura è caratterizzata da comportamento non isotropo e non lineare anche per valori ridotti delle deformazioni. Il legame tensione-deformazione può variare in modo più che significativo da muratura a muratura in funzione della composizione della stessa, ovvero della tipologia e dell'aggregazione degli elementi resistenti artificiali o naturali e della tipologia della malta di allettamento.

Sottoposto a prove di carico monoassiali, il materiale muratura presenta un comportamento fragile a trazione contraddistinto da valori della resistenza di gran lunga inferiori a quelli della resistenza a compressione. Una convenzione largamente accettata è quella di considerare nulla la resistenza a trazione della muratura; tale ipotesi è confortata, soprattutto per gli edifici esistenti.

Per quanto riguarda il comportamento a compressione, le esperienze di laboratorio dimostrano che, nella sua forma più completa, il legame costitutivo della muratura (Figura 4.1) è:

- Sostanzialmente lineare per bassi valori della contrazione;
- Non lineare crescente fino ad un valore di picco della tensione di compressione;
- Non lineare decrescente, con un ramo (*softening*) lungo il quale la resistenza del materiale decresce più o meno rapidamente in funzione della tipologia della muratura.



**Figura 4.1** – Legame costitutivo muratura a confronto con quelli dei propri costituenti

Il comportamento a compressione dipende anche dal confinamento trasversale della muratura: incrementando la compressione trasversale si ottiene un miglioramento della resistenza e della duttilità a compressione del materiale.



La resistenza a taglio della muratura dipende dalla compressione agente, essendo dovuta sostanzialmente, per ogni tessitura, alla coesione interna del materiale ed al fenomeno fisico dell'attrito.

Per una struttura in muratura i valori di riferimento ai fini di verifica sono:

- La resistenza caratteristica a compressione verticale ( $f_{mk}$ );
- La resistenza caratteristica a compressione orizzontale ( $f_{mk}^h$ );
- La resistenza a taglio ( $f_{vk}$ ).

Essi devono essere determinati mediante idonee prove sperimentali su campioni di muro, secondo le modalità definite dalla Normativa vigente. Orientativamente può assumersi un valore della  $f_{mk}^h$  pari al 50% della  $f_{mk}$ .

I valori delle proprietà meccaniche di progetto della muratura sono calcolati dividendo i valori caratteristici per un opportuno coefficiente parziale del materiale ( $\gamma_m = \gamma_M$ ) ed inoltre per un opportuno coefficiente parziale relativo al modello di resistenza,  $\gamma_{Rd}$ .

Nella maggior parte delle applicazioni ingegneristiche, il comportamento della muratura, per stati tensionali monoassiali, può essere schematizzato considerando:

- Resistenza a trazione nulla;
- Comportamento a compressione lineare con coefficiente angolare pari al modulo di elasticità normale secante della muratura fino alla resistenza di progetto,  $f_{md}$ , cui corrisponde una deformazione  $\bar{\epsilon}_m$ ; tensione costante, pari a  $f_{md}$ , per deformazioni comprese nell'intervallo  $\bar{\epsilon}_m \leq \epsilon \leq \epsilon_{mu}$ ; tensione nulla per deformazioni maggiori di  $\epsilon_{mu}$ .

In assenza di dati sperimentali la deformazione ultima di progetto da considerare per la muratura,  $\epsilon_{mu}$ , può essere assunta pari a 3,5%. In alternativa, possono essere utilizzati legami costitutivi più completi, in grado di cogliere i diversi tipi di comportamento a compressione precedentemente descritti, purché tali legami siano adeguatamente comprovati sulla base di idonee indagini sperimentali. I materiali compositi fibrorinforzati sono caratterizzati da comportamento non isotropo. Sollecitati a trazione in un'assegnata direzione, ad esempio quella delle fibre, essi esibiscono una risposta lineare fino alla tensione di rottura, il cui valore caratteristico è  $f_{fk}$ .

La massima deformazione di progetto consentita al rinforzo di FRP è pari a (4.1):

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \varepsilon_{fdd} \right\} \quad (4.1)$$

dove  $\varepsilon_{fk}$  rappresenta la deformazione caratteristica a rottura e  $\varepsilon_{fdd}$  è la deformazione massima nell'FRP all'atto della decoesione incipiente del rinforzo dalla muratura.

I valori attribuibili al fattore di conversione ambientale,  $\eta_a$ , e al coefficiente parziale,  $\gamma_f$ , sono riportati rispettivamente in Tabella 4.1 e in Tabella 3.4.

Condizione di esposizione	Tipo di fibre/resina	$\eta_a$
<b>Interna</b>	Vetro/Epossidica	0,75
	Arammidica/Epossidica	0,85
	Carbonio/Epossidica	0,95
<b>Esterna</b>	Vetro/Epossidica	0,65
	Arammidica/Epossidica	0,75
	Carbonio/Epossidica	0,85
<b>Ambiente aggressivo</b>	Vetro/Epossidica	0,50
	Arammidica/Epossidica	0,70
	Carbonio/Epossidica	0,85

**Tabella 4.1** – Fattore di conversione ambientale per diverse tipologie di FRP in base alla condizione di esposizione

Le verifiche di sicurezza devono essere condotte agli stati limite.

Per quanto riguarda gli SLU si distinguono due possibili casi, in funzione del tipo di analisi strutturale effettuata:

- Se si utilizzano modelli non lineari con impiego di legami costitutivi completi, si deve verificare che il carico ultimo sopportabile dalla struttura non risulti minore del carico di progetto, valutato utilizzando le combinazioni di carico prescritte dalla Normativa vigente. Occorre inoltre dimostrare che la soluzione utilizzata sia obiettiva, ovvero che non dipenda dalla particolare discretizzazione adottata per il calcolo.
- Se la modellazione della struttura è condotta in campo elastico lineare, ovvero tramite schemi semplificati, adottando una distribuzione equilibrata delle tensioni, eventualmente prescindendo dalla congruenza, la verifica deve essere effettuata con riferimento alle sollecitazioni risultanti su sezioni dei singoli elementi strutturali. In

particolare, per elementi bidimensionali inflessi (piastre, gusci) si deve fare riferimento alle sollecitazioni specifiche, valutate cioè per unità di lunghezza degli stessi elementi. Assumendo che, a seguito della deformazione, la generica sezione di ogni elemento strutturale si conservi piana, la verifica viene effettuata assicurando che i tagli ed i momenti sollecitanti di progetto siano minori dei corrispondenti valori resistenti di progetto. Questi ultimi vanno valutati in funzione dello sforzo normale agente, tenendo conto del comportamento non lineare dei materiali costituenti gli elementi strutturali, secondo il modello costitutivo semplificato.

Verifiche allo stato limite di danno devono essere eseguite nei casi previsti specificamente dalla Normativa.

#### **4.3 VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA NEI CONFRONTI DEL DISTACCO DAL SUPPORTO (DELAMINAZIONE)**

Nel rinforzo di paramenti murari mediante applicazione di lamine o tessuti di materiale composito il ruolo dell'aderenza tra muratura e composito è di grande importanza, poiché la crisi per perdita di aderenza del rinforzo è un modo di rottura fragile e, quindi, indesiderabile. Secondo un criterio di gerarchia delle resistenze tale meccanismo di crisi non dovrebbe mai precedere l'entrata in campo anelastico per compressione della muratura stessa, ovvero lo schiacciamento. Nel caso in cui vengano adottati speciali dispositivi di ancoraggio del rinforzo alla muratura, la rottura per delaminazione è accettata purché si tenga conto della variazione dello schema resistente.

Se si tiene conto della notevole varietà di composizioni murarie esistenti, quali la muratura realizzata con blocchi artificiali di laterizio o calcestruzzo, la muratura con blocchi di pietrame squadrato o non squadrato, l'applicazione del composito avviene solitamente su di una superficie disomogenea. Nel caso di murature con paramenti irregolari, allo scopo di realizzare un piano di posa adeguato alla posa del rinforzo, si procede di norma all'apposizione di uno strato di malta di regolarizzazione sul quale effettuare l'incollaggio. Uno stesso rinforzo, lungo il suo sviluppo, può quindi risultare connesso a materiali differenti, caratterizzati da diverse proprietà di interfaccia.

Qualora la resistenza dell'adesivo utilizzato per l'applicazione del rinforzo sia più elevata della resistenza del materiale su cui è apposto il rinforzo, la perdita di aderenza tra composito e

muratura avviene per *decoesione* di uno strato superficiale del mattone o del blocco di pietra o della malta.

#### 4.3.1 MODALITÀ DI COLLASSO

Il distacco dal paramento murario di lamine o tessuti ad esso applicati può essere classificato secondo due modalità principali: delaminazione di estremità del rinforzo (*plate end debonding*), delaminazione a partire dai giunti di malta o da fessure trasversali nella muratura (*intermediate crack debonding*).

In una muratura rinforzata e soggetta ad uno stato tensionale che generi trazione nel rinforzo, sia alle estremità di quest'ultimo sia nelle zone di esso a cavallo di una fessura, l'interfaccia FRP - muratura è sottoposta ad elevati sforzi tangenziali, localizzati su lunghezze dell'ordine di  $50 \div 200$  mm a partire dalla sezione di discontinuità.

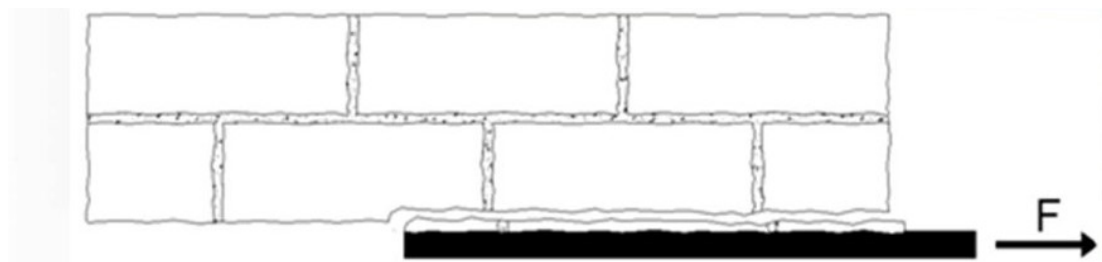
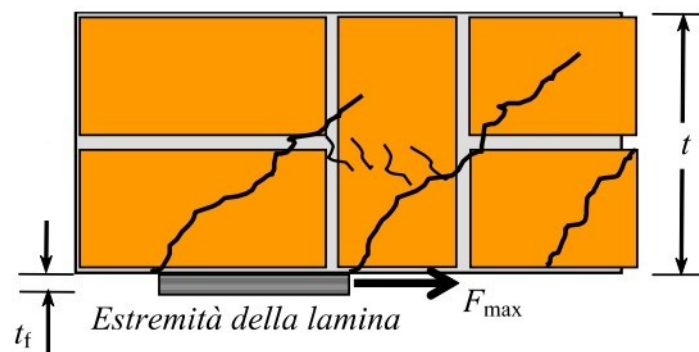


Figura 4.2 – Distacco di rinforzo FRP con asporto di strato di muratura

La forza di delaminazione si riduce nei casi di sollecitazione composta, ovvero in presenza di sforzi agenti in direzione ortogonale all'asse del rinforzo. In particolare, nel caso di rinforzi applicati su superfici curve (archi o volte) o quando la rigidità flessionale della lamina è elevata, si possono avere significativi sforzi di trazione in direzione normale all'interfaccia (*peeling*) che riducono la forza di ancoraggio trasmissibile.

Nel caso di tessuti applicati sul paramento murario con fibre inclinate rispetto alla direzione ortogonale alla fessurazione, si verifica una concentrazione delle tensioni interattive a cavallo delle fessure dovuta al possibile spostamento relativo, responsabile della discontinuità dell'interfaccia.

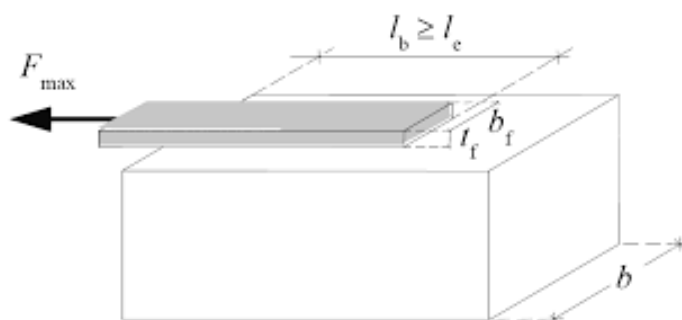
Il distacco di estremità (*end debonding*) può essere accompagnato dall'asportazione di un sottile strato di muratura (*rip-off failure*) (Figura 4.2), soprattutto quando le tensioni tangenziali di estremità si associano a cospicui sforzi normali di trazione. Tale modalità di crisi si manifesta con la formazione di fessure dovute alla diffusione dello sforzo di ancoraggio, cui possono associarsi, nel mattone, trazioni tali da provocarne la frattura (Figura 4.3).



**Figura 4.3** – Fessurazioni della struttura muraria per effetto delle trazioni generate dallo sforzo di ancoraggio

### 4.3.2 RESISTENZA ALLA DELAMINAZIONE RADENTE ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Sperimentalmente, attraverso prove di trasmissione dell'azione radente trasferita ad un substrato coesivo da un rinforzo di FRP ad esso incollato (Figura 4.4), si rileva che il valore ultimo della forza sopportabile dal rinforzo prima che subentri la delaminazione,  $F_x$ , dipende, a parità di tutte le altre condizioni, dalla lunghezza,  $l_b$ , della zona incollata: essa cresce con  $l_b$  fino ad attingere un massimo corrispondente ad una ben precisa lunghezza,  $l_e$ , detta lunghezza ottimale di ancoraggio, che corrisponde alla lunghezza minima di ancoraggio che assicura la trasmissione del massimo sforzo di aderenza: ulteriori allungamenti della zona di incollaggio non comportano incrementi della forza trasmessa. La lunghezza ottimale di ancoraggio di progetto,  $l_{ed}$ , può essere stimata utilizzando l'espressione (4.2).



**Figura 4.4** – Schematizzazione prova di trasmissione dell'azione radente

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}, 150 \text{ mm} \right\} \quad (4.2)$$

In cui  $E_f$  e  $t_f$  rappresentano rispettivamente il modulo di elasticità normale nella direzione della forza e lo spessore dello strato di rinforzo,  $\Gamma_{Fd}$  rappresenta il valore di progetto dell'energia specifica di frattura,  $\gamma_{Rd}$  è un coefficiente correttivo, pari a 1,50 per murature in laterizio o tufi e pari a 1,25 per murature in calcareniti o pietra leccese,  $f_{bd}$  è il valore di progetto della massima tensione tangenziale di aderenza e viene definito dall'espressione (4.3):

$$f_{bd} = \frac{2 \cdot \Gamma_{Fd}}{s_u} \quad (4.3)$$

dove  $s_u$  è il valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto che, in assenza di prove sperimentali può essere assunta pari a 0,4 per murature in laterizio o tufo e pari a 0,3 per murature in calcareniti o pietra leccese.

Il valore di progetto dell'energia specifica di frattura viene invece ricavato dall'espressione (4.4):

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{bm} \cdot f_{btm}} \quad (4.4)$$

Nella quale:

- $k_b$  è un coefficiente correttivo di natura geometrica;
- $k_G$  è un coefficiente correttivo tarato sulla base dei risultati di prove sperimentali, espresso in mm e dipende dal tipo di muratura, nel caso di rinforzi impregnati in situ assume i valori riportati in Tabella 4.2:

Tipo di muratura	$k_G$ [mm]
Muratura di laterizio	0,031
Muratura di tufo	0,048
Muratura di calcarenite o pietra leccese	0,012

Tabella 4.2 – Valori del coefficiente correttivo  $k_G$  in base al tipo di muratura di supporto

- $FC$  è un opportuno fattore di confidenza;
- $f_{bm}$  e  $f_{btm}$  sono rispettivamente il valore medio della resistenza a compressione e della resistenza a trazione dei blocchi costituenti la muratura; in assenza di dati sperimentali, la resistenza media a trazione dei blocchi può essere assunta pari a  $0,10f_{bm}$ .

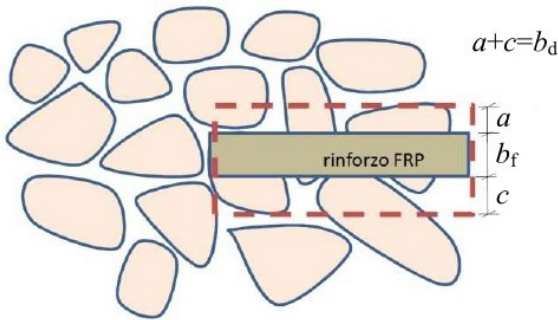
In assenza di dati sperimentali, il coefficiente correttivo  $k_b$  è calcolato come (4.5):

$$k_b = \sqrt{\frac{3 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{b}}} \quad (4.5)$$

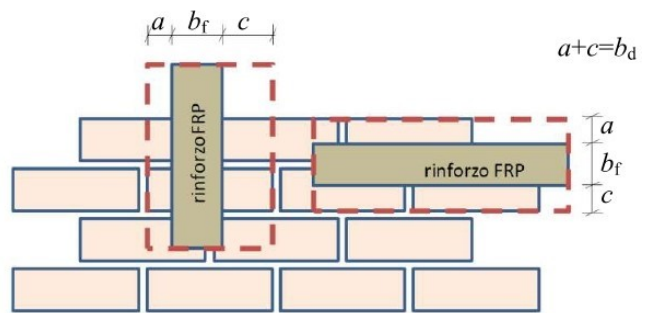
dove sono indicate con  $b_f$  e con  $b$  rispettivamente la larghezza del rinforzo e dell'elemento rinforzato.

Il valore di  $b$  può essere ottenuto come somma delle quantità  $b_f$  e  $b_d$ , larghezza della zona di diffusione delle tensioni di aderenza.

- Nel caso di muratura irregolare,  $b_d$  può essere assunto pari al diametro medio delle pietre componenti la muratura (Figura 4.5).
- Nel caso di muratura regolare,  $b_d$  può essere assunto pari alla dimensione del blocco costituente il supporto in direzione ortogonale all'asse del rinforzo (Figura 4.6).



**Figura 4.5** – Larghezza zona di diffusione delle tensioni di aderenza in muratura irregolare



**Figura 4.6** – Larghezza zona di diffusione delle tensioni di aderenza in muratura regolare

Nel caso di utilizzo di rinforzi pultrusi, i valori del coefficiente correttivo  $k_G$  riportati in Tabella 4.2 devono essere ridotti del 40%.

Con riferimento ad un distacco dal supporto che coinvolga i primi strati di muratura e lunghezze di ancoraggio maggiori o uguali a quella ottimale, la tensione di progetto nel rinforzo, ovvero il valore della massima tensione alla quale il rinforzo può lavorare nella sezione terminale di ancoraggio, nei riguardi del distacco di estremità vale (4.6):

$$f_{dd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (4.6)$$

dove  $\gamma_{f,d}$  è il coefficiente parziale indicato in Tabella 3.4.

Nel caso di incollaggio su murature con giunti di malta ad una distanza inferiore alla lunghezza ottimale di ancoraggio, la tensione di progetto nel rinforzo deve essere ridotta all'85% del valore fornito dalla formula (4.6).

Nel caso di lunghezze di ancoraggio,  $l_b$ , minori di quella ottimale,  $l_{ed}$ , la tensione di progetto deve essere opportunamente ridotta in accordo con la relazione:

$$f_{ad,rid} = f_{ad} \cdot \frac{l_b}{l_{ed}} \cdot \left(2 - \frac{l_b}{l_{ed}}\right) \quad (4.7)$$

Nel caso di utilizzo di particolari dispositivi di ancoraggio, la tensione di progetto alle estremità del composito deve essere valutata tramite specifiche prove sperimentali.

Qualora il rinforzo non sia applicato direttamente sulla muratura, ma su uno strato di regolarizzazione della superficie di incollaggio, da realizzare con malte a base epossidica, la verifica al distacco va effettuata all'interfaccia tra lo strato di regolarizzazione e la struttura in muratura sottostante, purché sia garantita la contemporanea reticolazione della resina epossidica della malta e della resina utilizzata per impregnare il tessuto di rinforzo. Le formule viste in precedenza risultano valide per tali verifiche.

Definendo lo spessore medio,  $t_r$ , e il modulo elastico,  $E_r$ , dello strato di regolarizzazione è possibile definire lo spessore,  $t_h$ , e il modulo elastico,  $E_h$ , del sistema omogeneizzato, costituito dal rinforzo e dallo strato di regolarizzazione, tramite le espressioni (4.8) e (4.9):

$$t_h = t_f + t_r \quad (4.8)$$

$$E_h = \frac{E_f \cdot t_f + E_r \cdot t_r}{t_h} \quad (4.9)$$

Lo spessore medio dello strato di regolarizzazione,  $t_r$ , può essere stimato in base al volume di materiale applicato. La resistenza limite al distacco si determina dalle formule (4.2) - (4.7), attribuendo alla larghezza  $b_h$  del sistema omogeneizzato il valore  $b_h = b_f + 2 \cdot t_r$ .



### 4.3.3 RESISTENZA ALLA DELAMINAZIONE IN PRESENZA DI AZIONE NORMALE AL PIANO DI ADESIONE

La forza di distacco per azione normale al piano di adesione risulta di difficile quantificazione e dovrebbe in generale essere ottenuta da prove sperimentali condotte sul paramento ove sono previsti gli interventi di rinforzo.

In mancanza di valutazioni analitiche approfondite, per rinforzi caratterizzati da una modesta curvatura, l'effetto combinato di distacco per forza di ancoraggio radente e ortogonale al piano di adesione, può essere valutato ipotizzando un dominio d'interazione lineare che riduca la forza radente di progetto in proporzione a quella ortogonale: indicando con  $\sigma_{sd}$  l'intensità della tensione normale al paramento agente in corrispondenza della superficie di adesione, il valore di progetto della resistenza alla delaminazione in direzione radente,  $f_{fpa}$ , può essere ottenuto mediante la relazione (4.10):

$$f_{fpa} = f_{fda} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{sd}}{f_{mtd}}\right) \quad (4.10)$$

dove  $f_{fda}$  è il valore di progetto della resistenza alla delaminazione e  $f_{mtd}$  è il valore di progetto della resistenza a trazione della muratura.

Nel caso in cui la lunghezza di ancoraggio,  $l_b$ , fosse minore della lunghezza ottimale,  $l_e$ , nella (4.10) andrebbe utilizzato il valore  $f_{fda,rid}$ .

### 4.3.4 SISTEMI DI ANCORAGGIO MECCANICO

La forza di distacco può essere aumentata fino al raggiungimento della crisi per trazione del composito fibrorinforzato attraverso l'utilizzo di sistemi meccanici di ancoraggio. L'efficacia dei sistemi di ancoraggio deve essere comprovata mediante opportune prove sperimentali di progetto in grado di simulare l'effettivo meccanismo di funzionamento del sistema adottato.

Le soluzioni tecnologiche maggiormente adottate consistono in:

- Serraggio del rinforzo con piastre metalliche ancorate alla muratura tramite *tirafondi*;
- Inserimento di perni ortogonali all'asse del rinforzo eseguito con barre, corde o sfocchi, sia in fibra che in altro materiale;
- Inserimento di una barra trasversale di ancoraggio in un intaglio ortogonale all'asse del rinforzo;

- Applicazione di una striscia di fasciatura dell'elemento strutturale, ortogonale all'asse del rinforzo.

Alcuni sistemi di ancoraggio meccanici, utilizzati in combinazione con lamine pultruse, permettono di esercitare un'azione di pretensione su queste ultime.

## 4.4 VERIFICHE DI ELEMENTI STRUTTURALI RICORRENTI

Di seguito sono state analizzate alcune delle più comuni applicazioni di rinforzi FRP per contrastare meccanismi di collasso locale particolarmente frequenti nella pratica tecnica.

### 4.4.1 RINFORZO DI PANNELLI MURARI

I pannelli di muratura possono essere rinforzati con FRP allo scopo di incrementarne la portanza o la duttilità nei confronti di azioni sia nel loro piano che al di fuori di esso.

A tal proposito il DT 200/2004 del CNR e le Linee Guida del 2009 suggeriscono alcune verifiche speditive atte al controllo del grado di sicurezza dei pannelli murari. Tali verifiche non sono però esaustive e devono essere integrate con ulteriori controlli, adeguati alla complessità dello specifico caso in esame.

#### 4.4.1.1 Verifiche per azioni fuori dal piano

Il collasso di pannelli fuori del piano della muratura, rappresenta una delle tipologie più frequenti di crisi locale di elementi strutturali murari: può essere dovuto a varie cause, fra cui l'azione sismica, l'effetto della spinta di archi e di volte, o ancora difetti di verticalità del pannello murario.

Tale tipologia di collasso può manifestarsi in varie forme:

- Per ribaltamento semplice;
- Per flessione verticale;
- Per flessione orizzontale.

##### 4.4.1.1.1 Verifica per ribaltamento semplice

Il cinematismo consiste nel ribaltamento del pannello murario attorno ad una cerniera cilindrica che si crea alla base dello stesso a causa della limitata resistenza a trazione della muratura. Seppure abbia dimensione finita, pari alla larghezza della muratura compressa, si assume che la cerniera sia posta sul filo esterno del pannello murario.

Il collasso per ribaltamento può avvenire in presenza di pareti ortogonali non ammortate, oppure non trattenute in sommità. Esso dipende da vari fattori, quali le condizioni di vincolo, la snellezza della parete e la geometria della sezione muraria.

Un possibile intervento con elementi di FRP consiste nell'inserimento di uno o più elementi orizzontali, incollati alla sommità della faccia esterna della parete in oggetto, risvoltati sulle pareti ortogonali di estremità (ove possibile) ed ancorati ad esse.

I maggiori benefici e la maggiore efficacia dell'intervento si ottengono cerchiando completamente, quando possibile, la fabbrica muraria. In tal caso, occorre particolare attenzione nell'arrotondamento delle zone di spigolo al fine di ridurre le concentrazioni di tensione ortogonali al rinforzo.

Si considera, come esempio, un pannello murario soggetto alle seguenti azioni (valori di progetto):

- $P_d$ , peso proprio del pannello;
- $N_d$ , sforzo normale agente sulla sommità del pannello;
- $\alpha_s$ , rapporto tra l'intensità dei carichi orizzontali e quella dei carichi verticali;
- $F_d$ , forza di contenimento esercitata sul pannello dal rinforzo di FRP.

Un'ulteriore forza agente in sommità da tenere in conto potrebbe essere, ad esempio, l'eventuale spinta del solaio di copertura. Le forze agenti e il cinematismo sono rappresentati in Figura 4.7.

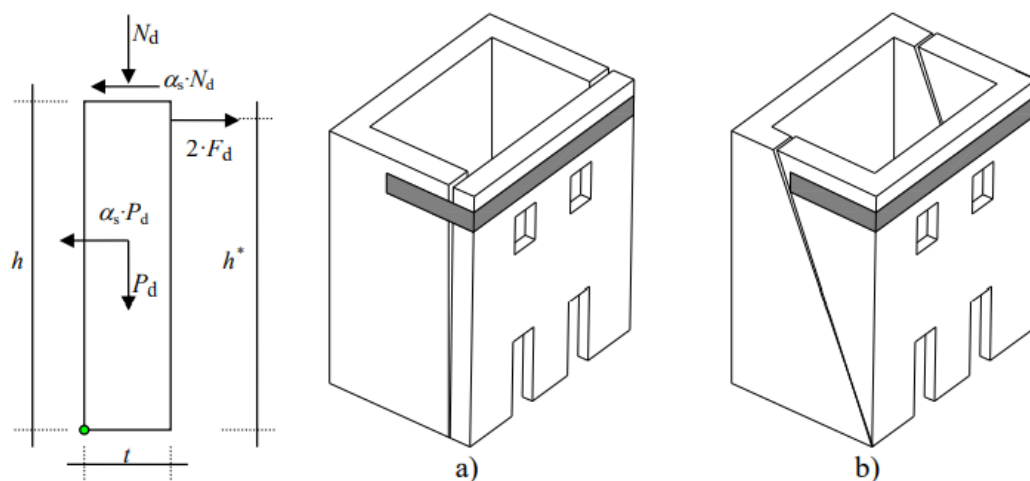


Figura 4.7 – Schema di calcolo per meccanismo di ribaltamento semplice

Assumendo che siano trascurabili le azioni di vincolo di eventuali solai e di muri ortogonali, come nel caso di Figura 4.7(a), è possibile determinare l'intensità della forza di trazione nel rinforzo attraverso l'equazione di equilibrio alla rotazione intorno al piede del pannello (4.11):

$$F_d = \frac{1}{2 \cdot h^*} \cdot \left[ \alpha_s \cdot \left( P_d \cdot \frac{h}{2} + N_d \cdot h \right) - (P_d + N_d) \cdot t \right] \quad (4.11)$$

indicando con  $h^*$  la distanza del punto di applicazione del rinforzo FRP dal piede del pannello murario.

Per prevenire il ribaltamento semplice del pannello murario è necessario effettuare:

- La verifica a trazione del rinforzo FRP.

Indicando con  $A_f$  l'area del rinforzo di FRP e con  $f_{fd} = E_f \cdot \varepsilon_{fd}$  la corrispondente tensione di rottura di progetto, la massima forza esplicabile è  $F_{Rd} = A_f \cdot f_{fd}$ , per cui la verifica è soddisfatta se si accerta la (4.12):

$$F_d \leq F_{Rd} \quad (4.12)$$

- La verifica al distacco del rinforzo di FRP dalle pareti ortogonali.

Indicando con  $F_{pd} = A_f \cdot f_{fd}$  la massima forza di ancoraggio del composito di FRP applicato su ciascuna delle pareti ortogonali al pannello in oggetto, la verifica è soddisfatta se risulta (4.13):

$$F_d \leq F_{pd} \quad (4.13)$$

In genere la verifica (4.13) risulta più gravosa, nel caso di cerchiatura con adeguata sovrapposizione è considerata tuttavia superflua.

In assenza di cerchiatura completa il composito FRP deve essere steso sulle pareti ortogonali per una lunghezza sufficiente ad evitare la formazione di un meccanismo a cuneo simile a quanto rappresentato in Figura 4.7(b), che contenga l'intero sistema di rinforzo.

#### 4.4.1.1.2 Verifica per flessione della striscia muraria verticale

Un pannello di muratura ben vincolato al piede ed in sommità, soggetto ad azioni orizzontali, può collassare per effetto delle sollecitazioni di flessione che si instaurano in esso. In questo caso il collasso avviene per formazione di tre cerniere: una al piede, una in sommità e la terza in posizione intermedia. La crisi sopravviene quando, alle sollecitazioni di sforzo assiale e momento flettente, corrisponde un centro di pressione esterno alla muratura.

Sono interessati dal fenomeno i pannelli murari particolarmente alti e/o vincolati a maschi murari ortogonali molto distanti tra loro.

Particolarmente sensibili a tale tipologia di collasso, sotto azioni sismiche, sono quei pannelli sui quali gravano, da parti opposte, solai ubicati a quote differenti per la presenza di interpiani di diversa altezza.

In questi casi, applicando sulle pareti del pannello sistemi FRP con fibre verticali, adeguatamente ancorati, si realizza una “muratura armata con FRP” nella quale gli sforzi di compressione associati alla flessione sono assorbiti dalla muratura e quelli di trazione dal rinforzo di FRP.

Considerando, ad esempio, una striscia di larghezza unitaria del pannello murario rinforzato soggetta alle seguenti azioni (valori di progetto):

- $P_d^{(s)}$ , peso proprio della parte superiore del pannello;
- $P_d^{(i)}$ , peso proprio della parte inferiore del pannello;
- $N_d$ , sforzo normale agente sulla sommità del pannello;
- $\alpha_s$ , rapporto tra l'intensità dei carichi orizzontali e quella dei carichi verticali;
- $Q_d$ , azione dovuta ad un'eventuale ulteriore spinta orizzontale.

Le forze agenti e il cinematismo sono rappresentati in Figura 4.8.

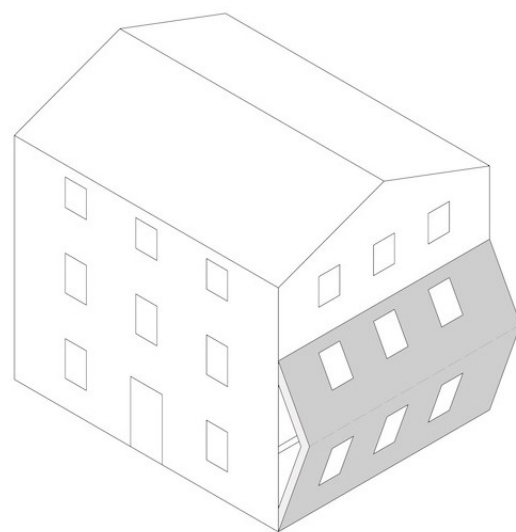
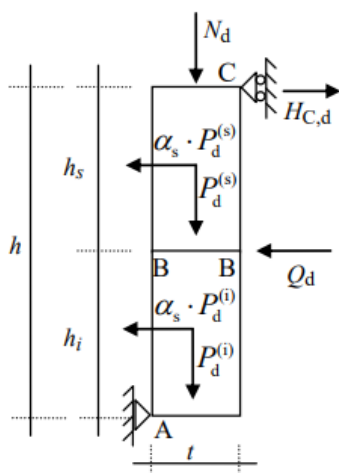


Figura 4.8 – Schema di calcolo per meccanismo di flessione verticale

L'intensità di calcolo della reazione al vincolo C rappresentato in Figura 4.8 può essere calcolata a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione attorno alla cerniera nel punto A (4.14):

$$H_{C,d} = \frac{h_i \cdot (2 \cdot Q_d + \alpha_s \cdot P_d^{(i)}) + \alpha_s \cdot Q_d^{(s)} \cdot (2 \cdot h - h_s) - t \cdot (N_d + P_d^{(s)} + P_d^{(i)})}{2 \cdot h} \quad (4.14)$$

La sezione muraria, nel punto B, in corrispondenza della quale viene applicato il composito fibrorinforzato per impedire la formazione della cerniera, è soggetta ad uno sforzo normale,  $N_{Sd}$ , e ad un momento flettente,  $M_{Sd}$ , pari rispettivamente a:

$$\begin{aligned} N_{Sd} &= N_d + P_d^{(s)} \\ M_{Sd} &= H_{C,d} \cdot h_s - Q_d^{(s)} \cdot \frac{h_s}{2} \end{aligned} \quad (4.15)$$

La verifica a flessione verticale è soddisfatta nel momento in cui si riscontra che (4.16):

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (4.16)$$

Il valore del momento resistente,  $M_{Rd}$ , della sezione di muratura rinforzata può essere determinato a partire dalle caratteristiche meccaniche della muratura e del composito fibrorinforzato, dallo spessore,  $t$ , della muratura, dal valore dello sforzo normale agente e dal competente coefficiente parziale di modello,  $\gamma_{Rd}$ , assunto, in questo caso specifico, pari a 1,00 (Tabella 3.5).

Per porzioni di pannello che non risentano dell'efficacia del composito FRP, il momento resistente,  $M_{Rd}$ , deve essere calcolato a prescindere da quest'ultimo.

In maniera semplificata, la verifica a pressoflessione delle sezioni di muratura rinforzata può essere condotta assumendo un diagramma costante delle tensioni di compressione, pari a  $0,85 \cdot f_{md}$ , esteso su una porzione di sezione profonda  $0,6 \div 0,8 x$ , dove  $x$  rappresenta la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso.

È inoltre necessaria la verifica del valore del taglio,  $V_{Sd}$ , per le stesse condizioni di carico, che non deve essere superiore, in qualsiasi sezione, al valore del taglio resistente,  $V_{Rd,m}$ , pari a (4.17):

$$V_{Rd,m} = 1 \cdot x \cdot f_{vd} \quad (4.17)$$

dove  $f_{vd}$  rappresenta la resistenza di progetto a taglio della muratura determinata in funzione della tensione normale media calcolata come rapporto tra il risultante degli sforzi di compressione e l'area della superficie compresa tra l'estremo lembo e l'asse neutro.

Occorre effettuare la verifica nei confronti del distacco di estremità del rinforzo.

I rinforzi verticali devono essere posati ad un interasse,  $p_f$ , che rispetti la (4.18):

$$p_f \leq 3 \cdot t + b_f \quad (4.18)$$

in cui  $b_f$  rappresenta la larghezza dei rinforzi adottati.

#### 4.4.1.1.3 Verifica per flessione della striscia muraria orizzontale

Nel caso di un pannello murario efficacemente vincolato alle pareti di spina, ma non trattenuto superiormente da apposite strutture, come cordoli o solette armate, possono manifestarsi meccanismi in grado di generare il crollo di una porzione della parete, come nel caso rappresentato in figura 4.9. In questa situazione, la resistenza alle azioni orizzontali è garantita da un funzionamento ad arco della fascia di sommità, come schematizzato in figura 4.10.

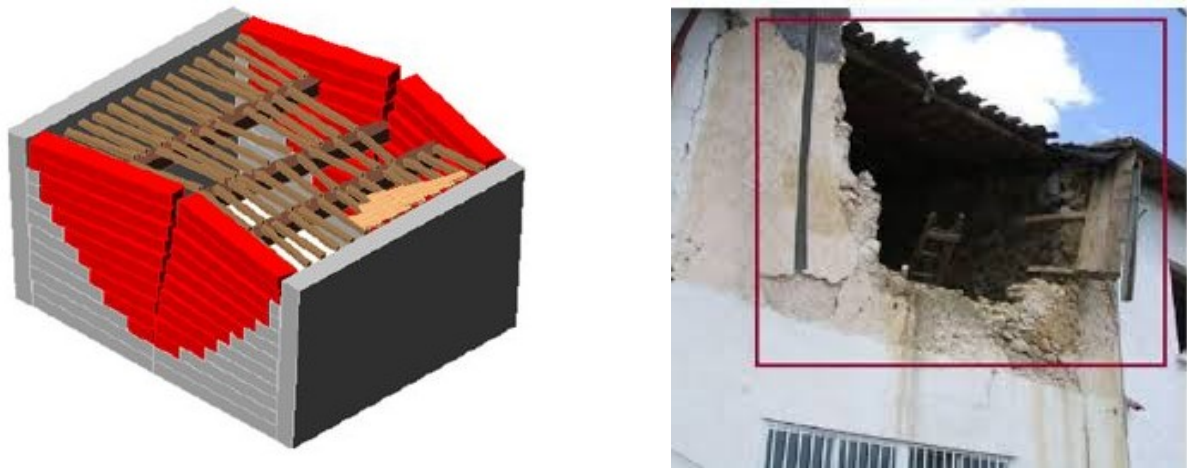
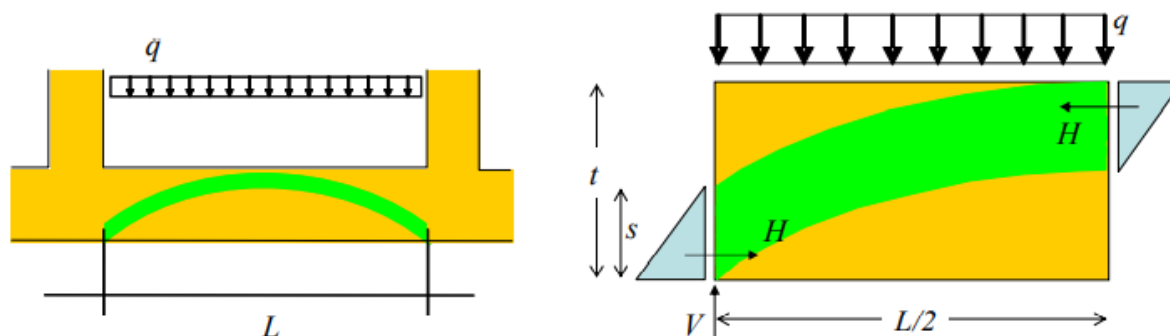


Figura 4.9 – Collasso di struttura muraria per flessione orizzontale

Il valore ultimo del carico orizzontale uniformemente distribuito per unità di superficie,  $q_d$ , che tale arco è in grado di sostenere è ricavabile dalla relazione (4.19):

$$q_d = \frac{2 \cdot t^2}{3 \cdot L^2} \cdot f_{md}^h \quad (4.19)$$

in cui  $L$  rappresenta la larghezza del pannello e  $f_{md}^h$  è la resistenza di progetto a compressione della muratura in direzione orizzontale.



