

**CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE**

**Istruzioni  
per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo  
di Interventi di Consolidamento Statico  
mediante l'utilizzo di  
Compositi Fibrorinforzati**

**Materiali, strutture in c.a. e in c.a.p., strutture murarie**



**VERSIONE SOTTOPOSTA AD INCHIESTA PUBBLICA**

**CNR-DT 200/2004**



## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA</b> .....	<b>1</b>
1.1	CONTENUTO E SCOPO DELLE ISTRUZIONI.....	3
1.2	SIMBOLOGIA.....	4
<b>2</b>	<b>MATERIALI</b> .....	<b>7</b>
2.1	INTRODUZIONE.....	7
2.2	LE CARATTERISTICHE DEI COMPOSITI E DEI LORO COMPONENTI.....	7
2.2.1	Principali fibre per compositi.....	10
2.2.1.1	Tipologie di fibre disponibili in commercio e classificazione.....	10
2.2.1.2	Fibre di vetro.....	12
2.2.1.3	Fibre di carbonio.....	14
2.2.1.4	Fibre aramidiche.....	14
2.2.1.5	Altre tipologie di fibre.....	15
2.2.1.6	Caratteristiche tecniche del filato.....	17
2.2.2	Tessuti non impregnati.....	18
2.2.2.1	Caratteristiche tecniche dei tessuti non impregnati.....	19
2.2.3	Matrici.....	20
2.2.3.1	Resine epossidiche.....	21
2.2.3.2	Resine poliestere.....	21
2.2.3.3	Altre tipologie di resine.....	22
2.2.3.4	Scheda tecnica della resina.....	23
2.2.4	Adesivi e principi generali di incollaggio.....	24
2.2.4.1	Scheda tecnica dell'adesivo.....	27
2.3	SISTEMI DI RINFORZO.....	28
2.3.1	Sistemi preformati.....	28
2.3.2	Sistemi impregnati <i>in situ</i> .....	29
2.3.3	Sistemi preimpregnati.....	31
2.3.4	Classificazione.....	31
2.4	QUALIFICAZIONE DEI MATERIALI.....	32
2.4.1	Fase A: Proprietà fisico-meccaniche.....	33
2.4.2	Fase B: Proprietà a lungo termine.....	35
2.5	ACCETTAZIONE.....	36
2.6	TRASPORTO, STOCCAGGIO E MOVIMENTAZIONE.....	37
<b>3</b>	<b>CONCETTI BASILARI DEL PROGETTO DI RINFORZO E PROBLEMATICHE SPECIALI</b> .....	<b>39</b>
3.1	REQUISITI FONDAMENTALI.....	39
3.2	VITA UTILE DELLA STRUTTURA RINFORZATA.....	39
3.3	REQUISITI DI DURABILITÀ.....	40
3.4	PRINCIPI GENERALI DEL PROGETTO DI RINFORZO.....	40
3.4.1	Generalità.....	40
3.4.2	Azioni di calcolo.....	41
3.4.3	Proprietà dei materiali.....	41
3.4.4	Capacità resistente di calcolo.....	42
3.5	COEFFICIENTI PARZIALI.....	42
3.5.1	Coefficienti parziali $\gamma_m$ per i materiali ed i prodotti.....	42
3.5.2	Coefficienti parziali $\gamma_{Rd}$ per i modelli di resistenza.....	42
3.6	PROBLEMI SPECIALI DI PROGETTO E RELATIVI FATTORI DI CONVERSIONE.....	43
3.6.1	Azioni ambientali e fattore di conversione ambientale $\eta_a$ .....	43

3.6.2	Modalità di carico e fattore di conversione per effetti di lunga durata $\eta_1$ .....	44
3.6.3	Resistenza alle azioni causate da impatto ed esplosione .....	45
3.7	LIMITI DEL RINFORZO NEL CASO DI ESPOSIZIONE AL FUOCO.....	45
<b>4</b>	<b>RINFORZO DI STRUTTURE IN C.A. E IN C.A.P.....</b>	<b>47</b>
4.1	MODALITÀ DI ROTTURA DI ELEMENTI RINFORZATI CON FRP E VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA NEI RIGUARDI DELLA DELAMINAZIONE.....	47
4.1.1	Meccanismi di rottura per delaminazione .....	47
4.1.2	Modellazione del legame di aderenza tra rinforzo e calcestruzzo.....	50
4.1.3	Resistenza alla delaminazione allo stato limite ultimo dalle estremità del rinforzo (Modalità 1).....	52
4.1.4	Resistenza alla delaminazione allo stato limite ultimo in corrispondenza di fessure da flessione (Modalità 2).....	53
4.1.5	Verifica delle tensioni di interfaccia allo stato limite di servizio .....	53
4.2	RINFORZO A FLESSIONE.....	55
4.2.1	Generalità .....	55
4.2.2	Analisi del comportamento agli stati limite ultimi .....	56
4.2.2.1	Generalità .....	56
4.2.2.2	Stato della struttura all'atto del rinforzo.....	56
4.2.2.3	Valutazione del momento resistente .....	57
4.2.2.4	Collasso per delaminazione.....	59
4.2.3	Analisi del comportamento agli stati limite di servizio.....	60
4.2.3.1	Basi del calcolo .....	60
4.2.3.2	Verifica delle tensioni .....	61
4.2.3.3	Verifica delle frecce .....	62
4.2.3.4	Verifica dell'apertura delle fessure .....	62
4.2.4	Duttilità.....	63
4.3	RINFORZO A TAGLIO .....	63
4.3.1	Generalità .....	63
4.3.2	Configurazioni per il rinforzo a taglio.....	63
4.3.3	Resistenza di calcolo a taglio dell'elemento rinforzato con FRP.....	63
4.3.3.1	Resistenza di calcolo a taglio .....	63
4.3.3.2	Resistenza efficace di calcolo del rinforzo.....	65
4.4	RINFORZO A TORSIONE .....	66
4.4.1	Generalità .....	66
4.4.2	Configurazioni per il rinforzo a torsione.....	67
4.4.3	Resistenza di calcolo a torsione dell'elemento rinforzato con FRP .....	67
4.4.3.1	Resistenza di calcolo a torsione .....	67
4.5	CONFINAMENTO.....	68
4.5.1	Generalità .....	68
4.5.2	Resistenza a compressione centrata.....	69
4.5.2.1	Stima della pressione laterale di confinamento.....	70
4.5.2.1.1	Sezioni circolari .....	70
4.5.2.1.2	Sezioni quadrate e rettangolari.....	72
4.5.3	Duttilità di elementi presso-inflessi confinati con FRP.....	73
4.6	RINFORZO A FLESSIONE DI STRUTTURE IN C.A.P. ....	74
4.6.1	Utilizzo di compositi FRP per elementi pre-tesi o post-tesi in c.a. ....	74
4.6.1.1	Analisi del comportamento allo stato limite ultimo .....	74
4.6.1.2	Analisi del comportamento agli stati limite di esercizio .....	75
4.7	INTERVENTI IN ZONA SISMICA .....	75
4.7.1	Principi generali di intervento .....	75
4.7.1.1	Obiettivi della progettazione .....	75
4.7.1.2	Criteri per la scelta dell'intervento con FRP.....	75

4.7.2 Strategie di intervento.....	76
4.7.2.1 Eliminazione dei meccanismi di collasso di tipo fragile.....	76
4.7.2.2 Eliminazione dei meccanismi di collasso di piano.....	77
4.7.2.3 Incremento della capacità deformativa globale di una struttura.....	77
4.7.2.3.1 Incremento della capacità deformativa locale degli elementi.....	77
4.7.2.3.2 Applicazione del criterio della gerarchia delle resistenze.....	77
4.7.3 Verifiche di sicurezza.....	78
4.7.3.1 Elementi e meccanismi duttili.....	78
4.7.3.1.1 Flessione composta.....	78
4.7.3.1.2 Rotazione rispetto alla corda.....	78
4.7.3.2 Elementi e meccanismi fragili.....	79
4.7.3.2.1 Taglio.....	79
4.7.3.2.2 Zone di sovrapposizione.....	79
4.7.3.2.3 Svergolamento delle barre longitudinali.....	79
4.7.3.2.4 Nodi.....	80
4.8 INSTALLAZIONE, MONITORAGGIO E CONTROLLO.....	80
4.8.1 Controllo e preparazione del substrato.....	81
4.8.1.1 Valutazione del deterioramento del substrato.....	81
4.8.1.2 Rimozione e ricostruzione del substrato ed eventuale trattamento delle barre metalliche.....	81
4.8.1.3 Preparazione del substrato.....	82
4.8.2 Raccomandazioni per l'esecuzione a regola d'arte.....	82
4.8.2.1 Condizioni di umidità e temperatura dell'ambiente e del substrato.....	82
4.8.2.2 Particolari costruttivi e norme di esecuzione.....	83
4.8.3 Controllo di qualità dell'esecuzione.....	83
4.8.3.1 Prove semi-distruttive.....	83
4.8.3.2 Prove non distruttive.....	84
4.8.4 Qualifica degli operatori per l'esecuzione delle prove.....	85
4.8.5 Monitoraggio dell'intervento di rinforzo.....	85
<b>5 RINFORZO DI STRUTTURE MURARIE.....</b>	<b>86</b>
5.1 GENERALITÀ.....	86
5.1.1 Oggetto ed ambito di applicazione.....	86
5.1.2 Criteri per il progetto del consolidamento strutturale.....	86
5.1.3 Articolazione degli interventi.....	87
5.1.4 Interventi di restauro su strutture di interesse storico e monumentale.....	87
5.2 VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA.....	87
5.2.1 Criteri di verifica.....	87
5.2.2 Modellazione della struttura.....	88
5.2.3 Verifiche di sicurezza.....	88
5.3 VALUTAZIONE DELLA FORZA DI ANCORAGGIO.....	90
5.3.1 Considerazioni generali e modi di collasso.....	90
5.3.2 Forza di ancoraggio radente allo stato limite ultimo.....	91
5.3.3 Forza di ancoraggio in presenza di azione normale al piano di adesione.....	93
5.4 VERIFICHE DI ELEMENTI STRUTTURALI RICORRENTI.....	94
5.4.1 Rinforzo di pannelli murari.....	94
5.4.1.1 Verifiche per azioni fuori dal piano.....	94
5.4.1.1.1 Verifica per ribaltamento semplice.....	94
5.4.1.1.2 Verifica per flessione della striscia muraria verticale.....	95
5.4.1.1.3 Verifica per flessione della striscia orizzontale.....	97
5.4.1.2 Verifiche per azioni nel piano del pannello.....	98
5.4.1.2.1 Pressoflessione nel piano.....	98
5.4.1.2.2 Taglio.....	98
5.4.2 Piattabande e fasce di piano.....	99
5.4.2.1 Verifica per funzionamento a piattabanda.....	99

5.4.2.2	Verifica per funzionamento a fascia di piano.....	100
<b>5.5</b>	<b>RINFORZO DI ELEMENTI STRUTTURALI A SEMPLICE E DOPPIA CURVATURA</b>	<b>100</b>
5.5.1	Archi.....	101
5.5.1.1	Schema ad arco.....	101
5.5.1.2	Schema a portale.....	102
5.5.2	Volte a semplice curvatura: volte a botte.....	102
5.5.3	Volte a doppia curvatura: cupole.....	102
5.5.3.1	Regime membranale.....	103
5.5.3.2	Regime flessionale.....	103
<b>5.6</b>	<b>CONFINAMENTO DI COLONNE IN MURATURA</b>	<b>103</b>
5.6.1	Resistenza a compressione centrata.....	104
5.6.2	Confinamento di colonne circolari.....	106
5.6.3	Confinamento di colonne quadrate o rettangolari.....	108
<b>5.7</b>	<b>PRINCIPI GENERALI DI INTERVENTO PER COSTRUZIONI IN ZONA SISMICA</b>	<b>110</b>
5.7.1	Obiettivi della progettazione.....	110
5.7.2	Criteri per la scelta dell'intervento con FRP.....	110
<b>5.8</b>	<b>INSTALLAZIONE, MONITORAGGIO E CONTROLLO</b>	<b>111</b>
5.8.1	Controllo e preparazione del substrato.....	112
5.8.1.1	Valutazione del deterioramento del substrato.....	112
5.8.1.2	Rimozione e ricostruzione del substrato.....	113
5.8.2	Raccomandazioni per l'esecuzione a regola d'arte.....	113
5.8.2.1	Condizioni di umidità e temperatura dell'ambiente e del substrato.....	114
5.8.2.2	Particolari costruttivi e norme di esecuzione.....	114
5.8.3	Controllo di qualità dell'esecuzione.....	114
5.8.3.1	Prove semi-distruttive.....	115
5.8.3.2	Prove non distruttive.....	115
5.8.4	Qualifica degli operatori.....	116
5.8.5	Monitoraggio dell'intervento di rinforzo.....	116
<b>6</b>	<b>APPENDICE.....</b>	<b>118</b>
6.1	TECNICHE DI PRODUZIONE.....	118
6.1.1	Pultrusione.....	118
6.1.2	Laminazione.....	119
6.2	COMPORTAMENTO MECCANICO DEI COMPOSITI.....	120
6.2.1	Effetto di carichi agenti in direzioni diverse dalle direzioni di simmetria del materiale.....	123
6.2.2	Criteri di rottura.....	125
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFIA RELATIVA AI CAPITOLI 2 E 6.....</b>	<b>128</b>

## 1 PREMESSA

È sensazione comune, da parte di quanti sono impegnati in attività di ricerca o di progettazione nel campo del consolidamento con materiali compositi fibro-rinforzati, che l'Italia stia assumendo una posizione particolare in ambito internazionale, sia per il valore dei contributi di conoscenza forniti, sia per la presenza di un patrimonio edilizio particolarmente vario ed importante. Ne fanno parte, infatti, costruzioni di rilevante importanza storica ed architettonica, oltre che realizzazioni più recenti in muratura, in c.a., in c.a.p. ed in acciaio. La maggior parte di queste ultime ha superato abbondantemente i trent'anni di vita, per cui molte di esse necessitano di interventi più o meno urgenti di riabilitazione strutturale.

Sono a tutti ben note le fondamentali iniziative in campo internazionale per individuare linee guida che rispondano alle esigenze delineate. Si ricordano le istruzioni americane (ACI 440), quelle giapponesi (JSCE), le europee FIP-CEB, ed infine il documento di studio approvato dal CNR nel gennaio '99 dal titolo "Impiego delle armature non metalliche nel c.a."

Tutti i documenti suddetti si riferiscono ad organismi strutturali con ossatura in conglomerato cementizio armato.

L'interesse scientifico verso le applicazioni innovative degli FRP per la riabilitazione strutturale, da un lato, e la peculiarità del patrimonio edilizio italiano, ampiamente variegato, dall'altro, hanno attirato negli ultimi anni l'interesse di numerosi ricercatori operanti nei settori della Meccanica delle Strutture, delle Costruzioni, della Riabilitazione Strutturale e dell'Ingegneria Sismica. Essi hanno dato vita ad una serie di programmi scientifici che hanno meritato il finanziamento dei più importanti enti di ricerca italiani ed in particolare del MIUR e del CNR. In coda al paragrafo è riportato un elenco di rilevanti programmi di ricerca sull'argomento, finanziati negli ultimi cinque anni, ai quali hanno partecipato la maggior parte degli autori del presente documento, sia in qualità di coordinatori nazionali che di coordinatori locali di singole unità di ricerca.

Un contributo significativo agli argomenti consegnati nel documento è stato reso possibile proprio grazie al supporto economico dei suddetti finanziamenti, cui si dà ampio riconoscimento.

Appare evidente come la redazione di un documento italiano di Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati (FRP), non fosse più rinviabile: soprattutto, quella di un documento di respiro ampio utilizzabile per le diverse tipologie presenti nel patrimonio edilizio nazionale, dalle costruzioni in c.a. e in c.a.p. a quelle murarie, dalle costruzioni in legno a quelle metalliche.

Il CNR, per il tramite della propria *Commissione incaricata di formulare pareri in materia di Normativa tecnica relativa alle costruzioni*, ha avvertito tempestivamente tale esigenza e si è adoperata per soddisfarla. A tal fine essa ha promosso nel mondo accademico ed industriale una specifica iniziativa attraverso l'azione catalizzatrice di un gruppo di docenti di Scienza e di Tecnica delle costruzioni, da tempo impegnati in ricerche sugli FRP, tra i quali alcuni componenti della stessa Commissione. I docenti sono: Luigi Ascione, Andrea Benedetti, Edoardo Cosenza, Angelo Di Tommaso, Ciro Faella, Luciano Feo, Antonio Grimaldi, Antonio La Tegola, Raimondo Luciano, Franco Maceri, Gaetano Manfredi, Giorgio Monti, Antonio Nanni, Renato Sante Olivito, Luciano Rosati, Elio Sacco, Marco Savoia, Enrico Spacone.