**Figura 4.10** – Diagramma di carico di struttura muraria per flessione orizzontale

L'applicazione di materiali compositi, adeguatamente ancorati, consente di contrastare il meccanismo, conferendo capacità di resistenza a flessione alla fascia sommitale del pannello, trasformata in questo modo in una trave di "muratura armata". In assenza di valutazioni più precise si considera l'estensione della fascia da rinforzare pari alla metà dell'altezza dell'intero pannello murario.

Una supplementare verifica della fascia orizzontale deve essere eseguita in corrispondenza di eventuali solai o coperture interagenti con la parete. In tal caso lo spessore della fascia orizzontale di muratura resistente può essere determinato ipotizzando una diffusione a 45° delle tensioni.

La verifica a flessione orizzontale è soddisfatta nel momento in cui viene rispettata la disequazione (4.16), in cui il momento resistente,  $M_{Rd}$ , si determina dalle caratteristiche meccaniche della muratura e del composito fibrorinforzato e dallo spessore,  $t$ , della muratura. In assenza di valutazioni, adeguatamente giustificate, dello sforzo normale orizzontale generato dal contrasto dei muri trasversali, il valore di quest'ultimo, ai fini del calcolo di  $M_{Rd}$ , viene assunto pari a zero.

Occorre inoltre effettuare una verifica a taglio nelle sezioni di attacco tra il pannello e le pareti ortogonali. La verifica viene effettuata con le stesse modalità indicate nel caso del collasso per flessione verticale: il valore del taglio,  $V_{Sd}$ , non deve essere superiore al valore del taglio resistente,  $V_{Rd,m}$ , dedotto dalla (4.17), assumendo un valore della  $f_{vd}$  corrispondente ad una compressione nulla.



Altre importanti verifiche da eseguire sono la verifica al distacco di estremità del composito dalla parete e la verifica a trazione, in prossimità dell'innesto del pannello murario oggetto di studio, dei muri ad esso ortogonali.

#### 4.4.1.2 Verifiche per azioni nel piano

Le verifiche da effettuare per i pannelli murari soggetti a sollecitazioni nel piano sono:

- Verifica a pressoflessione nel piano;
- Verifica a taglio.

##### 4.4.1.2.1 Verifica a pressoflessione nel piano

Allo scopo di incrementare la portanza a pressoflessione nel piano dei pannelli murari, si può prevedere l'applicazione di rinforzi di FRP verticali, disposti simmetricamente sui due paramenti del pannello ed opportunamente ancorati ad esso.

In forma semplificata, ipotizzando che, a seguito della deformazione, la generica sezione del pannello murario si conservi sostanzialmente piana, la verifica a pressoflessione nel piano può essere condotta assumendo un diagramma costante delle tensioni di compressione nella muratura, pari a  $0,85 \cdot f_{md}$ , ed esteso su una porzione di sezione profonda  $0,6 \div 0,8 x$ , dove  $x$  è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso.

La verifica deve riguardare anche le sezioni di estremità dei campi di pannello delimitati da due solai di interpiano consecutivi. In assenza di dispositivi meccanici di ancoraggio, la verifica va effettuata a prescindere dal contributo del composito.

##### 4.4.1.2.2 Verifica a taglio

La resistenza a taglio di un pannello murario rinforzato a pressoflessione con compositi FRP può essere incrementata con l'applicazione di ulteriori compositi FRP con fibre disposte preferibilmente nella direzione dello sforzo di taglio, posti anch'essi simmetricamente sui due paramenti del pannello. Viene a crearsi in questo modo, oltre al classico meccanismo di resistenza al taglio della muratura, un ulteriore meccanismo resistente per la formazione di un traliccio in grado di trasmettere taglio per equilibrio interno, schematizzato in Figura 4.11.

Qualora sia garantita la formazione del traliccio resistente, la resistenza di progetto a taglio della muratura rinforzata,  $V_{Rd}$ , è calcolata come somma dei contributi della muratura,  $V_{Rd,m}$ , e

del rinforzo di FRP,  $V_{Rd,f}$ , fino al valore limite  $V_{Rd,max}$ , che provoca la rottura delle bielle compresse del traliccio:

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,m} + V_{Rd,f}, V_{Rd,max}\} \quad (4.20)$$

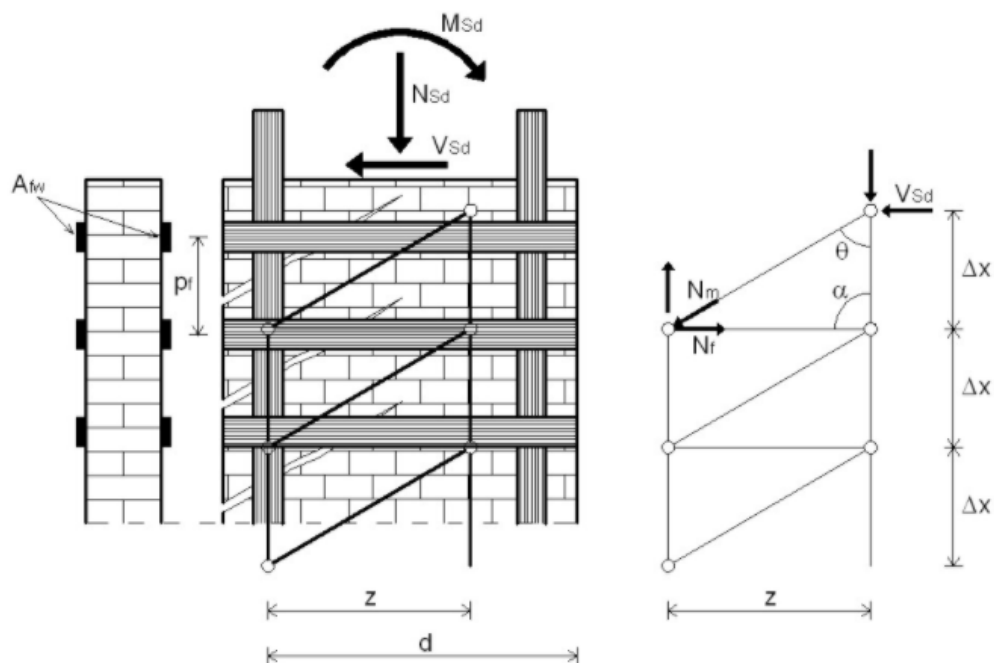


Figura 4.11 – Meccanismo resistente a traliccio

Nel caso in cui il rinforzo a taglio sia disposto parallelamente ai corsi di malta, i contributi sopra definiti possono essere valutati tramite le espressioni:

$$V_{Rd,m} = x \cdot t \cdot f_{vd} \quad (4.21)$$

$$V_{Rd,m} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot \frac{0,6 \cdot d \cdot (E_f \cdot \varepsilon_{fd}) \cdot 2 \cdot t_f \cdot b_f}{p_f} \quad (4.22)$$

nelle quali:

- $x$  è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso;
- $t$  è lo spessore della parete;
- $f_{vd}$  è la resistenza di progetto a taglio della muratura valutata in funzione della tensione normale media pari al rapporto tra risultante degli sforzi di compressione e l'area,  $x \cdot t$ ;
- $E_f$  è il modulo di elasticità del composito FRP nella direzione delle fibre;

- $\epsilon_{fd}$ , è la deformazione di progetto del rinforzo di FRP, determinata tramite la (4.1);
- $t_f$ , è lo spessore del rinforzo in FRP;
- $b_f$  e  $p_f$  rappresentano rispettivamente la larghezza e il passo delle fasce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre.

Il valore del coefficiente parziale relativo al modello di resistenza,  $\gamma_{Rd}$ , in riferimento a Tabella 3.5, viene assunto pari a 1,20.

Allo scopo di realizzare il traliccio è necessario predisporre un rinforzo FRP in direzione verticale in grado di assorbire lo sforzo di trazione che gli compete come tirante nel funzionamento del traliccio stesso.

La massima resistenza al taglio del pannello murario,  $V_{Rd,max}$ , corrispondente allo stato limite ultimo delle diagonali del traliccio è data dall'espressione (4.23):

$$V_{Rd,max} = 0,3 \cdot f_{md}^h \cdot t \cdot d \quad (4.23)$$

in cui  $f_{md}^h$  è la resistenza a compressione di progetto della muratura nella direzione dell'azione tagliante, ovvero parallela ai letti di malta.

Nel caso di parete consolidata con soli sistemi di rinforzo FRP a fibre verticali, atti ad assorbire la trazione generata dalla flessione, il valore della resistenza a taglio risulta comunque esaltato: questa è conseguenza dell'incremento dello sforzo di compressione agente sulla muratura per effetto della flessione. In questo caso il valore del taglio resistente è dato dalla relazione (4.24):

$$V_{Rd,m} = x \cdot t \cdot f_{vd} \quad (4.24)$$

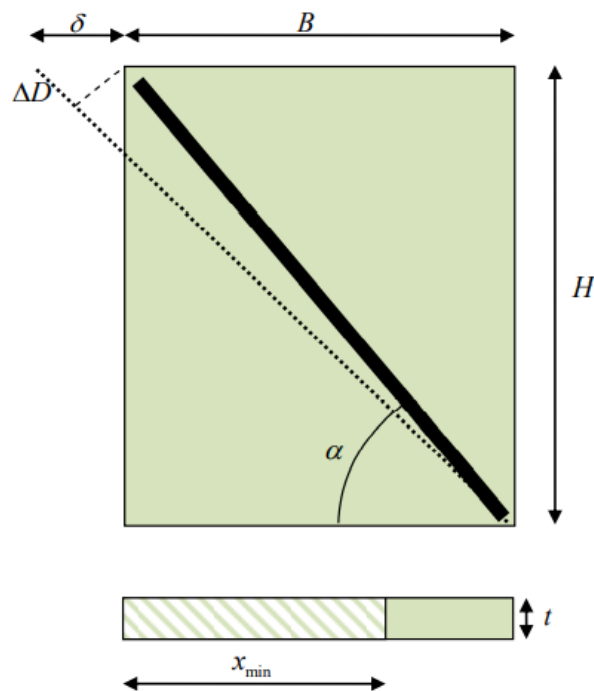
dove  $f_{vd}$  è la tensione di progetto a taglio della muratura in funzione della tensione normale media pari al rapporto tra risultante degli sforzi di compressione e l'area,  $x \cdot t$ .

Pareti murarie composte da più pannelli delimitati da interpiani strutturali possono essere rinforzate a taglio ricorrendo all'applicazione di rinforzi FRP disposti lungo le diagonali dei singoli pannelli, a patto che, in corrispondenza degli interpiani, siano presenti cordoli capaci di assicurare uno spostamento orizzontale sostanzialmente uniforme della sezione di sommità del

pannello. In genere si dispone una coppia di rinforzi diagonali, applicati simmetricamente sui due paramenti del pannello (Figura 4.12).



**Figura 4.12** – Rinforzo di pannello murario con diagonali in FRP



**Figura 4.13** – Pannello murario con rinforzo a taglio disposto secondo una direzione inclinata di un angolo  $\alpha$  rispetto all'orizzontale

Nel caso rappresentato in Figura 4.13, si assume che lo spostamento orizzontale della sezione di sommità del pannello rinforzato sia pari a:

$$\delta_{Rd,l} = 0,005 \cdot H \quad (4.25)$$

In corrispondenza di tale sezione si concentra la forza massima di taglio sopportabile dal pannello, espressa dalla (4.26):

$$V_{Rd,m} = x_{min} \cdot t \cdot f_{vd} \quad (4.26)$$

dove  $x_{min}$  rappresenta la distanza minima dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso e dove  $f_{vd}$  è la tensione di progetto a taglio della muratura in funzione della tensione normale media pari al rapporto tra risultante degli sforzi di compressione e l'area,  $x_{min} \cdot t$ .

Il massimo spostamento orizzontale della testa del pannello, compatibile con la deformazione di progetto del rinforzo FRP in procinto di distaccarsi dal supporto, è dato dall'equazione (4.27):

$$\delta_{Rd,2} = \frac{\Delta D_{fdd}}{\cos \alpha} = \varepsilon_{fdd} \cdot \frac{H}{\sin \alpha \cos \alpha} = \frac{f_{fdd} \cdot H}{E_f \cdot \sin \alpha \cos \alpha} \quad (4.27)$$

ponendo quindi:

$$\frac{\delta_{Rd}}{H} = \frac{1}{H} \min\{\delta_{Rd,1}, \delta_{Rd,2}\} = \min\left\{0,005; \frac{f_{fdd}}{E_f \cdot \sin \alpha \cos \alpha}\right\} \quad (4.28)$$

il taglio massimo sopportabile dal pannello murario rinforzato è fornito dall'espressione (4.29):

$$V_{Rd,m} = \frac{\delta_{Rd}}{H} \left( \frac{V_{Rd,m}}{0,005} + \sin \alpha \cos^2 \alpha \cdot E_f \cdot A_f \right) \quad (4.29)$$

dove  $\frac{\delta_{Rd}}{H} (\sin \alpha \cos^2 \alpha \cdot E_f \cdot A_f)$  è la componente orizzontale della forza esplicita dal rinforzo in corrispondenza dello spostamento  $\delta_{Rd}$ .

In presenza di soli rinforzi al taglio in FRP, disposti secondo le diagonali dei singoli pannelli, devono essere eseguite le verifiche a pressoflessione delle sezioni orizzontali di questi ultimi, in accordo con la Normativa vigente, senza tener conto del contributo del composito.

#### 4.4.2 ARCHITRAVE E FASCIA DI PIANO

Le zone di connessione tra i vari maschi murari all'interno di una parete vengono indicate con il termine di fasce di piano. Esse, oltre a sostenere la muratura gravante in luce alle aperture, hanno lo scopo di vincolare maschi murari contigui ad assumere deformate congruenti per effetto di azioni orizzontali.

Per effetto dei carichi verticali, nelle zone sovrastanti le aperture presenti in una parete occorre tenere in considerazione due situazioni:

- A causa della limitata resistenza a trazione, la zona di muratura sovrastante l'apertura, non è in grado di portare autonomamente il proprio peso, deve quindi essere sostenuta da un architrave in grado di reagire a taglio e a momento flettente
- Quando i maschi murari che contornano l'apertura sono particolarmente esili, tanto da non sopportare la spinta orizzontale dovuta alla presenza dell'apertura stessa, l'architrave deve funzionare come una catena il cui sforzo di trazione possa garantire l'equilibrio complessivo della parete.

Nel caso rappresentato in Figura 4.14, tenendo conto della funzione statica degli architravi e delle fasce di piano, il DT200 del CNR individua due procedimenti particolari di verifica:

- Verifica per funzionamento ad architrave;
- Verifica per funzionamento a fascia di piano.

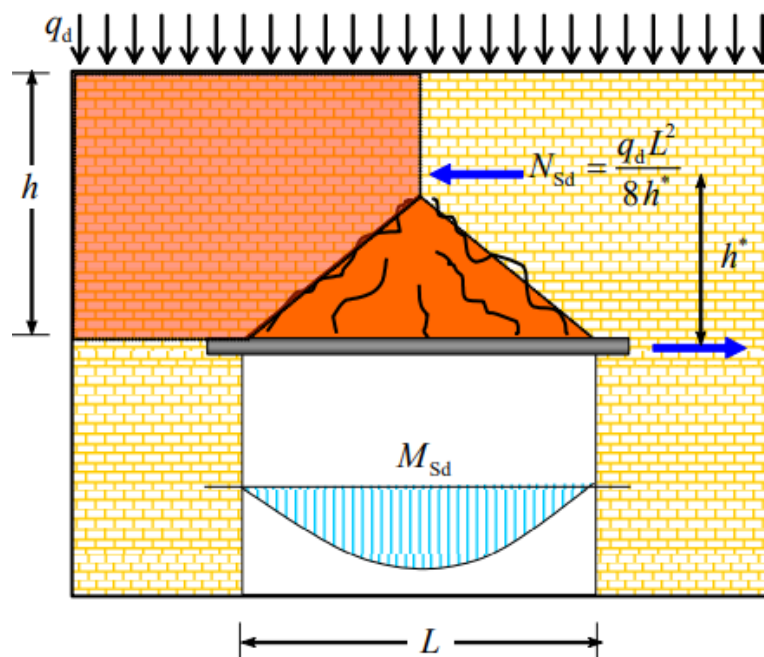


Figura 4.14 – Schema di calcolo di architrave a tensoflessione

#### 4.4.2.1 Verifica per funzionamento ad architrave

Gli architravi possono essere realizzati utilizzando elementi di rinforzo dotati di resistenza assiale e flessionale, ovvero di sola resistenza assiale. Nel primo caso il rinforzo è in grado di garantire entrambi i comportamenti strutturali di trave e di catena.

Nel caso in cui il rinforzo abbia solo resistenza assiale, il sostentamento della zona inerte della parete deve essere assicurato dalla formazione di una trave di muratura “armata” situata immediatamente al di sopra dell’apertura, nella quale le trazioni sono assorbite dal rinforzo di FRP applicato.

La sezione di muratura “armata” dell’architrave deve garantire un momento resistente di progetto,  $M_{Rd}$ , maggiore del momento sollecitante,  $M_{Sd}$ , fornito dall’espressione (4.30):

$$M_{Sd} = \gamma_G \cdot \frac{1}{24} \cdot g \cdot t \cdot L^3 \quad (4.30)$$

dove  $g$  e  $t$  rappresentano rispettivamente il peso specifico e lo spessore della muratura,  $L$  è la luce netta dell’apertura e  $\gamma_G$  è il coefficiente parziale che compete al peso proprio allo SLU.

Lo sforzo di trazione che il rinforzo di FRP deve assorbire è dato dalla relazione (4.31):

$$N_{Sd} = \frac{q_d \cdot L^2}{8 \cdot h^*} \quad (4.31)$$

in cui  $q_d$  è il carico verticale di progetto allo SLU trasmesso all’architrave dalla parte dell’edificio sovrastante ed  $h^*$  è il braccio della coppia interna, non maggiore del minimo tra la luce,  $L$ , dell’apertura e l’altezza,  $h$ , della fascia di piano.

#### 4.4.2.2 Verifica per funzionamento a fascia di piano

Il funzionamento della fascia di piano, rinforzata con FRP, deve essere verificato nei confronti delle sollecitazioni flettenti, taglianti ed assiali presenti nelle sezioni di connessione con i maschi murari. I valori delle azioni resistenti vanno calcolati con le stesse regole valide per i pannelli murari, tenuto conto della resistenza a compressione della muratura,  $f_{md}^h$ , nella direzione parallela ai giunti di malta.

I rinforzi possono essere posizionati parallelamente all'asse delle fasce di piano, ad una quota prossima a quella dei solai o nelle zone di confine, superiore e inferiore, delle fasce stesse. Tali rinforzi possono essere continui o discontinui e vanno applicati preferibilmente in maniera simmetrica sia sulle pareti esterne che su quelle interne. In particolare, l'azione di rinforzo sulle pareti esterne può essere affidata a sistemi FRP utilizzati per la cerchiatura perimetrale dell'edificio.

Per assicurare un comportamento soddisfacente nei confronti delle azioni taglianti, è possibile ricorrere all'applicazione di rinforzi secondo le diagonali dei pannelli murari sovrastanti le aperture. Anche in questo caso è opportuno che i rinforzi siano applicati simmetricamente rispetto al piano medio del muro, sia sulla faccia esterna che su quella interna delle fasce di piano.

#### **4.5 RINFORZO DI ELEMENTI A SEMPLICE E DOPPIA CURVATURA**

Gli elementi strutturali a singola o a doppia curvatura collassano per la formazione di cerniere che nascono a causa della limitata resistenza della muratura a trazione.

L'applicazione di sistemi di rinforzo FRP consente di realizzare una muratura "armata", migliorando il comportamento strutturale di tali elementi. Le verifiche per questo genere di strutture vengono condotte agli stati limite.

Le caratteristiche della sollecitazione di progetto, valutate allo SLU, devono essere maggiorate delle corrispondenti resistenze, in maniera analoga a quanto descritto per i meccanismi di collasso dei pannelli murari.

In rinforzo di FRP deve essere applicato sulla struttura in modo da contrastare la formazione delle cerniere responsabili dei possibili meccanismi di collasso. In prima approssimazione tali cerniere possono considerarsi poste all'estradosso o all'intradosso dell'elemento strutturale. Di conseguenza lo sforzo normale trasmesso da tali cerniere è eccentrico rispetto alla superficie media della struttura e la sua eccentricità è pari alla metà dello spessore di quest'ultima.

Un sistema di rinforzo di FRP, adeguatamente ancorato, è in grado di contrastare il meccanismo di rotazione, e quindi l'apertura dei cigli fessurativi. È quindi possibile ricorrere all'impiego di compositi fibrorinforzati per impedire la formazione di cerniere in corrispondenza della



superficie opposta a quella di applicazione. L'applicazione di FRP non risulta specificatamente idonea a contrastare la rottura a taglio o a schiacciamento della muratura.

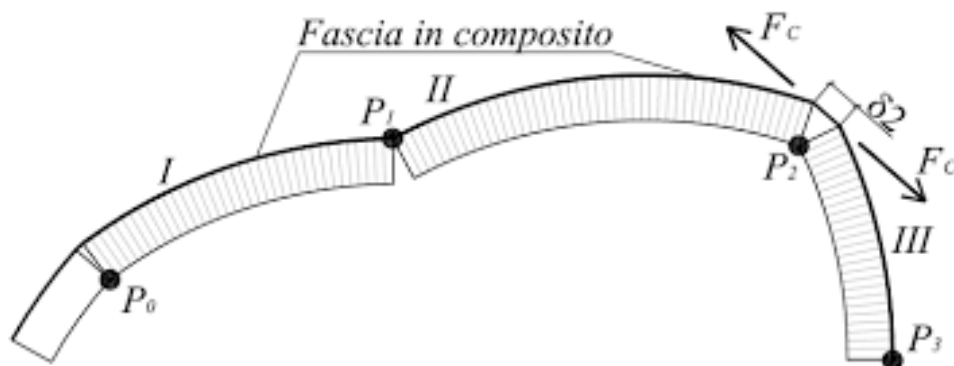
I sistemi di rinforzo FRP applicati su volte non strutturali (cannuciate, in foglio) consentono il consolidamento di queste, migliorandone l'efficienza delle connessioni ed il comportamento nei confronti della stabilità.

#### 4.5.1 ARCHI

Il DT200 del CNR, per quanto riguarda le verifiche rispetto alla formazione di meccanismi di collasso, fornisce indicazioni riguardo a specifici schemi strutturali:

- Lo *schema ad arco*, per archi insistenti su imposte fisse;
- Lo schema arco-piedritto, detto anche *schema a portale*, per archi insistenti su piedritti.

In genere, un arco o un portale collassa per la formazione di almeno quattro cerniere (Figura 4.15), che possono essere proprie o improprie. Un possibile meccanismo di collasso può essere dovuto alla formazione di tre cerniere proprie e una impropria (*doppio pendolo*), che permette lo slittamento a taglio di una parte dell'arco rispetto all'altra.



**Figura 4.15** – Esempio di collasso di un arco per formazione di quattro cerniere

##### 4.5.1.1 Schema ad arco

Nello schema ad arco, per impedire la formazione di cerniere all'intradosso, si può ricorrere all'applicazione di sistemi di rinforzo FRP all'estradosso, e viceversa per la formazione di cerniere all'estradosso.

Le cerniere possono formarsi sia all'interno dell'arco che alle imposte.

L'applicazione di sistemi di rinforzo FRP sulle superfici laterali dell'arco non comporta sensibili miglioramenti al comportamento della struttura. Infatti, in tal caso, si verifica un prematuro distacco del composito fibrorinforzato dal paramento murario. Tale decoesione è localizzata nelle zone compresse per effetto di instabilità locale e si estende progressivamente in tutta la superficie di incollaggio.

La tecnica di applicare rinforzi sia all'estradosso che all'intradosso è poco frequente in quanto, in genere, risulta di difficile realizzazione.

Gli interventi di rinforzo parziali, eseguiti su parte dell'estradosso o dell'intradosso, non escludono la formazione di cerniere responsabili dell'attivazione di un cinematismo; tuttavia, se opportunamente concepiti e realizzati, tali interventi contribuiscono ad incrementare il valore del carico di collasso. Di norma è preferibile:

- Eseguire interventi completi sull'estradosso o sull'intradosso;
- Collegare i rinforzi con le strutture verticali;
- Preferire alle lamine di FRP i tessuti, che meglio si adattano alla geometria del supporto murario;
- Applicare, se possibile, il rinforzo sull'estradosso dell'arco: infatti in tal caso, per effetto della curvatura, si mobilitano, all'interfaccia arco - FRP teso, tensioni normali di compressione; al contrario, nel caso di un rinforzo teso applicato all'intradosso dell'arco, insorgono all'interfaccia interazioni di trazione, che condizionano la resistenza alla delaminazione.

In uno schema più vicino alla situazione reale si dovrebbe tener conto del fatto che, a causa della limitata resistenza a compressione della muratura, le cerniere devono necessariamente formarsi ad una certa distanza dall'estradosso o dall'intradosso, a seconda che, rispettivamente, il rinforzo sia stato applicato all'intradosso o all'estradosso. La suddetta distanza è tanto maggiore, quanto minore è la resistenza a compressione della muratura.

Nell'ipotesi di resistenza a trazione nulla della muratura, occorre effettuare sull'arco rinforzato:

- La verifica di meccanismo, quando questo modo di crisi non sia impedito;
- La verifica a pressoflessione, considerando la possibilità di rottura per schiacciamento della muratura e di rottura a trazione del rinforzo;
- La verifica a taglio;

- La verifica alla delaminazione.

Le verifiche a pressoflessione e a taglio vengono eseguite in maniera conforme a quanto indicato per i pannelli murari nei precedenti capitoli. La verifica alla delaminazione va eseguita nella sezione posta a distanza  $l_b$  dall'estremità del rinforzo; il momento resistente di tale sezione deve essere calcolato ipotizzando nel composito fibrorinforzato lo sforzo di progetto (4.10).

#### 4.5.1.2 Schema a portale

Nello schema a portale può non essere sufficiente apporre il rinforzo di FRP all'estradosso o all'intradosso dell'arco per impedire il meccanismo ad apertura delle imposte. Occorre in tal caso intervenire sui piedritti oppure disporre una catena tra le imposte.

Le verifiche da effettuare sono le stesse di quelle previste per lo schema ad arco.

#### 4.5.2 VOLTE A SEMPLICE CURVATURA: VOLTE A BOTTE

In situazioni frequenti, lo studio della volta a botte, realizzata con mattoni disposti lungo la generatrice o ad essa ortogonali, è riconducibile a quello di un arco di profondità unitaria il cui profilo corrisponde alla curva direttrice della volta. Ne consegue che le volte a botte possono essere rinforzate mediante compositi FRP applicati lungo la direttrice su tutto lo sviluppo longitudinale della volta, sia all'estradosso che all'intradosso. L'interasse dei rinforzi, funzione dello spessore e della luce della volta, deve ostacolare la formazione di cinematismi anche in tale direzione. È consigliabile adottare interassi dimensionati in base alle (4.32):

$$p_f \leq 5 \cdot t + b_f \quad b_f \leq 2t \quad (4.32)$$

in cui  $t$  è lo spessore della volta e  $b_f$  è la larghezza dei rinforzi adottati. Nel caso di volte nervate, il valore dello spessore di calcolo è quello della vela e non della nervatura.

Rinforzi longitudinali, disposti lungo le generatrici, hanno una funzione di cucitura tra gli archi ideali formanti la volta a botte e possono contribuire, se adeguatamente posizionati, ad impedire la formazione di meccanismi lungo lo sviluppo longitudinale della volta. Tale azione è particolarmente importante in presenza di azioni orizzontali.

In genere, si consiglia di disporre lungo le generatrici una quantità di rinforzo per unità di area pari al 10% di quella disposta lungo la direttrice. Tale percentuale deve essere aumentata al 25% in zona sismica.

Nel caso di volte impiegate in edifici cellulari con vani di modeste dimensioni è opportuno privilegiare l'intervento di rinforzo sulla gabbia muraria, la cui integrità e rigidità può consentire alla volta di equilibrare i carichi verticali con soluzioni membranali che prevedano un impegno a trazione minimo o nullo. Tale intervento, di norma, consente di evitare o ridurre quello sulla superficie curva della volta.

### 4.5.3 VOLTE A DOPPIA CURVATURA: CUPOLE

Le cupole presentano un regime tensionale sia di tipo membranale che flessionale.

#### 4.5.3.1 Regime membranale

In una cupola soggetta a soli carichi verticali si instaura uno stato tensionale con tensioni normali di trazione dirette lungo i paralleli. Esso è localizzato in prossimità dell'imposta della cupola e si estende oltre le reni. La modesta resistenza a trazione della muratura giustifica il classico quadro fessurativo che frequentemente si instaura nelle cupole: le lesioni si dispongono lungo i meridiani, con l'apice posizionato all'incirca alla metà di questi ultimi, e si estendono fino all'imposta. La fessurazione lungo i meridiani modifica lo stato di equilibrio preesistente mobilitando valori considerevoli della spinta all'imposta, con eventuali ripercussioni sulla sottostante struttura. L'intervento mediante sistemi di rinforzo FRP, disposti lungo la circonferenza in prossimità della base della cupola, può servire a contrastare l'estensione della zona fessurata mitigando l'incremento di spinta all'imposta.

Per valutare il grado di sicurezza della cupola rinforzata vanno effettuate:

- La verifica a trazione del composito;
- La verifica di delaminazione.

#### 4.5.3.2 Regime flessionale

Il regime flessionale è generalmente localizzato all'imposta della cupola o lungo il bordo di eventuali lanterne.

In particolare, il regime flessionale può provocare il collasso degli spicchi delimitati dalle fessure meridiane. Se la portanza degli spicchi è dettata da un meccanismo con apertura delle imposte, la cupola può essere presidiata applicando i suddetti rinforzi circolari all'imposta. Se la portanza dei segmenti arcuati è invece dettata da un meccanismo con imposte

fisse, i rinforzi circonferenziali all'imposta risultano inerti. In tal caso, per presidiare la cupola, i rinforzi vanno applicati lungo i meridiani oppure lungo i paralleli in corrispondenza delle reni.

Per valutare il grado di sicurezza della cupola rinforzata vanno effettuate:

- La verifica a pressoflessione;
- La verifica a taglio;
- La verifica alla delaminazione.

Per la verifica a pressoflessione e per quella nei confronti del taglio complanare con il generico elementino di volta si procede in termini di caratteristiche specifiche (cioè riferite all'unità di lunghezza), in analogia con quanto già precedentemente indicato per le verifiche a pressoflessione e a taglio dei pannelli murari.

Occorre tenere in debito conto le eventuali riduzioni di resistenza derivanti dalle interazioni tra le varie componenti di tensione agenti contemporaneamente sulle quattro facce contenute nello spessore del generico elementino di volta. Almeno, va considerata l'interazione tra le due pressoflessioni nonché quella tra i due tagli complanari.

Per quanto attiene alle pressoflessioni, particolare attenzione va riservata al caso in cui le zone tese e compresse in una delle due direzioni siano invertite rispetto all'altra direzione.

In questo caso, in via approssimata, salvo determinazioni più rigorose, si può assumere che la somma dei valori assoluti dei due momenti sollecitanti di progetto, ciascuno rapportato al competente valore assoluto del momento resistente di progetto, calcolato in presenza del concomitante sforzo normale sollecitante, sia minore o al più uguale all'unità.

In caso contrario, la resistenza flessionale specifica in ciascuno dei due piani può assumersi, salvo determinazioni più rigorose, pari a quella risultante in una situazione di sollecitazione monoassiale. Per quanto attiene ai tagli complanari all'elementino, si può ragionare in una maniera analoga a quanto già fatto per il primo dei due casi sopra trattato.

Le resistenze flessionali e taglianti di calcolo vanno valutate con riferimento alle competenti resistenze di progetto a compressione della muratura, tenendo conto delle differenze esibite da quest'ultima nei riguardi della compressione in direzione ortogonale e parallela alla tessitura. Ai fini della verifica nei confronti del taglio ortogonale al piano dell'elementino non si deve tener conto del rinforzo di FRP e si deve procedere come nel caso delle murature non rinforzate,

operando sempre in termini di caratteristiche specifiche e tenendo in considerazione gli effetti delle interazioni tra sollecitazioni diverse.

Per la verifica alla delaminazione va tenuta in conto l'azione normale al piano di adesione.

Per garantire il corretto funzionamento del rinforzo all'imposta della cupola, questo deve essere opportunamente esteso ed ancorato alla struttura sottostante, ricorrendo eventualmente a dispositivi meccanici.

#### 4.5.4 VOLTE A DOPPIA CURVATURA SU PIANTA QUADRATA

L'intervento di rinforzo di volte a vela, ovvero volte di traslazione su pianta quadrata, spesso presenti in edifici cellulari con vani di modeste dimensioni, deve innanzitutto interessare la gabbia muraria: l'integrità e la rigidezza di quest'ultima consente alla struttura voltata di equilibrare i carichi verticali con stati tensionali di sola compressione. Ove non si ritenga di poter conseguire pienamente tale risultato, i rinforzi sulla volta possono limitarsi ai "pennacchi" d'angolo, nei quali la trazione è prevista in direzione ortogonale alle diagonali del vano.

#### 4.6 CONFINAMENTO DI COLONNE DI MURATURA

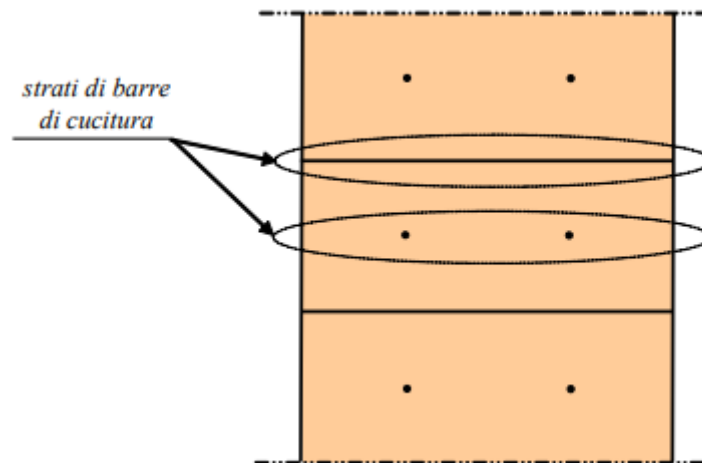
Il confinamento di elementi strutturali di muratura prevalentemente compressi, si applica attraverso la predisposizione di un sistema di elementi resistenti a trazione che, contrastando la dilatazione trasversale dell'elemento strutturale, conferiscono alla muratura un benefico stato di compressione triassiale. Tali interventi vengono realizzati sia per la riparazione di elementi danneggiati o deteriorati, sia per il rinforzo di elementi integri in vista di un adeguamento statico o sismico della struttura.

Il confinamento può essere realizzato con tessuti, lamine e barre (*tiranti*) di FRP. I tessuti sono applicati sul contorno come fasciatura esterna continua (*ricoprimento*) o discontinua (*cerchiatura*); le barre sono disposte all'interno della colonna per realizzare cuciture armate opportunamente diffuse.

Le cuciture interne vengono realizzate alloggiando le barre di FRP in fori praticati secondo due direzioni ortogonali della sezione trasversale. L'insieme delle barre disposte alla stessa quota secondo ognuna di tali direzioni forma uno "strato" (Figura 4.16).

Le cuciture sono in grado di contrastare le dilatazioni trasversali che nascono nell'elemento strutturale in conseguenza della compressione assiale. Le barre di cucitura sono rese solidali

alla muratura mediante saturazione del foro con materiale adesivo o per mezzo di sistemi di contrasto alle estremità.



**Figura 4.16** – Sezione longitudinale di una colonna in muratura con barre disposte in due direzioni ortogonali

Nel caso si realizzi un intervento di confinamento che preveda sia cuciture interne che una fasciatura esterna, è consigliato utilizzare barre e tessuti di caratteristiche meccaniche simili.

Se le colonne presentano fessurazioni verticali risulta opportuno realizzare confinamenti provvisori forzati, prima dell’inserimento delle barre trasversali. Per colonne a sezione rettangolare possono essere predisposti agli angoli dei rinforzi (profili ad “L”) con dispositivi di contrasto a cinture di forzatura provvisoria.

Nella quantificazione degli effetti del confinamento su elementi compressi di muratura, si utilizzano i parametri meccanici di progetto determinati sperimentalmente o definiti dalla Normativa vigente sulla base dei materiali componenti.

#### **4.6.1 RESISTENZA DI PROGETTO A COMPRESSIONE CENTRATA NELL’ELEMENTO CONFINATO**

La verifica di elementi strutturali confinati viene condotta valutando l’azione esercitata dalla fasciatura e dai tiranti, in funzione della geometria e della tipologia del sistema di rinforzo FRP utilizzato.

Per la valutazione della pressione di confinamento è buona norma disporre le fibre in direzione perpendicolare all’asse dell’elemento. In caso di disposizione ad elica l’efficacia del confinamento va opportunamente valutata.

La verifica dell'elemento confinato consiste nell'accertare che sia soddisfatta la limitazione (4.33):

$$N_{Sd} \leq N_{Rmc,d} \quad (4.33)$$

dove  $N_{Sd}$  è il valore di progetto dell'azione assiale agente e  $N_{Rmc,d}$  è il valore di progetto della resistenza della colonna confinata.

La resistenza assiale di progetto,  $N_{Rmc,d}$ , è definita dalla relazione (4.34):

$$N_{Rmc,d} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot A_m \cdot f_{mcd} \geq A_m \cdot f_{md} \quad (4.34)$$

in cui il coefficiente parziale,  $\gamma_{Rd}$ , con riferimento alla Tabella 3.5, viene assunto pari a 1,10, il simbolo  $A_m$  rappresenta l'area della sezione trasversale dell'elemento confinato,  $f_{md}$  rappresenta la resistenza a compressione della muratura non confinata, mentre  $f_{mcd}$  rappresenta il valore di progetto della resistenza a compressione dell'elemento confinato.

Alla resistenza di progetto,  $f_{mcd}$ , dell'elemento confinato soggetto ad un valore  $f_1$  della pressione di confinamento, contribuisce soltanto una quota parte di quest'ultima, detta *pressione efficace di confinamento*,  $f_{1,eff}$  (4.35):

$$f_{mcd} = f_{md} \cdot \left[ 1 + k' \cdot \left( \frac{f_{1,eff}}{f_{md}} \right)^{a_1} \right] \quad (4.35)$$

dove  $k'$  è un coefficiente adimensionale di incremento della resistenza e l'esponente  $a_1$  assume, in mancanza di comprovati risultati sperimentali, valore pari a 0,5.

La pressione efficace di confinamento,  $f_{1,eff}$ , è funzione della forma della sezione e delle modalità di intervento. Indicando con  $V_m$  il volume dell'elemento murario e con  $V_{c,eff}$  il volume della porzione efficacemente confinata, è possibile introdurre il coefficiente di efficienza (4.36):

$$k_{eff} = \frac{V_{c,eff}}{V_m} \quad (4.36)$$



in funzione del quale può essere definita la pressione efficace di confinamento. Il coefficiente di efficienza,  $k_{eff}$ , può essere espresso come prodotto di un coefficiente di efficienza orizzontale,  $k_H$ , per uno di efficienza verticale,  $k_V$  (4.37):

$$f_{1,eff} = k_{eff} \cdot f_1 = k_H \cdot k_V \cdot f_1 \quad (4.37)$$

L'efficacia dell'intervento di confinamento può essere influenzata dalla eventuale disposizione a spirale della fasciatura esterna. Se  $\alpha_f$  è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto al piano della sezione trasversale dell'elemento, è possibile introdurre il coefficiente  $k_\alpha$ :

$$k_\alpha = \frac{1}{1 + \tan^2 \alpha_f} \quad (4.38)$$

L'introduzione di tale coefficiente, moltiplicativo della pressione di confinamento,  $f_1$ , penalizza la pressione efficace di confinamento,  $f_{1,eff}$ , indotta dalla fasciatura esterna per effetto dell'inclinazione da essa presentata. Il suddetto coefficiente riguarda soltanto il contributo della fasciatura esterna eventualmente realizzata a spirale. Il contributo di tiranti disposti ortogonalmente all'asse della colonna non è invece affetto da tale coefficiente.