All'iniziativa hanno aderito quasi tutti i docenti e ricercatori italiani impegnati in questo settore emergente e promettente delle costruzioni, i responsabili tecnici delle maggiori ditte produttrici e installatrici di rinforzi in materiale composito, nonché rappresentanti di enti e di società che utilizzano i materiali fibro-rinforzati per il consolidamento di manufatti e opere d'arte.

A partire dal 15 gennaio 2004, essi sono stati impegnati nella redazione di un documento rispondente ai requisiti sopra delineati ed articolato nelle seguenti parti:

- Materiali
- Concetti basilari del rinforzo con FRP e problematiche speciali
- Rinforzo di strutture in c.a. e in c.a.p
- Rinforzo di strutture murarie
- Rinforzo di strutture metalliche
- Rinforzo di strutture in legno
- Nuove costruzioni con l'impiego di FRP.

Il documento è stato inoltre concepito con un intento informativo ed esplicativo, indispensabile per la diffusione, in ambito professionale, delle conoscenze meccaniche e tecnologiche basilari per l'utilizzo dei nuovi materiali.

Dopo sei mesi di intensa ed appassionata attività di lavoro, sono pronte per la pubblicazione le prime quattro parti; la pubblicazione delle rimanenti altre è invece prevista per il prossimo autunno.

\*\*\*\*\*

### **Elenco di rilevanti progetti di ricerca sui materiali compositi finanziati dal MIUR e dal CNR negli ultimi cinque anni**

- 1998-2000: Ricerca PRIN dal titolo: "I materiali compositi nelle costruzioni civili", Coordinatore Nazionale: Prof. Luigi Ascione;
- 2000-2002: Ricerca PRIN dal titolo: "Rinforzo strutturale del costruito con materiali compositi: individuazione di linee guida progettuali per l'affidabilità e la durabilità", Coordinatore Nazionale: Prof. Luigi Ascione;
- 2002-2004: Ricerca PRIN dal titolo: "Rinforzo attivi e passivi con l'utilizzo di materiali compositi nel costruito e per l'innovazione tecnologica nelle costruzioni civili", Coordinatore Nazionale: Prof. Luigi Ascione;
- 2002-2003: Ricerca PRIN dal titolo: "L'impiego dei compositi nel rinforzo sismico di strutture in cemento armato", Coordinatore Nazionale: Prof. G. Manfredi;
- 2003-2005: Ricerca PRIN dal titolo: "L'impiego di materiali con microstruttura per l'innovazione tecnologica delle strutture civili", Coordinatore Nazionale: Prof. Franco Maceri;
- 2003-2005: Ricerca PRIN dal titolo: "Comportamento e criteri di progetto nell'adeguamento con compositi di strutture in c.a.", Coordinatore Nazionale: Prof. Antonio Nanni.
- 2003-2005: Ricerca dal titolo "Modellazione di materiali innovativi per la salvaguardia strutturale", (Coordinatore: Prof. Luigi Ascione), nell'ambito del Progetto Strategico MIUR (legge 449/97) dal titolo "Diagnosi e salvaguardia di manufatti architettonici con particolare riferimento agli effetti derivanti da eventi sismici ed altre calamità naturali", Coordinatore Nazionale: Prof. Franco Maceri;
- 2003-2005: Ricerca dal titolo "Effetti delle proprietà reologiche dei materiali compositi negli interventi strutturali per l'ingegneria civile" (Coordinatore: Prof. Marco Savoia) nell'ambito del Progetto Strategico MIUR (legge 449/97) dal titolo "Materiali compositi per applicazioni strutturali di rilevante interesse industriale", Coordinatore Nazionale: Prof. Sesto Viticoli;
- 2003: Centro di Eccellenza su "Compositi strutturali per applicazioni innovative nell'ingegneria civile", con sede presso l'Università di Napoli, Responsabile: Prof. Edoardo Cosenza.

## 1.1 CONTENUTO E SCOPO DELLE ISTRUZIONI

Scopo delle presenti Istruzioni è quello di fornire, nell'ambito delle attuali Norme vigenti, un documento orientativo per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati. Le Istruzioni, per loro genesi e natura, non sono delle 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.

Il documento tratta dei seguenti argomenti:

- Materiali,
- Concetti basilari del rinforzo con FRP e problematiche speciali,
- Rinforzo di strutture in c.a. e in c.a.p,
- Rinforzo di strutture murarie.

Nell'ambito del rinforzo delle strutture in c.a. e in c.a.p e di quelle murarie sono inoltre fornite specifiche indicazioni concernenti le costruzioni in zona sismica, in linea con i più recenti orientamenti recepiti nelle Normative nazionali ed internazionali.

La trattazione del primo argomento è affrontata con un intento anche informativo e comprende un'Appendice nella quale sono riportate alcune nozioni meccaniche, ritenute basilari per un utilizzo consapevole dei materiali compositi in campo strutturale. In essa sono evidenziate le differenze peculiari che tali materiali presentano rispetto agli usuali materiali da costruzione di tipo isotropo, con particolare riguardo ai legami costitutivi ed alle verifiche di resistenza. Per la loro specificità i capitoli 2 e 6 contenenti gli argomenti su indicati sono supportati da una bibliografia essenziale con la quale gli interessati potranno arricchire le informazioni fornite nel documento.

Gli altri argomenti sono impostati secondo lo stile usuale dei documenti tecnici pubblicati dal CNR e recanti istruzioni in campo strutturale. Per essi viene seguito l'approccio, ampiamente condiviso, degli Eurocodici: le diverse proposizioni sono distinte in *Principi* e *Regole di Applicazione*; ciascuna proposizione è contraddistinta da un numero d'ordine; in particolare i principi sono contrassegnati dall'ulteriore etichetta (P).

Solo a scopo di completezza, si ricorda che i primi comprendono:

- *affermazioni generali e definizioni per le quali non esiste alternativa;*
- *esigenze e modelli analitici per i quali non è ammessa alternativa, se non specificamente stabilito;*

mentre le seconde sono *regole generalmente riconosciute, che seguono i Principi e ne soddisfano le esigenze.*

## 1.2 SIMBOLOGIA

### Lettere romane maiuscole

$A_c$	area della sezione in calcestruzzo, al netto delle armature metalliche
$A_f$	area del rinforzo in FRP
$A_{fw}$	area del rinforzo a taglio in FRP
$A_l$	area complessiva delle armature metalliche longitudinali
$A_{sw}$	area della sezione di un braccio di una staffa
$A_{s1}$	area delle armature metalliche in trazione
$A_{s2}$	area delle armature metalliche in compressione
$E_c$	modulo di elasticità normale del calcestruzzo
$E_f$	modulo di elasticità normale del rinforzo in FRP
$E_{fib}$	modulo di elasticità normale della fibra
$E_m$	modulo di elasticità normale della matrice
$E_s$	modulo di elasticità normale delle armature metalliche
$F_{max,k}$	valore caratteristico della massima forza di trazione trasmissibile da un rinforzo in FRP al supporto
$F_{max,d}$	valore di progetto della massima forza di trazione trasmissibile da un rinforzo in FRP al supporto
$F_{pd}$	valore di progetto della massima forza di ancoraggio trasmissibile da un rinforzo in FRP incollato su una muratura in presenza di un'azione normale al piano di adesione
$G_a$	modulo di elasticità tangenziale dell'adesivo
$G_c$	modulo di elasticità tangenziale del calcestruzzo
$I_o$	momento di inerzia della sezione in c.a. fessurata e non rinforzata
$I_l$	momento di inerzia della sezione in c.a. fessurata e rinforzata con FRP
$I_c$	momento di inerzia della sezione omogeneizzata
$I_f$	momento di inerzia del rinforzo in FRP
$M_{Rd}$	momento resistente della sezione rinforzata con FRP
$M_{Sd}$	momento flettente sollecitante di progetto
$M_o$	momento flettente sollecitante la sezione in c.a. all'atto dell'applicazione del rinforzo in FRP
$M_1$	momento flettente sollecitante la sezione in c.a. rinforzata con FRP dovuto ai carichi applicati successivamente all'intervento
$M_u$	momento resistente della sezione in c.a. rinforzata con FRP
$N_{Rcc,d}$	resistenza di progetto a compressione centrata dell'elemento in c.a. confinato con FRP
$N_{Rmc,d}$	resistenza di progetto a compressione centrata della muratura confinata con FRP
$N_{Sd}$	sfuerzo normale sollecitante di progetto
$P_{fib}$	frazione in peso delle fibre
$P_m$	frazione in peso della matrice
$T_g$	temperatura di transizione vetrosa della resina
$T_m$	temperatura di fusione della resina
$T_{Rd}$	resistenza di progetto a torsione dell'elemento in c.a. rinforzato con FRP
$T_{Rd,f}$	contributo a torsione del rinforzo in FRP alla resistenza di progetto
$T_{Rd,max}$	resistenza a torsione della biella compressa di calcestruzzo
$T_{Rd,s}$	contributo a torsione delle armature metalliche alla resistenza di progetto
$T_{Sd}$	momento torcente sollecitante di progetto
$V_{fib}$	frazione in volume delle fibre
$V_{Rd}$	resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato con FRP
$V_{Rd,ct}$	contributo del calcestruzzo alla resistenza a taglio di progetto
$V_{Rd,max}$	contributo della biella compressa di calcestruzzo alla resistenza a taglio di progetto

$V_{Rd,s}$	contributo delle armature metalliche trasversali alla resistenza a taglio di progetto
$V_{Rd,f}$	contributo del rinforzo in FRP alla resistenza a taglio di progetto
$V_{Sd}$	taglio sollecitante di progetto
$V_{Rd,m}$	contributo della muratura alla resistenza a taglio di progetto della muratura rinforzata

### Lettere romane minuscole

$f_{bd}$	resistenza di progetto dell'adesione tra rinforzo in FRP e calcestruzzo (o muratura)
$f_{bk}$	valore caratteristico della massima tensione tangenziale di aderenza
$f_{ccd}$	resistenza di progetto del calcestruzzo confinato
$f_{cd}$	resistenza di progetto a compressione del calcestruzzo
$f_{ck}$	resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo
$f_{ctm}$	valore medio della resistenza a trazione del calcestruzzo
$f_{fd}$	resistenza di progetto del rinforzo in FRP
$f_{fdd}$	resistenza di progetto alla delaminazione del rinforzo in FRP
$f_{fed}$	resistenza efficace di progetto del rinforzo a taglio in FRP
$f_{fk}$	resistenza caratteristica del rinforzo in FRP
$f_{mk}$	resistenza caratteristica a compressione della muratura
$f_{mcd}$	resistenza di progetto a compressione della muratura confinata con FRP
$f_{mck}$	resistenza caratteristica a compressione della muratura confinata con FRP
$f_{md}$	resistenza di progetto a compressione della muratura
$f_{md}^h$	resistenza di progetto a compressione della muratura in direzione orizzontale
$f_{mtd}$	resistenza di progetto a trazione della muratura
$f_{mtk}$	resistenza caratteristica a trazione della muratura
$f_{mtm}$	valore medio della resistenza a trazione della muratura
$f_{vk}$	resistenza caratteristica a taglio della muratura
$f_{yd}$	resistenza di progetto allo snervamento delle armature longitudinali
$f_{ywd}$	resistenza di progetto allo snervamento delle armature trasversali
$f_l$	pressione di confinamento
$f_l'$	pressione efficace di confinamento
$k_{eff}$	coefficiente di efficienza dell'azione di confinamento
$k_H$	coefficiente di efficienza orizzontale
$k_V$	coefficiente di efficienza verticale
$l_b$	lunghezza di ancoraggio
$l_e$	lunghezza ottimale di ancoraggio
$p_f$	passo di strisce o di cerchiature in FRP
$s$	scorrimento di interfaccia
$s_f$	scorrimento di interfaccia corrispondente alla completa delaminazione
$w_s$	larghezza delle strisce in FRP

### Lettere greche maiuscole

$\Gamma_{Fk}$	valore caratteristico dell'energia specifica di frattura
$\Gamma_{Fd}$	valore di progetto dell'energia specifica di frattura
$\Pi_{Rd}$	valore di progetto della forza di delaminazione del rinforzo in FRP agente in direzione ortogonale alla muratura
$\Pi_{Sd}$	valore del risultante delle forze associate alle tensioni normali alla muratura

### Lettere greche minuscole

$\gamma_m$	coefficiente parziale per materiali o prodotti
$\gamma_{Rd}$	coefficiente parziale per i modelli di resistenza
$\varepsilon_o$	deformazione del calcestruzzo al lembo teso prima dell'applicazione del rinforzo
$\varepsilon_c$	deformazione del calcestruzzo al lembo compresso

$\varepsilon_{ccu}$	deformazione ultima del calcestruzzo confinato
$\varepsilon_{co}$	deformazione del calcestruzzo al lembo compresso prima dell'applicazione del rinforzo
$\varepsilon_{cu}$	deformazione ultima del calcestruzzo
$\varepsilon_f$	deformazione del rinforzo in FRP
$\varepsilon_{fd}$	deformazione massima di progetto del rinforzo in FRP
$\varepsilon_{fd,rid}$	valore ridotto della deformazione massima di progetto del rinforzo in FRP nel confinamento di elementi in c.a. o in muratura
$\varepsilon_{fu}$	deformazione ultima a trazione del rinforzo in FRP
$\varepsilon_{mu}$	deformazione massima a compressione della muratura
$\varepsilon_{s1}$	deformazione dell'armatura metallica in trazione
$\varepsilon_{s2}$	deformazione dell'armatura metallica in compressione
$\varepsilon_{yd}$	valore di progetto della deformazione di snervamento dell'armatura metallica
$\eta$	fattore di conversione
$\nu_{fib}$	coefficiente di Poisson delle fibre
$\nu_m$	coefficiente di Poisson della matrice
$\rho_{fib}$	densità delle fibre
$\rho_m$	densità della matrice
$\sigma_c$	tensione nel calcestruzzo
$\sigma_f$	tensione nel rinforzo in FRP
$\sigma_s$	tensione nelle armature metalliche tese
$\tau_{b,e}$	tensione tangenziale equivalente all'interfaccia adesivo-calcestruzzo

## 2 MATERIALI

### 2.1 INTRODUZIONE

I materiali fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) a fibre continue, cui fa riferimento il presente documento, sono materiali compositi che trovano impiego nel consolidamento e nel rinforzo delle strutture civili. I vantaggi degli FRP sono molteplici: leggerezza, elevate proprietà meccaniche, caratteristiche anticorrosive. I compositi per il rinforzo strutturale sono disponibili in diverse geometrie: esse vanno dalle lamine pultruse, utilizzate per il rinforzo di elementi dotati di superfici regolari, ai tessuti bidirezionali che possono essere invece facilmente adattati alla forma dell'elemento da rinforzare prima della fase di impregnazione. I compositi si adattano bene anche ad applicazioni in cui è necessario preservare le caratteristiche estetiche della struttura originaria (edifici di interesse storico o artistico) o in casi in cui i rinforzi tradizionali sarebbero di difficile applicazione per limitatezza dello spazio a disposizione.

Esistono inoltre esempi di applicazioni di rinforzi in composito con fibre discontinue e matrice polimerica o con fibre continue e matrice inorganica che, per specifiche applicazioni, si sono dimostrati particolarmente promettenti; le suddette tipologie di rinforzo non sono però considerate in questo documento in quanto non è disponibile su di esse una mole sufficiente di studi scientifici, tale da garantirne l'affidabilità per impieghi strutturali.

Il presente capitolo riporta le informazioni essenziali per poter acquisire una conoscenza di base dei materiali compositi, dei loro componenti (fibre, matrici ed adesivi) e delle loro proprietà fisiche e meccaniche. Viene anche proposta una possibile classificazione dei compositi comunemente utilizzati nel rinforzo delle strutture e vengono suggeriti alcuni criteri utili per la qualificazione e l'accettazione dei prodotti.

### 2.2 LE CARATTERISTICHE DEI COMPOSITI E DEI LORO COMPONENTI

I materiali compositi presentano le seguenti caratteristiche:

- sono costituiti da due o più materiali (fasi) di natura diversa e “macroscopicamente” distinguibili;
- almeno due delle fasi presentano proprietà fisiche e meccaniche “sufficientemente” diverse tra loro, in modo da impartire al composito proprietà differenti da quelle dei costituenti.

I compositi fibrorinforzati a matrice polimerica soddisfano entrambe queste caratteristiche: essi sono infatti costituiti da una matrice polimerica di natura organica e da fibre di rinforzo, le cui principali proprietà sono quantificabili attraverso i valori indicativi riportati in Tabella 2-1. Come si può notare le fibre di carbonio possono esibire valori di modulo di elasticità normale molto più elevati dei comuni materiali da costruzione. Si tratta quindi di materiali molto efficienti dal punto di vista strutturale, che tuttavia possono generare problemi di accoppiamento con altri materiali, aspetto quest'ultimo da doversi sempre valutare con molta attenzione da parte del progettista.