Al fine di limitare deformazioni assiali e danneggiamenti in condizioni di esercizio, è opportuno contenere l'incremento di resistenza dell'elemento confinato entro valori non superiori al 50% della resistenza di progetto,  $f_{md}$ , del materiale non confinato.

#### 4.6.2 CONFINAMENTO DI COLONNE CIRCOLARI

La (4.39) definisce la percentuale geometrica della fasciatura esterna:

$$\rho_f = \frac{4 \cdot t_f \cdot b_f}{D \cdot p_f} \quad (4.39)$$

dove:

- $t_f$  è lo spessore del rinforzo;
- $b_f$  è l'altezza delle fasce che formano la cerchiatura discontinua;
- $D$  è il diametro esterno della sezione trasversale;
- $p_f$  è il passo delle fasce.

Nel caso di fasciatura continua,  $\rho_f$  si considera pari a:  $\rho_f = \frac{4 \cdot t_f}{D}$

In condizione di equilibrio limite, la pressione di confinamento,  $f_1$ , può essere calcolata con la relazione (4.40):

$$f_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fd,rid} \quad (4.40)$$

in cui  $E_f$  è il modulo di elasticità normale del rinforzo FRP, nella direzione delle fibre e  $\varepsilon_{fd,rid}$  è un valore ridotto di calcolo della deformazione del rinforzo all'atto del collasso della colonna, che può essere dedotta dall'espressione (4,41):

$$\varepsilon_{fd,rid} = \min \left\{ \frac{\eta_a \cdot \varepsilon_{fk}}{\gamma_f}; 0,004 \right\} \quad (4.41)$$

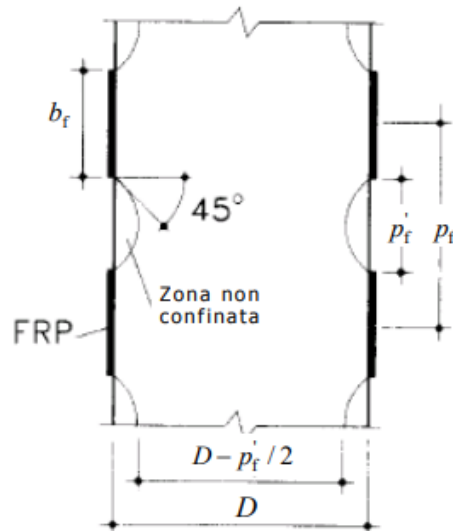
in cui il fattore ambientale,  $\eta_a$ , è ricavato in base ai valori in Tabella 4.1 e  $\varepsilon_{fk}$  e  $\gamma_f$  rappresentano rispettivamente la deformazione ultima e il coefficiente parziale del composito fibrorinforzato, mentre il valore 0,004 è il valore della deformazione limite convenzionale del composito.

Nel caso di fasciatura continua il coefficiente di efficienza orizzontale,  $k_H$ , e il coefficiente di efficienza verticale,  $k_V$ , assumo entrambi valore pari a 1.

Per una fasciatura discontinua, realizzata con fasce di altezza  $b_f$  disposte ad interasse  $p_f$ , si ha una riduzione del volume confinato per effetto della diffusione tensionale schematizzabile mediante una legge parabolica con angoli di attacco pari a 45° (Figura 4.17). il coefficiente di efficienza verticale,  $k_V$ , può essere determinato dall'espressione (4.42):

$$k_V = \left( 1 - \frac{p_f}{2 \cdot D} \right)^2 \quad (4.42)$$

Il coefficiente di efficienza orizzontale,  $k_H$ , si assume sempre pari a 1.



**Figura 4.17** – Sezione circolare confinata con fasciatura discontinua

L'interasse,  $p_f$ , non deve essere mai maggiore di  $D/2$ .

#### 4.6.3 CONFINAMENTO DI COLONNE QUADRATE O RETTANGOLARI

Il confinamento mediante rivestimento con FRP di elementi a sezione quadrata o rettangolare consente di conseguire solo modesti incrementi della resistenza a compressione. Applicazioni di questo genere devono pertanto essere attentamente vagliate ed analizzate.

In assenza di adeguate prove sperimentali che possano comprovarne l'efficacia, non deve essere considerato l'effetto del confinamento esterno su sezioni rettangolari (Figura 4.18) in cui il rapporto tra le due dimensioni della sezione dell'elemento abbia valore  $b/h > 2$ , ovvero per sezioni in cui  $\max\{b, h\} > 900\text{mm}$ .

La pressione di confinamento,  $f_1$ , esercitata su un elemento di sezione rettangolare, di dimensioni  $b \times h$ , da una fasciatura esterna discontinua e da barre di cucitura interne può essere valutata mediante la relazione (4.43):

$$f_1 = \frac{1}{2} \cdot \min\{\rho_{f,x} \cdot E_f + 2 \cdot \rho_{b,x} \cdot E_b; \rho_{f,y} \cdot E_f + 2 \cdot \rho_{b,y} \cdot E_b\} \cdot \varepsilon_{fd,rid} \quad (4.43)$$

in cui (Figura 4.18) i parametri adimensionali  $\rho_{f,x}$ ,  $\rho_{f,y}$ ,  $\rho_{b,x}$ ,  $\rho_{b,y}$  sono definiti come:

$$\rho_{f,x} = \frac{4 \cdot t_f \cdot b_f}{h \cdot p_f}, \quad \rho_{f,y} = \frac{4 \cdot t_f \cdot b_f}{b \cdot p_f}, \quad \rho_{b,x} = \frac{n_{b,x} \cdot A_b}{p_b \cdot h}, \quad \rho_{b,y} = \frac{n_{b,y} \cdot A_b}{p_b \cdot b} \quad (4.44)$$

dove  $n_{b,x}$  e  $n_{b,y}$  rappresentano il numero di barre disposte negli strati orditi, rispettivamente lungo le direzioni x e y,  $A_b$  è l'area della singola barra,  $p_b$  l'interasse tra due strati consecutivi di barre disposte lungo la medesima direzione.

Nel caso di fasciatura continua, le quantità  $\rho_{f,x}$  e  $\rho_{f,y}$  sono fornite dalle espressioni (4.45):

$$\rho_{f,x} = \frac{4 \cdot t_f}{h}, \quad \rho_{f,y} = \frac{4 \cdot t_f}{b} \quad (4.45)$$

Nel caso particolare di sezione rettangolare a sola fasciatura continua, la pressione di confinamento,  $f_1$ , esercitata dal rinforzo FRP è data da:

$$f_1 = 2 \cdot \frac{t_f \cdot E_f}{\max\{b, h\}} \cdot \varepsilon_{fd,rid}, \quad f_1 = 2 \cdot \frac{t_f \cdot b_f \cdot E_f}{\max\{b, h\} \cdot p_f} \cdot \varepsilon_{fd,rid} \quad (4.46)$$

Nel caso invece di sole barre, la stessa pressione di confinamento,  $f_1$ , si ricava come:

$$f_1 = \min\{\rho_{b,x} \cdot E_b; \rho_{b,y} \cdot E_b\} \cdot \varepsilon_{fd,rid} \quad (4.47)$$

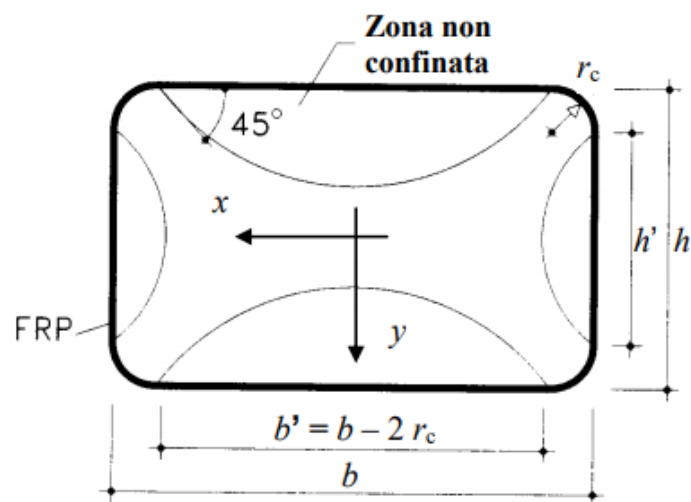


Figura 4.18 – Confinamento di sezione rettangolare con fasciatura esterna

Per una sezione rettangolare confinata solamente da fasciatura esterna (Figura 4.18), si considera che l'area di muratura effettivamente confinata sia solo una parte di quella complessiva, a causa dell'instaurarsi di un "effetto arco" che dipende dal raggio di curvatura con cui sono stati arrotondati i vertici della sezione.

In questo caso il coefficiente di efficienza orizzontale,  $k_H$ , viene ricavato dal rapporto tra l'area confinata e quella totale,  $A_m$ :

$$k_H = 1 - \frac{b'^2 + h'^2}{3 \cdot A_m} \quad (4.48)$$

in cui le dimensioni  $b'$  e  $h'$  fanno riferimento a Figura 4.18.

Nel caso in cui tale fasciatura sia discontinua, si verifica un fenomeno analogo anche in sezione verticale (Figura 4.17). Il coefficiente di efficienza verticale,  $k_V$ , è dato da:

$$k_V = \left(1 - \frac{p_f}{2 \cdot \min\{b, h\}}\right)^2 \quad (4.49)$$

Nel caso di fasciatura continua tale coefficiente assume valore unitario.

L'interasse di posa delle fasce,  $p_f$ , deve soddisfare la relazione (4.50):

$$p_f \leq \frac{1}{2} \cdot \min\{b, h\} \quad (4.50)$$

In assenza di valutazioni più approfondite del volume efficacemente confinato (Figura 4.19), il coefficiente di efficienza,  $k_{eff}$ , nel caso di soli tiranti interni può essere ricavato dall'equazione (4.51):

$$k_{eff} = k_H \cdot k_V = \left\{1 - \frac{[c_x^2 \cdot (n_{bx} - 1) + c_y^2 \cdot (n_{by} - 1) + 6 \cdot c_{xs} \cdot c_{ys}]}{3 \cdot b \cdot h}\right\} \cdot \left(1 - \frac{p_b}{2 \min\{b, h\}}\right)^2 \quad (4.51)$$

Per sezioni quadrate la (4.51) si semplifica nella forma (4.52):

$$k_{eff} = k_H \cdot k_V = \left\{ 1 - \frac{[2 \cdot c_b^2 \cdot (n_b - 1) + 6 \cdot c_{bs}^2]}{3 \cdot b^2} \right\} \cdot \left( 1 - \frac{p_b}{2 \cdot b} \right)^2 \quad (4.52)$$

in cui si assume  $n_{bx} = n_{by} = n_b$ ,  $c_x = c_y = c_b$  e  $c_{xs} = c_{ys} = c_{bs}$ .

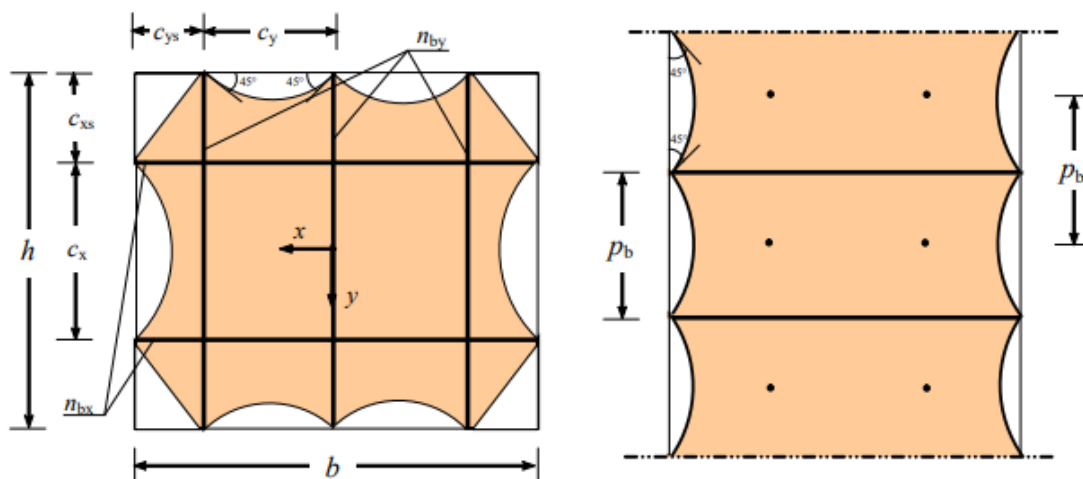


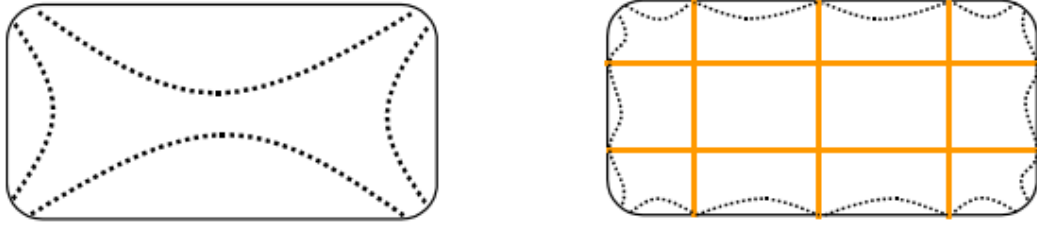
Figura 4.19 – Zone di confinamento dei tiranti nella sezione trasversale e longitudinale

La distanza della barra più estrema dal lato della sezione parallelo alle barre deve essere non superiore a  $\frac{1}{4}$  della lunghezza del lato ad esse ortogonale e deve inoltre risultare che:

$$c_x \leq \frac{h}{5} \quad c_y \leq \frac{b}{5} \quad p_b \leq \max\{c_x, c_y\} \quad (4.53)$$

La lunghezza di ancoraggio non deve essere maggiore a 10 volte il diametro delle barre; se tale distanza è superiore a  $\frac{1}{5}$  della lunghezza delle barre è necessario prevedere un opportuno dispositivo di ancoraggio.

L'utilizzo combinato di una fasciatura esterna e di cuciture interne realizzate con barre può contribuire, per sezioni rettangolari, ad aumentare l'area della sezione efficacemente confinata in sezioni quadrate, rettangolari (Figura 4.20).



**Figura 4.20** – Esempio di confinamento di elementi di muratura tramite tessuti, con (a destra) e senza (a sinistra) barre di FRP

Nel caso di utilizzo combinato di fasciatura continua e di tiranti interni, il coefficiente di efficienza,  $k_{eff}$ , viene determinato tramite l'espressione (4.54):

$$k_{eff} = k_H \cdot k_V = \left\{ 1 - \frac{[c_x^2 \cdot (n_{bx} - 1) + c_y^2 \cdot (n_{by} - 1) + 2 \cdot (c_{xs} - r_c)^2 + 2 \cdot (c_{ys} - r_c)^2]}{3 \cdot b \cdot h} \right\} \quad (4.54)$$

che nel caso di sezione rettangolare di lato  $b$  può essere riscritta nella forma (4.55):

$$k_{eff} = k_H \cdot k_V = \left\{ 1 - \frac{[2 \cdot c_b^2 \cdot (n_b - 1) + 4 \cdot (c_{bs} - r_c)^2]}{3 \cdot b \cdot h} \right\} \quad (4.55)$$

assumendo  $n_{bx} = n_{by} = n_b$ ,  $c_x = c_y = c_b$  e  $c_{xs} = c_{ys} = c_{bs}$  e indicando con  $r_c$  il raggio di curvatura relativo all'arrotondamento degli spigoli.

## 4.7 PRINCIPI GENERALI DI INTERVENTO PER COSTRUZIONI IN ZONA SISMICA

I sistemi di rinforzo FRP possono essere impiegati in zona sismica per intervenire su strutture non soddisfacenti i requisiti di sicurezza nei confronti di uno o più SLU. Il DT 200 del 2004 redatto dal CNR, insieme alle Linee Guida del 2009, fornisce tutte le indicazioni necessarie per quanto riguarda:

- La valutazione della sicurezza sismica;
- I requisiti di sicurezza (verifiche agli stati limite);
- I livelli di protezione antisismica;
- Metodi di analisi;
- Criteri di verifica (distinzione tra elementi “*duttili*” e “*fragili*”);
- Caratteristiche dei materiali.

#### 4.7.1 PRINCIPI GENERALI DI INTERVENTO

La scelta del tipo e dell'estensione dell'intervento con FRP deriva da un'attenta valutazione della sicurezza sismica della costruzione, tenendo conto di diversi aspetti:

- Le murature di qualità insufficiente a sopportare le azioni verticali e orizzontali cui sono sottoposte vanno adeguatamente consolidate o sostituite;
- Le pareti confluenti in martelli murari o in spigoli devono essere opportunamente collegate;
- Occorre rendere efficaci i collegamenti inadeguati tra solai e pareti o tra copertura e pareti;
- Le spinte di coperture, archi e volte devono essere assorbite da idonei elementi strutturali;
- I solai devono essere opportunamente irrigiditi nel proprio piano allo scopo di assicurare, mediante il loro collegamento alle pareti, il trasferimento delle competenti azioni orizzontali alle pareti disposte nella direzione del sisma e di costituire un vincolo per le pareti sollecitate da azioni ortogonali al proprio piano;
- Gli elementi a forte vulnerabilità sui quali non sia possibile intervenire vanno di regola eliminati;
- Nel caso di edifici fortemente irregolari (in termini di resistenza e/o rigidezza) non è possibile, in linea di principio, correggere tale sfavorevole situazione mediante interventi con FRP, anche se è possibile, intervenendo in tal modo su un ridotto numero di elementi, conferire una maggiore regolarità in resistenza;
- Gli interventi con FRP volti a migliorare la duttilità locale (cerchiatura di pilastri) sono sempre opportuni;
- L'introduzione di rinforzi locali con FRP non deve ridurre la duttilità globale della struttura.

Generalmente gli interventi con FRP hanno lo scopo di:

- Rinforzare, sostituire o ricostruire in tutto o in parte alcuni elementi (*interventi selettivi*);
- Migliorare il comportamento complessivo dell'organismo strutturale collegando tra loro vari elementi strutturali.

Il progetto dell'intervento con FRP deve avvenire secondo procedure specifiche:



- La scelta motivata del tipo di intervento;
- La scelta delle tecniche e/o dei materiali;
- Il dimensionamento preliminare dei rinforzi;
- L'analisi strutturale, che tenga conto delle caratteristiche della struttura post-intervento;
- Le verifiche della struttura post-intervento eseguite sugli elementi esistenti, modificati e nuovi.

In zona sismica l'applicazione dei rinforzi su strutture murarie è principalmente finalizzata al raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- L'incremento della resistenza a flessione e taglio di pannelli murari, assicurando la trasmissione di sforzi di trazione all'interno di singoli elementi o tra elementi contigui;
- L'eliminazione di spinte e forze applicate ortogonalmente ai paramenti murari;
- Il collegamento tra elementi che collaborano a resistere alle azioni orizzontali, in modo da ottenere un comportamento scatolare della costruzione;
- L'irrigidimento di solai nel proprio piano per ottenere un funzionamento a diaframma rigido;
- La limitazione dell'apertura di fessure per migliorare la dissipazione di energia;
- Il confinamento di colonne per incrementare la resistenza e la duttilità del materiale.

La strategia d'intervento con FRP deve essere ispirata al principio di incrementare la resistenza degli elementi sottodimensionati, con l'intento di conseguire una maggiore regolarità strutturale e l'eliminazione di possibili modi di collasso locale di singole pareti o elementi strutturali.

L'efficienza sismica dell'intervento progettato può essere stimata dall'incremento di spostamento orizzontale a collasso derivante dall'applicazione del rinforzo. È sempre necessario valutare se gli interventi di rinforzo, orientati ad aumentare la resistenza laterale degli schemi strutturali, non determinino una diminuzione della duttilità generale che possa indurre una maggiore vulnerabilità sismica.

Occorre porre particolare attenzione sugli interventi che tendono a solidarizzare i blocchi costituenti i piedritti verticali e sugli interventi orientati ad impedire la formazione di cerniere negli archi o nelle volte di collegamento. Sono in genere da preferirsi interventi orientati ad aumentare la duttilità delle cerniere sia nei ritti che nelle volte. Analogamente, nelle pareti di controvento degli edifici ordinari occorre orientare gli interventi ad un aumento della duttilità generale dello schema evitando che il collasso dei ritti preceda quello delle fasce di piano.

## 4.8 INSTALLAZIONE E PARTICOLARI COSTRUTTIVI

Il funzionamento ottimale di un rinforzo strutturale di materiale composito dipende da diversi fattori. Tra questi, oltre quelli già richiamati nei precedenti capitoli, rientrano la preparazione del substrato su cui il rinforzo è applicato e la sua messa in opera, che saranno approfonditi nel presente paragrafo. L'incidenza di ciascuno di questi fattori varia a seconda che ci si riferisca ad applicazioni “*per aderenza*” (rinforzo a flessione o a taglio) o applicazioni “*per contatto*” (confinamento passivo di colonne o pilastri di muratura).

Ad esempio, possono essere omesse alcune verifiche relative alla qualità del substrato in casi in cui la geometria del rinforzo ne garantisca il funzionamento intrinseco (per esempio nel caso di applicazioni in avvolgimento come le fasciature chiuse di confinamento) o siano previsti appositi elementi di ancoraggio collaudati indipendentemente.

Una volta realizzato l'intervento è necessario procedere al suo controllo e, in seguito, al suo eventuale monitoraggio nel tempo mediante prove non distruttive o parzialmente distruttive.

Il DT200 descrive quelle che sono le prove da eseguire per verificare la qualità della messa in opera dei materiali compositi e per monitorarne il funzionamento nel tempo. La progettazione del tipo e del numero delle prove da eseguire viene condotta, per ciascuna applicazione, valutando diversi aspetti:

- L'importanza funzionale e strategica che assume la costruzione durante gli eventi sismici, relativamente ad un possibile collasso;
- La valenza storica e culturale dell'edificio;
- La rilevanza strutturale dell'intervento, in base a se riguardi elementi strutturali primari (volte, cupole, pareti) o secondari (piattabande, tiranti);
- L'estensione dell'intervento in relazione alle dimensioni della struttura.

### 4.8.1 CONTROLLO E PREPARAZIONE PREVENTIVA DEL SUBSTRATO

L'applicazione di un sistema di rinforzo con FRP necessita del preventivo controllo delle condizioni del substrato e dell'adozione di provvedimenti atti a migliorarne lo stato, ovvero la rimozione e la ricostruzione della muratura ammalorata, con eventuali operazioni di pulizia ed asportazione di parti degradate per umidità, per presenza di microvegetazione o alterazione dei materiali lapidei o di laterizio.

I sistemi tecnologici utilizzati per l'ancoraggio delle estremità di lamine o tessuti devono essere oggetto di idonee indagini sperimentali condotte secondo criteri normalizzati. Il protocollo di applicazione deve riguardare i materiali utilizzati (adesivi e rinforzi), la successione delle fasi indicate dal produttore e/o dal fornitore per la preparazione delle superfici, i tempi di esecuzione, le condizioni ambientali. L'indagine deve verificare anche l'eventuale sensibilità dei risultati nei confronti di tali parametri.

#### 4.8.1.1 Valutazione del deterioramento del substrato

Prima dell'applicazione del rinforzo è necessario verificare le caratteristiche del substrato eseguendo prove di omogeneità su tutta l'area da rinforzare ed effettuando il rilievo strutturale del degrado del materiale, tramite, ad esempio, reticoli metallici. Il periodo di osservazione non dovrebbe essere inferiore a sei mesi.

Le prove di caratterizzazione meccanica della muratura vanno previste in ragione di almeno una prova per 100 m<sup>2</sup> di area da rinforzare, con un minimo di due prove per ogni zona omogenea, secondo almeno una delle seguenti modalità:

- Prova di compressione su campione di muratura;
- Prova a taglio su campione di muratura;
- Prova con martinetti piatti;
- Prova di taglio con martinetto;
- Prova *dilatometrica* per muratura a sacco;
- Prove con ultrasuoni.

Le prove di omogeneità su tutta l'area da rinforzare, vanno distribuite secondo una griglia a maglia quadrata con passo di 1 metro per estensioni inferiori a 5 m<sup>2</sup> e proporzionalmente maggiore per estensioni superiori, ad eccezione delle zone critiche. Esse possono essere effettuate mediante:

- Ispezioni manuali a mezzo di battitura;
- Analisi radiografica;
- Velocità degli ultrasuoni in *modalità omeosuperficiale*;
- Velocità di impulsi sonici (con martello strumentato e accelerometri);
- Penetrometria;
- Termografia;
- Tomografia.

#### 4.8.1.2 Rimozione e ricostruzione del substrato

Il substrato della muratura può aver subito un deterioramento fisico-chimico, fisicomeccanico, biologico o conseguente ad un impatto. In tal caso è fondamentale rimuovere interamente la muratura deteriorata.

La rimozione delle parti di muratura deteriorata consente di verificare lo stato del materiale lapideo, naturale o artificiale, e della malta: è quindi possibile programmare, prima di procedere alla ricostruzione delle parti murarie rimosse, l'esecuzione di interventi che consentano di eliminare, ove possibile, le cause del deterioramento della muratura stessa. Qualora sui materiali sia in atto un processo di esfoliazione, di polverizzazione, di fessurazione o un attacco chimico-fisico, è necessario rimuovere lo strato deteriorato mediante spazzolatura o sabbatura e poi trattare la superficie con idonei inibitori del processo in atto.

Una volta che il substrato deteriorato sia stato rimosso e siano stati adottati gli opportuni provvedimenti per bloccare i processi di degrado dei materiali, nonché tutti gli altri fenomeni che siano causa di esso (ad esempio infiltrazioni d'acqua o presenza di microvegetazione), si può procedere alla ricostruzione delle parti rimosse mediante l'utilizzo di prodotti compatibili con la muratura stessa. Al ripristino delle parti di murature ammalorate è opportuno associare il livellamento di eventuali asperità superficiali superiori a 10 mm. Il livellamento può essere effettuato con stucco epossidico compatibile, per asperità comprese tra i 10 mm ed i 20 mm, oppure con malta fibrorinforzata, per asperità superiori ai 20 mm. Se l'elemento da rinforzare presenta fessure di ampiezza superiore a 0.5 mm, è opportuno che queste ultime siano richiuse mediante iniezione prima di applicare il rinforzo.

#### 4.8.1.3 Preparazione del substrato

Allo scopo di migliorare l'aderenza del rinforzo sul substrato ricostruito, può essere necessario sabbare la superficie interessata dall'applicazione del rinforzo. La sabbatura ha lo scopo di assicurare un grado di ruvidezza almeno pari a 0.3 mm; tale grado può essere misurato mediante strumenti quali un *profilometro laser* oppure un'apparecchiatura per *rugosimetria ottica*.

Nel caso in cui si operi su una superficie di muratura che non necessiti di ripristino, ma che sia di qualità scadente, è opportuno valutare la possibilità di applicare su di essa un consolidante prima della stesura del *primer*.

È necessario assicurarsi che le parti degli elementi interessate dal rinforzo con composito siano perfettamente pulite, rimuovendo da esse polveri, grassi, idrocarburi e tensioattivi.

## 4.8.2 RACCOMANDAZIONI PER L'ESECUZIONE A REGOLA D'ARTE

La qualità dell'esecuzione del rinforzo con materiali compositi dipende fortemente dalle condizioni di temperatura e di umidità ambientali, nonché da quelle del substrato su cui il rinforzo è applicato. Alle precauzioni di base, indipendenti dal sistema di rinforzo, si aggiungono delle precauzioni specifiche per garantire la qualità di installazione di sistemi *in situ* la cui polimerizzazione avviene sul posto e non è quindi controllata in stabilimento.

### 4.8.2.1 Condizioni di umidità e temperatura dell'ambiente e del substrato

Quando l'ambiente è molto umido, è sconsigliata l'installazione di rinforzi FRP, in quanto un elevato grado di umidità può ritardare la stagionatura delle resine nonché inficiare la perfetta realizzazione del composito nel caso di sistemi con polimerizzazione *in situ*.

I rinforzi non vanno installati su substrati che presentino un grado di umidità superficiale maggiore del 10%: tale condizione potrebbe infatti impedire la penetrazione del primer nei pori e generare bolle d'aria tali da compromettere l'aderenza del composito. L'umidità del substrato può essere valutata mediante un misuratore di umidità per malte oppure semplicemente con l'utilizzo di carta assorbente. Il rinforzo non deve inoltre essere installato quando temperatura ambiente e temperatura superficiale sono molto basse, in quanto potrebbero risultare condizionate la stagionatura delle resine e l'impregnazione delle fibre; le condizioni ideali per la posa di compositi FRP ricadono nell'intervallo di temperature comprese tra i 10°C e i 35°C. Quando è inevitabile la posa del composito a basse temperature, è opportuno riscaldare le zone interessate dal rinforzo. Allo stesso modo è sconsigliata l'applicazione del composito su superficie fortemente soleggiate.

Quando la stagionatura del rinforzo avviene in condizioni di pioggia, di eccessivo soleggiamento, di forti gradienti termici, di elevata umidità, o in presenza di polvere può essere opportuno avvalersi di teli protettivi o di provvedimenti succedanei.

#### 4.8.2.2 Particolari costruttivi e norme di esecuzione

La lunghezza di ancoraggio minima da prevedere è di 150 mm, in alternativa si può ricorrere all'utilizzo di connettori meccanici. In tutti i casi in cui il materiale composito di rinforzo debba essere applicato su spigoli, è necessario procedere preventivamente all'arrotondamento di questi ultimi con un raggio di curvatura,  $r_c$ , non inferiore a 20 mm.

Nella messa in opera di sistemi di rinforzo realizzati *in situ* le fibre vanno disposte secondo l'orientamento previsto da progetto e devono essere esenti da ondulazioni.

In vista delle eventuali prove di collaudo semi-distruttive da condurre successivamente, è necessario prevedere zone aggiuntive (“*testimoni*”) di rinforzo in parti della struttura selezionate. Tali zone, di dimensioni pari almeno a 500×300 mm<sup>2</sup>, devono presentare un'estensione totale minima di 0.15 m<sup>2</sup> e comunque non inferiore allo 0.5% dell'area totale del rinforzo. I fazzoletti devono essere realizzati con gli stessi materiali e le stesse modalità del rinforzo principale in zone in cui la loro rimozione non comporta alterazioni dei meccanismi di collasso; devono inoltre essere esposti alle stesse condizioni ambientali del rinforzo e, se in numero maggiore di uno, distribuiti nell'intera costruzione.

#### 4.8.2.3 Protezione del sistema di rinforzo

Nel caso di applicazioni in ambiente esterno è opportuno proteggere il sistema di rinforzo dall'azione diretta dell'irraggiamento solare, che può produrre alterazioni chimico-fisiche nella matrice epossidica. La protezione può essere assicurata mediante l'impiego di vernici acriliche protettive, sia in dispersione acquosa sia in solvente, previa pulitura della superficie del composito mediante l'uso di una spugna satura d'acqua saponata. Alternativamente, la protezione può consistere nell'applicazione di malte o intonaci sul composito, i cui spessori sono generalmente consigliati da produttori e/o fornitori e che vanno applicati sul rinforzo previa applicazione di resina epossidica e spolvero di sabbia al quarzo.

Ai fini della protezione al fuoco si possono adottare due differenti soluzioni: l'uso di pannelli intumescenti o l'applicazione di intonaci protettivi. In entrambi i casi produttori e/o fornitori devono indicare il grado di protezione in relazione allo spessore del rivestimento. I pannelli (in genere a base di *calciosilicati*) vengono posati sul rinforzo previo inserimento di tasselli che non devono mai tagliare o forare le fibre. L'intonaco intumescente rappresenta la soluzione maggiormente utilizzata come strato protettivo. Allo stato attuale sono reperibili sul mercato

rivestimenti protettivi, di spessore e consistenza adeguati, in grado di contenere, in caso di incendio, la temperatura del composito al di sotto di 80°C per un tempo di 90 minuti.

## 4.9 PROCEDURA PER LA POSA IN OPERA

Viene di seguito riportata, a titolo esemplificativo, la descrizione di alcuni interventi di posa in opera di rinforzi in FRP su strutture in muratura, osservati dal sottoscritto nel corso di un tirocinio formativo svolto all'esterno dell'ambito accademico.

### 4.9.1 CERCHIATURA DI EDIFICIO IN MURATURA TRAMITE FASCE DI FRP

Viene proposto l'esempio di un intervento di cerchiatura di edificio in muratura tramite posa in opera di fasce di FRP per l'intero perimetro esterno. La lavorazione viene realizzata seguendo un preciso schema procedurale:

1. La prima operazione consiste nella rimozione dell'intonaco esistente nella fascia destinata ad ospitare la cerchiatura, tramite scalcinatura con mezzo meccanico, con l'utilizzo di martello a scalpello pneumatico, e la successiva pulizia della superficie tramite idrolavaggio a pressione.



**Figura 4.21** – Scalcinatura di intonaco e preparazione del substrato per la posa in opera del rinforzo FRP

2. Successivamente alla pulizia del substrato, si è provveduto alla realizzazione di uno strato di regolarizzazione in malta a base di calce, destinato a fare da collegamento tra rinforzo FRP e muratura e con lo scopo di realizzare superfici regolari e planari per poter garantire il mantenimento delle prestazioni meccaniche del rinforzo di FRP previste da progetto.



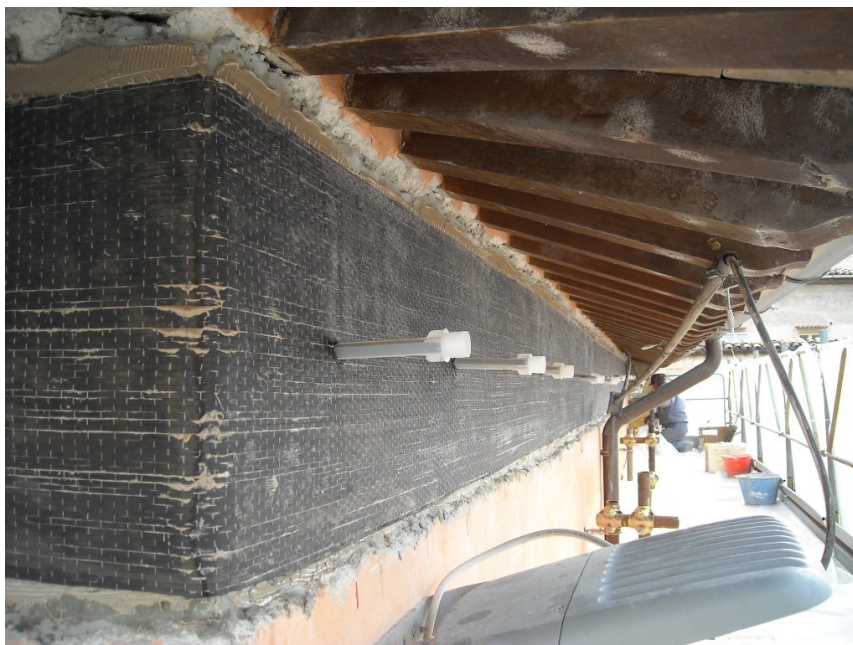
**Figura 4.22** – Realizzazione strato di regolarizzazione della superficie di contatto tra rinforzo e muratura.

3. Avvenuta la presa dello strato di regolarizzazione, sono state realizzate le perforazioni, ad interasse costante, destinate all’inserimento di connettori in fibra di carbonio. Si procede poi con la posa del rinforzo in fibra di carbonio: sullo strato di regolarizzazione viene applicato a spatola uno strato di primer epossidico, sul quale viene immediatamente stesa la fascia in fibra di carbonio (a mano e con l’ausilio di apposito rullo) (Figura 4.23). Man mano che la fascia di rinforzo viene stesa, vengono inseriti dei “picchetti” attraverso di essa, atti al mantenimento dell’integrità dei perfori precedentemente realizzati nella muratura (Figura 4.24).





**Figura 4.23** – Posa in opera di fascia in fibra di carbonio previa stesura di primer epossidico



**Figura 4.24** – Posa in opera di picchetti per la conservazione dei perfori

4. Una volta indurito il primer, sulla fascia in fibra di carbonio viene posato a pennello uno strato di resina epossidica bicomponente trasparente (Figura 4.25) sul quale viene poi spruzzata a mano della sabbia al quarzo (Figura 4.26), che fungerà da aggrappo per la successiva posa di intonaco.



**Figura 4.25** – Spennellatura di resina epossidica bicomponente

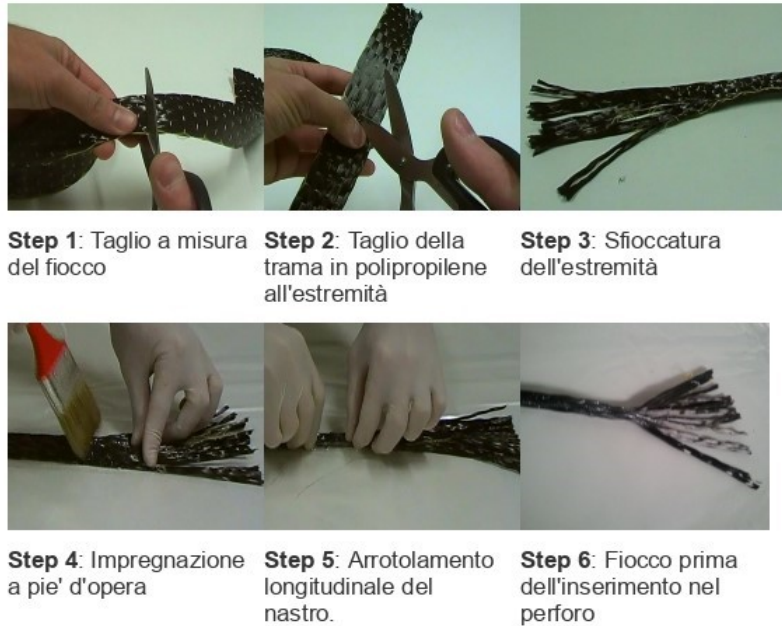


**Figura 4.26** – Spruzzatura a mano di sabbia al quarzo

5. Contemporaneamente alla posa in opera della fascia in tessuto in fibra di carbonio, vengono realizzati i connettori (Figura 4.27) da inserire nei perfori: si tratta di un nastro di tessuto in fibra di carbonio unidirezionale, che viene tagliato a misura in base alla dimensione dei connettori; ciascun segmento di nastro viene “*sfioccato*” ad una estremità, impregnato di resina epossidica bicomponente e arrotolato longitudinalmente, in modo da ottenere un connettore cilindrico con una estremità sfilacciata; la parte di connettore che andrà inserita nella muratura viene impregnata di

resina epossidica bicomponente e ricoperta di sabbia al quarzo, che ne aumenterà l'aderenza lungo la superficie laterale.

I connettori vanno realizzati in anticipo in quanto necessitano di diverse ore prima che induriscano.



**Figura 4.27** – Realizzazione dei connettori in fibra di carbonio

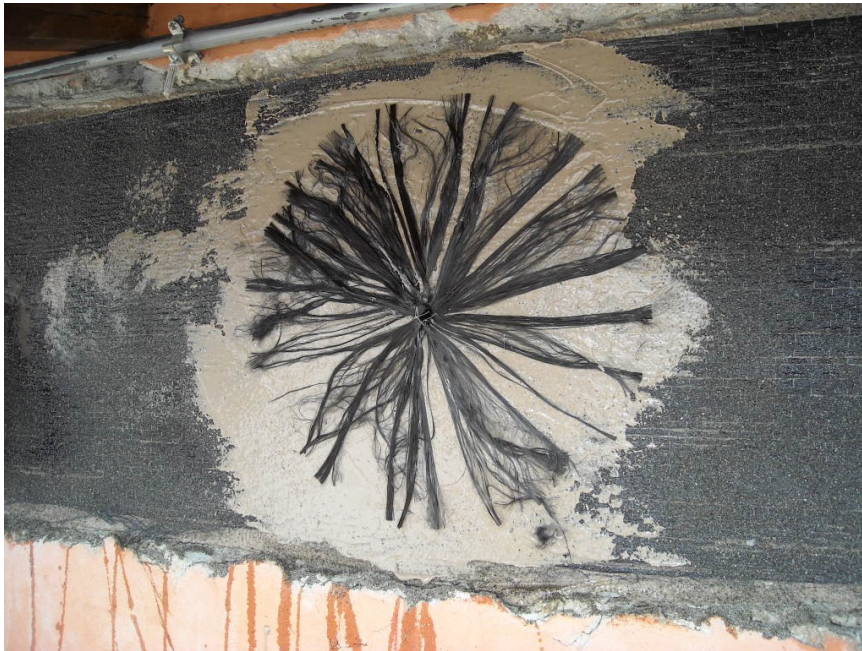
6. I perfori vengono iniettati di resina fino a rifiuto e all'interno di essi vengono inseriti i connettori in fibra di carbonio precedentemente realizzati.