La matrice può essere considerata, almeno nei casi più comuni, come un continuo isotropo. La fase di rinforzo, ad eccezione della fibra di vetro, è invece un materiale anisotropo. Contribuiscono a definire quest'ultima:

- la geometria: forma, dimensioni e distribuzione delle dimensioni;
- la disposizione: orientazione rispetto agli assi di simmetria del corpo; se essa è casuale (nel piano o nello spazio) il composito risulta avere caratteristiche simili a quelle di un materiale isotropo (“quasi-isotropo”); in tutti gli altri casi il composito è anisotropo;
- la concentrazione: frazione in volume, distribuzione della concentrazione (dispersione).

Un composito è quindi un continuo non omogeneo e, nella maggior parte dei casi, anisotropo.

**Tabella 2-1** – Confronto tra le proprietà delle fibre di rinforzo e delle matrici più comuni e dell'acciaio da costruzione (valori indicativi).

	Modulo di elasticità normale $E$	Resistenza $\sigma_r$	Deformazione a rottura $\epsilon_r$	Coefficiente di dilatazione termica $\alpha$	Densità $\rho$
	[GPa]	[MPa]	[%]	[ $10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ]	[g/cm <sup>3</sup> ]
Fibre di vetro E	72 – 80	3445	4.8	5 – 5.4	2.5 – 2.6
Fibre di vetro S	85	4585	5.4	1.6 – 2.9	2.46 – 2.49
Fibre di carbonio (alto modulo)	390 – 760	2400 – 3400	0.5 – 0.8	-1.45	1.85 – 1.9
Fibre di carbonio (alta resistenza)	240 – 280	4100 – 5100	1.6 – 1.73	-0.6 – -0.9	1.75
Fibre aramidiche	62 – 180	3600 – 3800	1.9 – 5.5	-2	1.44 – 1.47
Matrice polimerica	2.7 – 3.6	40 – 82	1.4 – 5.2	30 – 54	1.10 – 1.25
Acciaio da costruzione	206	250 – 400 (snervamento) 350 – 600 (rottura)	20 – 30	10.4	7.8

E' conveniente, ai fini dell'esame delle proprietà dei compositi fibrorinforzati, distinguere questi ultimi in due categorie principali, indipendentemente dalla tecnologia di produzione:

- monostrato (lamina);
- multistrato (laminati).

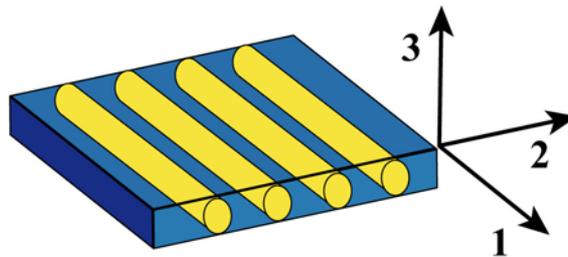
I laminati sono materiali costituiti da strati di qualche decimo di millimetro di spessore (detti lamine) sovrapposti tra loro. Nel caso più semplice, le fibre sono contenute esclusivamente nel piano della lamina (non ci sono fibre disposte perpendicolarmente a tale piano). Le dimensioni dei laminati sono intermedie fra quelle delle fibre di rinforzo e quelle delle strutture di interesse ingegneristico (Tabella 2-2). Esiste anche una particolare classe di compositi multistrato, detti laminati ibridi, in cui le singole lamine sono composte da fibre di natura differente (ad es. compositi a matrice epossidica con fibre sia di carbonio che aramidiche per ottenere un composito rigido e tenace) o da materiali differenti (ad es. i compositi a strati alternati di resina epossidica con fibre aramidiche e di alluminio).

Il principale vantaggio dei laminati è rappresentato dalla massima libertà nella disposizione delle fibre, pur essendo ovviamente richiesto un controllo sistematico sulle scelte operate e quindi sulle proprietà del materiale composito.

**Tabella 2-2** – Scala dei compositi fibrosi a matrice polimerica.

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

Le lamine sono in generale dei materiali anisotropi (proprietà diverse nelle diverse direzioni) e conseguentemente la descrizione delle loro proprietà meccaniche dipende dalla scelta del sistema di riferimento. Di solito gli assi di quest'ultimo vengono fatti coincidere con quelli di simmetria del materiale (o assi naturali). In Figura 2-1 è illustrato il caso di un rinforzo unidirezionale.



**Figura 2-1** – Assi di riferimento per lamine unidirezionali.

Il rapporto tra i valori delle proprietà di un materiale composito nelle diverse direzioni è detto grado di anisotropia. Nel caso di laminati unidirezionali, in Tabella 2-3 sono riportati alcuni valori indicativi del grado di anisotropia delle principali proprietà significative ai fini della progettazione ( $E_i$ : modulo di elasticità normale;  $G_{ij}$ : modulo di elasticità tangenziale;  $\sigma_{ri}$ : sforzo di rottura;  $\alpha_i$ : coefficiente di dilatazione termica).

**Tabella 2-3** – Grado di anisotropia di laminati unidirezionali fibrorinforzati (valori indicativi).

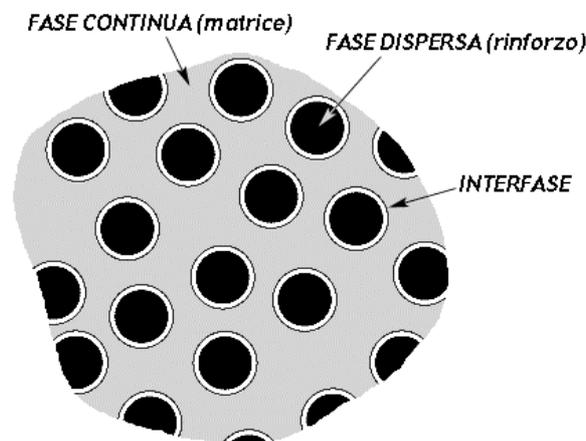
	$E_1/E_2$	$E_1/G_{12}$	$\sigma_{r1}/\sigma_{r2}$	$\alpha_1/\alpha_2$
Carburo di silicio/ceramica	1.09	2.35	17.8	0.93
Boro/alluminio	1.71	5.01	11.6	0.30
Carburo di silicio/alluminio	1.73	5.02	17	0.52
Vetro-S/epossidica	2.44	5.06	28	0.23
Vetro-E/epossidica	4.42	8.76	17.7	0.13
Boro/epossidica	9.27	37.4	24.6	0.20
Carbonio/epossidica	13.6	19.1	41.4	-0.07
Arammide/epossidica	15.3	27.8	26	-0.07

I materiali compositi possono essere più resistenti e - almeno nel caso dei compositi a fibra di carbonio - più rigidi dei materiali da costruzione tradizionali. Quando, per uno specifico progetto, il peso della struttura diventa rilevante, i compositi possono risultare molto attrattivi grazie alla loro

minore densità. La resistenza specifica (resistenza/densità) dei compositi è fino a quattro volte superiore rispetto a quella dei materiali tradizionali; il loro modulo specifico fino al doppio. Questo significa che, a parità di rigidità, una struttura in materiale composito può arrivare a pesare circa la metà e, nel caso delle fibre aramidiche, risultare quattro volte più resistente rispetto ad un'altra realizzata con un materiale da costruzione tradizionale.

La natura delle fasi che costituiscono il composito contribuisce in maniera determinante alla formazione delle proprietà finali del materiale. Tuttavia, per ottenere un composito ad elevata resistenza meccanica, non è sufficiente utilizzare fibre "resistenti": è anche indispensabile garantire una buona adesione tra la matrice ed il rinforzo.

L'adesione viene di solito promossa mediante l'impiego di un terzo componente, che, applicato in strato molto sottile sulla superficie delle fibre, la rende compatibile con la matrice organica. Tale trattamento superficiale del rinforzo comporta la presenza di una terza fase intermedia tra la matrice e le fibre, detta interfaccia o interfase (Figura 2-2). L'interfaccia consiste normalmente in uno strato molto sottile (spesso monoatomico), localizzato alla superficie del rinforzo, le cui caratteristiche, pur non contribuendo direttamente alle proprietà meccaniche globali del composito, sono tuttavia fondamentali per il successo del materiale in applicazioni strutturali.



**Figura 2-2** – Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito.

Anche se il dettaglio dei meccanismi chimico-fisici che determinano l'adesione tra fibra e matrice è delegato al produttore del materiale, non va dimenticato che la mancanza di adesione tra fibre e matrice è una delle cause principali di cedimento strutturale dei materiali compositi.

## 2.2.1 Principali fibre per compositi

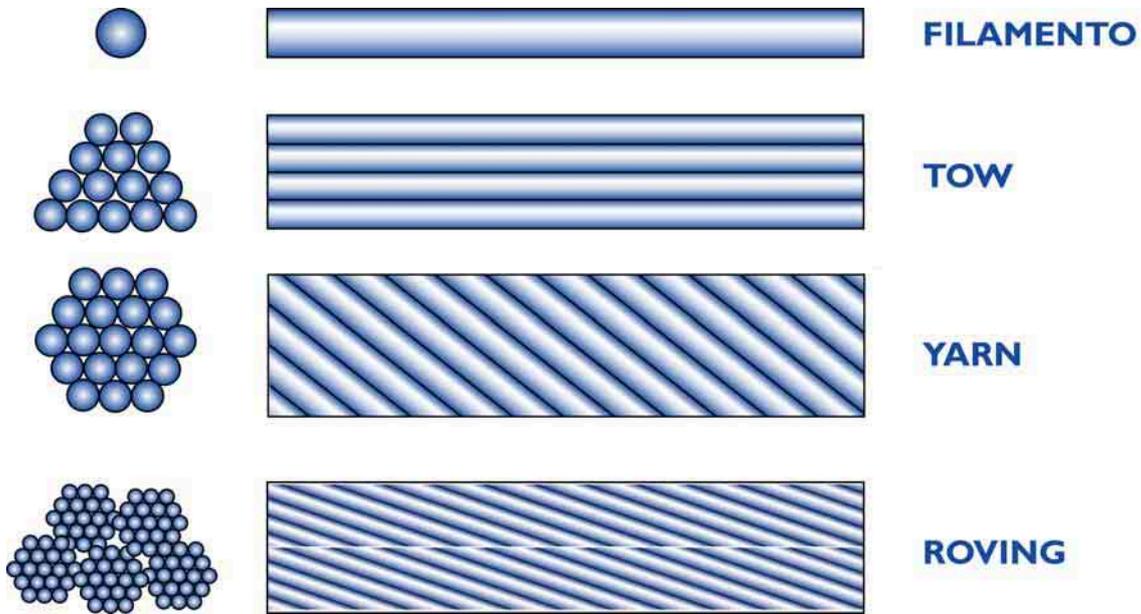
Le fibre più usate per la produzione di materiali compositi sono quelle di vetro, di carbonio ed aramidiche. La particolare geometria filiforme, ancorché molto versatile per la realizzazione dei compositi, conferisce a tali materiali caratteristiche di rigidità e di resistenza molto più elevate di quelle possedute dagli stessi materiali quando siano utilizzati in configurazioni tridimensionali: ciò è dovuto alla minore densità di difetti che tipicamente compete alla configurazione monodimensionale rispetto a quella volumica.

### 2.2.1.1 Tipologie di fibre disponibili in commercio e classificazione

Le fibre sono costituite da filamenti continui molto sottili e quindi difficili da manipolare singolarmente. Per tale motivo le fibre sono disponibili commercialmente in varie forme, di cui le più comuni sono [1] (Figura 2-3):

- filamento (monofilament): elemento base con dimensioni di circa 10  $\mu\text{m}$  di diametro;

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



**Figura 2-3 – Tipologie di fibre.**

Unendo insieme alcune centinaia di *tows* o *yarns* si ottiene il tape, in cui i *tows* o gli *yarns* possono essere semplicemente affiancati oppure cuciti tra loro o fissati su un supporto.

La classificazione delle fibre è mutuata direttamente da quella tradizionalmente utilizzata per le fibre tessili.

I filamenti costituenti i filati sono caratterizzati essenzialmente dalla composizione chimica e dalla massa per unità di lunghezza. L'unità di misura di massa lineare o titolo (massa per unità di lunghezza) secondo la norma ISO 2974:2000(E) è il Tex, equivalente a 1 g per km di fibra. Un'altra unità di misura di massa lineare, ormai obsoleta, è il denaro (*denier*), che equivale a 0.111 Tex.

La designazione tecnica delle fibre di vetro viene effettuata secondo le norme ISO 1139:1973(E) e ISO 2078:1993(E) 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 - continuo (per filamenti);
  - D - discontinuo (per 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).



Torsione negativa (S).



Torsione positiva (Z).

**Figura 2-4** – Definizione dei due possibili sensi di torsione.

Alcuni esempi di designazione, con la relativa interpretazione, sono elencati di seguito:

- EC10 40: filamento continuo di vetro E, di 10  $\mu\text{m}$  di diametro e di massa lineare pari a 40 Tex.
- EC9 34 Z 40: filamento continuo in vetro E, avente 9  $\mu\text{m}$  di diametro e di massa lineare pari a 34 Tex, ritorto a 40 giri/m. La lettera Z indica una torsione definita come positiva secondo la norma ISO 1139:1973(E) (la torsione negativa viene indicata con la lettera S).
- 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, come visto in precedenza; il numero successivo (4) indica il numero dei filamenti e la lettera S una torsione negativa, effettuata a 150 giri/m.
- EC9 x 4 S 150: designazione semplificata del precedente filamento.

Alcuni filati (*yarn*), comunemente usati per i compositi strutturali, sono quelli corrispondenti alla sigla EC5 10 x 2, a base di vetro E, oppure quelli corrispondenti alla sigla SC5 4 x 2, a base di vetro S.

Per le fibre di carbonio si è soliti classificare i filati in termini di “k” dove k sta per migliaia; quindi un filato da 1k sarà costituito da 1000 filamenti (66.6 Tex), uno da 3k (200 Tex) ne conterrà 3000, ecc. Valori tipici sono: 0.5k, 1k, 3k, 6k, 12k, 18k, 24k, 48k.

Oltre che in forma di *yarn* o di *roving*, le fibre sono disponibili commercialmente anche in una grande varietà di tessuti (*fabric*), in cui la disposizione delle fibre può essere tale da conferire ai corrispondenti compositi delle caratteristiche di quasi isotropia nel piano. Nei tessuti si distingue la direzione principale, detta ordito (*warp*), e quella trasversale, detta trama (*weft*).

### 2.2.1.2 Fibre di vetro

Sono fibre comunemente usate in campo navale ed industriale per la fabbricazione di compositi con prestazioni medio-alte. Si distinguono per la loro elevata resistenza.

Il vetro è composto principalmente da silice ( $\text{SiO}_2$ ) in struttura tetraedrica ( $\text{SiO}_4$ ). Ossidi di alluminio ed altri ioni metallici sono aggiunti in varie proporzioni (Tabella 2-4) per facilitare le operazioni di lavorazione o per modificare alcune proprietà (ad esempio le fibre di vetro S rispetto alle E mostrano una maggior resistenza a trazione, come mostrato in Tabella 2-1).

**Tabella 2-4** – Composizione tipica delle fibre di vetro (% in peso).

	VETRO E	VETRO S
Ossido di silicio	54.3	64.2
Ossido di alluminio	15.2	24.8
Ossido di ferro	-	0.21
Ossido di calcio	17.2	0.01
Ossido di magnesio	4.7	10.27
Ossido di sodio	0.6	0.27
Ossido di boro	8	0.01
Ossido di bario	-	0.20
Varie	-	0.03

Nelle sue linee essenziali la tecnologia di produzione delle fibre di vetro è basata sulla filatura di una miscela (*batch*) costituita principalmente da sabbia, allumina e calcare. I componenti sono miscelati a secco e portati a fusione (circa 1260 °C) in una fornace a refrattari (*tank*). Il vetro fuso viene alimentato direttamente su filiere di platino (*bushings*) e fatto passare per gravità attraverso appositi fori praticati sul fondo.

I filamenti, prodotti per filatura da fuso, sono quindi raggruppati, con l'applicazione o meno di una leggera torsione, 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 µm e sono ricoperti da un legante o bozzima (*binder* o *size*). I filati sono raccolti, perlopiù senza ritorcitura, in *roving*. I valori di massa lineare tipici del *roving* per applicazioni nel settore civile sono superiori a 2000 Tex.

Le fibre di vetro sono anche disponibili in forma di foglio sottile, che prende il nome di *mat*. Un *mat* può essere costituito sia da fibre 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 massa è dell'ordine di 0.5 kg/m<sup>2</sup>.

Le fibre di vetro hanno un modulo di elasticità normale inferiore a quelle di carbonio ed aramidiche (circa 70 GPa per le fibre di vetro E) ed una resistenza all'abrasione relativamente modesta, che richiede una certa cautela nelle operazioni di manipolazione prima dell'impregnazione. Esse, inoltre, presentano una modesta resistenza allo scorrimento viscoso e a fatica. Per promuovere l'adesione tra fibre e matrice e per proteggere le fibre dall'azione degli agenti alcalini e dell'umidità, le fibre sono sottoposte a trattamenti di ensimaggio (*sizing*) con sostanze aventi funzione di compatibilizzante. Trattamenti di questo tipo sono molto importanti ai fini della durabilità e della resistenza a fatica (statica e dinamica) del materiale composito.