**Figura 4.28** – Iniezione di connettori in fibra di carbonio

7. Una volta indurita la resina iniettata, i fiocchi vengono sfilacciati, aperti e fatti aderire alla fascia in fibra di carbonio tramite la stesura di primer epossidico (Figura 4.29): i

focchi vanno aperti in maniera omogenea, in modo da realizzare una superficie di ancoraggio uniforme.



**Figura 4.29** – Apertura fiocco in fibra di carbonio

8. Il fiocco aperto viene ricoperto e spianato tramite l'applicazione di primer epossidico e successivamente ne viene aumentata la scabrosità tramite la spruzzatura a mano di sabbia al quarzo.



**Figura 4.30** – Copertura focchi e spruzzatura di sabbia al quarzo

9. La lavorazione viene completata con la posa in opera di intonaco a coprire la fascia di cerchiatura e le successive opere di finitura.

#### 4.9.2 RINFORZO DI VOLTE IN MURATURA CON FASCE DI FRP

Si propone in questo paragrafo l'esempio di un intervento di rinforzo con FRP all'estradosso di una volta in muratura. La lavorazione viene realizzata seguendo un preciso schema procedurale:

1. La prima operazione consiste nella pulizia superficiale dell'estradosso della volta, tramite spazzolatura e sabbiatura, e nella successiva realizzazione dello strato di regolarizzazione per la posa del rinforzo, tramite rasatura delle fasce dell'estradosso interessate dall'intervento con malta cementizia bicomponente. Sulla rasatura sono state poi tracciate in maniera visibile le traiettorie delle fasce da posare.



**Figura 4.31** – Preparazione e regolarizzazione del substrato

Per aumentare la rigidità e la stabilità della volta, i rinforzi saranno risvoltati sulle pareti laterali per una lunghezza di 0,50 m: si effettua quindi una pulizia e una rasatura della parete nelle zone in cui verranno realizzati tali risvolti.

2. All'interno delle traiettorie precedentemente tracciate viene posato, tramite rullo o pennello, uno strato di primer epossidico bicomponente, che avrà lo scopo di aumentare l'aderenza tra la regolarizzazione della superficie del substrato e il composito fibrorinforzato.



**Figura 4.32** – Applicazione di primer epossidico bicomponente

3. Sul primer indurito si procede con la posa in opera del rinforzo: contemporaneamente alla stesura, tramite spatola, dello strato di resina adesiva epossidica bicomponente si procede con la posa, a mano e tramite apposito rullo, della fascia di rinforzo in fibra di carbonio (Figura 4.33).



**Figura 4.33** – Posa in opera di fascia in fibra di carbonio unidirezionale previa stesura di resina epossidica bicomponente

Nel caso in esempio sono state impiegate fasce in tre diverse tessiture:

- Tessuto bidirezionale in fibra di carbonio, sui costoloni (Figura 4.34).
- Tessuto quadriassiale in fibra di carbonio, all'estradosso della sola parte a cupola (Figura 4.35).
- Tessuto unidirezionale in fibra di carbonio, sull'intera superficie estradosale (Figura 4.33).



**Figura 4.34** – Posa in opera di fascia in fibra di carbonio bidirezionale  
previa stesura di resina epossidica bicomponente



**Figura 4.35** – Posa in opera di fascia in fibra di carbonio quadriassiale  
previa stesura di resina epossidica bicomponente

4. Allo scopo di migliorare ulteriormente la coerenza tra volta e muratura portante vengono inseriti dei connettori, realizzati con le modalità descritte precedentemente in Figura 4.27: si realizza la perforazione nell'angolo di collegamento volta-parete, viene iniettato di resina fino a rifiuto (Figura 4.36) e viene inserito il connettore in fibra di carbonio.

Il fiocco del connettore viene poi fatto aderire in maniera uniforme alla fascia di rinforzo di FRP tramite l'applicazione a spatola di resina epossidica bicomponente (Figura 4.37).



**Figura 4.36** – Iniezione di resina epossidica in perforo



**Figura 4.37** – Apertura e adesione fiocco con spatolatura di resina epossidica bicomponente



5. Sui rinforzi induriti viene infine applicato, a pennello o a rullo, uno strato di resina epossidica fluida impregnante (Figura 4.38), sul quale viene eseguita una spruzzatura a mano di sabbia al quarzo (Figura 4.39).



**Figura 4.38** – Applicazione a pennello di resina epossidica impregnante su fascia di rinforzo FRP



**Figura 4.39** – Rinforzo di FRP a seguito della spruzzatura a mano di sabbia al quarzo

# 5. APPLICAZIONE DI FRP PER STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO

---

Le applicazioni di materiali compositi nell'edilizia negli ultimi decenni sono state protagoniste di una crescita esponenziale, scatenata in parte dall'interesse scientifico nei confronti di un materiale completamente innovativo e in parte dalla necessità, in particolare in Europa, e soprattutto in Italia, di intervenire con la minore invasività possibile su edifici e costruzioni di notevole interesse storico e artistico.

Le caratteristiche di resistenza, associate alla leggerezza e alla durabilità di questi materiali rendono l'applicazione degli FRP la soluzione tecnologica più innovativa nel campo del recupero, del rinforzo, del consolidamento e del miglioramento sismico di edifici, di nuova costruzione ed esistenti.

Il presente capitolo si occuperà di analizzare in particolar modo gli interventi di rinforzo strutturale su edifici con struttura in calcestruzzo armato e in elementi di calcestruzzo armato precompresso (CAP), tramite applicazione di FRP (*Fiber Reinforced Polymer*), materiali compositi fibrorinforzati a matrice di resina polimerica, andando ad esaminare, in linea generale, le tipologie di interventi eseguibili su tali strutture e le modalità di esecuzione degli interventi più comuni.

Come già visto precedentemente, i compositi fibrorinforzati per il rinforzo strutturale sono disponibili sul mercato in diverse forme e geometrie: dalle lamine pultruse, ai tessuti mono/bi/quadri-direzionali, ma anche barre, griglie e profili pultrusi.

Morfologicamente i sistemi di rinforzo in materiali FRP sono distinguibili in:

- *Sistemi preformati (pre cured systems)*, costituiti da componenti di varia forma preparati in stabilimento mediante pultrusione o altri processi produttivi di comprovata validità tecnologica, ed incollati all'elemento strutturale da rinforzare;
- *Sistemi impregnati in situ* (ad esempio: *wet lay-up systems*), costituiti da fogli o tessuti di fibre unidirezionali o multidirezionali impregnati con una resina che può fungere anche da adesivo con il substrato interessato;

- *Sistemi pre-impregnati (prepreg systems)*, costituiti da fogli o tessuti di fibre unidirezionali o multidirezionali pre-impregnati con resina parzialmente polimerizzata ed incollati al substrato da rinforzare, con o senza l'uso di resine aggiuntive.

## 5.1 INQUADRAMENTO NORMATIVO

La possibilità di impiego di FRP per interventi di tipo selettivo è stata consentita per la prima volta in Italia con l'emanazione dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20/03/2003.

Successivamente il D.M. del 14/01/2008 "*Norme Tecniche per le Costruzioni*", al Capitolo 12, ha confermato la possibilità di utilizzare per le costruzioni esistenti materiali e prodotti non tradizionali, come gli FRP, purché nel rispetto di documenti di comprovata validità, tra i quali figurano anche le Istruzioni del CNR, tra cui risultano di particolare rilievo, in riferimento all'argomento trattato nella presente tesi, le Istruzioni CNR-DT 200/2004 "*Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati - Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie*" e le Istruzioni del CNR-DT 204/2006 "*Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato*".

Inoltre nel luglio 2009 L'Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici ha approvato le "*Linee Guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di Strutture di cemento armato, cemento armato precompresso e murarie mediante FRP*", fortemente ispirate alle istruzioni del CNR-DT 200/2004.

In generale le Istruzioni tecniche del CNR non sono norme cogenti, ma rappresentano esclusivamente un aiuto per i tecnici a filtrare con discrezione la ponderosa bibliografia, nazionale ed internazionale, che la letteratura specifica mette a disposizione, lasciando comunque ad essi la responsabilità finale delle scelte operate. Lo scopo delle istruzioni è dunque quello di fornire un documento orientativo nell'ambito delle normative vigenti. A seguito dell'entrata in vigore del D.M. del 14/01/2008, tuttavia, questi documenti, e soprattutto il DT 200/2004, hanno assunto un'importanza sempre maggiore.

Altre normative riguardanti la progettazione, la realizzazione, la manutenzione e il controllo di opere di rinforzo strutturale tramite applicazione di materiali compositi fibrorinforzati su strutture in calcestruzzo armato e calcestruzzo armato precompresso (CAP) sono:

- Bollettini rilasciati dalla *fib*, *Fédération Internationale du béton* (FIP-CEB-2001);
- EuroCodici ed EuroNorme;
- Manuali e quaderni tecnici dell'ACI, *American Concrete Institute* (ACI 440R);
- Manuali dell'ASCE (*American Society of Civil Engineers*).

Nel presente capitolo si farà prevalentemente riferimento a quanto descritto e definito dalle norme del CNR (DT 200/2004 e DT 204/2006) e dalle Linee Guida del 2009.

## 5.2 VERIFICHE DI RESISTENZA

Il progetto allo Stato Limite Ultimo (SLU) di elementi di trave soggetti a flessione richiede la valutazione del momento resistente ultimo ed il confronto di questo con il momento di progetto.

Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU di sezioni di calcestruzzo fibrorinforzato sono:

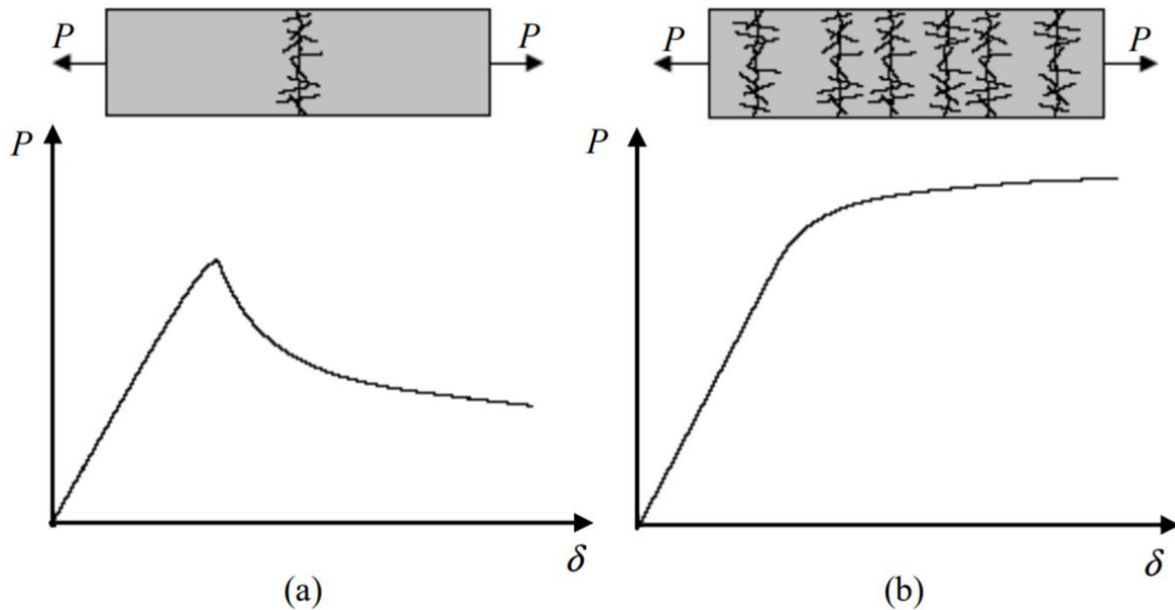
- La conservazione della condizione di sezioni piane fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- La perfetta aderenza tra calcestruzzo fibrorinforzato ed armatura metallica di rinforzo (quando presente);
- Il legame costitutivo del calcestruzzo;
- Il legame costitutivo delle barre d'armatura di acciaio (quando presenti) conforme alla Normativa vigente.

Si ipotizza che la rottura per flessione si manifesti quando si verifica una delle seguenti condizioni:

- Il raggiungimento della massima deformazione di compressione,  $\epsilon_{cu}$ , nel calcestruzzo fibrorinforzato;
- Il raggiungimento della massima deformazione di trazione,  $\epsilon_{su}$ , nell'acciaio d'armatura (quando presente);
- Il raggiungimento della massima deformazione di trazione,  $\epsilon_{Fu}$ , nel calcestruzzo fibrorinforzato.

Nel caso di legame costitutivo di tipo *degradante* (Figura 5.1-a), la massima deformazione di trazione,  $\epsilon_{Fu}$ , è assunta pari al 2%. Il valore ultimo dell'apertura di fessura,  $w_u$ , deve comunque soddisfare la limitazione:  $w_u = \epsilon_u \cdot l_{cs} \leq 3$  mm. Il concomitante valore di tensione (nel ramo

post-fessurazione del legame costitutivo) è assunto come valore della tensione residua ultima. Nel caso di legame costitutivo di tipo *incrudente* (Figura 5.1-b), la deformazione massima di trazione,  $\epsilon_{Fu}$ , è assunta pari all'1%.



**Figura 5.1** – Esempi di legame costitutivo degradante (a) e legame costitutivo incrudente (b)

La verifica delle tensioni di compressione in esercizio (SLE) deve essere eseguita in accordo con la Normativa vigente. Nel caso di elementi strutturali realizzati con materiali degradanti, la verifica delle tensioni di trazione in esercizio è implicitamente soddisfatta se l'elemento è verificato allo SLU.

Nel caso di elementi strutturali realizzati con materiali incrudenti, deve essere eseguita la verifica delle tensioni di trazione in esercizio imponendo il soddisfacimento della limitazione:

$$\sigma_t \leq 0,6 \cdot f_{Ftuk} \quad (5.1)$$

Le modalità di crisi degli elementi strutturali di una struttura in calcestruzzo armato sono:

- La fessurazione per trazione del calcestruzzo;
- Lo schiacciamento del calcestruzzo;
- La torsione dell'elemento strutturale;
- La rottura del composito fibrorinforzato;
- La *delaminazione* del rinforzo di FRP dal calcestruzzo.

### 5.3 VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA NEI CONFRONTI DEL DISTACCO DAL SUPPORTO (DELAMINAZIONE)

Negli interventi di rinforzo di elementi di calcestruzzo armato mediante lamine o tessuti di materiale FRP, il ruolo dell'aderenza tra calcestruzzo e composito assume grande importanza in quanto il meccanismo di rottura per *delaminazione* (perdita di aderenza) è di tipo fragile.

La perdita di aderenza tra composito e calcestruzzo può riguardare lamine o tessuti applicati all'intradosso di travi di c.a., nel caso di rinforzo a flessione, o sulle facce laterali (usualmente tessuti), nel caso di rinforzo a taglio. Generalmente, il distacco del composito dal supporto può prodursi all'interno dell'adesivo, tra calcestruzzo ed adesivo, nel calcestruzzo o all'interno del rinforzo (ad esempio tra strati di tessuto orditi con differenti angoli di inclinazione delle fibre). Nel caso di rinforzi posti correttamente in opera, essendo solitamente la resistenza a taglio dell'adesivo molto più elevata di quella del calcestruzzo, la rottura si verifica sempre all'interno di quest'ultimo con l'asportazione di uno strato di materiale, il cui spessore può variare da pochi millimetri fino ad interessare l'intero copriferro delle barre di armatura.

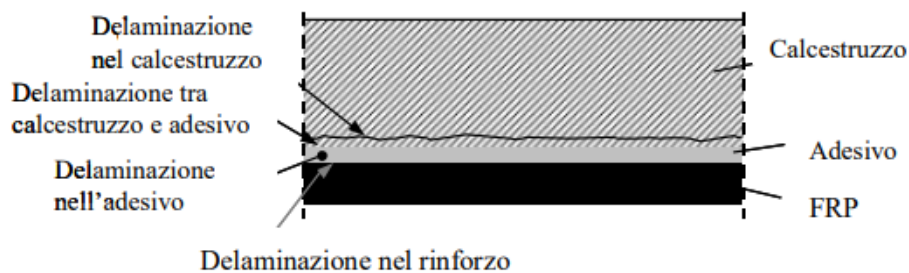


Figura 5.2 – Decoesione di rinforzo FRP da elemento in c.a.

I modi di collasso per delaminazione di lamine o tessuti utilizzati per il rinforzo a flessione, rappresentati schematicamente in Figura 5.3, possono essere classificati in quattro diverse categorie:

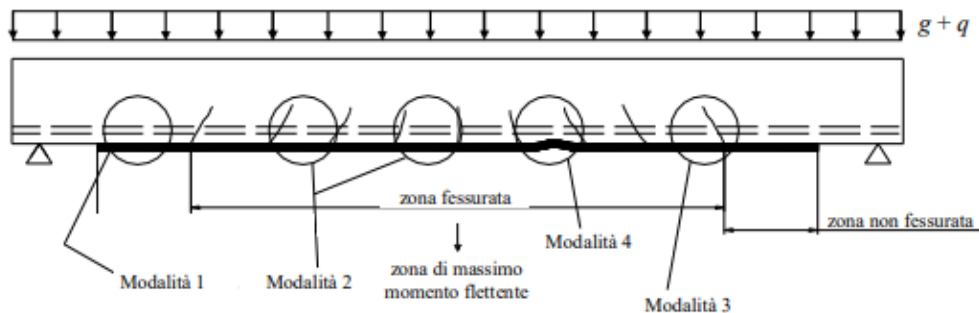


Figura 5.3 – Modalità di rottura per distacco dal supporto di trave rinforzata a flessione con lamine di FRP

- Modalità 1: distacco di estremità;
- Modalità 2: distacco intermedio, provocato da fessure per flessione nella trave;
- Modalità 3: distacco causato da fessure diagonali da taglio nella trave;
- Modalità 4: distacco provocato da irregolarità e rugosità della superficie di calcestruzzo.

### 5.3.1 VERIFICHE DI SICUREZZA NEI CONFRONTI DELLA DELAMINAZIONE

La verifica di sicurezza nei confronti della crisi per distacco dal supporto richiede la valutazione della massima forza trasmissibile dal calcestruzzo al rinforzo, nonché la valutazione delle tensioni, sia tangenziali che normali, mobilitate all'interfaccia calcestruzzo - FRP. La prima valutazione risulta necessaria per la verifica allo SLU, la seconda per la verifica dello stato tensionale in esercizio.

Con riferimento ad una tipica prova di aderenza, come quella rappresentata schematicamente in Figura 5.4, il valore ultimo della forza sopportabile dal rinforzo di FRP, prima che subentri la delaminazione, dipende, a parità di tutte le altre condizioni, dalla lunghezza,  $l_b$ , della zona incollata. Tale valore cresce con  $l_b$  fino ad attingere un massimo corrispondente ad una ben definita lunghezza,  $l_e$ : ulteriori allungamenti della zona di incollaggio non comportano incrementi della forza trasmessa.

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

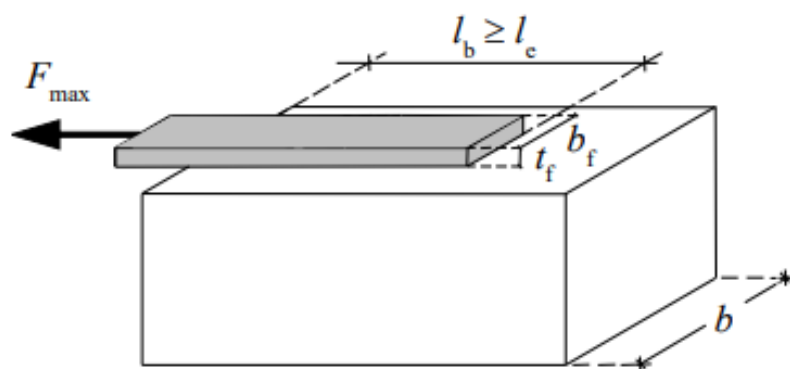


Figura 5.4 – Massima forza trasmissibile da un rinforzo di FRP

La lunghezza ottimale di ancoraggio di progetto,  $l_{ed}$ , può essere stimata tramite l'espressione (5.2):

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}, 200 \text{ mm} \right\} \quad (5.2)$$

in cui:

- $E_f$  e  $t_f$  sono rispettivamente il modulo di elasticità normale nella direzione della forza e lo spessore del composito fibrorinforzato;
- $\Gamma_{Fd}$  è il valore di progetto dell'energia specifica di frattura;
- $f_{bd} = \frac{2 \cdot \Gamma_{Fd}}{s_u}$ , con  $s_u = 0,25$  mm valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto;
- $\gamma_{Rd} = 1,25$  è un coefficiente correttivo.

Il valore di progetto dell'energia specifica di frattura è fornito dall'espressione (5.3):

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (5.3)$$

dove:

- $f_{cm}$  e  $f_{ctm}$  sono rispettivamente i valori medi di resistenza a compressione e resistenza a trazione del calcestruzzo valutate *in situ*. In mancanza di dati sperimentali, la resistenza media a trazione,  $f_{ctm}$ , può essere ricavata dalla resistenza media a compressione,  $f_{cm}$ , in base a quanto indicato dalla Normativa vigente;
- $FC$  è un fattore di confidenza, opportunamente definito;
- $k_b$  è un coefficiente correttivo di natura geometrica e si ricava dall'espressione (5.4) in base al rapporto tra la larghezza del supporto,  $b_f$ , e quella dell'elemento rinforzato,  $b$ :

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{b}}} \geq 1 \quad (5.4)$$

quando risulti che  $\frac{b_f}{b} \geq 0,25$ . Quando invece risulta  $\frac{b_f}{b} < 0,25$ , al coefficiente viene assegnato un valore  $k_b = 1,18$  corrispondente alla situazione per cui  $\frac{b_f}{b} = 0,25$ .

- $k_G$  è un ulteriore coefficiente correttivo tarato in base a prove sperimentali: viene assunto  $k_G = 0,023$  mm per i compositi preformati e  $k_G = 0,037$  mm per i compositi impregnati *in situ*.



Nel caso di rinforzo a flessione di una soletta, consistente in più fasce affiancate di FRP, ciascuna di larghezza  $b_f$ , il coefficiente correttivo  $k_b$  può essere calcolato a tramite la (5.4) assumendo come larghezza  $b$  l'interasse tra due fasce affiancate di rinforzo.

### 5.3.2 RESISTENZA ALLO STATO LIMITE ULTIMO PER DELAMINAZIONE DI ESTREMITÀ (Modalità 1)

Nell'ipotesi di una delaminazione che coinvolga i primi strati di calcestruzzo, con lunghezze di ancoraggio maggiori o uguali a quella ottimale, la tensione di progetto del sistema di rinforzo,  $f_{fdd}$ , ovvero il valore della massima tensione alla quale il rinforzo può lavorare prima che si verifichi il distacco di estremità (Figura 5.4), può essere determinata tramite l'espressione (5.5):

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (5.5)$$

dove il coefficiente parziale  $\gamma_{f,d}$  fa riferimento alla Tabella 3.4 e  $\Gamma_{Fd}$  rappresenta l'energia specifica di frattura fornita dalla (5.3).

Nel caso di lunghezze di ancoraggio,  $l_b$ , minori di quella ottimale,  $l_{ed}$ , la tensione di progetto viene opportunamente ridotta in accordo con la relazione (5.6):

$$f_{fdd,rid} = f_{fdd} \cdot \frac{l_b}{l_{ed}} \cdot \left(2 - \frac{l_b}{l_{ed}}\right) \quad (5.6)$$

Qualora si facesse ricorso a particolari dispositivi di ancoraggio (barre trasversali di composito, fasciatura dell'estremità mediante tessuti) la forza massima di ancoraggio deve essere valutata attraverso apposite prove e indagini sperimentali.

### 5.3.3 RESISTENZA ALLO STATO LIMITE ULTIMO PER DELAMINAZIONE INTERMEDIA (Modalità 2)

Allo scopo di prevenire il meccanismo di distacco secondo la modalità 2, si può verificare che la variazione di tensione  $\Delta\sigma_f$  nel rinforzo di FRP tra due fessure consecutive non superi un opportuno valore limite  $\Delta\sigma_R$ . Quest'ultimo dipende, in generale, dalle caratteristiche del legame di aderenza, dalla distanza tra le fessure e dal livello di tensione,  $\sigma_f$ , nel rinforzo.

In alternativa è possibile adottare una procedura semplificata consistente nel verificare che allo SLU la tensione massima nel composito fibrorinforzato non ecceda il valore di progetto,  $f_{fdd,2}$ , ricavato dall'espressione (5.7):

$$f_{fdd,2} = \frac{k_q}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{E_f}{t_f} \cdot \frac{2 \cdot k_b \cdot k_{G,2}}{FC} \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}}} \quad (5.7)$$

nella quale  $k_{G,2}$  è un coefficiente correttivo calibrato sulla base di risultati di prove sperimentali, assunto pari a 0,10 mm indipendentemente dal tipo di rinforzo applicato,  $k_q$ , è un coefficiente che tiene conto della condizione di carico, da assumersi pari a 1,25 per carichi distribuiti e pari a 1,00 per tutti gli altri casi.

Il massimo valore attribuibile alla deformazione del composito in sede di progetto affinché non si verifichi il distacco intermedio è dato da:

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{f_{fdd,2}}{E_f} \geq \varepsilon_{sy} - \varepsilon_0 \quad (5.8)$$

in cui  $\varepsilon_{sy}$  è la deformazione di calcolo dell'armatura preesistente in corrispondenza dello snervamento e  $\varepsilon_0$  è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.

### 5.3.4 VERIFICA DELLE TENSIONI DI INTERFACCIA ALLO STATO LIMITE DI ESERCIZIO

In una trave rinforzata con FRP, all'interfaccia tra calcestruzzo e rinforzo si verificano concentrazioni tensionali (tangenziali e normali) localizzate in corrispondenza di fessure trasversali presenti nel calcestruzzo, soprattutto alle estremità del rinforzo. Tali concentrazioni possono provocare la fessurazione dell'interfaccia innescando il distacco tra i due materiali.

Risulta opportuno che, in condizioni di esercizio, non si verifichi l'apertura di tali fessure, soprattutto in presenza di cicli di carico e di cicli di gelo/disgelo. La competente verifica può essere eseguita mediante un calcolo delle tensioni di interfaccia utilizzando modelli elastici lineari.

È necessario controllare che, all'interfaccia adesivo-calcestruzzo, per la combinazione di carico rara o frequente, la tensione tangenziale “equivalente”,  $\tau_{b,e}$ , sia inferiore alla resistenza di adesione tra il rinforzo ed il substrato di calcestruzzo,  $f_{bd}$ :

$$\tau_{b,e} \leq f_{bd} \quad (5.9)$$

Il valore di progetto della resistenza di adesione tra rinforzo e calcestruzzo,  $f_{bd}$ , è funzione della resistenza media a trazione del calcestruzzo,  $f_{ctm}$ , ed è ricavabile dall'espressione (5.10):

$$f_{bd} = 0,21 \cdot \frac{k_b}{\gamma_b} \cdot \frac{f_{ctm}}{FC} \quad (5.10)$$

nella quale il coefficiente parziale  $\gamma_b$  ha valore pari a 1,00 per la combinazione caratteristica e pari a 1,20 per quella frequente, mentre il fattore correttivo  $k_b$  assume il valore fornito dalla (5.4).

La tensione tangenziale “equivalente”,  $\tau_{b,e}$ , è definita dalla (5.11) a partire dalla tensione tangenziale media,  $\tau_m$ , valutata in corrispondenza della corda sulla quale si interfacciano adesivo e calcestruzzo:

$$\tau_{b,e} = k_{id} \cdot \tau_m \quad (5.11)$$

Il coefficiente  $k_{id}$  ha sempre valore maggiore o uguale a 1,00 e tiene conto della concentrazione di tensioni tangenziali e normali nelle zone terminali ed è fornito dalla relazione (5.12):

$$k_{id} = (k_{\sigma}^{1,5} + 1,15 \cdot k_{\tau}^{1,15})^{\frac{2}{3}} \quad (5.12)$$

in cui:

- $k_{\sigma} = k_{\tau} \cdot \beta \cdot t_f$ ;
- $k_{\tau} = 1 + \alpha \cdot a \cdot \frac{M_{(z=a)}}{V_{(z=a)} \cdot a}$ ;
- $M_{(z=a)}$  è il momento flettente agente nella sezione di interruzione del rinforzo;

- $V_{(z=a)}$  è il taglio agente nella sezione di interruzione del rinforzo, posta a una distanza dall'estremità della trave  $z = a$ ;
- $\alpha = \sqrt{\frac{K_1}{E_f \cdot t_f}}$ ;
- $\beta = \left(\frac{b_f \cdot 2,30 \cdot K_1}{4 \cdot E_f \cdot I_f}\right)^{\frac{1}{4}}$ ;
- $K_1 = \frac{1}{\frac{t_a + t_c}{G_a + G_c}}$ ;
- $G_a$  e  $G_c$  sono i moduli di elasticità tangenziale dell'adesivo e del calcestruzzo;
- $t_a$  è lo spessore nominale dell'adesivo;
- $t_c$  è lo spessore dello strato di calcestruzzo partecipante alla deformabilità dell'interfaccia (si assume, in genere,  $t_c = 20 \div 30$  mm).

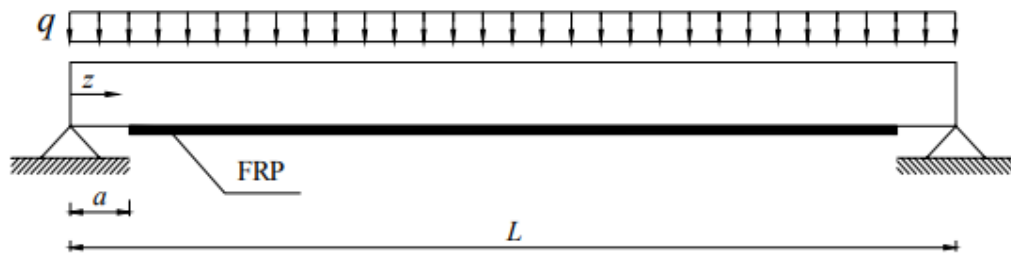


Figura 5.5 – Definizione dei parametri geometrici

La tensione tangenziale media,  $\tau_m$ , è ricavabile dalla relazione (5.13):

$$\tau_m = \frac{V_{(z=a)} \cdot t_f \cdot (h - x)}{\frac{I_c}{n_f}} \quad (5.13)$$

nella quale:

- $h$  è l'altezza della sezione;
- $x$  è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso;
- $I_c$  è il momento d'inerzia della sezione omogeneizzata, parzializzata se in presenza di fessurazione;
- $E_c$  è il modulo di elasticità normale del calcestruzzo;
- $n_f = \frac{E_f}{E_c}$  è il coefficiente di omogeneizzazione, corrispondente alla combinazione di carico considerata (frequente o caratteristica).

Nel caso in cui sia previsto un rinforzo terminale, realizzato mediante fasciatura a “U”, l’effetto delle tensioni normali ai fini della verifica dell’interfaccia può essere trascurato; il coefficiente  $k_{\sigma}$  può essere assunto di valore nullo.

Per il calcolo delle tensioni di ancoraggio allo SLE vanno tenuti in conto i soli incrementi delle caratteristiche della sollecitazione che competono alle variazioni di carico successive all’applicazione del rinforzo.

## 5.4 RINFORZO A FLESSIONE

Il rinforzo a flessione si rende necessario per elementi strutturali soggetti ad un momento flettente di progetto maggiore della corrispondente resistenza. In particolare, nel prosieguo sarà esaminato il caso di flessione retta, che si verifica nei casi in cui l’asse di sollecitazione coincida con un asse di simmetria della sezione trasversale dell’elemento rinforzato.

Il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere eseguito applicando al lembo teso dell’elemento da rinforzare una o più lamine, ovvero uno o più strati di tessuto impregnati *in situ*.

### 5.4.1 ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

Il progetto allo SLU richiede il dimensionamento del rinforzo di FRP in modo che il momento resistente di progetto,  $M_{Rd}$ , ed il momento sollecitante di progetto,  $M_{Sd}$ , soddisfino la relazione (5.14):

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (5.14)$$

L’analisi allo SLU delle sezioni in c.a. rinforzate con FRP si basa su diverse ipotesi:

- La conservazione della planarità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare;
- La perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo, FRP-calcestruzzo);
- L’incapacità del calcestruzzo di resistere a sforzi di trazione;

- I legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio sono conformi alla Normativa vigente;
- Il legame costitutivo del composito fibrorinforzato è elastico lineare fino a rottura.

L'intervento di rinforzo risulta efficace per sezioni a debole armatura, pertanto, le regole riportate di seguito faranno riferimento esclusivamente a tale situazione.

Si ipotizza che la rottura per flessione si manifesti al verificarsi di una delle seguenti condizioni:

- Il raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso,  $\epsilon_{cu}$ , come definita dalla Normativa vigente;
- Il raggiungimento di una deformazione massima nel rinforzo di FRP,  $\epsilon_{fd}$ , definita come:

$$\epsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_a \cdot \frac{\epsilon_{fk}}{\gamma_f}, \epsilon_{ffd} \right\} \quad (5.15)$$

dove  $\epsilon_{fk}$  è la deformazione caratteristica a rottura del rinforzo,  $\gamma_f$  e  $\eta_a$  sono i coefficienti definiti rispettivamente in Tabella 3.5 e in Tabella 4.1;  $\epsilon_{ffd}$  è la deformazione massima per distacco intermedio, definita secondo la (5.8).

È importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto per il quale si rende necessario l'intervento di rinforzo a flessione.

Il rinforzo di FRP viene solitamente applicato su strutture già sollecitate, si deve quindi tener conto dello stato di deformazione della struttura all'atto del rinforzo. Se il momento flettente preesistente all'applicazione del rinforzo,  $M_0$ , è inferiore a quello di fessurazione, lo stato deformativo iniziale può essere trascurato.

Lo stato di deformazione della struttura all'atto del rinforzo può essere valutato ipotizzando il comportamento elastico lineare dei due materiali costituenti la trave, ovvero calcestruzzo e acciaio, e considerando l'incapacità del calcestruzzo di sopportare sforzi di trazione.

### 5.4.1.1 Resistenza di progetto a flessione dell'elemento rinforzato con FRP

La valutazione della resistenza flessionale della sezione si effettua secondo quanto precedentemente indicato. Le due equazioni da utilizzare per la risoluzione del problema sono quella di equilibrio alla traslazione nella direzione dell'asse della trave e quella di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese e parallelo all'asse neutro.

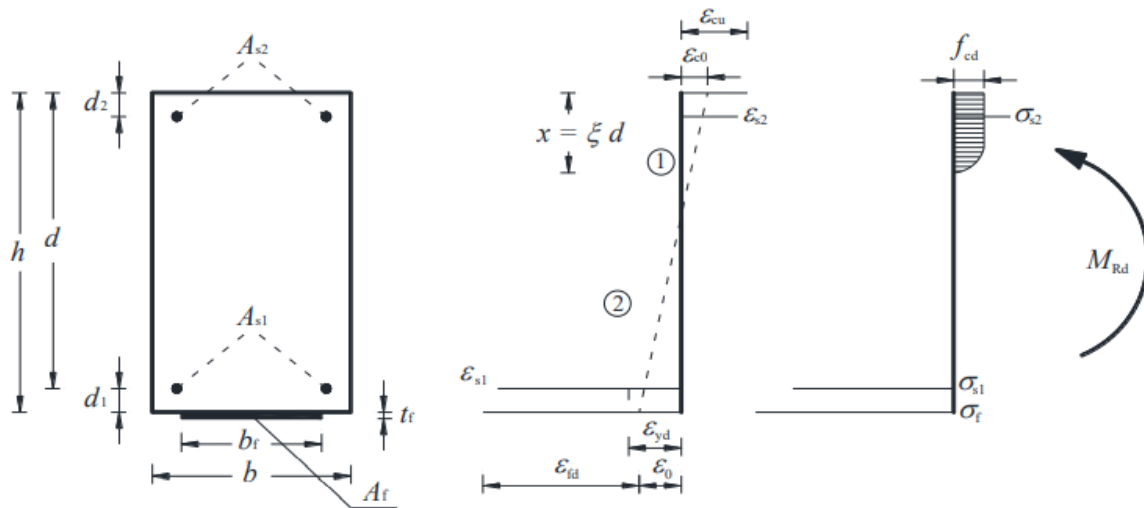
Facendo riferimento all'esempio rappresentato in Figura 5.6, è possibile distinguere due tipi di rottura, in base a se si raggiunga la massima dilatazione del rinforzo di FRP (*zona 1*) o la massima contrazione del calcestruzzo (*zona 2*).

Nella *zona 1* la rottura perviene per il raggiungimento della deformazione (*dilatazione*) elastica limite di progetto nel composito: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione delle fibre,  $\epsilon_{fd}$ , definito dalla relazione (5.15).

Le deformazioni normali che competono alle diverse fibre della sezione retta, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate, invocando la linearità del diagramma, attraverso specifiche relazioni:

- FRP  $\epsilon_f = \epsilon_{fd}$
- Calcestruzzo al lembo compresso  $\epsilon_c = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x}{(h - x)} \leq \epsilon_{cu}$
- Acciaio in compressione  $\epsilon_{s2} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{x - d_2}{(h - x)}$
- Acciaio in trazione  $\epsilon_{s1} = (\epsilon_{fd} + \epsilon_0) \cdot \frac{d - x}{(h - x)}$

nelle quali  $x$  è la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso della sezione retta,  $\epsilon_{fd}$  è la deformazione limite delle fibre del rinforzo di FRP, definita dalla (5.15),  $\epsilon_{cu}$  è la deformazione limite che il calcestruzzo può subire a compressione,  $\epsilon_0$  è la deformazione preesistente all'applicazione del rinforzo in corrispondenza dell'estremo lembo teso.



**Figura 5.6** – Modalità di rottura di una sezione di c.a. rinforzata esternamente con FRP

Nel caso in cui il legame costitutivo assunto per le barre di acciaio sia bilineare con incrudimento, risulta in genere superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dalle armature metalliche tese allo SLU, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre,  $\epsilon_{fd}$ , e del calcestruzzo,  $\epsilon_{cu}$ , il valore di progetto di tale deformazione non viene mai considerato. Se la deformazione ultima del calcestruzzo stabilita dalla Normativa vigente viene invece superata, è necessario tenere conto di tale deformazione nel calcolo della posizione dell'asse neutro e nella definizione del momento resistente.

Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre la deformazione limite del composito non è stata ancora raggiunta: in tal caso resta fissata la deformazione massima di progetto del calcestruzzo compresso,  $\epsilon_{cu}$ , in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Le deformazioni normali competenti alle diverse fibre della sezione retta dell'elemento, distese parallelamente all'asse neutro, possono essere calcolate, invocando la linearità del diagramma, attraverso determinate relazioni:

- FRP 
$$\epsilon_f = \frac{\epsilon_{cu}}{x} \cdot (h - x) - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fd}$$
- Calcestruzzo al lembo compresso 
$$\epsilon_c = \epsilon_{cu}$$
- Acciaio in compressione 
$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{x - d_2}{x}$$
- Acciaio in trazione 
$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \cdot \frac{d - x}{x}$$



In entrambi i tipi di rottura, la posizione,  $x$ , dell'asse neutro viene determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave (5.16):

$$0 = \psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} - A_{s1} \cdot \sigma_{s1} - A_f \cdot \sigma_f \quad (5.16)$$

nella quale  $f_{cd}$  è il valore di progetto della resistenza a compressione del calcestruzzo preesistente. Nel caso di applicazione su calcetsruzzi giovani deve essere valutata l'applicazione di un coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata.

Il valore del momento resistente,  $M_{Rd}$ , può essere determinato a partire dall'equazione di equilibrio alla rotazione intorno all'asse passante per il baricentro delle armature tese e parallelo all'asse neutro (5.17):

$$M_{Rd} = \frac{[\psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (d - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (d - d_2) + A_f \cdot \sigma_f \cdot d_1]}{\gamma_{Rd}} \quad (5.17)$$

in cui il coefficiente parziale  $\gamma_{Rd}$  deve essere assunto di valore pari a 1,00, in accordo con quanto riportato in Tabella 3.5.

Nelle equazioni (5.16) e (5.17) i fattori  $\psi$  e  $\lambda$  sono coefficienti adimensionali che rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso rapportati, nell'ordine, a  $b \cdot x \cdot f_{cd}$  e a  $x$ .

Essendo il comportamento del rinforzo di FRP elastico lineare fino a rottura, la tensione di esercizio può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale nella direzione dell'asse della trave.

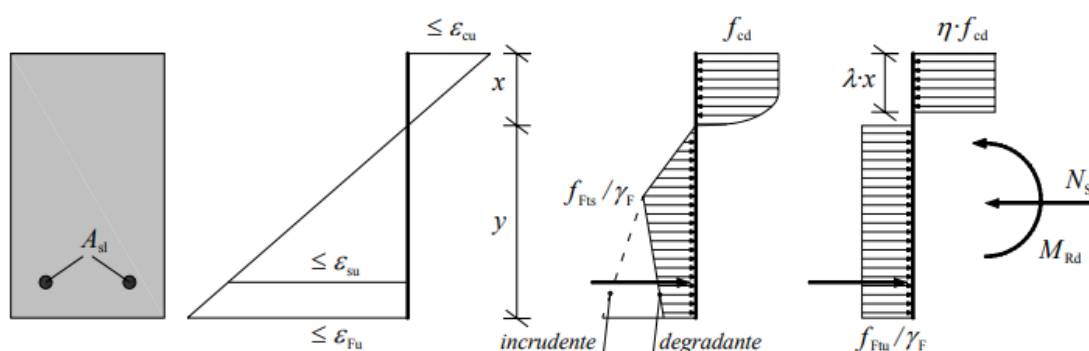
#### 5.4.1.2 Resistenza di progetto a flessione dell'elemento rinforzato con FRP in presenza di forza assiale (pressoflessione)

Per la pressoflessione sono validi i medesimi principi introdotti per la verifica a flessione, tenendo conto della dipendenza del valore di progetto del momento resistente della sezione rinforzata,  $M_{Rd}$ , dal valore dello sforzo normale sollecitante,  $N_{Sd}$ .

L'efficacia dell'azione del rinforzo in corrispondenza delle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di idonee soluzioni costruttive atte a garantire un adeguato ancoraggio del

composito e la trasmissione degli sforzi di trazione da quest'ultimo al nodo. Il sistema di rinforzo a pressoflessione deve inoltre garantire che il collasso avvenga per rottura del composito, la quale dovrà quindi precedere il distacco dal supporto. Una tale condizione può essere ottenuta ricorrendo, ad esempio, ad un confinamento trasversale. Risulta quindi lecito adottare per la deformazione limite delle fibre,  $\epsilon_{fd}$ , il valore fornito dal primo termine dell'espressione (5.15). Il raggiungimento degli obiettivi costruttivi appena descritti deve essere validato mediante l'esecuzione di adeguate indagini sperimentali.

Facendo riferimento alla situazione rappresentata in Figura 5.7, in accordo con quanto previsto dall'Eurocodice 2 (EC2), la valutazione del momento ultimo per un assegnato sforzo normale resistente può eventualmente essere effettuata sulla base di legami costitutivi semplificati, verificando a posteriori che non siano violate le deformazioni ultime  $\epsilon_{cu}$ ,  $\epsilon_{su}$  ed  $\epsilon_{Fu}$  dei materiali e, nel contempo, la modalità di rottura.



**Figura 5.7** – Stato limite ultimo per pressoflessione: utilizzo dei legami semplificati (*stress-block* con coefficienti  $\eta$  e  $\lambda$  determinati secondo l'EuroCodice 2)

### 5.4.1.3 Collasso per distacco di estremità

Il distacco di estremità dipende da una serie di fattori quali l'ubicazione della zona di formazione delle fessure, la tipologia di queste ultime (fessure taglienti e/o flessionali), la presenza di irregolarità sulla superficie di applicazione del rinforzo e la concentrazione di tensioni nelle zone di ancoraggio.

Nel caso di elementi inflessi in c.a., una volta individuata la sezione a partire dalla quale è necessario applicare il rinforzo di FRP per incrementarne il momento resistente, deve verificarsi che la tensione cui tale sezione è soggetta allo SLU non superi il massimo valore ammissibile nei riguardi del fenomeno del distacco di estremità. Il valore della tensione massima

ammissibile è funzione della lunghezza della zona di ancoraggio, a sua volta dipendente dalla distanza  $a^*$  della sopraelevata sezione dall'appoggio (Figura 5.8):

- Per  $a^* \geq l_{ed}$  occorre prevedere una lunghezza di ancoraggio  $l_b \geq l_{ed}$ ;
- Per  $a^* < l_{ed}$  occorre inevitabilmente imporre  $l_b < l_{ed}$ .

Nel primo caso il massimo valore ammissibile per la tensione di trazione nel composito nei riguardi del fenomeno del distacco di estremità è pari a  $f_{fda}$ , determinato tramite l'espressione (5.5); nel secondo caso sarà invece pari a  $f_{fda,rid}$  determinata tramite la relazione (5.6).

Qualora l'ancoraggio sia realizzato in una zona soggetta a prevalenti sollecitazioni taglianti, che possono quindi indurre fessure inclinate, la forza di trazione mobilitata nel composito, alla distanza  $a^*$ , deve essere calcolata dopo aver operato un'opportuna traslazione del diagramma del momento flettente, di entità  $a_1$ . Tale traslazione deve avvenire nel verso che dà luogo ad un aumento del valore assoluto del momento flettente (Figura 5.8).

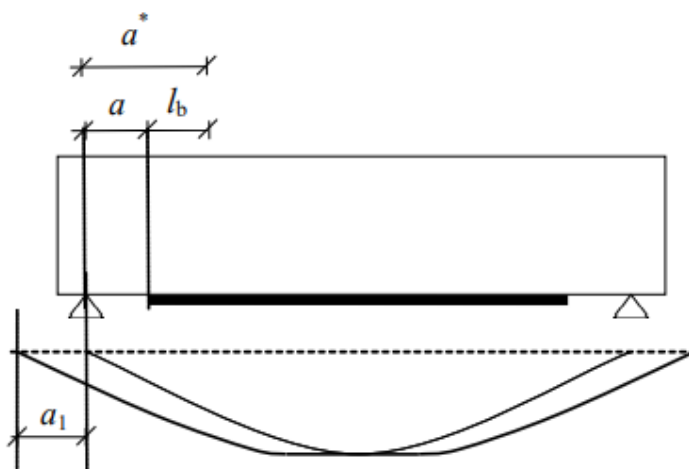


Figura 5.8 – Traslazione del diagramma del momento flettente

Generalmente, la forza di ancoraggio può essere valutata incrementando il momento di calcolo sollecitante della quantità:

$$M = V_{sd} \cdot a_1 \quad (5.18)$$

in cui  $V_{sd}$  è il taglio sollecitante di progetto e  $a_1 = 0,9 \cdot d \cdot (1 - \cot \alpha)$ , con  $\alpha$  che rappresenta l'inclinazione dell'armatura a taglio e  $d$  che rappresenta l'altezza utile della sezione.

In presenza di dispositivi speciali per l'ancoraggio delle estremità dei sistemi di rinforzo, è possibile omettere le verifiche di cui ai capitoli precedenti, a condizione di disporre di un'opportuna certificazione di tali dispositivi basata su adeguate indagini sperimentali. La certificazione deve riguardare i materiali impiegati (adesivi e rinforzi), gli specifici sistemi utilizzati per migliorare l'ancoraggio (barre trasversali annegate nel copriferro, fasciatura trasversale mediante tessuti, ecc.), la successione delle fasi indicate dal Produttore e/o dal Fornitore per la preparazione delle superfici, i tempi di esecuzione e le condizioni ambientali.

In presenza di momenti negativi alle estremità dell'elemento rinforzato, a meno di valutazioni più specifiche o di adozione di dispositivi speciali di ancoraggio, è opportuno limitare l'applicazione del composito FRP alla sola zona soggetta a momento positivo, valutando la distanza  $a^*$  a partire dalla sezione a momento nullo.

#### 5.4.2 ANALISI DEL COMPORTAMENTO AGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO

Verranno in seguito presi in considerazione i seguenti Stati Limite di Esercizio:

- Limitazione delle tensioni;
- Controllo dell'inflessione;
- Controllo della fessurazione.

Sotto i carichi di esercizio è necessario verificare che:

- I livelli tensionali nei materiali siano opportunamente limitati allo scopo di evitare lo snervamento dell'acciaio e di mitigare i fenomeni di viscosità nel calcestruzzo e nel rinforzo esterno;
- Le deformazioni e le frecce non raggiungano valori eccessivi, tali cioè da inficiare il normale uso della struttura, produrre danni ad elementi non portanti, arrecare disturbo psicologico agli utenti;
- I fenomeni fessurativi risultino opportunamente contenuti, in quanto la presenza di fessure troppo numerose e/o troppo aperte potrebbe ridurre notevolmente la durabilità delle strutture, la loro funzionalità, il loro aspetto e danneggiare l'integrità del legame di aderenza all'interfaccia FRP - calcestruzzo.

Le verifiche in condizioni di esercizio possono essere svolte in campo elastico-lineare tenendo conto sia del comportamento per sezione interamente reagente che per sezione fessurata e va

tenuta in considerazione l'eventuale deformazione preesistente al momento dell'applicazione del rinforzo. Le tensioni nei materiali sono valutabili per sovrapposizione degli effetti. Le ipotesi alla base del calcolo sono:

- Il comportamento elastico lineare dell'armatura metallica e del rinforzo;
- La conservazione della planarità delle sezioni rette;
- Il comportamento elastico lineare a compressione del calcestruzzo e la limitata capacità di quest'ultimo di resistere a sforzi di trazione, eventualmente tenendo conto dell'effetto di *tension stiffening*.
- L'assenza di scorrimenti (*perfetta aderenza*) tra calcestruzzo ed armatura metallica e tra calcestruzzo e rinforzo di FRP.

Tali ipotesi consentono di definire un rapporto di proporzionalità tra la tensione dell'acciaio e quella di una fibra di calcestruzzo compresso posta alla stessa quota ( $\frac{\sigma_s}{\sigma_c} = \frac{E_s}{E_c} = n_s$ ), nonché tra la tensione del rinforzo di FRP e quella della fibra di calcestruzzo compresso ad esso adesa ( $\frac{\sigma_f}{\sigma_c} = \frac{E_f}{E_c} = n_f$ ). Tali rapporti sono noti come *coefficienti di omogeneizzazione*.

I valori dei coefficienti di omogeneizzazione devono essere stabiliti tenendo conto dell'evoluzione delle deformazioni differite, e quindi facendo riferimento a situazioni e breve e a lungo termine.

Nel calcolo delle tensioni è necessario considerare, oltre all'effetto dei carichi, anche gli effetti dovuti alle variazioni termiche, alla viscosità, al ritiro e alle eventuali distorsioni.

#### 5.4.2.1 Verifica delle tensioni

In condizioni di esercizio le tensioni nel composito fibrorinforzato, calcolate per la *combinazione di carico quasi permanente*, devono soddisfare la limitazione  $\sigma_f \leq \eta \cdot f_{fk}$ , dove  $f_{fk}$  rappresenta la tensione caratteristica di rottura del rinforzo e  $\eta$  è il fattore di conversione, i cui valori sono indicati in Tabella 4.1. Le tensioni nel calcestruzzo e nell'acciaio vanno limitate in accordo con quanto prescritto nella Normativa vigente.

In presenza di un momento  $M_0$  agente sulla sezione all'atto dell'applicazione del rinforzo e di un momento  $M_1$  dovuto ai carichi applicati dopo l'intervento, le tensioni indotte dal momento complessivo  $M = M_0 + M_1$  possono essere valutate additivamente, nel modo seguente:

- Tensioni nel calcestruzzo      $\sigma_c = \sigma_{c0} + \sigma_{c1}$       $\sigma_{c0} = \frac{M_0}{W_{0,c}^s}$       $\sigma_{c1} = \frac{M_1}{W_{1,c}^s}$
- Tensioni nell'acciaio teso      $\sigma_s = \sigma_{s0} + \sigma_{s1}$       $\sigma_{s0} = n_s \cdot \frac{M_0}{W_{0,s}^i}$       $\sigma_{s1} = n_s \cdot \frac{M_1}{W_{1,s}^i}$
- Tensioni nelle fibre      $\sigma_f = n_f \cdot \frac{M_1}{W_{1,f}^i}$

Facendo riferimento a Figura 5.6, nelle relazioni soprastanti:

- $W_{0,c}^s = \frac{I_0}{x_0}$  è il modulo di resistenza della sezione in c.a. relativo al lembo di calcestruzzo più compresso;
- $W_{0,s}^i = \frac{I_0}{(d-x_0)}$  è il modulo di resistenza della sezione in c.a. relativo all'acciaio in trazione;
- $W_{1,c}^s = \frac{I_1}{x_1}$  è il modulo di resistenza della sezione in c.a. rinforzata relativo al lembo di calcestruzzo più compresso;
- $W_{1,s}^i = \frac{I_1}{(d-x_1)}$  è il modulo di resistenza della sezione in c.a. rinforzata relativo all'acciaio in trazione;
- $W_{1,f}^i = \frac{I_1}{(h-x_1)}$  è il modulo di resistenza della sezione in c.a. rinforzata relativo al composito fibrorinforzato.

Per quanto riguarda le caratteristiche geometriche della sezione retta e la posizione dell'asse neutro, nell'ipotesi che il momento  $M_0$  induca fessurazione nella sezione, i momenti di inerzia  $I_0$  e  $I_1$  e le distanze  $x_0$  e  $x_1$  degli assi neutri dall'estremo lembo compresso sono relativi, rispettivamente, alla condizione di sezione di c.a. fessurata e non rinforzata, e di sezione di c.a. fessurata e rinforzata con FRP. Anche in questo caso i coefficienti di omogeneizzazione utilizzati devono tenere conto dell'evoluzione della viscosità del calcestruzzo, distinguendo tra verifiche a breve ed a lungo termine.

#### 5.4.2.2 Verifica delle frecce

Le deformazioni esibite dalle strutture rinforzate con FRP devono rispettare le limitazioni imposte dalla Normativa vigente.

Il modello meccanico adottato deve simulare il comportamento reale della struttura con un livello di accuratezza adeguato agli obiettivi del calcolo. In particolare, si deve tenere conto

dell'eventuale presenza della fessurazione per gli effetti da essa prodotti sulla deformazione del corrente teso e di quello compresso.

Se risulta appropriato, il modello meccanico adottato deve consentire di tenere conto:

- Gli effetti della viscosità e del ritiro;
- L'effetto irrigidente del calcestruzzo teso tra le fessure;
- La fessurazione preesistente, provocata da carichi antecedenti all'applicazione del rinforzo;
- L'influenza di distorsioni eventualmente agenti, quali, ad esempio, quelle di origine termica;
- La modalità di applicazione del carico, sia essa statica o dinamica;
- Il valore più appropriato del modulo di elasticità normale del calcestruzzo in funzione del tipo di inerte e della maturazione al momento della messa in carico.

Il calcolo della freccia per travi in c.a. rinforzate con FRP può essere effettuato mediante integrazione del diagramma delle curvature. Queste possono essere valutate attraverso un'analisi non lineare che tenga conto della fessurazione e dell'effetto irrigidente del calcestruzzo teso.

In caso di calcolo non lineare delle frecce non è valido il principio di sovrapposizione degli effetti.

In alternativa, sono possibili analisi semplificate, del tipo di quelle in uso per le ordinarie sezioni di c.a., sempre che siano suffragate da adeguate sperimentazioni.

#### **5.4.2.3 Verifica dell'apertura delle fessure**

Allo scopo di proteggere l'armatura metallica interna e di garantire la funzionalità degli elementi strutturali, occorre prevedere, in condizioni di esercizio, opportune limitazioni sui valori dell'apertura delle fessure.

I limiti di fessurazione delle strutture rinforzate con FRP devono soddisfare le prescrizioni contenute nella Normativa vigente.

Allo stato attuale non sono disponibili modellazioni accurate e completamente affidabili per il calcolo dell'apertura delle fessure di strutture in c.a. rinforzate con FRP. In letteratura sono reperibili diverse formulazioni a base sperimentale che modificano opportunamente le

espressioni in uso per le ordinarie sezioni di c.a. tenendo conto della presenza del rinforzo esterno. L'evidenza sperimentale dimostra che le membrature di c.a. placcate con FRP presentano, generalmente, fessure di ampiezza inferiore anche se più ravvicinate.

È sempre possibile adottare modellazioni più complesse ed accurate purché siano supportate da adeguate sperimentazioni.

### **5.4.3 DUTTILITÀ**

La duttilità degli elementi inflessi, intesa come capacità di deformazione in campo plastico, dipende dal comportamento della sezione e dalle modalità effettive di collasso dell'elemento strutturale nel suo complesso. Si ottiene un comportamento tanto più duttile quanto più l'armatura metallica tesa è snervata e quanto più è elevata la curvatura dell'elemento rinforzato nella condizione di crisi imminente. La duttilità può ritenersi del tutto assente nel caso in cui il fenomeno di distacco del rinforzo di FRP dal supporto preceda lo snervamento dell'armatura metallica tesa.

## **5.5 RINFORZO A TAGLIO**

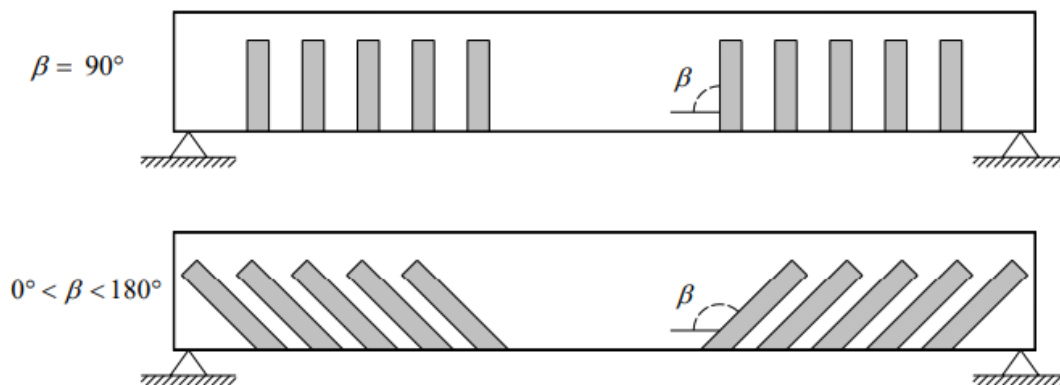
Il rinforzo a taglio si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il taglio di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura trasversale metallica presente.

Il rinforzo a taglio va verificato per il solo SLU.

### **5.5.1 CONFIGURAZIONI PER IL RINFORZO A TAGLIO**

Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando in aderenza sulla superficie esterna dell'elemento da rinforzare (Figura 5.9) fasce di tessuto, su uno o più strati. Nel caso di applicazioni su elementi monodimensionali, i rinforzi possono essere applicati in maniera discontinua, con spazi vuoti fra fasce consecutive, oppure in maniera continua, con strisce adiacenti l'una all'altra. In quest'ultimo caso il rinforzo assume l'aspetto di un foglio.

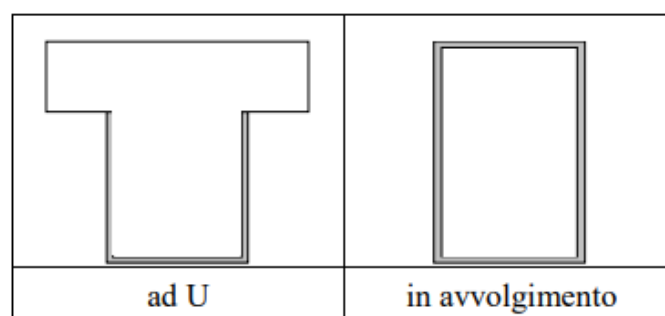




**Figura 5.9** – Orientazione del rinforzo a taglio in forma di fasce

Elementi distintivi del rinforzo sono: la geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di tessuto adese alla membratura rinforzata e l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima.

La disposizione del rinforzo attorno alla sezione può avvenire nelle seguenti modalità: rinforzo laterale, rinforzo ad "U" e rinforzo in avvolgimento (Figura 5.10):



**Figura 5.10** – Disposizione del rinforzo a taglio attorno alla sezione

Nel caso di rinforzi ad "U" su sezioni rettangolari o a "T", è possibile migliorare le condizioni di vincolo delle estremità libere (non avvolte completamente attorno agli angoli delle sezioni) dei tessuti, mediante l'applicazione, in tali zone, di barre, lamine o strisce di materiale composito. In tale eventualità, se è dimostrata l'efficacia del vincolo offerto da tali dispositivi, il comportamento del rinforzo ad "U" può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato mediante l'inserimento di barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale

tipologia di rinforzo non è però oggetto delle Istruzioni redatte dal CNR: qualora fosse utilizzata, la sua efficacia dovrebbe essere supportata da evidenze sperimentali.

## 5.5.2 RESISTENZA DI PROGETTO A TAGLIO DELL'ELEMENTO RINFRZATO CON FRP

### 5.5.2.1 Resistenza di progetto a taglio

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la relazione (5.19):

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,s} + V_{Rd,f}, V_{Rd,c}\} \quad (5.19)$$

in cui  $V_{Rd,s}$  e  $V_{Rd,f}$  rappresentano rispettivamente la capacità a taglio-trazione dell'armatura trasversale di acciaio e quella del sistema di rinforzo FRP;  $V_{Rd,c}$  rappresenta invece la capacità a taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente.

Nel caso di disposizione ad "U" o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo di FRP,  $V_{Rd,f}$ , può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Mörsch mediante l'espressione (5.20):

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot \theta + \cot \beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \quad (5.20)$$

in cui:

- $d$  è l'altezza della sezione;
- $f_{fed}$  rappresenta la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo;
- $t_f$  è lo spessore del sistema di rinforzo FRP;
- $b_f$  e  $p_f$  sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce di rinforzo, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre: nel caso di strisce poste in adiacenza o di elementi di rinforzo bidimensionali si assume che  $\frac{b_f}{p_f} = 1,0$ ;
- $\gamma_{Rd}$  è un coefficiente parziale, ricavato da Tabella 3.5.

Nel caso in cui le strisce di rinforzo siano applicate con un'inclinazione  $\beta$ , come nell'esempio in Figura 5.11, è possibile sostituire all'interno della (5.20) al fattore  $p_f$ , la quantità  $\bar{p}_f \cdot \sin \beta$ , in cui  $\bar{p}_f$  è il passo delle strisce misurate lungo l'asse dell'elemento.

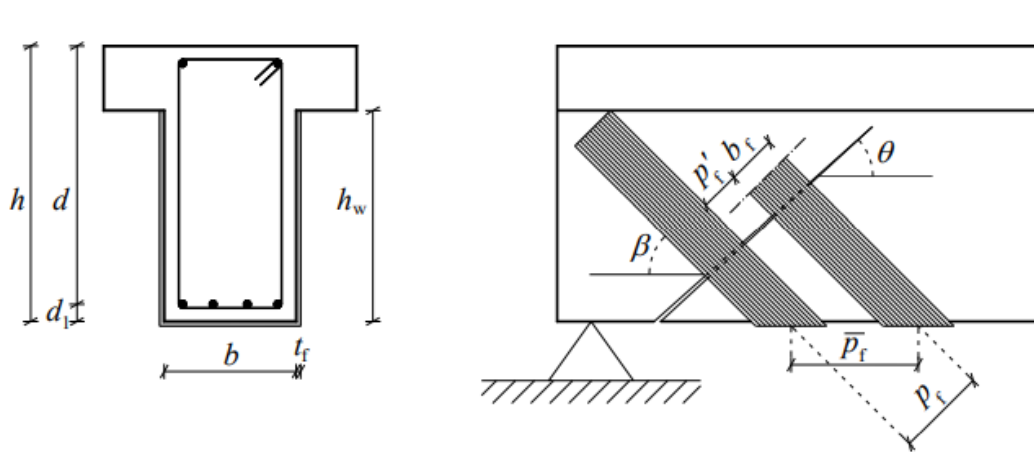


Figura 5.11 – Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce

Nel caso di sistemi di rinforzo discontinui costituiti da strisce di materiale composito, la larghezza,  $b_f$ , ed il passo,  $p_f$ , delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare precise limitazioni:

$$50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm} \quad b_f \leq p_f \leq \min\{0,5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$$

Nel caso in cui risulti che  $\min\{0,5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$ , sarà necessario ricorrere ad un sistema di rinforzo differente.

Nel caso di disposizione in avvolgimento continuo su elementi con sezione circolare di diametro  $D$ , con le fibre orientate ortogonalmente all'asse dell'elemento da rinforzare ( $\beta = 90^\circ$ ), il contributo del rinforzo di FRP,  $V_{Rd,f}$ , è fornito dalla relazione (5.21):

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta \quad (5.21)$$

### 5.5.2.2 Resistenza efficace di progetto del rinforzo

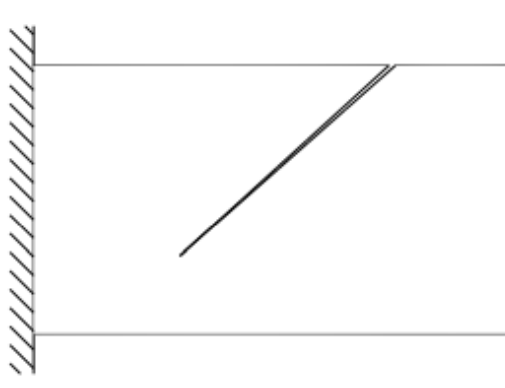
In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano delle concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo - FRP che possono innescare il distacco del composito dal supporto secondo la *modalità 1*. In assenza di una valutazione più rigorosa dello stato tensionale responsabile del fenomeno, è possibile avvalersi di una procedura semplificata, che si basa sulla definizione convenzionale di “tensione efficace” del sistema di rinforzo, intesa come la tensione di trazione in esso riscontrata all'atto della delaminazione.

Nel caso di disposizione ad “U” su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo,  $f_{fed}$ , è fornita dalla relazione (5.22):

$$f_{fed} = f_{fda} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{l_{ed} \cdot \sin \beta}{\min\{0,9 \cdot d, h_w\}} \right] \quad (5.22)$$

dove  $f_{fda}$  è la tensione di progetto del sistema di rinforzo, ricavata dalla (5.5),  $l_{ed}$  è la lunghezza efficace di ancoraggio, ricavata tramite la (5.2),  $\beta$  è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento,  $d$  è l'altezza utile della sezione e  $h_w$  è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere completamente impegnata dal rinforzo ad “U”.

Particolare attenzione deve essere riposta nei casi in cui la zona compressa sia localizzata inferiormente alla trave, come, ad esempio, nel caso di una mensola (Figura 5.12), in cui la lesione da taglio va ad allargarsi verso l'alto. In situazioni simili deve essere ben valutata l'opportunità di ricorrere ad idonei presidi per garantire un adeguato ancoraggio del rinforzo ad “U”, ivi compreso il ricorso a dispositivi meccanici. Negli stessi casi, per il calcolo della resistenza  $f_{fed}$  si deve sempre far ricorso alla (5.22).



**Figura 5.12** – Situazione tipo di zona compressa localizzata inferiormente alla trave

Nel caso di disposizione in avvolgimento su una sezione rettangolare, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione (5.23):

$$f_{fed} = f_{fad} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0,9 \cdot d, h_w\}} \right] + \frac{1}{2} \cdot (\phi_R \cdot f_{fd} - f_{fad}) \cdot \left[ 1 - \frac{l_e \cdot \sin \beta}{\min\{0,9 \cdot d, h_w\}} \right] \quad (5.23)$$

in cui  $f_{fad}$  rappresenta la tensione di progetto del sistema di rinforzo FRP, da valutare mediante la (5.5) e inoltre considerando che:

$$\phi_R = 0,2 + 1,6 \cdot \frac{r_c}{b} \quad 0 \leq \frac{r_c}{b} \leq 0,5 \quad (5.24)$$

dove  $r_c$  è il raggio di curvatura realizzato in corrispondenza dello spigolo della sezione rinforzata e  $b$  è la larghezza dell'anima della sezione.

Nell'equazione (5.23) il contributo del secondo termine viene considerato solo se positivo.

Per la valutazione del fattore geometrico  $k_b$ , ricavato tramite l'espressione (5.4), è necessario assumere:

- $b = p_f$ , nel caso di rinforzi discontinui sotto forma di strisce o fasce.
- $b = b_f = \min\{0,9 \cdot d, h_w\} \cdot \frac{\sin(\theta + \beta)}{\sin \theta}$ , nel caso di sistemi di rinforzo continui o di strisce adiacenti.

Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad "U" e si dimostra che il loro contributo è almeno pari a quello conseguibile nel caso di disposizione in avvolgimento, la tensione efficace di calcolo può essere ottenuta a partire dalla (5.23). In caso contrario, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla (5.22).

Nel caso di avvolgimento continuo su elementi a sezione circolare di diametro  $D$ , la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo è fornita dalla relazione (5.25):

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max} \quad (5.25)$$

in cui  $E_f$  è il modulo di elasticità normale del composito nella direzione delle fibre e  $\varepsilon_{f,max}$  è un opportuno valore limite della deformazione nel composito, da assumersi, in mancanza di una determinazione più accurata, pari a  $5 \cdot 10^3$ .

## 5.6 RINFORZO A TORSIONE

Il rinforzo a torsione si rende necessario nel caso di elementi strutturali per i quali il momento torcente di calcolo, eventualmente valutato con i criteri della gerarchia delle resistenze, sia superiore alla corrispondente resistenza di calcolo. Quest'ultima deve essere determinata considerando i contributi del calcestruzzo e dell'eventuale armatura metallica trasversale presente.

Il rinforzo a torsione va verificato per i soli SLU.

### 5.6.1 CONFIGURAZIONI PER IL RINFORZO A TORSIONE

Il rinforzo a torsione con materiali compositi si realizza applicando in aderenza alla superficie esterna della membratura da rinforzare (Figura 5.9) elementi mono o bidimensionali di composito (solitamente tessuti), costituiti da uno o più strati. Nel caso di applicazioni su elementi monodimensionali, le strisce di composito possono essere applicate in adiacenza, ovvero in maniera discontinua.

Il rinforzo è contraddistinto dalla geometria (spessore, larghezza, passo) delle strisce di tessuto adese alla membratura rinforzata. Le fibre devono essere disposte con un angolo di inclinazione  $\beta = 90^\circ$  rispetto all'asse longitudinale.

L'unica disposizione prevista per il rinforzo a torsione è quella in avvolgimento (Figura 5.10).

Il rinforzo a torsione può anche essere realizzato mediante l'inserimento di barre o lamine di materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale tipologia di rinforzo non è però oggetto delle Istruzioni fornite dal CNR: qualora fosse adottata, la sua efficacia dovrebbe essere supportata da evidenze sperimentali.

### 5.6.2 RESISTENZA DI PROGETTO A TORSIONE DELL'ELEMENTO RINFORZATO CON FRP

Le istruzioni rilasciate dal Consiglio Nazionale delle Ricerche fanno riferimento ad elementi prismatici in cui sia possibile individuare una sezione anulare fittizia resistente e per i quali

l'insufficiente resistenza torsionale, da sopperire con FRP, non derivi da un difetto di armatura metallica longitudinale. Tali elementi devono quindi soddisfare la condizione:

$$T_{Rd,l} > \min\{T_{Rd,s}, T_{Rd,c}\} \quad (5.26)$$

dove  $T_{Rd,s}$ ,  $T_{Rd,l}$  e  $T_{Rd,c}$  sono, rispettivamente, le resistenze ascrivibili all'armatura trasversale di acciaio, all'armatura longitudinale ed alla biella di calcestruzzo, da valutarsi in accordo con la Normativa vigente.

### 5.6.2.1 Resistenza di progetto a torsione

La resistenza di progetto a torsione dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la relazione (5.27):

$$T_{Rd} = \min\{T_{Rd,s} + T_{Rd,f}, T_{Rd,l}, T_{Rd,c}\} \quad (5.27)$$

in cui la quantità  $T_{Rd,f}$  rappresenta la resistenza torsionale ascrivibile al sistema di rinforzo FRP.

Nel caso in cui dalla (5.27) risulti  $T_{Rd} = T_{Rd,s}$ , allora sarà possibile ricavare il valore della resistenza  $T_{Rd,f}$  dall'espressione (5.28):

$$T_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 2 \cdot f_{fed} \cdot t_f \cdot b \cdot h \cdot \frac{b_f}{p_f} \cdot \cot \theta \quad (5.28)$$

dove il coefficiente parziale  $\gamma_{Rd}$  assume valore pari a 1,20, in accordo con quanto riportati in Tabella 3.5,  $f_{fed}$  è la resistenza efficace di calcolo del rinforzo,  $t_f$  è lo spessore della striscia o del foglio di FRP,  $b$  ed  $h$  sono rispettivamente la base e l'altezza della sezione,  $\theta$  è l'angolo d'inclinazione delle bielle compresse rispetto all'asse dell'elemento (da assumersi compreso tra i valori  $22^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ ) e  $b_f$  e  $p_f$  rappresentano, nell'ordine, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre. Nel caso di strisce applicate in adiacenza o di rinforzi continui, il rapporto  $\frac{b_f}{p_f}$  viene assunto di valore pari a 1,0.

Nei rinforzi eseguiti con strisce di materiale composito, la larghezza  $b_f$  e il passo  $p_f$  di queste, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre, devono rispettare specifiche limitazioni:

$$50 \text{ mm} \leq b_f \leq 250 \text{ mm} \quad b_f \leq p_f \leq \min\{0,5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\}$$

Nel caso in cui dovesse risultare che  $\min\{0,5 \cdot d, 3 \cdot b_f, b_f + 200 \text{ mm}\} < b_f$ , sarà necessario ricorrere ad un sistema di rinforzo differente.

Nell'eventualità in cui si presenti una sollecitazione combinata di torsione,  $T_{Sd}$ , e taglio,  $V_{Sd}$ , dovrà essere soddisfatta la relazione (5.29):

$$\frac{T_{Sd}}{T_{Rd,c}} + \frac{V_{Sd}}{V_{Rd,c}} \leq 1 \quad (5.29)$$

Il progetto del sistema di rinforzo FRP a torsione si esegue indipendentemente da quello del rinforzo a taglio: l'area complessiva di rinforzo da applicare è data dalla somma delle singole aree competenti ai due interventi. A tal proposito, l'inclinazione  $\theta$  attribuita alle bielle compresse di calcestruzzo per la verifica ed il progetto a taglio e a torsione deve essere la medesima ed assunta pari a  $45^\circ$ .

## 5.7 CONFINAMENTO

Un adeguato confinamento degli elementi di c.a. può determinare un miglioramento delle prestazioni dell'elemento strutturale. In particolare, esso consente di incrementare:

- la resistenza ultima e la corrispondente deformazione ultima, per elementi sollecitati da sforzo normale centrato o con piccola eccentricità;
- la duttilità e, congiuntamente all'impiego di rinforzi longitudinali, la resistenza ultima di elementi pressoinflessi.

Il confinamento di elementi di c.a. può essere realizzato con tessuti o lamine di FRP disposti sul contorno in modo da costituire una fasciatura esterna continua (*ricoprimento*) o discontinua (*cerchiatura*).

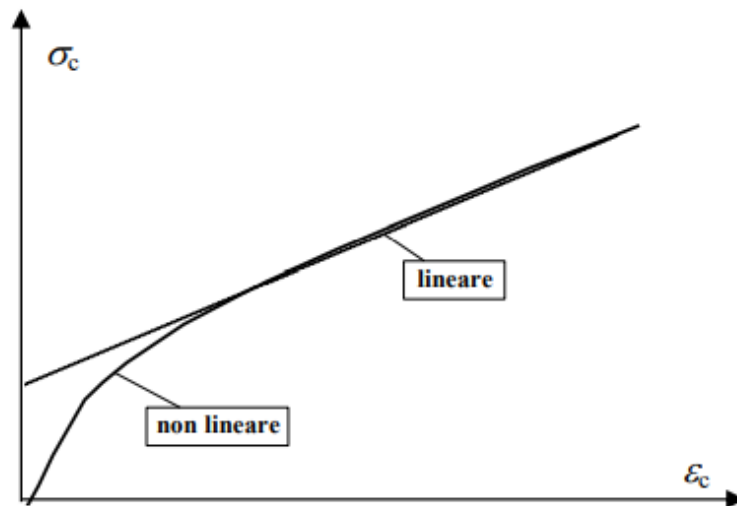
L'incremento della resistenza a compressione e della corrispondente deformazione ultima del calcestruzzo confinato con FRP dipendono dalla pressione di confinamento applicata. Quest'ultima è funzione della rigidità del sistema di rinforzo e della forma della sezione trasversale dell'elemento confinato.

Per la redistribuzione dei carichi verticali non è consentito fare affidamento sulla duttilità di elementi soggetti a sforzo normale centrato o con piccola eccentricità.



Un sistema confinante realizzato con FRP, a differenza di un sistema di acciaio, esercita una pressione laterale sempre crescente, all'aumentare della dilatazione trasversale dell'elemento confinato.

Un tipico legame “ $\sigma - \varepsilon$ ” (tensione - deformazione) esibito da provini compressi confinati con FRP è riportato in figura 5.13.



**Figura 5.13** – Andamento del legame tensione – deformazione per calcestruzzo confinato con FRP

Per valori della deformazione assiale,  $\varepsilon_c$ , pari allo 0,2%, la tensione nel calcestruzzo confinato è solo leggermente superiore a quella esibita dal calcestruzzo non confinato, e cioè alla tensione di progetto di quest'ultimo.

Per deformazioni superiori allo 0,2% il legame “ $\sigma - \varepsilon$ ” è non lineare e la pendenza della corrispondente curva diminuisce progressivamente fino ad assumere, nel tratto finale, un valore pressoché costante. In quest'ultimo tratto, ad andamento lineare, il calcestruzzo confinato perde progressivamente la sua integrità per effetto di una fessurazione sempre più diffusa.

Il collasso dell'elemento confinato si raggiunge per rottura delle fibre del composito. Tuttavia, a partire da un certo valore della deformazione assiale, l'elemento confinato con FRP perde di fatto la propria funzionalità potendo assorbire solo modeste ed insignificanti sollecitazioni trasversali. In considerazione di ciò, il collasso dell'elemento confinato è convenzionalmente raggiunto quando si attinge una deformazione limite delle fibre pari allo 0,4%.

Gli elementi confinati vanno verificati nei riguardi dei soli SLU.

### 5.7.1 RESISTENZA DI PROGETTO A COMPRESSIONE CENTRATA O CON PICCOLA ECCENTRICITÀ DELL'ELEMENTO CONFINATO

Per ottenere un efficace confinamento è buona norma disporre le fibre del composito in direzione perpendicolare all'asse dell'elemento. Nel caso di disposizione *ad elica* l'efficacia del confinamento deve essere opportunamente valutata.

In assenza di una pretensione iniziale, il sistema di rinforzo FRP esercita un confinamento passivo sulla membratura compressa. L'azione di confinamento diventa significativa nella fase di *plasticizzazione*, e quindi di fessurazione, dell'elemento rinforzato, a seguito della più vistosa dilatazione trasversale esibita da quest'ultimo: si rileva che prima della fessurazione del calcestruzzo il sistema a base di FRP è praticamente scarico.