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



Fibre discontinue.



Mat a fibre discontinue.

**Figura 2-5** – Mat in fibra di vetro.

### 2.2.1.3 Fibre di carbonio

Sono fibre usate per la fabbricazione di compositi ad elevate prestazioni e si distinguono per l'alto modulo di elasticità normale e l'elevata resistenza. Esibiscono un comportamento a rottura intrinsecamente fragile con un assorbimento di energia relativamente modesto, anche se i carichi di rottura sono elevati.

A confronto con quelle di vetro ed aramidiche, le fibre di carbonio risultano essere le meno sensibili ai fenomeni di *creep* e di fatica e sono contraddistinte da una modesta riduzione di resistenza a lungo termine.

La struttura cristallina della grafite è di tipo esagonale, con gli atomi di carbonio organizzati in strutture essenzialmente planari, tenute insieme da forze trasversali di interazione del tipo Van der Waals, di gran lunga più deboli rispetto a quelle che agiscono tra gli atomi di carbonio nel piano (legami covalenti). Per il suddetto motivo il modulo di elasticità normale e la resistenza sono estremamente elevati nelle direzioni planari, mentre risultano notevolmente inferiori nella direzione trasversale (comportamento anisotropo).

La struttura delle fibre di carbonio non è completamente cristallina come quella della grafite. Il termine "fibre di grafite" viene tuttavia utilizzato nel linguaggio comune, anche se in modo improprio, per indicare fibre con un contenuto di carbonio maggiore del 99%; il termine "fibre di carbonio" indica, invece, fibre con un contenuto di carbonio variabile tra l'80 ed il 95%.

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

La moderna tecnologia di produzione delle fibre di carbonio si basa essenzialmente sulla pirolisi, cioè la decomposizione termica in assenza di ossigeno di sostanze organiche, dette precursori, tra i quali i più usati sono le fibre di poliacrilonitrile (PAN) e di rayon. Le fibre di PAN vengono dapprima "stabilizzate", cioè sottoposte ad un trattamento termico a 200-240 °C per 24 h in aria, affinché la loro struttura molecolare subisca un'orientazione preferenziale nella direzione del carico applicato. In seguito subiscono un trattamento di carbonizzazione a 1500 °C in atmosfera inerte, durante il quale la maggior parte degli elementi chimici diversi dal carbonio, presenti nel precursore, sono eliminati. Le fibre carbonizzate possono quindi essere sottoposte ad un trattamento di grafitizzazione in atmosfera inerte a 3000 °C durante il quale la struttura cristallina delle fibre può svilupparsi completamente, avvicinandosi a quella della grafite pura.

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

### 2.2.1.4 Fibre aramidiche

Le fibre aramidiche (o arammidiche) sono fibre di natura organica, costituite da poliammidi aromatiche in forma estremamente orientata. Introdotte per la prima volta nel 1971 col nome commerciale di Kevlar<sup>®</sup>, queste fibre si distinguono per l'elevata tenacità e per la loro resistenza alle operazioni di manipolazione. Il modulo di elasticità normale e la resistenza a trazione sono intermedi tra quelli delle fibre di vetro e quelli delle fibre di carbonio (Figura 2-6 e Figura 2-7). 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% [2]. 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.

Per le implicazioni dei suddetti comportamenti ai fini progettuali, si rimanda al capitolo 3, in cui sono trattati i problemi speciali di progetto.

La tecnologia di produzione delle fibre aramidiche si basa sull'estrusione ad alta temperatura ed alta velocità del polimero in soluzione con successivo raffreddamento veloce (*quenching*) ed essiccaamento. La sintesi del polimero viene effettuata a monte dell'apparecchiatura di estrusione con l'impiego di soluzioni fortemente acide.

E' possibile sottoporre le fibre così prodotte ad un trattamento di orientazione a caldo per avvolgimento su bobine in rotazione ad elevata velocità (*post-spinning*) allo scopo di migliorarne le caratteristiche meccaniche.

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

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

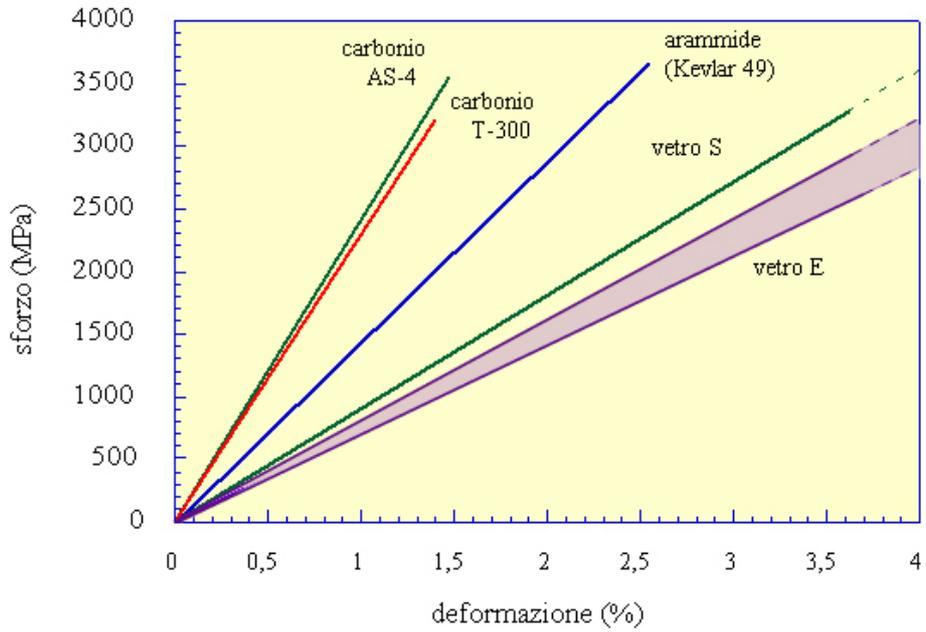
### 2.2.1.5 Altre tipologie di fibre

Le tipologie di fibre fin qui descritte risultano essere ad oggi le più utilizzate nei materiali compositi per applicazioni in campo civile. Ad esse si affiancano le fibre di boro che, analogamente a quelle di carbonio, presentano un elevato modulo di elasticità normale ed una cospicua resistenza, soprattutto a compressione. Sono però caratterizzate da una densità di massa maggiore.

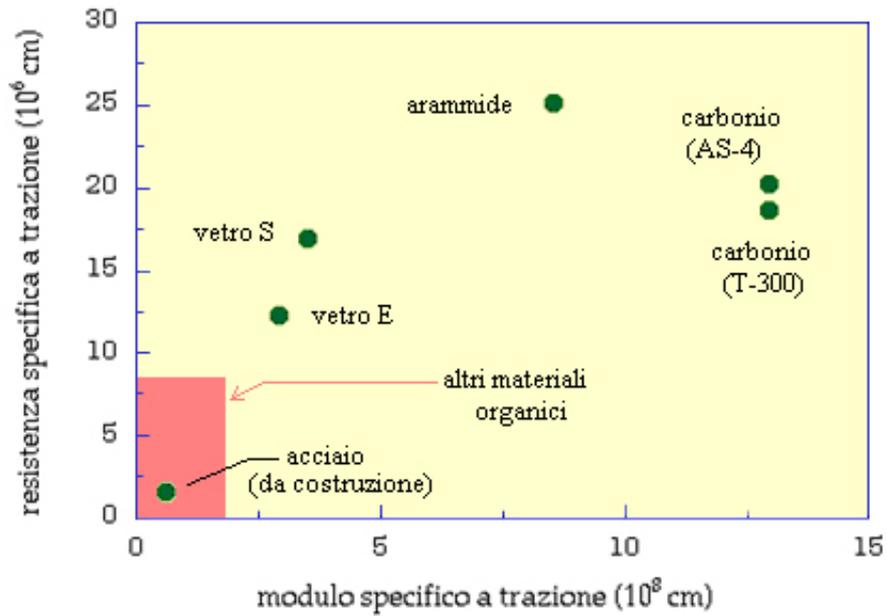
Per applicazioni ad alta temperatura è possibile ricorrere a differenti tipologie di fibre, quali le fibre ceramiche (ad esempio fibre di allumina e di carburo di silicio), le cui caratteristiche meccaniche sono riportate in Tabella 2-5 insieme con quelle delle fibre di boro.