La verifica dell'elemento confinato consiste nell'accertare che sia soddisfatta la limitazione (5.30):

$$N_{Sd} \leq N_{Rcc,d} \quad (5.30)$$

dove  $N_{Sd}$  è il valore di progetto dell'azione assiale agente e  $N_{Rcc,d}$  è il valore di progetto della resistenza dell'elemento confinato, che, in assenza di fenomeni di instabilità, è fornita dall'espressione (5.31):

$$N_{Rcc,d} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot A_c \cdot f_{ccd} + A_s \cdot f_{yd} \quad (5.31)$$

nella quale:

- $\gamma_{Rd}$  è il coefficiente parziale, da assumersi pari a 1,10, in accordo con quanto riportato in Tabella 3.5;
- $A_c$  e  $f_{ccd}$  sono, rispettivamente, l'area della sezione trasversale dell'elemento confinato e la tensione di progetto del calcestruzzo confinato;
- $A_s$  e  $f_{yd}$  sono rispettivamente l'area e la tensione di progetto dell'armatura metallica eventualmente presente.

La resistenza di progetto del calcestruzzo confinato,  $f_{ccd}$ , viene valutata tramite la (5.32):

$$\frac{f_{ccd}}{f_{cd}} = 1 + 2,6 \cdot \left( \frac{f_{l,eff}}{f_{cd}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (5.32)$$

dove  $f_{cd}$  rappresenta la tensione di progetto del calcestruzzo non confinato e  $f_{l,eff}$  rappresenta la pressione efficace di confinamento.

Il confinamento risulta efficace nel momento in cui  $\frac{f_{l,eff}}{f_{cd}} > 0,5$ .

### 5.7.1.1 Stima della pressione laterale di confinamento

Della pressione di confinamento,  $f_l$ , esercitata dal sistema di rinforzo, solo una porzione,  $f_{l,eff}$ , detta “*pressione efficace di confinamento*”, contribuisce alla resistenza dell’elemento confinato.

La pressione efficace di confinamento,  $f_{l,eff}$ , funzione della forma della sezione e delle modalità di realizzazione dell’intervento, è fornita dalla relazione (5.33):

$$f_{l,eff} = k_{eff} \cdot f_l \quad (5.33)$$

dove  $k_{eff}$  è un coefficiente di efficienza ( $k_{eff} \leq 1$ ), definito come rapporto tra il volume,  $V_{c,eff}$ , di calcestruzzo efficacemente confinato ed il volume,  $V_c$ , dell’elemento di calcestruzzo, al netto del volume delle armature longitudinali.

La pressione di confinamento può essere valutata mediante la relazione (5.34):

$$f_l = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fd,rid} \quad (5.34)$$

in cui  $\rho_f$  è la percentuale geometrica di rinforzo, dipendente dalla forma della sezione e dal tipo di applicazione (confinamento continuo o discontinuo),  $E_f$  è il modulo di elasticità normale del materiale in direzione delle fibre,  $\varepsilon_{fd,rid}$  è una deformazione di calcolo, opportunamente ridotta, del composito fibrorinforzato.

Il coefficiente di efficienza,  $k_{eff}$ , può essere espresso come prodotto di tre fattori: un coefficiente di efficienza orizzontale,  $k_H$ , uno di efficienza verticale,  $k_V$ , e un legato all’inclinazione delle fibre,  $k_\alpha$

$$k_{eff} = k_H \cdot k_V \cdot k_\alpha \quad (5.35)$$

Il coefficiente di efficienza orizzontale,  $k_H$ , dipende dalla forma della sezione, se circolare o rettangolare.

Il coefficiente di efficienza verticale,  $k_V$ , dipende dalla modalità di applicazione del confinamento lungo l'asse longitudinale dell'elemento. In caso di fasciatura continua si assume  $k_V = 1$ . In caso di fasciatura discontinua (Figura 5.14), realizzata cioè con strisce di FRP disposte ad interasse  $p_f$  e distanza netta  $p'_f$ , si deve tenere conto della riduzione di efficacia dovuta al fenomeno di diffusione delle tensioni tra due fasciature consecutive. Per effetto di tale diffusione si creano delle zone che non risentono del confinamento, aventi approssimativamente, in sezione verticale, un contorno parabolico con tangente iniziale inclinata di  $45^\circ$ .

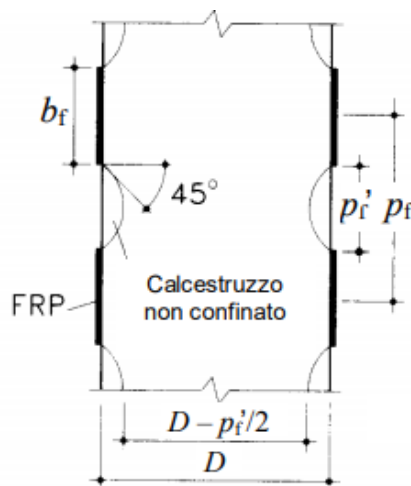


Figura 5.14 – Sezione circolare confinata in maniera discontinua

Indipendentemente dalla forma della sezione, il coefficiente di efficienza verticale,  $k_V$ , che consente di portare in conto il fenomeno di diffusione verticale delle tensioni, può essere assunto pari a:

$$k_V = \left(1 - \frac{p'_f}{2 \cdot d_{min}}\right)^2 \quad (5.36)$$

dove  $d_{min}$  è la dimensione minima trasversale dell'elemento.

Nel caso di fasciatura discontinua è opportuno che la distanza netta tra le strisce rispetti la limitazione:

$$p'_f \leq \frac{d_{min}}{2} \quad (5.37)$$

Indipendentemente dalla forma della sezione, il coefficiente di efficienza  $k_\alpha$  può essere espresso in funzione dell'angolo di inclinazione delle fibre,  $\alpha_f$ , tramite la relazione (5.38):

$$k_\alpha = \frac{1}{1 + \tan^2 \alpha_f} \quad (5.38)$$

La deformazione ridotta del composito fibrorinforzato,  $\varepsilon_{fd,rid}$ , viene ricavata tramite l'espressione (5.39):

$$\varepsilon_{fd,rid} = \min \left\{ \frac{\eta_a \cdot \varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, 0,004 \right\} \quad (5.39)$$

dove  $\eta_a$  e  $\gamma_f$  sono rispettivamente il fattore di conversione ambientale ed il coefficiente parziale del materiale composito fibrorinforzato, i cui valori sono riportati, nell'ordine, in Tabella 4.1 e in Tabella 3.4; 0,004 corrisponde invece alla deformazione limite convenzionale del composito.

#### 5.7.1.1.1 Sezioni circolari

L'intervento di confinamento con FRP risulta particolarmente efficace per elementi a sezione circolare soggetti a compressione centrata o a pressoflessione con modesta eccentricità.

In presenza di fibre disposte in direzione trasversale all'asse longitudinale dell'elemento, il sistema di rinforzo FRP induce una pressione laterale uniforme sulla superficie di contatto, che si oppone all'espansione radiale dell'elemento compresso.

La percentuale geometrica di rinforzo,  $\rho_f$ , da impiegare nella valutazione della pressione efficace di confinamento è fornita dalla relazione (5.40):

$$\rho_f = \frac{4 \cdot t_f \cdot b_f}{D \cdot p_f} \quad (5.40)$$

dove, con riferimento a Figura 5.14,  $t_f$  e  $b_f$  sono rispettivamente lo spessore e l'altezza della generica striscia di FRP,  $p_f$  è il passo delle strisce e  $D$  è il diametro della sezione circolare.

Nel caso di confinamento continuo, la (5.40) si riscrive come:

$$\rho_f = \frac{4 \cdot t_f}{D} \quad (5.41)$$

Il coefficiente di efficienza orizzontale,  $k_H$ , ha valore pari a 1,0.

La dimensione  $d_{min}$ , introdotta dalla (5.36) per il calcolo del coefficiente di efficacia verticale,  $k_H$ , va intesa come il diametro della sezione.

#### 5.7.1.1.2 Sezioni quadrate e rettangolari

Il confinamento con FRP di elementi a sezione quadrata o rettangolare produce incrementi solo marginali della resistenza a compressione. Ne consegue che applicazioni di questo genere devono essere attentamente vagliate ed analizzate.

Prima dell'applicazione del sistema di FRP è opportuno procedere ad un arrotondamento degli spigoli della sezione, allo scopo di evitare pericolose concentrazioni di tensione localizzate in corrispondenza degli stessi, che potrebbero provocare una rottura prematura del sistema di rinforzo. Il raggio di curvatura adottato per arrotondare gli spigoli deve rispettare una precisa limitazione:

$$r_c \geq 20 \text{ mm} \quad (5.42)$$

La percentuale geometrica di rinforzo,  $\rho_f$ , da impiegare nella valutazione della pressione efficace di confinamento (5.34) è determinata dall'espressione (5.43):

$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot (b + h) \cdot b_f}{b \cdot h \cdot p_f} \quad (5.43)$$

in cui  $t_f$  e  $b_f$  sono rispettivamente lo spessore e l'altezza della generica striscia di FRP,  $p_f$  è il passo delle strisce, mentre  $b$  e  $h$  sono le dimensioni trasversali della sezione.

In caso di confinamento continuo, l'espressione (5.43) viene riscritta come:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot (b + h)}{b \cdot h} \quad (5.44)$$

Facendo riferimento a Figura 5.15, è accettabile sostenere che l'area di calcestruzzo effettivamente confinata sia solo una parte dell'area complessiva. Tale comportamento è dovuto all'“*effetto arco*”, che si manifesta all'interno della sezione. Tale effetto dipende dal valore del raggio di arrotondamento degli spigoli,  $r_c$ .

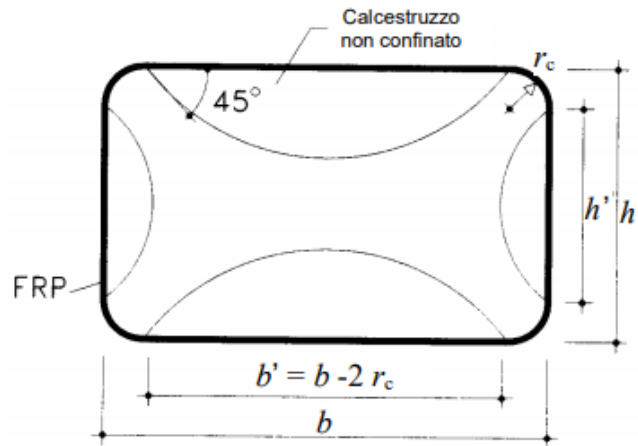


Figura 5.15 – Confinamento di sezione rettangolare

Il coefficiente di efficienza orizzontale,  $k_H$ , per le sezioni rettangolari, che tiene conto dell'effetto arco che si attiva nella sezione trasversale, assume un valore individuato dalla relazione (5.45):

$$k_H = 1 - \frac{b'^2 + h'^2}{3 \cdot A_g} \quad (5.45)$$

in cui  $b'$  e  $h'$  sono le dimensioni della sezione, individuate in Figura 5.15, e  $A_g$  è l'area della sezione trasversale dell'elemento confinato.

In assenza di adeguate prove sperimentali che siano in grado di dimostrarne l'efficacia, non va considerato l'effetto del confinamento su sezioni rettangolari per cui si abbia  $\frac{b}{h} > 2$ , ovvero  $\max\{b, h\} > 900$  mm.

### 5.7.2 DUTTILITÀ DI ELEMENTI PRESSOINFLESSI CONFINATI CON FRP

Il confinamento con FRP può essere realizzato anche su elementi di calcestruzzo soggetti a pressoflessione (sforzo normale con grande eccentricità). In questo modo sarà possibile incrementare la loro duttilità e, solo in misura ridotta, la loro resistenza.

In mancanza di determinazioni più accurate, la valutazione della curvatura ultima di una sezione pressoinflessa può essere effettuata ipotizzando, per il calcestruzzo confinato, un classico legame costitutivo del tipo parabola-rettangolo ed amplificando il valore della deformazione ultima,  $\epsilon_{ccu}$ , tramite l'espressione (5.46):

$$\varepsilon_{ccu} = 0,0035 + 0,015 \cdot \sqrt{\frac{f_{l,eff}}{f_{cd}}} \quad (5.46)$$

dove  $f_{cd}$  rappresenta la tensione di progetto del calcestruzzo non confinato e  $f_{l,eff}$  rappresenta la pressione efficace di confinamento. Quest'ultima può essere stimata attribuendo alla deformazione ridotta di calcolo del composito fibrorinforzato,  $\varepsilon_{fd,rid}$ , il valore fornito dall'espressione (5.47):

$$\varepsilon_{fd,rid} = \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f} \leq 0,6 \cdot \varepsilon_{fk} \quad (5.47)$$

## 5.8 RINFORZO A FLESSIONE DI STRUTTURE IN C.A.P.

Il DT200 del 2004, insieme alle Linee Guida del 2009, definisce i metodi ed i criteri da applicare nella realizzazione di rinforzi di elementi di conglomerato cementizio precompresso con lamine di FRP non presollecitate.

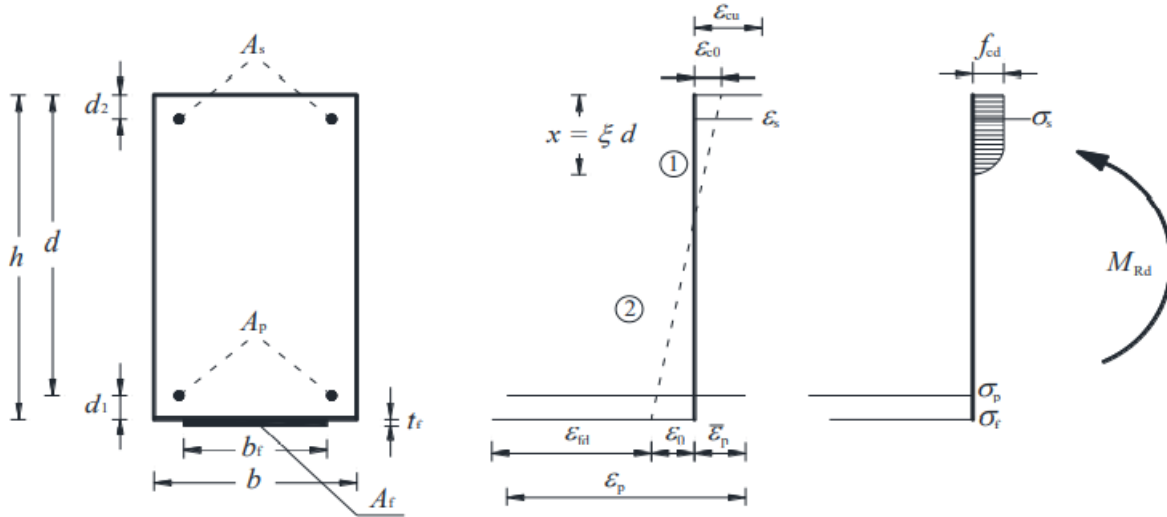
### 5.8.1 ANALISI DEL COMPORTAMENTO ALLO STATO LIMITE ULTIMO

La determinazione della capacità ultima per flessione di sezioni precomprese si esegue secondo procedure analoghe a quelle precedentemente descritte per le sezioni in calcestruzzo armato normale, con alcune varianti:

- La deformazione delle armature di precompressione è pari alla somma algebrica della deformazione del calcestruzzo ad esse adeso più la deformazione al limite di decompressione,  $\bar{\varepsilon}_p$ . Quest'ultima rappresenta la deformazione esibita dall'armatura di precompressione quando, per un'opportuna combinazione delle azioni interne, la tensione nel calcestruzzo ad essa circostante è nulla (Figura 5.16);
- Se l'età del calcestruzzo è tale da poter considerare esauriti i fenomeni differiti, la deformazione  $\varepsilon_0$  coincide con quella presente sulla superficie del calcestruzzo all'atto della posa del rinforzo, cambiata di segno. In ogni caso, nella valutazione di  $\varepsilon_0$  si devono considerare eventuali fenomeni di redistribuzione indotti da cause accidentali (quali ad esempio danneggiamento da impatto);
- Nel caso in cui i fenomeni differiti del calcestruzzo non possano ritenersi esauriti, il valore di  $\varepsilon_0$  è pari alla somma algebrica del valore calcolato precedentemente più la



deformazione differita che si sviluppa nel calcestruzzo (sulla superficie di contatto con la lamina) posteriormente all'applicazione del rinforzo. Nella valutazione di tale deformazione differita, così come nella determinazione delle perdite differite dell'armatura di precompressione, si può trascurare la presenza del rinforzo.



**Figura 5.16** – Modalità di rottura di una sezione in c.a.p. rinforzata esternamente con compositi FRP

Il raggiungimento dello SLU deve essere preceduto dallo snervamento dell'armatura di precompressione.

La verifica nei confronti del distacco del sistema di rinforzo FRP dal supporto viene eseguita con le stesse modalità e gli stessi criteri indicate per le sezioni in c.a. normale.

### 5.8.2 ANALISI DEL COMPORTAMENTO AGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO

In condizioni di esercizio le tensioni di lavoro del calcestruzzo, dell'acciaio e del rinforzo di FRP devono soddisfare le limitazioni previste nella Normativa vigente ed in particolare, per quanto attiene al rinforzo di FRP, quelle già precedentemente introdotte per il c.a. normale.

Se temporaneamente compressi (come ad esempio a seguito della deformazione viscosa del conglomerato), il contributo dei rinforzi non deve essere tenuto in conto.

## 5.9 INTERVENTI IN ZONA SISMICA

I sistemi di rinforzo FRP possono essere utilmente impiegati in zona sismica per intervenire su strutture in conglomerato cementizio armato non soddisfacenti i requisiti di sicurezza nei confronti di uno o più SLU.

Le Linee Guida del 2009 e il DT200 del 2004 recepiscono le prescrizioni della Normativa vigente e le principali indicazioni fornite dalla letteratura scientifica e dalle linee guida internazionali su:

- La valutazione della sicurezza sismica;
- I requisiti di sicurezza;
- I livelli di protezione antisismica;
- I metodi di analisi;
- I criteri di verifica;
- Le caratteristiche dei materiali.

### 5.9.1 PRINCIPI GENERALI DI INTERVENTO

La strategia da perseguire con interventi di rinforzo mediante FRP deve essere ispirata a specifici principi:

- Eliminazione di tutti i meccanismi di collasso di tipo fragile;
- Eliminazione di tutti i meccanismi di collasso di piano (“*piano soffice*”);
- Miglioramento della capacità deformativa globale della struttura da conseguirsi:
  - Incrementando la capacità rotazionale delle potenziali cerniere plastiche senza variarne la posizione;
  - Rilocalizzando le potenziali cerniere plastiche nel rispetto del criterio della gerarchia delle resistenze.

Tipologia, entità ed urgenza dell'intervento con FRP devono dipendere dall'esito di una preventiva valutazione della sicurezza sismica, tenendo conto in particolare che:

- Forti irregolarità degli edifici (in termini di resistenza e/o rigidità) non possono essere sanate con tale tecnica;
- Una maggiore regolarità in termini di resistenza può essere ottenuta rinforzando un numero ridotto di elementi;

- Risultano sempre opportuni interventi volti a migliorare la duttilità locale;
- L'introduzione di rinforzi locali non deve ridurre la duttilità globale della struttura.

### 5.9.1.1 Eliminazione dei meccanismi di collasso di tipo fragile

I meccanismi di collasso di tipo fragile da eliminare e le rispettive modalità di intervento sono:

- Crisi per taglio: si interviene rinforzando a taglio gli elementi che presentano tale problema;
- Crisi per perdita di aderenza nelle zone di sovrapposizione: si interviene confinando mediante avvolgimento di FRP le zone in cui la lunghezza di sovrapposizione delle barre longitudinali risulti insufficiente;
- Crisi per svergolamento delle barre longitudinali in compressione: si interviene confinando mediante avvolgimento di FRP le zone di potenziale formazione di cerniere plastiche nelle quali le armature trasversali non siano in grado di impedire lo svergolamento post-elastico delle barre longitudinali compresse;
- Crisi per trazione dei pannelli dei nodi: si interviene applicando su di essi un rinforzo di FRP.

#### 5.9.1.1.1 Crisi per taglio

L'incremento della resistenza a taglio può essere ottenuto mediante l'applicazione di sistemi di rinforzo con fibre disposte ortogonalmente all'asse dell'elemento ( $\beta = 90^\circ$ ) ed, eventualmente, anche in altre direzioni.

#### 5.9.1.1.2 Crisi dei pilastri per perdita di aderenza delle barre

Il pericolo di scorrimento delle giunzioni per aderenza nei pilastri può essere eliminato mediante confinamento con FRP.

Per sezioni circolari di diametro  $D$ , lo spessore da attribuire al confinamento può essere valutato mediante la relazione (5.48):

$$t_f = \frac{D \cdot (f_l - \sigma_{sw})}{2 \cdot 0,001 \cdot E_f} \quad (5.48)$$

in cui:

- $\sigma_{sw}$  rappresenta la tensione di trazione nelle staffe corrispondente alla deformazione dell'1‰, o la pressione di iniezione della malta tra FRP e pilastro, quando presente;
- $f_l$  rappresenta la pressione di confinamento nella zona di sovrapposizione di lunghezza  $L_s$ , definita tramite l'espressione (5.49):

$$f_l = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{\left[ \frac{u_e}{2 \cdot n} + 2 \cdot (d_b + c) \right] \cdot L_s} \quad (5.49)$$

dove  $f_{yd}$  è la tensione di progetto delle barre di acciaio,  $u_e$  è il perimetro della sezione all'interno del poligono che circoscrive le barre longitudinali di diametro  $d_b$ ,  $n$  è il numero di barre giuntate lungo  $u_e$  e  $c$  è lo spessore del copriferro.

Per sezioni rettangolari, di dimensioni  $b$  e  $d$ , si possono utilizzare le espressioni precedenti sostituendo  $D$  con  $\max\{b, d\}$  e riducendo l'efficacia del confinamento di FRP attraverso il fattore  $k_H$ .

#### 5.9.1.1.3 Crisi nei pilastri per svergolamento delle barre

Il pericolo di svergolamento delle barre longitudinali di armatura può essere eliminato mediante l'applicazione di una fasciatura di confinamento realizzata con compositi fibrorinforzati FRP.

Lo spessore,  $t_f$ , da attribuire a tale fasciatura può essere valutato mediante la relazione (5.50):

$$t_f = \frac{0,45 \cdot n \cdot f_{yd}^2 \cdot d}{4 \cdot E_{ds} \cdot E_f} \cong \frac{10 \cdot n \cdot d}{E_f} \quad (5.50)$$

dove:

- $n$  è il numero totale di barre longitudinali in condizioni di potenziale svergolamento;
- $f_{yd}$  è la tensione di progetto delle barre d'acciaio;
- $d$  è la dimensione della sezione parallela al piano di flessione;
- $E_f$  è il modulo di elasticità normale del confinamento FRP nella direzione delle barre longitudinali;
- $E_{ds}$  è un opportuno "modulo ridotto" delle barre di armatura longitudinali fornito dalla relazione (5.51):

$$E_{ds} = \frac{4 \cdot E_s \cdot E_i}{(\sqrt{E_s} + \sqrt{E_i})^2} \quad (5.51)$$

in cui  $E_s$  e  $E_i$  rappresentano rispettivamente il valore del modulo di elasticità normale e del modulo di elasticità tangente iniziale in campo elastico delle barre.

#### 5.9.1.1.4 Crisi per trazione dei pannelli dei nodi trave – pilastro

Il calcolo dell'incremento di resistenza a trazione conseguibile nei pannelli dei nodi non confinati va eseguito tenendo conto del contributo del materiale fibrorinforzato nella direzione delle tensioni principali di trazione e limitando la massima deformazione di quest'ultimo al valore del 4%. L'intervento è efficace solo se le estremità del rinforzo sono adeguatamente ancorate attraverso l'adozione di opportuni particolari costruttivi. In caso contrario il rinforzo non può essere ritenuto efficace.

#### 5.9.1.2 Eliminazione dei meccanismi di collasso di piano

Premesso che, in assenza di pareti, i meccanismi di collasso di piano possono attivarsi a seguito della formazione di cerniere plastiche sia in testa che al piede di tutti i pilastri di un determinato piano, l'intervento sarà finalizzato ad incrementare in tali zone la resistenza a flessione composta, con l'obiettivo di inibire la formazione delle suddette cerniere. In nessun caso è consentito di intervenire sui meccanismi di collasso di piano esclusivamente con l'intento di incrementare l'entità degli spostamenti che ne precedono l'attivazione.

#### 5.9.1.3 Incremento della capacità deformativa globale di una struttura

La capacità deformativa ultima di una struttura è una misura della sua attitudine a sopportare l'azione sismica. Può essere saggiata utilizzando i risultati di un'analisi statica non lineare. La capacità deformativa ultima di una struttura dipende dalla capacità deformativa in campo plastico dei singoli elementi resistenti (travi, pilastri e pareti).

##### 5.9.1.3.1 Incremento della capacità deformativa locale degli elementi

La capacità deformativa di travi e di pilastri può essere misurata mediante la rotazione,  $\theta$ , della sezione di estremità rispetto alla congiungente di quest'ultima con la sezione di momento nullo ("rotazione rispetto alla corda") a distanza pari alla luce di taglio:  $L_V = \frac{M}{V}$ . Tale rotazione è anche pari al rapporto tra lo spostamento relativo fra le due sezioni suddette e la luce di taglio. Generalmente la capacità deformativa in campo plastico degli elementi è limitata dal

comportamento a rottura del calcestruzzo compresso. L'intervento di confinamento con FRP su tali elementi (prevalentemente pilastri) determina un aumento della deformazione ultima del calcestruzzo compresso, conferendo una maggiore duttilità agli elementi.

#### 5.9.1.3.2 Rilocalizzazione delle potenziali cerniere plastiche

L'applicazione del criterio della gerarchia delle resistenze comporta l'adozione di provvedimenti atti ad impedire la formazione di tutte le potenziali cerniere plastiche nei pilastri. Nelle situazioni di "pilastro debole-trave forte", usuali per strutture intelaiate progettate per soli carichi verticali, le sezioni dei pilastri sono sottodimensionate e denunciano carenza di armatura longitudinale. In questi casi è necessario incrementare la loro resistenza a pressoflessione con l'obiettivo di ricondurre la struttura intelaiata ad una situazione di "pilastro forte-trave debole". L'adozione del criterio della gerarchia delle resistenze comporta un incremento della resistenza a flessione dei pilastri e quindi un incremento del taglio agente in condizioni ultime. Si rende quindi necessario eseguire opportune verifiche a taglio dei pilastri, incrementando eventualmente la resistenza nei confronti di tale caratteristica allo scopo di evitare un collasso di tipo fragile.

#### 5.9.1.3.3 Rotazione ultima degli elementi rinforzati

Per la valutazione della rotazione ultima,  $\theta_u$ , di elementi rinforzati mediante confinamento con FRP, si può fare riferimento a formule di comprovata validità, attribuendo alla deformazione ultima del conglomerato cementizio,  $\epsilon_{ccu}$ , il valore ricavato tramite la (5.46).

## 5.10 INSTALLAZIONE, MONITORAGGIO E CONTROLLO

Il funzionamento ottimale di un sistema di rinforzo strutturale di materiale composito è subordinato a diversi fattori. Tra questi, oltre quelli già richiamati nei precedenti capitoli, rientrano la preparazione del substrato su cui il rinforzo è applicato e la sua messa in opera. Il peso di ciascuno di questi aspetti varia a seconda che ci si riferisca ad applicazioni "per aderenza" (rinforzo a flessione o a taglio) o applicazioni "per contatto" (confinamento passivo di pilastri). Possono essere omesse alcune verifiche relative alla qualità del substrato quando la configurazione del rinforzo lo consenta (per esempio nel caso di applicazioni in avvolgimento come le fasciature chiuse di confinamento), ovvero quando siano previsti appositi dispositivi di ancoraggio collaudati indipendentemente.

Una volta che un intervento di rinforzo sia stato realizzato, è necessario procedere al suo controllo e, in seguito, al suo eventuale monitoraggio nel tempo mediante prove non distruttive o parzialmente distruttive, elencate nei paragrafi successivi.

In seguito sono descritte le prove che possono effettuarsi per verificare il livello di qualità delle applicazioni dei materiali compositi e per monitorarne nel tempo il funzionamento. La progettazione del tipo e del numero di prove da eseguire deve essere commisurata all'importanza dell'applicazione, valutando:

- Se si tratta di edificio o infrastruttura strategica la cui funzionalità durante gli eventi sismici assume rilievo fondamentale per le finalità di protezione civile o il cui ruolo assume rilevanza in relazione alle conseguenze di un eventuale collasso;
- Se l'intervento riguarda elementi strutturali primari (es. travi e pilastri) o secondari (es. solai);
- Quale sia l'estensione dell'intervento in rapporto alle dimensioni della struttura.

### 5.10.1 CONTROLLO E PREPARAZIONE PREVENTIVA DEL SUBSTRATO

L'applicazione di un sistema di rinforzo FRP richiede il preventivo controllo delle condizioni di deterioramento del substrato con l'adozione di provvedimenti atti a migliorarne lo stato, fino a rimuovere e ricostruire le parti ammalorate. Se necessario, devono essere previsti provvedimenti di pulizia e passivazione delle armature metalliche corrose.

I sistemi tecnologici utilizzati per l'ancoraggio delle estremità di lamine o tessuti devono essere oggetto di idonee indagini sperimentali condotte secondo criteri normalizzati. Il protocollo di applicazione deve riguardare sia i materiali utilizzati (adesivi e rinforzi) che la successione delle fasi indicate dal Produttore e/o dal Fornitore per la preparazione del substrato, i tempi di esecuzione, le condizioni ambientali. L'indagine deve saggiare anche l'eventuale sensibilità dei risultati nei confronti di tali parametri.

#### 5.10.1.1 Valutazione del deterioramento del substrato

Prima dell'applicazione del rinforzo per aderenza è necessario verificare le caratteristiche del substrato. In ogni caso la resistenza media a compressione del calcestruzzo non deve essere inferiore a  $15 \frac{N}{mm^2}$ .

È sempre opportuno eseguire delle prove di omogeneità su tutta l'area da rinforzare.

### 5.10.1.2 Rimozione e ricostruzione del substrato ed eventuale trattamento delle barre metalliche

Il substrato di calcestruzzo può risultare danneggiato a causa di un deterioramento fisico-chimico, fisico-meccanico o a causa di un eventuale impatto. Il calcestruzzo ammalorato va rimosso da tutta la zona danneggiata.

La rimozione del calcestruzzo ammalorato e/o danneggiato consente di accertare lo stato delle armature metalliche e quindi di progettare l'esecuzione di eventuali interventi che eliminino le cause responsabili del deterioramento del calcestruzzo stesso. Tali interventi sono assolutamente necessari prima di procedere alla ricostruzione delle parti di calcestruzzo rimosse. Se è in atto un processo corrosivo a carico delle armature metalliche, è necessario rimuovere lo strato deteriorato mediante spazzolatura o sabbiatura e poi trattare la superficie con idonei inibitori di corrosione.

Una volta che tutto il calcestruzzo deteriorato sia stato rimosso e siano stati adottati i provvedimenti più opportuni per arrestare la corrosione delle armature metalliche, nonché tutti gli altri fenomeni che siano causa di degrado (ad esempio infiltrazioni d'acqua o carente regimentazione delle acque), si può procedere al suo reintegro mediante l'utilizzo di betoncini reoplastici.

Al ripristino delle parti di calcestruzzo ammalorate è opportuno associare il livellamento di eventuali asperità superficiali superiori a 10 mm, da effettuarsi, ad esempio, con stucco epossidico compatibile; nel caso in cui la zona da colmare abbia profondità superiore ai 20 mm si dovrà utilizzare un idoneo materiale di apporto. Infine, se l'elemento da rinforzare presenta delle fessure di ampiezza superiore a 0.5 mm, è opportuno che esse siano sigillate mediante iniezione prima di applicare il rinforzo.

### 5.10.1.3 Preparazione del substrato

Dopo aver accertato la qualità del substrato ed aver eventualmente provveduto al ripristino del calcestruzzo ammalorato ed al trattamento delle barre metalliche, è necessario sabbiare la superficie interessata dal rinforzo. La sabbiatura deve assicurare un grado di ruvidezza almeno pari a 0.3 mm; tale grado può essere misurato mediante appositi strumenti quali, ad esempio, un *profilometro laser* oppure un'apparecchiatura per rugosimetria ottica.



Nel caso in cui si operi su una superficie di calcestruzzo che non necessiti di ripristino, ma sia di qualità scadente, è opportuno valutare la possibilità di applicare su di essa un consolidante prima della stesura del *primer*.

Nel caso in cui si operi invece sulla superficie di una struttura nuova, è necessario assicurarsi che le parti interessate dall'applicazione siano perfettamente pulite da eventuali *film* disarmanti applicati sui casseri in fase di getto. In generale, è necessario verificare che sulla superficie di applicazione del rinforzo non siano presenti polveri, grassi, idrocarburi e tensioattivi.

Nel confinamento di pilastri, nel rinforzo a taglio ed in generale in tutti i casi in cui il sistema di rinforzo di FRP debba essere applicato intorno a spigoli, è necessario procedere preliminarmente all'arrotondamento di questi ultimi, assicurando un raggio di curvatura almeno pari a 20 mm.

## **5.10.2 RACCOMANDAZIONI PER L'ESECUZIONE A REGOLA D'ARTE**

La qualità dell'esecuzione del rinforzo con materiali compositi dipende strettamente dalle condizioni di temperatura ed umidità ambientali nonché da quelle del substrato su cui il rinforzo è applicato.

### **5.10.2.1 Condizioni di umidità e temperatura dell'ambiente e del substrato**

È sempre sconsigliato installare rinforzi di composito se l'ambiente è molto umido in quanto un elevato grado di umidità può ritardare la stagionatura delle resine nonché inficiare la perfetta realizzazione del composito nel caso di sistemi con polimerizzazione *in situ*.

I compositi devono essere applicati nelle condizioni igrometriche e termiche definite nelle schede tecniche.

In condizioni di pioggia, eccessivo soleggiamento, forti gradienti termici, elevata umidità o in presenza di polveri può essere opportuno avvalersi di teli protettivi o di altri provvedimenti succedanei.

### 5.10.2.2 Particolari costruttivi e norme di esecuzione

Per il progetto dei particolari di estremità del rinforzo, è opportuno assicurare una lunghezza di ancoraggio almeno pari a 200 mm. In alternativa, se possibile, si possono adottare connettori meccanici.

Negli interventi di rinforzo a taglio, torsione e confinamento è opportuno procedere ad un preventivo arrotondamento degli spigoli degli elementi rinforzati, allo scopo di evitare pericolose concentrazioni di tensione, che potrebbero provocare una rottura prematura del composito. Il raggio di curvatura,  $r_c$ , dell'arrotondamento deve essere almeno pari a 20 mm.

Durante la posa in opera di sistemi di rinforzo con polimerizzazione *in situ*, è importante rispettare l'allineamento delle fibre previsto in progetto ed evitare ondulazioni delle stesse.

Nei casi di sistemi di rinforzo in fibre di carbonio (CFRP) che potrebbero venire a diretto contatto con parti di acciaio, è opportuno prevedere strati di materiale isolante in grado di evitare l'innesco di corrosione galvanica.

In vista di prove di controllo semi-distruttive da eseguirsi successivamente, è buona norma prevedere zone aggiuntive (“*testimoni*”) di rinforzo in parti della struttura opportunamente selezionate. Tali zone, suddivise in fazzoletti di dimensioni superiori a  $500 \times 200 \text{ mm}^2$ , devono presentare un'estensione totale minima di  $0.1 \text{ m}^2$  e comunque non inferiore allo 0.5% dell'area complessiva del rinforzo. I fazzoletti vanno realizzati all'atto del rinforzo, con gli stessi materiali e con le medesime modalità previste per il rinforzo principale, in zone in cui la rimozione del rinforzo non comporti alterazione dei meccanismi di collasso. I fazzoletti devono inoltre essere esposti alle stesse condizioni ambientali del rinforzo principale e, se in numero maggiore di uno, devono essere distribuiti in maniera omogenea.

### 5.10.2.3 Protezione del sistema di rinforzo

Nel caso di applicazioni in ambiente esterno è sempre consigliabile proteggere il sistema di rinforzo dall'azione diretta dell'irraggiamento solare, che può produrre alterazioni chimico-fisiche nella matrice epossidica. Ciò può essere ottenuto mediante l'impiego di vernici acriliche protettive, sia in dispersione acquosa sia in solvente, previa pulitura della superficie del composito mediante l'uso di una spugna satura d'acqua saponata.

In alternativa, si può ottenere una protezione maggiore mediante l'applicazione sul composito già messo in opera di intonaci o malte (preferibilmente di natura cementizia). Tali intonaci, di

spessori consigliati dai Produttori e/o dai Fornitori, vanno posati sul sistema di rinforzo, previa preparazione della superficie mediante applicazione di resina epossidica con successivo spolvero “fresco su fresco” di sabbia al quarzo. Lo strato così realizzato è particolarmente idoneo a ricevere qualsiasi tipo di intonaco.

Ai fini della protezione al fuoco si possono adottare due differenti soluzioni: l'uso di pannelli intumescenti o l'applicazione di intonaci protettivi. In entrambi i casi, Produttori e/o Fornitori devono indicare nelle schede tecniche il grado di protezione in relazione allo spessore del rivestimento. I pannelli (generalmente a base di calciosilicati) vengono posati sul rinforzo previo inserimento di tasselli che non devono mai tagliare o forare le fibre. Allo stato attuale sono reperibili sul mercato rivestimenti protettivi, di spessore e consistenza adeguati, in grado di contenere, in caso di incendio, la temperatura del composito al di sotto di 80°C per un tempo di 90 min.

### 5.10.3 CONTROLLO DI QUALITÀ DELL'ESECUZIONE

Il controllo di qualità dell'installazione dovrebbe includere almeno un ciclo di prove semi-distruttive per la caratterizzazione meccanica della stessa installazione ed almeno una mappatura non distruttiva atta ad assicurarne l'omogeneità.

#### 5.10.3.1 Prove semi-distruttive

Possono essere eseguite sia prove di strappo normale che prove di strappo a taglio. Le prove semi-distruttive vanno eseguite sui testimoni e, dove possibile, anche in zone del rinforzo non critiche in ragione di una prova per ogni 5 m<sup>2</sup> di applicazione, e comunque in numero totale non inferiore a 2 per tipo.

- Prova di strappo normale. La prova, utile per il solo accertamento delle proprietà del substrato ripristinato, viene eseguita utilizzando piastre circolari di acciaio di spessore 20 mm e con diametro pari ad almeno 3 volte la dimensione caratteristica dell'inerte del calcestruzzo del substrato, e comunque non inferiore a 40 mm. Il rinforzo deve essere tagliato attorno al bordo della piastra, prima della prova, con una fresa cilindrica retta di diametro  $\leq 3$ mm, rotante ad almeno 2500 giri/min, avendo cura di non surriscaldare il composito e di ottenere l'incisione anche del substrato per uno spessore di 1-2 mm. L'applicazione può ritenersi accettabile se almeno l'80% delle prove (entrambe nel caso di due sole prove) fornisce una tensione di picco allo strappo non inferiore a 0.9-1.2

MPa ed inoltre se, prevalentemente, la crisi è localizzata al di sotto della superficie di interfaccia composito/substrato.

- Prova di strappo a taglio. La prova risulta particolarmente significativa per l'accertamento della qualità dell'incollaggio. È eseguibile solo se è possibile tirare una porzione di materiale composito nel proprio piano in corrispondenza di uno spigolo staccato dal substrato. L'applicazione può ritenersi accettabile se almeno l'80% delle prove (entrambe nel caso di due sole prove) fornisce una forza di picco allo strappo non inferiore a 24 kN.

### 5.10.3.2 Prove non distruttive

Le prove non distruttive possono essere utilizzate per caratterizzare l'omogeneità dell'applicazione a partire da adeguate mappature bidimensionali della superficie rinforzata aventi risoluzione spaziale differenziata in funzione della zona del rinforzo, secondo le indicazioni fornite in Tabella 5.1.

- Prove di tipo acustico stimolato. Analoghe alla tipologia di prova “*impact-echo*”, tali prove si fondano sul diverso comportamento oscillatorio dello strato di composito in presenza o in assenza di coerenza con il substrato sottostante. Nella versione più elementare, una prova di questo tipo può essere eseguita da un tecnico esperto percuotendo la superficie del composito con una bacchetta rigida e ascoltando la sonorità che scaturisce dall'impatto. Risultati più oggettivi possono essere ottenuti con sistemi automatizzati.
- Prove ultrasoniche ad alta frequenza. Devono essere condotte impiegando metodologie in riflessione con frequenze non inferiori a 1.5 MHz e sonde con diametro non superiore a 25 mm, utilizzando la tecnica basata sulla variazione dell'ampiezza del primo picco per la localizzazione dei difetti.
- Prove termografiche. Risultano efficaci solamente in presenza di materiali di rinforzo caratterizzati da bassa conducibilità termica e non sono applicabili a rinforzi in carbonio o con fibre metalliche, a meno che non vengano utilizzati accorgimenti particolari che ne garantiscano una sensibilità adeguata. Occorre inoltre assicurare che il riscaldamento impartito nel corso della prova non danneggi il rinforzo con temperature troppo vicine a quella di transizione vetrosa.
- Prove in emissione acustica. La tecnica, basata sull'Emissione Acustica (EA), consente di cogliere e seguire il verificarsi e l'evolversi di un fenomeno di danno all'interno di

un elemento strutturale soggetto a carico, “ascoltando” e registrando i “rumori” generati dalla formazione di *cracks* o fenomeni di distacco, che si propagano nel mezzo come onde elastiche. Rientra tra i metodi di controllo e monitoraggio passivi, i quali si attivano in funzione delle condizioni presenti negli elementi strutturali in fase di esercizio. Tale tecnica risulta particolarmente idonea per rilevare difetti dell’applicazione del composito alla struttura di c.a. e per rilevare l’inizio del distacco dalla struttura medesima.

<b>Trasferimento di tensioni di taglio all’interfaccia</b>	<b>Esempio</b>	<b>Controllo non distruttivo</b>	<b>Maglia di mappatura superficiale</b>	<b>Risoluzione minima per lo spessore del difetto</b>
<b>Assente</b>	Fasciature, con eccezione della zona di sovrapposizione nel caso di realizzazioni a singolo strato	Facoltativo	250 mm	3 mm
<b>Debole</b>	Zona centrale di rinforzi piani molto estesi	Facoltativo	250 mm	3 mm
<b>Moderato o potenziale</b>	Zona centrale di rinforzi longitudinali a flessione	Consigliato	100 mm	0,5 mm
<b>Critico</b>	Zone di ancoraggio, zone di sovrapposizione tra gli strati, staffe di rinforzo a taglio, zone di interfaccia con i connettori, zone con vistose asperità o fessurazioni del substrato	Obbligatorio	50 mm	0,1 mm

**Tabella 5.1** – Risoluzione minima per lo spessore di difetti da identificare mediante prove non distruttive

#### 5.10.4 QUALIFICA DEGLI OPERATORI PER L’ESECUZIONE DELLE PROVE

I profili professionali degli operatori preposti alle prove devono corrispondere ai seguenti tre livelli di qualifica specificati in Tabella 5.2, in conformità con la normativa di riferimento UNI EN 473 e UNI EN 45013. La qualifica va anche regolata in accordo con la normativa UNI EN 45013 – “*Criteri generali riguardanti gli Organismi di Certificazione preposti alla certificazione del personale*”.

<b>Livello 1</b>	Regolare l'apparecchiatura; eseguire le prove; registrare e classificare i risultati in relazione a criteri scritti; stendere un resoconto sui risultati.
<b>Livello 2</b>	Scegliere la modalità operativa della prova da utilizzare; definire i limiti di applicazione della prova per la quale la persona di livello 2 è qualificata; comprendere le norme e le specifiche di prova e tradurle in istruzioni pratiche di prova adattate alle condizioni reali di lavoro; regolare e tarare le apparecchiature; effettuare e sorvegliare le prove; interpretare e valutare i risultati in funzione delle norme, dei codici o delle specifiche da rispettare; redigere le istruzioni scritte di prova per il livello 1; svolgere e sorvegliare tutti gli incarichi propri di un livello 1; addestrare o guidare il personale di livello inferiore al livello 2; organizzare i risultati di una prova e redigere il relativo rapporto.
<b>Livello 3</b>	Assumere l'intera responsabilità di un laboratorio di prova e del relativo personale; stabilire e convalidare le tecniche e le procedure di prova; interpretare le norme, i codici, le specifiche e le procedure; stabilire le prove specifiche e le procedure che è opportuno utilizzare; avere la competenza per valutare ed interpretare i risultati in relazione alle norme, ai codici ed alle specifiche esistenti; avere una sufficiente conoscenza pratica dei materiali, della fabbricazione e della tecnologia dei vari prodotti interessati al fine di poter scegliere i metodi, stabilire le tecniche e collaborare alla definizione di criteri di accettazione quando non ne esistano di prestabiliti; avere una conoscenza nei diversi campi di applicazione; avere la capacità di guidare il personale di livello inferiore al livello 3.

**Tabella 5.2** – Livelli di specializzazione per l'esecuzione di prove di monitoraggio e collaudo

### 5.10.5 MONITORAGGIO DELL'INTERVENTO DI RINFORZO

La disponibilità, relativamente modesta, di dati relativi al comportamento a lungo termine dei materiali compositi consiglia, in situazioni di particolare rilevanza (con riferimento alla destinazione d'uso dell'edificio e/o del manufatto sul quale si è intervenuti, al numero di elementi rinforzati e all'entità degli incrementi di resistenza conseguiti), un'adeguata attività di monitoraggio delle applicazioni mediante l'esecuzione periodica di prove non distruttive e semi-distruttive, o di prove mediante sensori incorporati. Scopo del monitoraggio è tenere sotto controllo i seguenti parametri o solo alcuni di essi:

- La temperatura del rinforzo;
- L'umidità dell'ambiente;
- L'andamento di spostamenti e deformazioni;
- La continuità e livello di danneggiamento delle fibre;
- Le estensioni di difetti e distacchi dell'applicazione.

## 5.11 PROCEDURA PER LA POSA IN OPERA

Viene di seguito riportata, a titolo esemplificativo, la descrizione di un intervento di posa in opera di rinforzi in FRP su struttura in calcestruzzo armato, osservato dal sottoscritto nel corso di un tirocinio formativo svolto all'esterno dell'ambito accademico. Le schede tecniche dei materiali utilizzati nell'esecuzione della lavorazione in oggetto sono riportati in Allegato 2.

### 5.11.1 CONFINAMENTO DI PILASTRO IN C.A.

Viene proposto l'esempio di un intervento di confinamento di un pilastro in c.a. a sezione circolare tramite posa in opera di fasce di FRP. La lavorazione viene realizzata seguendo un preciso schema procedurale:

1. La prima operazione consiste nella pulizia superficiale del calcestruzzo, mediante spicconatura, eseguita nelle zone degradate, allo scopo di ottenere superfici pulite in maniera da renderle prive di elementi estranei ed eliminare zone corticalmente poco resistenti di limitato spessore, ed ogni altro elemento che possa fungere da falso aggrappo ai successivi trattamenti.



**Figura 5.17** – Pulizia superficiale di calcestruzzo ammalorato

2. La pulizia della superficie viene completata tramite l'*idroscarifica*, con acqua ad alta pressione, atta ad evitare la formazione di una nuova ossidazione delle barre di armatura metallica.



**Figura 5.18** – Idroscarifica del calcestruzzo superficiale

3. Completata la scarifica del calcestruzzo, occorre realizzare il trattamento dei ferri d'armatura con prodotto passivante liquido con dispersione di polimeri di resine sintetiche legate a cemento, applicato a pennello in due strati, con intervallo di almeno 2 ore tra la prima e la seconda mano, allo scopo di inibirne la corrosione.



**Figura 5.19** – Trattamento ferri per inibizione alla corrosione



4. La posa in opera del rinforzo in FRP richiede una superficie di appoggio liscia e regolare, dunque occorre eseguire la riprofilatura dell'elemento strutturale, eseguita a mano, con applicazione di malta cementizia a ritiro controllato bicomponente direttamente a cazzuola o con frattazzo metallico, esercitando una buona pressione a compattazione del sottofondo.



**Figura 5.20** – Riprofilatura pilastro con malta cementizia bicomponente a ritiro controllato

5. Avvenuta la presa della malta bicomponente, si procede con la posa in opera del sistema di rinforzo: viene innanzitutto applicato uno strato di primer epossidico (in questo caso è stato utilizzato il MAPEWRAP PRIMER 1<sup>®</sup>) a rullo (Figura 5.21); sullo strato di primer ancora fresco viene stesa una mano di resina (MAPEWRAP 31 T<sup>®</sup>) di spessore uniforme, sulla quale viene immediatamente posata la fascia di rinforzo in fibra di carbonio unidirezionale (MAPEWRAP C UNI-AX 600<sup>®</sup>), che viene fatta aderire a mano e tramite apposito rullo (Figura 5.22). Sulla fascia in fibra di carbonio viene successivamente applicata una seconda mano di resina (MAPEWRAP 31 T<sup>®</sup>) di spessore uniforme e lisciata superficialmente tramite cazzuola e frattazzo.



**Figura 5.21** – Applicazione a rullo di primer epossidico



**Figura 5.22** – Posa in opera di tessuto di rinforzo unidirezionale

6. A seguito della presa del secondo strato di resina, si procede con le opere di finitura: la posa di intonaco e l'eventuale tinteggiatura.

# CONCLUSIONI

---

Il tema del recupero del patrimonio edilizio esistente è di grande attualità oramai da diversi anni, ma presenta una continua evoluzione, per le tante variabili che lo caratterizzano, dalla sensibilità nei confronti dei manufatti esistenti, tutelati o no, alle innovazioni continuamente proposte nel campo dei materiali e delle tecniche di intervento.

La ricerca è stata impostata focalizzando l'attenzione sul tema specifico dell'utilizzo di materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica, con particolare attenzione ai tipi ed agli aspetti tecnologici delle applicazioni, alle tipologie di prodotti in commercio ed alle problematiche che caratterizzano gli interventi sugli edifici preesistenti, con l'obiettivo di razionalizzare tutte le conoscenze nel campo, organizzandole in una sintesi che partendo dalla descrizione dei materiali e delle loro caratteristiche, ne analizza le più diffuse modalità applicative e le proprietà dei sistemi di rinforzo ottenuti.

Questa fase dello studio è stata condotta attraverso il reperimento di fonti bibliografiche, con l'analisi critica delle ricerche, casi di studio presenti in letteratura ed il confronto dei prodotti disponibili in commercio, con le loro particolari caratteristiche e campi di impiego. Allo studio teorico è stata affiancata una ricerca sul campo, basata su sopralluoghi in cantiere, effettuata al di fuori dell'ambito accademico, che ha offerto la possibilità di riscontrare gli effettivi problemi legati alla messa in opera dei materiali compositi.

Le conoscenze acquisite in questa fase sono state sistematizzate nella schedatura e nel confronto dei prodotti in commercio, nella schedatura di casi di studio ritenuti più interessanti e rappresentativi delle problematiche individuate e nella individuazione di modalità e raccomandazioni relative alle fasi operative degli interventi.

Da tutte le considerazioni fatte emerge come sia di fondamentale importanza portare avanti la ricerca sia da un punto di vista teorico,

verificando o migliorando i modelli disponibili in letteratura, sia da un punto di vista sperimentale, attraverso prove di laboratorio che possano fornire un riferimento per la calibrazione delle formule progettuali e consentano di evidenziare le problematiche che si possono riscontrare in fase di applicazione.

Il confronto presentato nelle prime fasi di sviluppo della tesi tra i materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) e quelli a matrice cementizia (FRCM) non è casuale. Infatti è giusto ricordare e fare presente che, seppure i sistemi di FRP rappresentino tuttora la soluzione maggiormente diffusa ed utilizzata nel campo del rinforzo e del consolidamento di edifici a struttura muraria o in calcestruzzo armato, i sistemi di rinforzo con FRCM hanno assunto negli ultimi tempi un'importanza di rilievo, grazie alla compatibilità fisico-chimica delle matrici a base cementizia con i supporti in muratura e in calcestruzzo armato.

Questo non sta a voler affermare la superiorità di una soluzione tecnologica rispetto all'altra, ma vuole semplicemente sottolineare ulteriormente la velocità con cui le tecniche che prevedono l'utilizzo di materiali compositi nel rinforzo strutturale si stiano imponendo all'interno del mercato dell'edilizia e la varietà di soluzioni differenti che questa tecnica costruttiva consente di mettere a disposizione di progettisti e costruttori.

Quello dei materiali compositi è un ambito estremamente ampio e vario e in perenne sviluppo, non ci sorprenderebbe vedere nuove tecnologie diventare obsolete in pochi anni a seguito di nuove scoperte e nuove innovazioni nel campo delle costruzioni, e gli utilizzi che se ne possono fare sono praticamente illimitati, basti pensare che già negli ultimi anni sono stati realizzati edifici la cui struttura è interamente composta di materiali compositi, che hanno quindi presto abbandonato il ruolo secondario di rinforzo di strutture esistenti, diventando veri e propri protagonisti dello sviluppo innovativo di opere edili e civili: basti

immaginare le forme e le architetture che è possibile ottenere con questi materiali innovativi estremamente modellabili.

## Bibliografia

---

- [1] Consiglio Nazionale delle Ricerche, "*CNR - DT 200/2004: Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati – Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie*";
- [2] Consiglio Nazionale delle Ricerche, "*CNR - DT 200 R1/2013: Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati – Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie*";
- [3] Consiglio Nazionale delle Ricerche, "*CNR DT 204/2006: Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo fibrorinforzato*";
- [4] Comitato 440 dell'ACI (American Concrete Institute International), "*Guida per il progetto e la costruzione di strutture in cemento armato rinforzate esternamente con sistemi in FRP*", 2002;
- [5] Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, "*Linee guida per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo di interventi di rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP*";
- [6] C. Poggi, G. Fava, "*Il controllo di accettazione di materiali fibrorinforzati per il rinforzo strutturale - COKIT: un sistema per la caratterizzazione di materiali composite per le costruzioni*", I quaderni tecnici di Assocompositi, Milano, 2006;
- [7] Tesi di Laurea di R. Pagani, "*Valutazione numerica e sperimentale della capacità portante di travi in calcestruzzo armato con rinforzi esterni in tessuto di carbonio*", Anno Accademico 2012 – 2013;
- [8] Tesi di Laurea di V. Alvaro, "*Materiali compositi a matrice cementizia per i rinforzi strutturali*", Anno Accademico 2006 – 2007;

- [9] Tesi di Dottorato di P. Spiezia, “*I materiali compositi fibrorinforzati nel recupero degli edifici storici*”, 2005;
- [10] Tesi di Laurea di E. Gazzola, “*Aderenza tra compositi FRCM e calcestruzzo: prove di taglio diretto*”, Anno Accademico 2014 – 2015;
- [11] R. Capozucca, “*Brickwork masonry walls reinforced by CFRP*”, 2001;
- [12] R. Capozucca, M. N. Cerri, “*Static and dynamic behaviour of RC beam model strengthened by CFRP-sheets*”, 2002;
- [13] R. Capozucca, M. N. Cerri, “*Modello di volta in laterizio rinforzata con CFRP*”, 2002;
- [14] R. Capozucca, V. Pascucci, “*Shear behaviour of masonry panels strengthened by CFRP*”, 2004;
- [15] R. Capozucca, “*Analysis of historic masonry shear walls strengthened by composite material*”, 2004, A. A. Balkema Publishers;
- [16] R. Capozucca, V. Pascucci, “*T-shape cross walls strengthened by CFRP-sheets under combined compression and shear loading*”, 2006;
- [17] R. Capozucca, M. Ponzano, “*CFRP sheets bonded to historical masonry shear wall*”, 2008;
- [18] R. Capozucca, “*Experimental FRP/SRP-historic masonry delamination*”, 2010;
- [19] R. Capozucca, “*Experimental analysis of historic masonry walls reinforced by CFRP under in-plane cyclic loading*”, 2011;
- [20] R. Capozucca, V. Maccioni, “*Changes in the Dynamic Behaviour of Carbon Fibre Reinforced Polymer Elements with Increasing Damage*”, 2013, Trans. Tech. Publication;
- [21] R. Capozucca, “*Experimental strengthening for historic masonry walls by FRP/SRG*”, 2014;



- [22] R. Capozucca, S. Bossoletti, “*Changes in the dynamic behaviour of strengthened RC beams with NSM CFRP strips*”, 2014;
- [23] R. Capozucca, S. Bossoletti, E. Magagnini, “*Vibration of RC beams with NSM CFRP rectangular rods in different restrains conditions*”, 2016, Società Editrice Esculapio;
- [24] S. Katir, B. Brahim, R. Capozucca, M. A. Wahab, “*Damage detection in CFRP composite beams based on vibration analysis using proper orthogonal decomposition method with radial basis function and Cuckoo Search algorithm*”, 2018
- [25] R. Capozucca, E. Magagnini, M. V. Vecchietti, “*Experimental vibration analysis of damaged RC beams and strengthened with FRP*”, 2018;
- [26] R. Capozucca, E. Grande, G. Milani, “*Fiber reinforced polymer strengthened masonry: delamination, experimental and numerical issues, Part III, Chapter 15*”, 2019, Elsevier;
- [27] R. Capozucca, E. Magagnini, M. V. Vecchietti, “*Delamination Buckling of FRP: Experimental Tests and Theoretical Model*”, 2020;
- [28] M. A. Aiello, M. Leone, L. Ombres, “*Cracking analysis of fibre-reinforced polymer reinforced concrete tension members*”, Structure & Building, 2004;
- [29] C. Badini, “*Materiali compositi per l’ingegneria*”, 2013, CELID.



# **Allegato 1**

## APPENDICE 1 SCHEDE TECNICHE PROPOSTE NEL DOCUMENTO CNR DT200

Vengono riportati i modelli di schede dei componenti e dei compositi proposte nel documento CNR DT200.

### SCHEDE TECNICHE: FILATO

il produttore deve riportare i valori statistici necessari per la valutazione delle resistenze caratteristiche (ad esempio media, scarto quadratico medio, popolazione, frattile, intervallo di confidenza).

#### Descrizione filato

Nome commerciale, tipo di filato, ritorcitura, finissaggi, ed ogni altra informazione generale ritenuta utile.

#### Condizioni di Stoccaggio

Temperatura, tempo, umidità ed ogni altra informazione generale ritenuta utile.

#### Precauzioni d'uso e sicurezza

Manipolazione, protezione individuale, smaltimento ed ogni altra informazione generale ritenuta utile.

### CARATTERISTICHE DEL FILATO

Proprietà	Unità di misura	Metodo di prova normativa di riferimento
diametro fibra	µm	
densità fibra	g/cm <sup>3</sup>	
numero filamenti		
titolo	Tex	ISO1889:1997(E)
tipo di finissaggio (size)		
contenuto di finissaggio	%	ISO1887:1995(E) ISO10548:2002(E)
modulo di elasticità normale	GPa	ISO10618:1999(E)
resistenza a trazione (valore medio e caratteristico)	MPa	ISO10618:1999(E)
deformazione a rottura	%	ISO10618:1999(E)
contenuto di umidità	%	ISO3344:1997(E)

### SCHEDE TECNICHE: ADESIVO

il produttore deve riportare i valori statistici necessari per la valutazione delle resistenze caratteristiche (ad esempio media, scarto quadratico medio, popolazione, frattile, intervallo di confidenza).

#### Descrizione dell'adesivo

Nome commerciale, mono o bicomponente, pasta o liquida, tipologia di utilizzo, ed ogni altra informazione generale ritenuta utile.

#### Condizioni di Stoccaggio

Temperatura, tempo, umidità ed ogni altra informazione generale ritenuta utile.

#### Precauzioni d'uso e sicurezza

Manipolazione, protezione individuale, smaltimento ed ogni altra informazione generale ritenuta utile.

### PROPRIETÀ ADESIVE DELLA RESINA

Proprietà	Unità di misura	Temp. di prova	Valore		Metodo di prova normativa di riferimento
			5 gg. a 22 °C	1 ora a 70 °C	
resistenza a taglio (valore medio e caratteristico)	MPa				single lap shear ISO 4587:2003(E)
resistenza a peeling (valore medio e caratteristico)	kN/m				floating-roller method ISO 4578:1997(E)

N.B. per il rinforzo esterno con lamine/nastri di FRP è in preparazione una norma ISO (TC71/SC6N): "Non-conventional reinforcement of concrete - Test methods-Part 2: Fiber reinforced polymer (FRP) sheets" in cui vengono proposte due prove per valutare l'adesione sul calcestruzzo: "Test Method for direct pull-off strength of FRP sheets with concrete" e "Test Method for bond properties of FRP sheets to concrete". Un'analoga prova di pull-off, "Test method for direct tension pull-off test", è proposta anche dal documento ACI 440.3R-04 "Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures" dell'American Concrete Institute.

Per l'adesione sull'acciaio tali norme non propongono prove specifiche. Esiste però un'analoga normativa Giapponese (JSCE-E544-2000 in "Test methods for continuous fiber sheets") che propone anche un test di lap shear strength tra FRP e acciaio. I documenti citati prevedono inoltre una prova di resistenza a taglio dell'adesivo basata sul lap shear test.

## SCHEDA TECNICA: RESINA

### Descrizione resina

Nome commerciale, mono o bicomponente, pasta o liquida, tipologia di utilizzo ed ogni altra informazione generale ritenuta utile.

### CARATTERISTICHE DELLA RESINA NON MISCELATA

Proprietà	Unità di misura	Comp. A	Comp. B	Miscela	Metodo di prova normativa di riferimento
colore					
viscosità a 25 °C <sup>(1)</sup>	Pa·s				ISO 2555:1989(E) ISO 3219:1993(E)
indice di tissotropia <sup>(1)</sup>					ASTM D2196-99
densità	g/cm <sup>3</sup>				ISO 1675:1985(E)
rapporto di miscelazione	in volume in peso	% %			
condizioni di stoccaggio (contenitore sigillato)	tempo temperatura	mesi °C			

<sup>(1)</sup> Per resine non tissotropiche si può usare il viscosimetro Garner (solo misura di viscosità); per resine tissotropiche è necessario usare il viscosimetro Brookfield.

### CARATTERISTICHE DELLA RESINA MISCELATA

#### Condizioni di miscelazione:

Temperature limite, tipo di mescolamento ed ogni altra informazione generale ritenuta utile.

#### Condizioni di applicazione:

Strumenti, modalità ed ogni altra informazione generale ritenuta utile.

Proprietà	Unità di misura	Temp. di prova	Metodo di prova normativa di riferimento
tempo di lavorabilità (a 35 °C) <sup>(2)</sup>			ISO 10364:1993(E)
tempo di gelo <sup>(3)</sup>	a 5 °C	min	ISO 9396:1997(E) ISO 2535:2001(E) ISO 15040:1999(E)
	a 20 °C		
	a 35 °C		
temperatura minima di applicazione		°C	
picco esotermico	tempo	min	ISO 12114:1997(E)
	temperatura	°C	
tempo di completa reticolazione ( <i>full cure</i> )	a 5 °C	min	ISO 12114:1997(E)
	a 20 °C		
	a 35 °C		

<sup>(2)</sup> Tempo di lavorabilità (*pot life* o *working life*) = tempo massimo di lavorabilità dopo la miscelazione dei reagenti.

<sup>(3)</sup> Tempo di gelo (*gel time*) = tempo necessario affinché, dopo la miscelazione dei reagenti, il prodotto passi dallo stato liquido a quello di gel in condizioni di temperatura prestabilite.

### PROPRIETÀ DELLA RESINA RETICOLATA

Proprietà	Unità di misura	Temp. di prova	Valore		Metodo di prova normativa di riferimento
			stagionato 5 gg. a 22 °C	stagionato 1 ora a 70 °C	
ritiro volumetrico		---			ISO 12114:1997(E)
coefficiente di dilatazione termica	10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	---			ISO 11359-2:1999(E)
temperatura di transizione vetrosa, T <sub>g</sub>	°C	---			ISO 11357-2:1999(E) (DSC) ISO 11359-2:1999(E) (TMA) ASTM E1640 (DMA)
modulo di elasticità normale a trazione	GPa				ISO 527:1993(E)
resistenza a trazione	MPa				ISO 527:1993(E)
deformazione a rottura	%				ISO 527:1993(E)

#### Condizioni di Stoccaggio

Temperatura, tempo, umidità ed ogni altra informazione generale ritenuta utile.

#### Precauzioni d'uso e sicurezza

Manipolazione, protezione individuale, smaltimento ed ogni altra informazione generale ritenuta utile.

## SCHEDA TECNICA: COMPOSITI PREFORMATI

(lamine, barre per armatura ordinaria, cavi di precompressione)

il produttore deve riportare i valori statistici necessari per la valutazione delle resistenze caratteristiche (ad esempio media, scarto quadratico medio, popolazione, frattile, intervallo di confidenza).

### Descrizione

Nome commerciale, tipo di fibra, tipo di resina, tecnologia di produzione (pultrusione, laminazione, ecc.), marchiatura ed ogni altra informazione generale ritenuta utile.

### CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E FISICHE

Proprietà		Unità di misura	Metodo di prova normativa di riferimento
spessore (lamina)		mm	
larghezza		mm	
lunghezza		mm	
geometria della sezione (barre, cavi)			
area nominale (barre, cavi)		mm <sup>2</sup>	
perimetro nominale (barre, cavi) <sup>(1)</sup>		mm	
colore			
densità <sup>(2)</sup>	fibra	g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183-1:2004(E)
	matrice	g/cm <sup>3</sup>	
contenuto di fibra	in peso	%	ISO 11667:1997(E)
	in volume	%	
temperatura di transizione vetrosa della resina (T <sub>g</sub> )		°C	ISO 11357-2:1999(E) (DSC) ISO 11359-2:1999(E) (TMA) ASTM E1640 (DMA)
temperatura limite massima di utilizzo		°C	
conduttività elettrica		S/m	

<sup>(1)</sup> Valore utile nel caso di barre e cavi di sezione non circolare per il calcolo della lunghezza di ancoraggio.

<sup>(2)</sup> Valore utile per il calcolo della frazione in peso di fibra quando è nota quella in volume o viceversa.

<sup>(3)</sup> La ISO 899-1:2003(E) è la normativa di riferimento generale per la determinazione del comportamento a creep di materiali polimerici rinforzati (compositi) o non, mentre per le barre per armatura ed i cavi di precompressione è in preparazione una norma ISO (TC71/SC6N): "Non-conventional reinforcement of concrete - Test methods-Part 1: Fiber reinforced polymer (FRP) bars and grids" in cui è proposta una prova specifica per le barre di FRP ("Test Method for creep failure"). In alternativa esiste una prova proposta nel documento ACI 440.3R-04 "Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures" dal titolo: "Test Method for creep rupture of FRP bars"

<sup>(4)</sup> Nella norma ISO (TC71/SC6N) riguardante barre e cavi di FRP sono proposte le due seguenti prove: "Test method for bond strength by pull-out testing" per l'aderenza e "Test Method for long-term relaxation" per il rilassamento. Prove analoghe sono previste dal documento ACI 440.3R-04

### PROPRIETÀ

Proprietà	Unità di misura	Metodo di prova normativa di riferimento
modulo di elasticità normale a trazione	GPa	ISO 527-4,5:1997(E)
resistenza a trazione (valore medio e caratteristico)	MPa	ISO 527-4,5:1997(E)
deformazione a rottura a trazione	%	ISO 527-4,5:1997(E)
modulo di elasticità normale a compressione (barre)	GPa	ISO 14126:1999(E)
resistenza a compressione (barre) (valore medio e caratteristico)	MPa	ISO 14126:1999(E)
deformazione a rottura per compressione (barre)	%	ISO 14126:1999(E)
resistenza a creep <sup>(3)</sup>		ISO 899-1:2003(E)
rilassamento (barre, cavi) <sup>(4)</sup>		
aderenza: tensione tangenziale (barre, cavi) <sup>(4)</sup>		prova di pull-out

### Condizioni di Stoccaggio

Temperatura, tempo, umidità ed ogni altra informazione generale ritenuta utile.

### Precauzioni d'uso e sicurezza

Manipolazione, protezione individuale, smaltimento ed ogni altra informazione generale ritenuta utile.

### Indicazioni sull'utilizzo del prodotto in un sistema di rinforzo

Il produttore può fornire indicazioni relative ad altri prodotti da abbinare al composito preformato per la realizzazione del sistema di rinforzo quali, ad esempio, gli adesivi, eventuali rivestimenti protettivi, primer, putty, ecc. Tali informazioni devono essere corredate da risultati di prove di compatibilità eseguite sul sistema completo.

## **Allegato 2**



# MapeWrap Primer 1

**Primer epossidico  
specifico per il  
sistema MapeWrap**



#### **CAMPI DI APPLICAZIONE**

Preparazione delle superfici di elementi in calcestruzzo, calcestruzzo armato o murature, propedeutica all'incollaggio dei tessuti **MapeWrap**.

#### **CARATTERISTICHE TECNICHE**

**MapeWrap Primer 1** è un prodotto a base di resine epossidiche, esente da solventi, costituito da due componenti predosati (che devono essere miscelati tra di loro prima dell'uso), secondo una formula sviluppata nei laboratori di ricerca MAPEI.

Dopo la miscelazione **MapeWrap Primer 1** assume la consistenza di un liquido a bassa viscosità, facilmente applicabile anche in verticale, molto adatto per il consolidamento e la primerizzazione dei supporti.

#### **AVVISI IMPORTANTI**

- **MapeWrap Primer 1** non deve essere usato per riprese di getto tra calcestruzzo fresco e calcestruzzo vecchio (usare **Eporip**).
- **MapeWrap Primer 1** non deve essere usato su superfici bagnate.
- **MapeWrap Primer 1** non deve essere usato su superfici sporche o friabili.

#### **MODALITÀ DI APPLICAZIONE**

##### **Preparazione del sottofondo**

La superficie su cui applicare **MapeWrap Primer 1** deve essere perfettamente pulita, asciutta e meccanicamente resistente.

Dalle strutture non danneggiate eliminare, mediante sabbiatura, residui di olio disarmante, vernici o pitture e lattime di cemento.

Nel caso, invece, il calcestruzzo fosse degradato, rimuovere le parti ammalorate mediante martellatura manuale o pneumatica oppure attraverso idroscarifica.

Pulire le armature metalliche da eventuali tracce di ruggine e quindi proteggerle con **Mapefer**, malta cementizia anticorrosiva bicomponente o **Mapefer 1K**, malta cementizia anticorrosiva monocomponente (per l'applicazione seguire la procedura descritta nelle relative schede tecniche dei prodotti).

Ripristinare le superfici in calcestruzzo con i prodotti della linea **Mapegrout**.

Attendere almeno tre settimane prima di procedere alla posa in opera di **MapeWrap Primer 1**.

Nel caso in cui l'intervento di rinforzo dovesse essere eseguito immediatamente, impiegare per la riparazione **Adesilex PG1** o **Adesilex PG2**.

Sigillare eventuali fessurazioni presenti nella struttura mediante iniezioni con **Epojet** (adatto se le fessure sono asciutte o leggermente umide) oppure con **Foamjet T** o **Foamjet F** (adatti se le fessure sono umide e con infiltrazioni d'acqua).

Tutti gli spigoli vivi presenti negli elementi in calcestruzzo (es. travi e pilastri) da fasciare con **MapeWrap**, prima di applicare **MapeWrap Primer 1**,





# MapeWrap Primer 1



Preparazione del supporto



Applicazione della 1ª mano di MapeWrap Primer 1



Applicazione della 2ª mano di MapeWrap Primer 1

DATI TECNICI (valori tipici)		
DATI IDENTIFICATIVI DEL PRODOTTO		
	Componente A	Componente B
Consistenza:	liquido	liquido
Colore:	giallo trasparente	giallo trasparente
Massa volumica (g/cm <sup>3</sup> ):	1,12	1
Viscosità Brookfield (mPa·s):	350 (rotore 1 - giri 5)	50 (rotore 1 - giri 5)
DATI APPLICATIVI		
Rapporto di miscelazione:	componente A : componente B = 3 : 1	
Consistenza dell'impasto:	liquido	
Colore dell'impasto:	giallo trasparente	
Massa volumica dell'impasto (g/cm <sup>3</sup> ):	1,1	
Viscosità Brookfield (mPa·s):	300 (rotore 1 - giri 10)	
Tempo di lavorabilità:	120'	
- a +10°C:	90'	
- a +23°C:	60'	
- a +30°C:		
Tempo di presa:	5-6 h	
- a +10°C:	3-4 h	
- a +23°C:	2-3 h	
- a +30°C:		
Temperatura di applicazione:	da +10°C a +30°C	
Indurimento completo:	7 gg	
Adesione al calcestruzzo (N/mm <sup>2</sup> ):	> 3 (dopo 7 gg a +23°C - rottura del calcestruzzo)	

devono essere smussati mediante l'impiego di un martelletto demolitore oppure attraverso l'ausilio di altra idonea attrezzatura. È consigliabile che il raggio di curvatura non sia inferiore a 2 cm.

#### Preparazione dell'impasto

I due componenti di cui è composto **MapeWrap Primer 1** devono essere miscelati tra loro. Versare il componente B nel componente A e mescolare a basso numero di giri, con trapano munito di agitatore fino a completa omogeneizzazione della resina.

Rapporto di miscelazione: 3 parti in peso di componente A e 1 parte in peso di componente B.

Per non incorrere in accidentali errori di dosaggio impiegare l'intera confezione; nel caso le confezioni debbano essere impiegate parzialmente utilizzare una bilancia elettronica di precisione.

#### Applicazione dell'impasto

**MapeWrap Primer 1** può essere applicato su calcestruzzo con rullo o pennello.

Generalmente l'impregnazione viene effettuata in una sola mano; nel caso il supporto sia fortemente assorbente, applicare una seconda mano, dopo che la prima sia stata assorbita completamente.

Dopo la preparazione **MapeWrap Primer 1** ha un tempo di lavorabilità di circa 90 minuti a +23°C. **MapeWrap Primer 1** deve essere applicato entro il tempo di vita utile. È opportuno organizzare il lavoro in modo tale da poter utilizzare completamente la confezione di prodotto entro questo periodo.

#### Norme da osservare prima della messa in opera

Nessun accorgimento particolare deve essere preso con temperatura compresa tra +10°C e +30°C. Nella stagione calda è opportuno non esporre il materiale al sole ed eseguire l'intervento di primerizzazione nelle ore più fresche della giornata.

Nei periodi invernali, in caso di interventi esterni con temperatura inferiore a +10°C si raccomanda, prima di utilizzare **MapeWrap Primer 1**, di riscaldare il sottofondo nelle 24 ore precedenti l'intervento e di predisporre

adeguati sistemi isolanti al fine di scongiurare un eventuale pericolo di gelo. Immagazzinare, inoltre, il prodotto prima dell'utilizzo in ambiente riscaldato.

#### **Pulizia**

A causa dell'elevata adesione di **MapeWrap Primer 1** anche su metallo si consiglia di lavare gli attrezzi da lavoro con solventi (alcol etilico, toluolo, ecc.) prima dell'indurimento del prodotto.

#### **CONSUMI**

250-300 g/m<sup>2</sup>.

#### **CONFEZIONI**

Unità da kg 2 (componente A = kg 1,5 componente B = kg 0,5).

#### **IMMAGAZZINAGGIO**

Il prodotto si conserva 24 mesi negli imballi originali in ambienti con temperatura non inferiore a +5°C.

#### **ISTRUZIONI DI SICUREZZA PER LA PREPARAZIONE E LA MESSA IN OPERA**

**MapeWrap Primer 1** parte A è irritante per la pelle e gli occhi, sia la parte A che la parte B possono causare sensibilizzazione a contatto con la pelle in soggetti predisposti.

**MapeWrap Primer 1** parte B è corrosivo e può causare ustioni. Il prodotto contiene resine epossidiche a basso peso molecolare che possono causare sensibilizzazione incrociata con altri composti epossidici. Durante l'uso indossare guanti e occhiali protettivi ed utilizzare le consuete precauzioni per la manipolazione dei prodotti chimici. In caso di contatto con gli occhi o la pelle lavare immediatamente e abbondantemente con acqua e consultare il medico. Quando il materiale reagisce sviluppa un elevato calore: dopo miscelazione tra il componente A ed il componente B si raccomanda di applicare il prodotto quanto prima e di non lasciare il contenitore incustodito fino al completo svuotamento.

**MapeWrap Primer 1** parte A e parte B sono pericolosi per l'ambiente acquatico, non disperdere il prodotto nell'ambiente. Per ulteriori e complete informazioni riguardo l'utilizzo sicuro del prodotto si raccomanda di consultare l'ultima versione della Scheda Dati Sicurezza.

PRODOTTO PER USO PROFESSIONALE.

#### **AVVERTENZA**

*Le informazioni e le prescrizioni sopra riportate, pur corrispondendo alla nostra migliore esperienza, sono da ritenersi, in ogni caso, puramente indicative e dovranno essere confermate da esaurienti applicazioni pratiche; pertanto, prima di adoperare il prodotto, chi intenda farne uso è tenuto a stabilire se esso sia o meno adatto all'impiego previsto e, comunque, si assume ogni responsabilità che possa derivare dal suo uso.*

Fare sempre riferimento all'ultima versione aggiornata della scheda tecnica, disponibile sul sito [www.mapei.com](http://www.mapei.com)

#### **INFORMATIVA LEGALE**

*I contenuti della presente Scheda Tecnica possono essere riprodotti in altro documento progettuale, ma il documento così risultante non potrà in alcun modo sostituire o integrare la Scheda Tecnica in vigore al momento dell'applicazione del prodotto MAPEI.*

*La Scheda Tecnica più aggiornata è disponibile sul nostro sito [www.mapei.com](http://www.mapei.com).*

**QUALSIASI ALTERAZIONE DEL TESTO O DELLE CONDIZIONI PRESENTI IN QUESTA SCHEDA TECNICA O DA ESSA DERIVANTI ESCLUDE LA RESPONSABILITÀ DI MAPEI.**

**Le referenze relative a questo prodotto sono disponibili su richiesta e sul sito Mapei [www.mapei.it](http://www.mapei.it) e [www.mapei.com](http://www.mapei.com)**

# MapeWrap Primer 1



## VOCE DI PRODOTTO

Applicazione, a rullo o a pennello, di una mano (oppure di due mani se il supporto risulta fortemente assorbente) di primer bicomponente a base di resine epossidiche, esente da solventi (tipo **MapeWrap Primer 1** della MAPEI S.p.A.), atto a consolidare le superfici in calcestruzzo, calcestruzzo armato o muratura prima dell'applicazione di tessuti **MapeWrap**. La superficie sulla quale dovrà essere applicato **MapeWrap Primer 1** dovrà risultare perfettamente pulita, asciutta e meccanicamente resistente. Rimuovere, quindi, mediante spazzolatura o sabbiatura, i residui di olio disarmante, vernici, pitture, lattime di cemento, tracce di ruggine e quant'altro possa inficiare l'adesione del primer epossidico.

Il prodotto consolidante dovrà avere le seguenti caratteristiche peculiari:

Rapporto di miscelazione:	componente A : componente B = 3 : 1
Massa volumica dell'impasto (g/cm <sup>3</sup> ):	1,1
Viscosità Brookfield (mPa·s):	300 (rotore 1 - giri 10)
Tempo di lavorabilità:	90' (a +23°C)
Tempo di presa:	3-4 h (a +23°C)
Indurimento completo:	7 gg
Adesione al calcestruzzo (N/mm <sup>2</sup> ):	> 3 (dopo 7 gg a +23°C - rottura del calcestruzzo)
Consumo (g/m <sup>2</sup> ):	250-300

La riproduzione di testi, foto e illustrazioni di questa pubblicazione è vietata e viene perseguita ai sensi di legge

1005-8-2019 (I)



IL PARTNER MONDIALE DEI COSTRUTTORI



# MapeWrap 31 T

## Adesivo epossidico tissotropico per l'impregnazione con "sistema a secco" dei tessuti MapeWrap

### CAMPI DI APPLICAZIONE

**MapeWrap 31 T** viene utilizzato per impregnare i tessuti **MapeWrap**, quando la riparazione o il rinforzo degli elementi in calcestruzzo, in cemento armato o muratura viene effettuato in opera con il "sistema a secco".

### CARATTERISTICHE TECNICHE

**MapeWrap 31 T** è un adesivo a base di resine epossidiche, di consistenza tissotropica, esente da solventi, appositamente formulato nei laboratori di Ricerca & Sviluppo MAPEI per effettuare l'impregnazione in opera con il "sistema a secco" dei tessuti **MapeWrap**.

**MapeWrap 31 T** è costituito da due componenti predosati (componente A = resina e componente B = induritore) che devono essere miscelati tra loro prima dell'uso. Dopo la miscelazione **MapeWrap 31 T** rimane lavorabile per circa 50 minuti a +23°C. Ad indurimento avvenuto **MapeWrap 31 T** acquisisce ottime proprietà dielettriche ed elevate resistenze meccaniche.

**MapeWrap 31 T** risponde ai principi definiti nella 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") ai requisiti minimi richiesti dalla EN 1504-4 ("Incollaggio strutturale").

### AVVISI IMPORTANTI

- Non utilizzare **MapeWrap 31 T** quando comincia la reazione di indurimento.

### MODALITÀ DI APPLICAZIONE

#### Preparazione di MapeWrap 31 T

I due componenti di cui è composto **MapeWrap 31 T** devono essere miscelati tra loro. Versare il componente B nel componente A e mescolare a basso numero di giri, con trapano dotato di agitatore, fino ad ottenere la completa omogeneizzazione del prodotto. Rapporto di miscelazione: 4 parti in peso di componente A e 1 parte in peso di componente B. Per non incorrere in accidentali errori di dosaggio utilizzare l'intera confezione; nel caso le confezioni debbano essere impiegate parzialmente, effettuare la miscelazione dei due componenti impiegando una bilancia elettronica di precisione.

#### Applicazione di MapeWrap 31 T e posa in opera dei tessuti MapeWrap

Applicare in spessore uniforme una prima mano di **MapeWrap 31 T** a spatola liscia, porre in opera immediatamente il tessuto **MapeWrap**, avendo cura di stenderlo con le mani, protette da guanti impermeabili di gomma, senza lasciare alcuna grinzia, e pressarlo più volte utilizzando un rullo di gomma rigida o di metallo (**Rullino per MapeWrap**) per permettere all'adesivo di penetrare completamente attraverso le fibre del tessuto.

Applicare sui tessuti **MapeWrap** una seconda mano di **MapeWrap 31 T**.

DATI TECNICI (valori tipici)		
<b>DATI IDENTIFICATIVI DEL PRODOTTO</b>		
	<b>componente A</b>	<b>componente B</b>
Consistenza:	pasta	pasta
Colore:	giallo scuro	giallo chiaro
Peso specifico (g/cm <sup>3</sup> ):	1,34	1,25
Viscosità Brookfield (mPa·s):	200.000 (rotore 6 - giri 5)	20.000 (rotore 5 - giri 10)
<b>DATI APPLICATIVI (dopo 7 gg a +23°C - 50% U.R.)</b>		
Rapporto di miscelazione:	componente A : componente B = 4 : 1	
Consistenza dell'impasto:	pasta tissotropica	
Colore dell'impasto:	giallo	
Peso specifico dell'impasto (g/cm <sup>3</sup> ):	1,30	
Viscosità Brookfield (mPa·s):	70.000 (rotore 6 - giri 10)	
Tempo di lavorabilità: - a +23°C:	50 min.	
Tempo di presa: - a +23°C:	4 h	
Temperatura di applicazione:	da +5°C a +30°C	
<b>PRESTAZIONI FINALI</b>		
Adesione al calcestruzzo (N/mm <sup>2</sup> ):	> 3 (dopo 7 gg - rottura del calcestruzzo)	
Resistenza a trazione* (ASTM D 638) (N/mm <sup>2</sup> ):	≥ 20	
Allungamento a trazione* (ASTM D 638) (%): - dopo 28 gg:	1,0	
Resistenza a compressione (ASTM D 695) (N/mm <sup>2</sup> ):	≥ 70	
Resistenza a flessione* (ISO 178) (N/mm <sup>2</sup> ):	≥ 25	

\* Valori ottenuti da prove effettuate su 5 campioni (+23°C (+73°F) - 50% U.R.)

Per eliminare eventuali bolle d'aria occluse durante le precedenti lavorazioni, ripassare sul tessuto impregnato il **Rullino per MapeWrap**.

#### **NORME DA OSSERVARE PRIMA DELLA MESSA IN OPERA**

Nessun accorgimento particolare deve essere preso con temperatura compresa tra +5°C e +30°C.

Nella stagione calda è opportuno non esporre il materiale al sole ed eseguire l'intervento di incollaggio nelle ore più fresche della giornata.

Nei periodi invernali, nel caso si debbano eseguire interventi esterni con temperatura inferiore a +5°C si raccomanda, prima di procedere alla riparazione o al rinforzo con i tessuti **MapeWrap**, di riscaldare il sottofondo almeno 24 ore prima di eseguire l'incollaggio e di predisporre adeguati sistemi isolanti al fine di scongiurare un eventuale pericolo di gelo. L'isolamento termico deve essere mantenuto almeno per le 24 ore successive. Immagazzinare, inoltre, il prodotto in ambiente riscaldato, prima di utilizzarlo.

#### **Pulizia**

A causa dell'elevata adesione di **MapeWrap 31 T** si consiglia di lavare gli attrezzi da lavoro con solventi (alcool etilico, toluolo, ecc.) prima dell'indurimento del prodotto.

#### **CONSUMI**

Il consumo del prodotto varia in funzione del tipo di tessuto (unidirezionale, bidirezionale e quadriassiale) e dell'altezza:

<b>MapeWrap C (tessuti in CARBONIO)</b>			
Tipo di tessuto	Consumo (g/m <sup>2</sup> )	Altezza (cm)	Consumo (g/m)
UNI-AX 300 o UNI-AX HM 300	1400-1600	10	140-160
		20	280-320
		40	560-640
UNI-AX 600 o UNI-AX HM 600	1680-1920	10	168-192
		20	336-384
		40	672-768
BI-AX 230	1300-1500	20	260-300
		40	520-600
BI-AX 360	1560-1800	20	312-360
		40	624-720
QUADRI-AX 380	1400-1600	30	420-480
		48,5	679-776

#### **CONFEZIONI**

Unità da 5 kg (componente A = 4 kg - componente B = 1 kg).

#### **IMMAGAZZINAGGIO**

Il prodotto si conserva 24 mesi negli imballi originali e in ambienti con temperatura non inferiore a +5°C.

#### **ISTRUZIONI DI SICUREZZA PER LA PREPARAZIONE E LA MESSA IN OPERA**

**MapeWrap 31 T** parte A è irritante per la pelle e gli occhi, sia la parte A che la parte B possono causare sensibilizzazione a contatto con la pelle in soggetti predisposti.

**MapeWrap 31 T** parte B è corrosivo e può causare ustioni. Il prodotto contiene resine epossidiche a basso peso molecolare che possono causare sensibilizzazione incrociata con altri composti epossidici.

Durante l'uso, indossare guanti ed occhiali protettivi ed utilizzare le consuete precauzioni per la manipolazione dei prodotti chimici. In caso di contatto con gli occhi o la pelle lavare immediatamente ed abbondantemente con acqua e consultare il medico. Quando il materiale reagisce sviluppa un elevato calore: dopo miscelazione tra componente A ed il componente B si raccomanda di applicare il prodotto quanto prima e di non lasciare il contenitore incustodito fino al completo svuotamento.

**MapeWrap 31 T** parte A e parte B sono pericolosi per l'ambiente acquatico, non disperdere il prodotto nell'ambiente.

Per ulteriori e complete informazioni riguardo l'utilizzo sicuro del prodotto si raccomanda di consultare l'ultima versione della Scheda Dati di Sicurezza.

USO RISTRETTO AGLI UTILIZZATORI PROFESSIONALI.

#### **AVVERTENZA**

*Le informazioni e le prescrizioni sopra riportate, pur corrispondendo alla nostra migliore esperienza, sono da ritenersi, in ogni caso, puramente indicative e dovranno essere confermate da esaurienti applicazioni pratiche; pertanto, prima di adoperare il prodotto, chi intenda farne uso è tenuto a stabilire se esso sia o meno adatto all'impiego previsto e, comunque, si assume ogni responsabilità che possa derivare dal suo uso.*

Fare sempre riferimento all'ultima versione aggiornata della scheda tecnica, disponibile sul sito [www.mapei.com](http://www.mapei.com)

#### **INFORMATIVA LEGALE**

*I contenuti della presente Scheda Tecnica possono essere riprodotti in altro documento progettuale, ma il documento così risultante non potrà in alcun modo sostituire o integrare la Scheda Tecnica in vigore al momento dell'applicazione del prodotto MAPEI.*

*La Scheda Tecnica più aggiornata è disponibile sul nostro sito [www.mapei.com](http://www.mapei.com).  
QUALSIASI ALTERAZIONE DEL TESTO O DELLE CONDIZIONI PRESENTI IN QUESTA SCHEDA TECNICA O DA ESSA DERIVANTI ESCLUDE LA RESPONSABILITÀ DI MAPEI.*

**Le referenze relative a questo prodotto sono disponibili su richiesta e sul sito Mapei [www.mapei.it](http://www.mapei.it) e [www.mapei.com](http://www.mapei.com)**

# MapeWrap 31 T



## VOCE DI PRODOTTO

Applicazione in spessore uniforme, a spatola liscia, di adesivo epossidico di media viscosità (tipo **MapeWrap 31 T** della MAPEI S.p.A.) per l'impregnazione, in opera, dei tessuti **MapeWrap**. Il posizionamento dei tessuti **MapeWrap** deve essere effettuato immediatamente dopo aver applicato **MapeWrap 31 T**, avendo cura di stenderli senza lasciare alcuna grinza. Dopo aver spianato il tessuto, procedere all'applicazione di una seconda mano di **MapeWrap 31 T**. Il prodotto deve rispondere ai requisiti minimi richiesti dalla EN 1504-4.

Il prodotto impregnante dovrà avere le seguenti caratteristiche peculiari:

Rapporto di miscelazione:	componente A : componente B = 4 : 1
Massa volumica dell'impasto (g/cm <sup>3</sup> ):	1,30
Viscosità Brookfield (mPa·s):	70.000 (rotore 6 - giri 10)
Tempo di lavorabilità:	50' (a +23°C)
Tempo di presa:	4 h (a +23°C)
Adesione al calcestruzzo (N/mm <sup>2</sup> ):	> 3 (dopo 7 gg a +23°C - rottura del calcestruzzo)
Resistenza a trazione (N/mm <sup>2</sup> ):	≥ 20 (ASTM D 638)
Allungamento a trazione (%):	1,0 (ASTM D 638)
Resistenza a compressione (N/mm <sup>2</sup> ):	≥ 70 (ASTM D 695)
Resistenza a flessione (N/mm <sup>2</sup> ):	≥ 25 (ISO 178)

La riproduzione di testi, foto e illustrazioni di questa pubblicazione è vietata e viene perseguita ai sensi di legge

1036-9-2019 (I)



IL PARTNER MONDIALE DEI COSTRUTTORI

# MapeWrap C UNI-AX System



**SISTEMA DI RINFORZO STRUTTURALE COMPOSTO DA TESSUTO UNIDIREZIONALE IN FIBRA DI CARBONIO AD ALTA RESISTENZA CON ELEVATO MODULO ELASTICO E RESINE EPOSSIDICHE DI IMPREGNAZIONE E INCOLLAGGIO (FRP)**

**COPERTO DA CERTIFICATO DI IDONEITÀ TECNICA ALL'IMPIEGO (CIT) N°2467/2018 CLASSE 210C**

## **PRODOTTI COMPONENTI IL SISTEMA:**

**MapeWrap C UNI-AX 300 - MapeWrap C UNI-AX 300 W -  
MapeWrap C UNI-AX 600 - MapeWrap C UNI-AX 600 W  
MapeWrap 31  
MapeWrap 11 - MapeWrap 12  
MapeWrap Primer 1**

### **CAMPI DI APPLICAZIONE**

Il sistema è indicato per la riparazione e il rinforzo strutturale di elementi in calcestruzzo armato, muratura, acciaio e legno sottodimensionati o danneggiati, per il rinforzo a flessione, a taglio, per il confinamento a compressione e il rinforzo a pressoflessione di elementi in calcestruzzo e muratura e per l'adeguamento o il miglioramento sismico di strutture poste in zone a rischio, per migliorare le caratteristiche dei nodi travi-pilastro e per aumentare la duttilità degli elementi confinati.

### **Alcuni esempi di applicazione**

- Ripristino, adeguamento statico e sismico di strutture dissestate o degradate, laddove è indispensabile integrare la sezione resistente a trazione e taglio.
- Confinamento di elementi compressi o pressoinflessi (pilastri, pile da ponte, ciminieri) per migliorarne la capacità portante o la duttilità.
- Restauro ed adeguamento sismico di strutture ad arco e voltate senza aumento di massa e senza pericolo di percolamento di liquidi sulla superficie intradosale.
- Riparazione di strutture danneggiate dall'incendio.
- Rinforzo di elementi portanti in edifici il cui sistema strutturale viene modificato a causa di nuove esigenze architettoniche o di utilizzo (cambio di destinazione d'uso).
- Adeguamento sismico di edifici industriali in c.a.

Il sistema è coperto da Certificato di Idoneità Tecnica all'impiego (CIT) n°2467/2018 (che sostituisce il precedente n°288/2017) rilasciato dalla 2° Div. di STC del CSLP.

Il sistema è inoltre coperto da certificazione ESR-3499 rilasciata dall'Istituto statunitense ICC-ES (International Code Council Evaluation Service) che ne ha valutato le prestazioni meccaniche e la durabilità sotto diversi

condizionamenti ambientali e tramite test su elementi rinforzati in scala reale.

### **CARATTERISTICHE TECNICHE MAPEWRAP C UNI-AX SYSTEM**

è composto dall'abbinamento di un tessuto in fibra di carbonio **MAPEWRAP C UNI-AX 300 / MAPEWRAP C UNI-AX 300 W** o **MAPEWRAP C UNI-AX 600 / MAPEWRAP C UNI-AX 600 W** e da un sistema di leganti epossidici comprendente una resina epossidica per l'impregnazione e l'incollaggio **MAPEWRAP 31**, uno stucco epossidico per la regolarizzazione e l'incollaggio **MAPEWRAP 11** o **MAPEWRAP 12** e un primer epossidico consolidante del supporto **MAPEWRAP PRIMER 1**. **MAPEWRAP C UNI-AX 300 / MAPEWRAP C UNI-AX 300 W** sono tessuti unidirezionali a 0° del peso di 300 g/m<sup>2</sup> composti da fibra di carbonio ad alta resistenza in ordito e da un filo di vetro termoplastico senza funzioni strutturali in trama, caratterizzati da elevata resistenza a trazione ed elevato modulo elastico, disponibili in diverse larghezze.

**MAPEWRAP C UNI-AX 600 / MAPEWRAP C UNI-AX 600 W** sono tessuti unidirezionali a 0° del peso di 600 g/m<sup>2</sup> composti da fibra di carbonio ad alta resistenza in ordito e da un filo di vetro termoplastico senza funzioni strutturali in trama, caratterizzati da elevata resistenza a trazione ed elevato modulo elastico, disponibili in diverse larghezze.

**MAPEWRAP 31** è un adesivo epossidico di media viscosità per l'impregnazione dei tessuti **MAPEWRAP**, costituito da:

- un componente A (resina);
- un componente B catalizzatore (induritore).

**MAPEWRAP 11 / MAPEWRAP 12** sono stucchi epossidici a consistenza tissotropica per la regolarizzazione delle superfici e l'incollaggio strutturale, costituiti da:

- un componente A (resina);

- un componente B catalizzatore (induritore).

**MAPEWRAP PRIMER 1** è un primer epossidico per la preparazione delle superfici di elementi in calcestruzzo, cemento armato o murature, propedeutica all'incollaggio dei tessuti **MAPEWRAP**, costituito da:

- un componente A;
- un componente B.

**MAPEWRAP 31, MAPEWRAP 11 e MAPEWRAP 12** rispondono ai principi definiti nella 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") ed ai requisiti minimi richiesti dalla EN 1504-4 ("Incollaggio strutturale").

### **VANTAGGI**

A differenza degli interventi basati sulle tecniche tradizionali, **MAPEWRAP C UNI-AX SYSTEM**, grazie alla estrema leggerezza dei tessuti, può essere messo in opera impiegando un minor numero di operatori. L'applicazione viene eseguita in tempi estremamente brevi e spesso senza che sia necessario interrompere l'esercizio della struttura.

Rispetto alla tecnica di placcaggio con piastre metalliche (beton plaque), l'utilizzo di **MAPEWRAP C UNI-AX SYSTEM** consente di adattarsi a qualsiasi forma dell'elemento da riparare, non necessita di sostegni provvisori durante la posa in opera ed elimina tutti i rischi connessi con la corrosione del rinforzo applicato.

### **AVVISI IMPORTANTI**

Dotare gli operatori di guanti, maschera per solventi, occhiali protettivi.

### **MODALITÀ DI APPLICAZIONE Preparazione del sottofondo**

La superficie su cui applicare **MAPEWRAP C UNI-AX SYSTEM** deve essere perfettamente pulita, asciutta e





# MapeWrap C UNI-AX System

meccanicamente resistente.  
Per strutture in muratura: prima dell'applicazione dei tessuti, è necessario rimuovere le parti friabili, incoerenti o in fase di distacco, e successivamente procedere alla eventuale regolarizzazione delle superfici, mediante applicazione di uno strato di **PLANITOP HDM** o **PLANITOP HDM MAXI**.  
Per strutture in legno: se necessario ripristinare gli elementi lignei tramite l'applicazione degli adesivi della linea **MAPEWOOD**.

Per strutture in calcestruzzo non degradato: è necessario eliminare, mediante sabbatura, residui di olio disarmante, vernici o pitture e lattime di cemento.  
Per strutture in calcestruzzo degradato: rimuovere le parti ammalorate mediante martellatura manuale o pneumatica o attraverso idroscarifica.  
Pulire le armature metalliche da eventuali tracce di ruggine e quindi proteggerle con **MAPEFER**, malta cementizia anticorrosiva bicomponente o **MAPEFER 1K**, malta cementizia anticorrosiva monocomponente.

Ripristinare le superfici in calcestruzzo con le malte della linea **MAPEGROUT**.  
Attendere almeno tre settimane prima di procedere alla posa in opera di **MAPEWRAP C UNI-AX SYSTEM**.

Nel caso in cui l'intervento di rinforzo di strutture in calcestruzzo dovesse essere eseguito immediatamente, impiegare per la riparazione **ADESILEX PG1**, **ADESILEX PG2**.

Sigillare eventuali fessurazioni presenti nella struttura mediante iniezioni con **EPOJET** (adatto se le fessure sono asciutte o leggermente umide) oppure con **FOAMJET T** o **FOAMJET F** (adatti se le fessure sono umide e con infiltrazioni d'acqua).

Per l'applicazione di tutti i prodotti summenzionati si vedano le relative schede tecniche.

Tutti gli spigoli vivi presenti negli elementi in calcestruzzo o muratura da fasciare con **MAPEWRAP C UNI-AX SYSTEM** (es. travi e pilastri) devono essere smussati mediante l'impiego di un martello demolitore oppure di altra idonea attrezzatura. È consigliabile che il raggio di curvatura non sia inferiore a 2 cm (in accordo a quanto riportato nel CNR-DT 200 R1/2013).

## Procedura di posa di MAPEWRAP C UNI-AX SYSTEM

Fasi operative

1. Preparazione di **MAPEWRAP PRIMER 1**.
2. Applicazione di **MAPEWRAP PRIMER 1**.
3. Preparazione di **MAPEWRAP 11** o **MAPEWRAP 12**.
4. Applicazione di **MAPEWRAP 11** o **MAPEWRAP 12**.
5. Preparazione di **MAPEWRAP 31**.
6. Applicazione della prima mano di **MAPEWRAP 31**.

## 7. Posa in opera dei tessuti MAPEWRAP C UNI-AX.

### 1. Preparazione di MAPEWRAP PRIMER 1

I due componenti di cui è composto **MAPEWRAP PRIMER 1** devono essere miscelati tra loro. Versare il componente B nel componente A e mescolare con trapano munito di agitatore fino a completa omogeneizzazione della resina fluida. Rapporto di miscelazione: 3 parti in peso di componente A e 1 parte in peso di componente B. Per non incorrere in accidentali errori di dosaggio impiegare l'intera confezione; nel caso le confezioni debbano essere impiegate parzialmente utilizzare una bilancia elettronica di precisione (questa procedura dovrà essere adottata anche per i prodotti successivi). Dopo la preparazione **MAPEWRAP PRIMER 1** ha un tempo di lavorabilità di circa 90 minuti a +23°C

### 2. Applicazione di MAPEWRAP PRIMER 1

Sulla superficie in calcestruzzo o muratura, pulita ed asciutta, stendere a pennello o a rullo, una mano omogenea di **MAPEWRAP PRIMER 1**.  
Nel caso il supporto sia fortemente assorbente, applicare una seconda mano di **MAPEWRAP PRIMER 1**, dopo che la prima sia stata assorbita completamente. Effettuare la successiva rasatura di regolarizzazione con **MAPEWRAP 11** o **MAPEWRAP 12** sul prodotto sottostante ancora "fresco".

### 3. Preparazione di MAPEWRAP 11 o MAPEWRAP 12

A seconda della temperatura e dei tempi di lavorabilità, scegliere **MAPEWRAP 11** o **MAPEWRAP 12** (**MAPEWRAP 12** ha tempi di lavorabilità maggiori rispetto a **MAPEWRAP 11**). Versare il componente B nel componente A e miscelare, a basso numero di giri, con trapano munito di agitatore fino ad ottenere un impasto di colore grigio uniforme. Rapporto di miscelazione per entrambi i prodotti: 3 parti in peso di componente A e 1 parte in peso di componente B. Alla temperatura di +23°C, dopo la miscelazione, **MAPEWRAP 11** rimane lavorabile per circa 40 minuti mentre **MAPEWRAP 12** per circa 60 minuti. **MAPEWRAP 11** è particolarmente indicato per applicazioni con temperatura compresa tra +5°C e +23°C, mentre **MAPEWRAP 12** è consigliato per temperature più elevate.

### 4. Applicazione di MAPEWRAP 11 o MAPEWRAP 12

Sulla superficie in calcestruzzo o muratura, precedentemente trattata con **MAPEWRAP PRIMER 1** e con il prodotto ancora "fresco", applicare, con una spatola dentata, uno strato di circa 1 mm di spessore di **MAPEWRAP 11** o **MAPEWRAP 12** e, successivamente, con una spatola piana, lisciare la superficie allo scopo di eliminare completamente anche le più piccole irregolarità presenti sul supporto. Effettuare, inoltre, con lo stesso prodotto, il riempimento e l'arrotondamento degli angoli in modo tale da creare una sguscia con raggio di curvatura non inferiore ai 2 cm.

## 5. Preparazione di MAPEWRAP 31

Versare il componente B nel componente A e miscelare, a basso numero di giri, con trapano munito di agitatore fino ad ottenere un impasto di colore giallo uniforme.

Rapporto di miscelazione: 4 parti in peso di componente A e 1 parte in peso di componente B. Dopo la miscelazione il prodotto rimane lavorabile per circa 40 minuti a +23°C.

### 6. Applicazione della prima mano di MAPEWRAP 31

Stendere in modo uniforme, a pennello o a rullo a pelo lungo, su **MAPEWRAP 11** o **MAPEWRAP 12** ancora "freschi", un primo strato di circa 0,5 mm di spessore di **MAPEWRAP 31**.

### 7. Posa in opera di MAPEWRAP C UNI-AX

Sullo strato di **MAPEWRAP 31** ancora "fresco", porre in opera immediatamente il tessuto **MAPEWRAP C UNI-AX** avendo cura di stenderlo senza lasciare alcuna grinza.

Dopo averlo spianato bene con le mani, protette da guanti impermeabili di gomma, applicare sui tessuti **MAPEWRAP C UNI-AX** una seconda mano di **MAPEWRAP 31** e quindi pressarlo più volte utilizzando il **RULLINO PER MAPEWRAP** per permettere all'adesivo di penetrare completamente attraverso le fibre del tessuto. Per eliminare eventuali bolle d'aria occluse durante le precedenti lavorazioni, ripassare sul tessuto impregnato il **RULLINO PER MAPEWRAP**.

Procedere quindi, sulla resina ancora fresca, allo spaglio di sabbia di quarzo a rifiuto asciutta con granulometria compresa tra 1,2 e 1,9 mm.

(Per maggiori dettagli sulle caratteristiche tecniche delle singole resine epossidiche impiegate nel sistema di rinforzo **MAPEWRAP C UNI-AX SYSTEM** si vedano le relative schede tecniche di prodotto).

### Giunzioni

Negli interventi di fasciatura di pilastri, la parte terminale della striscia di **MAPEWRAP C UNI-AX** deve essere sormontata alla "testa" dello stesso tessuto per almeno 20 cm.  
La stessa procedura deve essere rispettata quando si devono congiungere più strisce, nella direzione longitudinale. Il sormonto, per una ragione pratica di allineamento, deve essere di circa 5 cm nella direzione della larghezza del tessuto. Dopo la posa e la pressatura con l'apposito rullino, i tessuti **MAPEWRAP C UNI-AX** non devono essere più mossi.

### Procedura per l'applicazione a "fresco" (entro le 24 ore) di più strati di MAPEWRAP C UNI-AX

Applicazione del primo strato di **MAPEWRAP 31**, posa in opera del primo strato di **MAPEWRAP C UNI-AX** e stesura del secondo strato di **MAPEWRAP 31**. Posa in opera del secondo strato di **MAPEWRAP C UNI-AX** e stesura del seguente strato di **MAPEWRAP 31**, procedendo in tale modo per tutti gli strati necessari. Per

sfruttare al meglio le caratteristiche meccaniche di **MAPEWRAP C UNI-AX** si consiglia di non applicarne più di tre strati.

**Nota:** nel caso l'applicazione di più strati di tessuto venga effettuata dopo le 24 ore è necessario ravvivare, mediante carteggiatura, lo strato di resina precedente già indurito.

#### FINITURA E RIVESTIMENTO PROTETTIVO

La finitura può essere eseguita, dopo completo indurimento dei prodotti epossidici impiegati (circa 1-2 giorni a +23°C), tramite una rasatura cementizia a tessitura civile fine come **PLANITOP 200** o **PLANITOP 210** (si vedano le relative schede tecniche).  
In ambiente esterno è necessario proteggere l'intervento applicando, dopo l'indurimento completo dei sistemi epossidici impiegati, **MAPELASTIC**, malta cementizia elastica bicomponente. Il prodotto crea un'efficiente barriera contro i raggi U.V., perciò il suo impiego è particolarmente consigliato quando le strutture sono esposte alla luce solare. Ai fini della protezione al fuoco del sistema è possibile utilizzare pannelli, generalmente a base di calciosilicati, o intonaci intumescenti, così come indicato al punto 4.8.2.3 del CNR DT 200 R1/2013.

#### NORME DA OSSERVARE DURANTE E DOPO LA POSA

- La temperatura durante la posa non dovrà essere inferiore a +5°C ed, inoltre, la struttura dovrà essere protetta dalla pioggia e dall'eventuale polvere trasportata dal vento.
- Dopo aver effettuato l'intervento mantenere le superfici trattate ad una temperatura superiore a +5°C.
- Proteggere le superfici dalla pioggia per almeno 24 ore se la temperatura minima non scende al di sotto di +15°C e per almeno 3 giorni se la temperatura dovesse essere inferiore.

#### Pulizia

A causa dell'elevata adesione dei sistemi epossidici descritti, si consiglia di

lavare gli attrezzi di lavoro con solvente (alcol etilico, toluolo ecc.) prima dell'indurimento dei prodotti.

#### CONFEZIONAMENTO E IMMAGAZZINAGGIO

Il prodotto **MAPEWRAP C UNI-AX** è confezionato in scatole di cartone contenenti ciascuna 1 rotolo da 50 m. Il prodotto **MAPEWRAP 31** è fornito in kit da 5 kg composti da un fustino da 4 kg (componente A) e un fustino da 1 kg (componente B).

Il prodotto accessorio **MAPEWRAP 11** o **MAPEWRAP 12** è fornito in kit da 6 kg composti da un fustino da 4,5 kg (componente A) e un fustino da 1,5 kg (componente B).  
Tutti i prodotti componenti il sistema devono essere conservati in luogo coperto e asciutto.

#### NOTE

Tutte le disposizioni inerenti la sicurezza e la manipolazione dei prodotti, sono riportate sulle schede di sicurezza dei

singoli materiali che compongono il ciclo. Si consiglia comunque agli utilizzatori di indossare guanti ed occhiali protettivi durante la miscelazione e l'applicazione dei prodotti.

#### AVVERTENZA

Le informazioni e le prescrizioni sopra riportate, pur corrispondendo alla nostra migliore esperienza, sono da ritenersi, in ogni caso, puramente indicative e dovranno essere confermate da esaurienti applicazioni pratiche; pertanto, prima di adoperare il prodotto, chi intenda farne uso è tenuto a stabilire se esso sia o meno adatto all'impiego previsto e, comunque, si assume ogni responsabilità che possa derivare dal suo uso.

**Fare sempre riferimento all'ultima versione aggiornata della scheda tecnica, disponibile sul sito [www.mapei.com](http://www.mapei.com)**

PRODOTTI PER USO PROFESSIONALE.



Applicazione di MapeWrap Primer 1



Rasatura con MapeWrap 11 o MapeWrap 12



Prima mano di MapeWrap 31



Applicazione del tessuto MapeWrap C UNI-AX impregnato con MapeWrap 31



Pilastro confinato con MapeWrap C UNI-AX System

**VOCE DI SISTEMA**

Riparazione e rinforzo strutturale di elementi in calcestruzzo armato, muratura, acciaio e legno sottodimensionati o danneggiati, rinforzo a flessione, a taglio, confinamento a compressione e rinforzo a pressoflessione di elementi in calcestruzzo e muratura; adeguamento o miglioramento sismico di strutture poste in zone a rischio, miglioramento delle caratteristiche dei nodi travi-pilastro e aumento della duttilità degli elementi confinati mediante l'impiego di sistema di rinforzo tipo **MAPEWRAP C UNI-AX SYSTEM** della MAPEI S.p.A., composto da tessuti unidirezionali in fibre di carbonio caratterizzati da elevato modulo elastico e da alte resistenze meccaniche a trazione **MAPEWRAP C UNI-AX** posti in opera rispettando la seguente procedura:

- applicazione di primer **MAPEWRAP PRIMER 1**;
- regolarizzazione del supporto con **MAPEWRAP 11** o **MAPEWRAP 12**;
- impregnazione del tessuto in opera con **MAPEWRAP 31**.

A seconda del tipo d'intervento sarà possibile scegliere un tessuto con una grammatura di 300 o 600 g/m<sup>2</sup>, con larghezze standard di 10, 20 e 40 cm o altre larghezze disponibili su richiesta.

Il sistema, applicato in accordo al Certificato di Idoneità Tecnica all'impiego CIT n°2467/2018 rilasciato dalla 2° Div. di STC del CSLP, deve avere le seguenti caratteristiche:

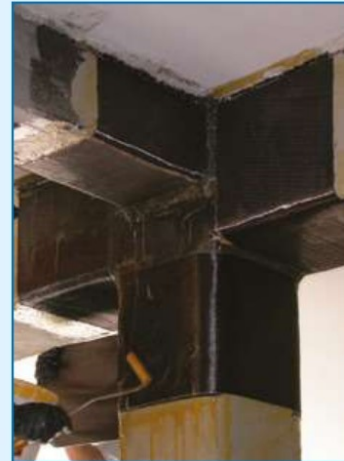
Classe di appartenenza secondo LG di cui al DPCS LL.PP. n. 220 del 9.7.2015: 210C

**proprietà del tessuto secco:**

Grammatura (g/m <sup>2</sup> ):	300	600
Spessore equivalente di tessuto secco (mm):	0,164	0,337
Area resistente per unità di larghezza (mm <sup>2</sup> /m):	164,3	331,4
Resistenza meccanica a trazione tessuto secco (N/mm <sup>2</sup> ):	≥ 4.900	≥ 4.900
Carico massimo per unità di larghezza (kN/m):	> 800	> 1.600
Modulo elastico a trazione (N/mm <sup>2</sup> ):	252.000 ± 2%	252.000 ± 2%
Allungamento a rottura (%):	≥ 2	≥ 2

**proprietà del sistema:**

Modulo elastico del laminato riferita all'area netta fibre valore medio 1 strato E <sub>r</sub> (MPa)	230.000	250.000
Resistenza del laminato riferita all'area netta fibre valore caratteristico 1 strato f <sub>ib,k</sub> (MPa)	3.800	3.500
Deformazione a rottura ε <sub>ib</sub> (%)	1,60	1,40
Adesione al calcestruzzo (N/mm <sup>2</sup> ):	≥ 3	(rottura del supporto)



**Confinamento nodo trave-pilastro con MapeWrap C UNI-AX System**



**Rinforzo nodi e pilastri con MapeWrap C UNI-AX System**



**Rinforzo a flessione travetti solaio latero-cemento con MapeWrap C UNI-AX System**



**Rinforzo cupola in muratura con MapeWrap C UNI-AX System**



**Rinforzo ciminiera in muratura con MapeWrap C UNI-AX System**



**Microfotografia di un composito strutturale a matrice polimerica dal Laboratorio di Ricerca e Sviluppo MAPEI**

# MapeWrap C UNI-AX System

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E FISICHE			
Proprietà	Metodo di prova normativa di riferimento	MAPEWRAP C UNI-AX 300/300 W	MAPEWRAP C UNI-AX 600/600 W
Tipo di fibra	–	carbonio ad alta resistenza	
Aspetto	–	tessuto unidirezionale	
Densità delle fibre $\rho_{fb}$ (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM D 4018	1,80-1,84	1,78-1,81
Massa del tessuto per unità di area $p_x$ (g/m <sup>2</sup> )	–	300	600
Densità della resina $\rho_m$ (g/cm <sup>3</sup> )	ISO 1675	1,06	1,06
Area equivalente tessuto secco $A_{rt}$ (mm <sup>2</sup> /m)	–	164,3	337,08
Spessore equivalente tessuto secco $t_{eq}$ (mm)	–	0,164	0,337
Frazione in peso delle fibre nel composito (%)	ASTM D 3171	40-50	
Frazione in volume delle fibre nel composito (%)	ASTM D 3171	40-50	
Temperatura di transizione vetrosa della resina di impregnazione $T_{g,im}$ (°C)	ISO 11357-2:2013(E) DSC <sup>(1)</sup>	65	
Temperatura di transizione vetrosa dello stucco opzionale di regolarizzazione $T_{g,re}$ (°C)	ISO 11357-2:2013(E) DSC <sup>(1)</sup>	71	
Temperature limiti, minima e massima, di utilizzo (°C) <sup>(2)</sup>	ACI 440.2R-08	Da -20 a +50 <sup>(3)</sup>	
Reazione al fuoco	ASTM E 84	Classe A <sup>(4)</sup>	
Resistenza al fuoco	–	NPD	

Note:

(1) Su provini stagionati 7 gg a +23°C.

(2) Valori riferiti alla temperatura della resina e non alla temperatura dell'ambiente circostante.

(3) La temperatura massima di utilizzo può essere considerata pari alla temperatura di transizione vetrosa dell'adesivo ridotta di 15°C, così come da CNR-DT 200 R1/2013 rif. ACI 440.2R-08.

Attenzione: tale assunzione è estremamente cautelativa in quanto l'ACI citato si riferisce a valori di Tg determinati mediante DMA (Analisi Meccanica Dinamica), metodo che fornisce valori superiori di 15-20°C rispetto al metodo DSC (Calorimetria Differenziale a Scansione) qui utilizzato in accordo alla normativa europea.

(4) Prestazione calcolata come da norma ASTM E 84 "Standard test method for surface burning characteristics of building materials", con tipica finitura di almeno 10 mm di malta cementizia, secondo la scala di prestazione decrescente: classe A – B – C.

PROPRIETÀ MECCANICHE TESSUTO SECCO		
Proprietà	MAPEWRAP C UNI-AX 300/300 W	MAPEWRAP C UNI-AX 600/600 W
Resistenza meccanica a trazione tessuto secco (N/mm <sup>2</sup> )	≥ 4.900	≥ 4.900
Carico massimo per unità di larghezza tessuto secco (kN/m)	> 800	> 1.600
Modulo elastico a trazione tessuto secco (N/mm <sup>2</sup> )	252.000 ± 2%	252.000 ± 2%
Deformazione a rottura tessuto secco (%)	≥ 2	≥ 2

PROPRIETÀ MECCANICHE MAPEWRAP C UNI-AX SYSTEM IN ACCORDO A CIT n°2467/2018					
Classe di appartenenza secondo LG di cui al DPCS LL.PP. n. 220 del 9.7.2015					210C
Modulo elastico del laminato riferita all'area netta fibre (GPa)				Valore tabellare	210
Resistenza del laminato riferita all'area netta fibre (MPa)				Valore tabellare	2.700
Proprietà	Metodo di prova normativa di riferimento	MAPEWRAP C UNI-AX 300/300 W		MAPEWRAP C UNI-AX 600/600 W	
		per n.1 strato di tessuto	per n.3 strati di tessuto	per n.1 strato di tessuto	per n.3 strati di tessuto
Modulo elastico del laminato riferita all'area netta fibre valore medio $E_f$ (GPa)	UNI EN 2561	230	225	250	230
Resistenza del laminato riferita all'area netta fibre valore caratteristico $f_{fb,k}$ (MPa)		3.800	3.400	3.500	3.000
Deformazione a rottura $\epsilon_{fb}$ (%)		1,60	1,50	1,40	1,30
Adesione al calcestruzzo (N/mm <sup>2</sup> )		> 3 (rottura del supporto)			

PROPRIETÀ MECCANICHE MAPEWRAP C UNI-AX SYSTEM IN ACCORDO A ESR-3499 ICC-ES					
	MAPEWRAP C UNI-AX 300		MAPEWRAP C UNI-AX 600		
PROPRIETÀ	Valore medio	Valore di progetto <sup>1</sup>	Valore medio	Valore di progetto <sup>1</sup>	Metodo di prova
Resistenza a trazione* (MPa)	1.637	1.492	1.630	1.450	D-3039
Modulo elastico a trazione* (MPa)	83.848	83.848	81.876	81.876	D-3039
Allungamento a rottura* (%)	2	1,7	2	1,76	D-3039
Spessore nominale del tessuto* (mm)	0,500	0,500	1	1	-
Adesione al calcestruzzo (N/mm <sup>2</sup> ):	> 3 (rottura del supporto)				

\* valori ottenuti da prove effettuate su 20 campioni in accordo alla normativa americana ACI 440. Test realizzati in accordo alla ASTM D3039.

<sup>1</sup> valore medio meno 3 volte lo scarto quadratico medio in accordo alla normativa americana ACI 440.2R (par. 4.3.1).

CONFEZIONI - I tessuti di MapeWrap C UNI-AX sono disponibili in rotoli da 50 m imballati in scatole di cartone, con le seguenti denominazioni:

	Grammatura (g/m <sup>2</sup> )	Altezza (cm)	Superficie (m <sup>2</sup> /m)	Superficie (m <sup>2</sup> /rotolo)
MapeWrap C UNI-AX 300/10	300	10	0,1	5
MapeWrap C UNI-AX 300/20	300	20	0,2	10
MapeWrap C UNI-AX 300/40	300	40	0,4	20
MapeWrap C UNI-AX 600/10	600	10	0,1	5
MapeWrap C UNI-AX 600/20	600	20	0,2	10
MapeWrap C UNI-AX 600/40	600	40	0,4	20

#### CONSUMI DEI SISTEMI EPOSSIDICI

Primerizzazione, regolarizzazione e rasatura delle superfici

	Consumo (g/m <sup>2</sup> )
MapeWrap Primer 1	250-300
MapeWrap 11 o MapeWrap 12	1500-1600

Impregnazione di MapeWrap C UNI-AX

	Grammatura (g/m <sup>2</sup> )	Consumo (g/m <sup>2</sup> )	Altezza (cm)	Consumo (g/m)
MapeWrap 31	300	1.000-1.100	10	100-110
			20	200-220
			40	400-440
	600	1.500-1.550	10	150-155
			20	300-310
			40	600-620



6130-5-2018 (I)