**Tabella 2-5** – Proprietà delle fibre di boro e delle fibre ceramiche.

	Fibre di Boro	Fibre ceramiche		
		Allumina (FP)	SiC (CVD)	SiC (pirolisi)
Diametro [ $\mu\text{m}$ ]	16.5	$20 \pm 5$	140	10-20
Densità [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	2.63	3.95	3.3	2.6
Sforzo di rottura [MPa]	2800	1380	3500	2000
Modulo di elasticità normale [GPa]	385	379	430	180



**Figura 2-6** – Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo: comportamento a trazione monoassiale.



**Figura 2-7** – Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo: i valori del modulo e della resistenza sono rapportati al peso specifico (valori “specifici”).

### 2.2.1.6 Caratteristiche tecniche del filato

I filati non sono commercializzati come materiali per il rinforzo strutturale, in quanto costituiscono la materia prima per la fabbricazione dei tessuti. Le aziende produttrici possono mettere a disposizione le caratteristiche del filato ed i relativi certificati di conformità allo scopo di tutelare i loro clienti. Qui di seguito viene proposta una scheda tecnica tipo, con la precisazione che le schede dei prodotti in commercio potrebbero riportare solo parte delle informazioni qui indicate o includerne anche altre. La normativa internazionale di riferimento è la ISO 2113:1996(E).

#### **SCHEDA TECNICA: 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.

#### **Caratteristiche del filato**

Proprietà	Unità di misura	Metodo di prova normativa di riferimento
diametro fibra	μm	
densità fibra	g/cm <sup>3</sup>	
nr. Filamenti		
titolo	Tex	ISO1889:1997(E)
tipo di finissaggio ( <i>size</i> )		
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)

#### **Condizioni di Stoccaggio**

Descrizione

#### **Precauzioni d'uso e sicurezza**

Descrizione

Nel caso in cui sia necessario determinare o verificare il titolo di un filato è possibile operare secondo la norma ISO 1889:1997(E). Si preleva, cioè, dal tessuto un campione di filato di lunghezza definita e se ne effettua la pesatura; il valore del titolo è dato dal rapporto:

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

essendo  $T_x$  il titolo del filato, espresso in Tex [g/km];  $P$  il peso del campione, espresso in grammi;  $L$  la lunghezza del campione, espressa in metri.

### 2.2.2 Tessuti non impregnati

Il tessuto non impregnato di resina può anche essere indicato con l'attributo "secco". Il tessuto più semplice è ottenuto a partire dal *roving* ed è detto *stuoia* (*woven roving*). Poiché il *roving* è essenzialmente privo di ritorcitura, il filo tende a schiacciarsi all'incrocio tra trama e ordito, dando luogo ad un tessuto adatto a realizzare manufatti di grandi dimensioni ed elevato spessore.

Per applicazioni più specifiche, in cui sia richiesta l'ottimizzazione del peso della struttura, si utilizzano tessuti ottenuti direttamente dalla tessitura dei fili (*yarn*), i quali risultano così più leggeri e compatti.

Un composito laminato ottenuto con l'impiego di tessuti presenterà sempre una frazione in volume di fibre inferiore rispetto ad un laminato composto da lamine di fibre unidirezionali, a causa dell'ondulazione imposta dalla tessitura.

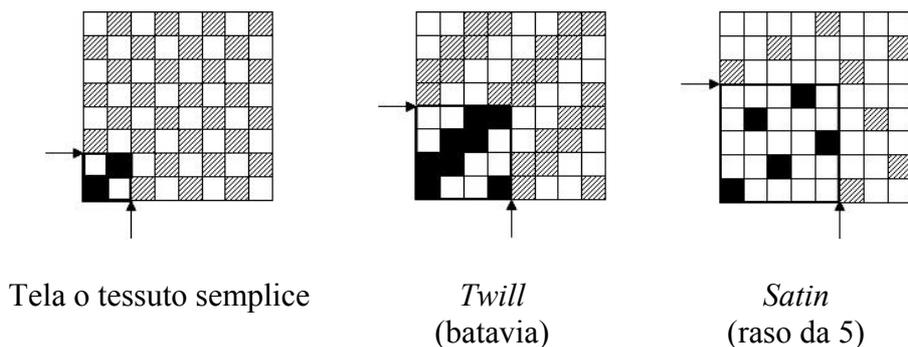
Le tipologie di tessuto più comuni sono la tela, il batavia ed il raso. La tela (*plain*) presenta la struttura più rigida e stabile, in quanto possiede una trama molto fitta. I principali svantaggi sono la difficoltà di impregnazione con la resina e il fatto che trama e ordito si presentano molto ondulati. Quest'ultima caratteristica implica una minore efficienza del rinforzo nel piano del laminato. L'ondulazione (*crimp*) di questo tipo di tessuto è pari a circa il 10%.

Il batavia (*twill*, 2 fili sopra e 2 fili sotto) e ancor più il tessuto raso (*satın*) sono più flessibili e, in proporzione, più facilmente danneggiabili in fase di manipolazione. Il tessuto *satın* è quello intrinsecamente più rigido nel piano di laminazione, in quanto presenta la minore ondulazione delle fibre in entrambe le direzioni.

Accanto alle suddette tipologie, ne esistono altre quali, ad esempio, il *crowfoot*, il *basket* e il leno.

In Figura 2-8 sono riportate le geometrie dei tessuti che più frequentemente ricorrono nelle applicazioni correnti. La rappresentazione è conforme alla seguente convenzione:

- casella nera o tratteggiata = filo di trama sopra il filo di ordito;
- casella bianca = filo di trama sotto il filo di ordito.



**Figura 2-8** – Esempi di tessuti.

Esistono anche tessuti multiassiali, nei quali le fibre sono orientate in più di due direzioni del piano. Essi possono essere costituiti da fili intessuti o semplicemente cuciti tra di loro.

Sono infine disponibili anche tessuti tridimensionali, in cui la presenza di una seconda "trama" in direzione ortogonale al piano impartisce maggiore resistenza e conferisce al prodotto proprietà particolari (ad esempio, la capacità di rigonfiarsi quando vengono impregnati con la resina).

### 2.2.2.1 Caratteristiche tecniche dei tessuti non impregnati

I tessuti per il rinforzo strutturale sono comunemente distribuiti secchi ed in rotoli, da utilizzare per l'impregnazione in cantiere con apposite resine. I tessuti possono essere unidirezionali, nei quali le fibre sono tutte orientate nella direzione della lunghezza e tenute insieme da un trama leggera di tipo non strutturale; bidirezionali, costituiti da una tessitura trama-ordito ortogonale di solito bilanciata (stessa percentuale di fibre nelle due direzioni); multiassiali con fibre orientate in diverse direzioni del piano. L'utilizzatore di tessuti secchi può richiedere alle aziende produttrici i certificati di conformità dei prodotti alle specifiche dichiarate.

Qui di seguito viene riportata a titolo di esempio una scheda tecnica tipo per tessuti mono e bidirezionali (le schede tecniche dei tessuti in commercio potrebbero riportare anche altre informazioni o

#### SCHEDA TECNICA: tessuto non impregnato

IL PRODUTTORE DEVE RIPORTARE I VALORI STATISTICI NECESSARI PER LA VALUTAZIONE DELLE RESISTENZE CARATTERISTICHE (AD ESEMPIO MEDIA, SCARTO QUADRATICO MEDIO, POPOLAZIONE, FRATILE, INTERVALLO DI CONFIDENZA).

#### Descrizione tessuto

Tipo armatura (tela, batavia, raso, spina, ecc.), tipo di filato (trama e ordito), altri componenti oltre a trama ed ordito (finissaggi, velo, filo legatura, ecc.), ed ogni altra informazione generale ritenuta utile.

#### Caratteristiche del tessuto

Proprietà		Unità di misura	Metodo di prova normativa di riferimento
titolo filato	ordito	Tex	ISO1889:1997(E)
	trama	Tex	
densità filato		g/cm <sup>3</sup>	
N° fili/cm	ordito	n°/cm	ISO 4602:1997(E)
	trama	n°/cm	
massa (peso)	totale	g/m <sup>2</sup>	ISO 3374:2000(E)
	ordito	g/m <sup>2</sup>	
	trama	g/m <sup>2</sup>	
modulo di elasticità normale a trazione	ordito	MPa	
	trama	MPa	
resistenza a trazione (valore medio e caratteristico)	ordito	[N]	ISO 4606:1995(E) (textile glass)
	trama	[N]	ISO 13934-1:1999(E)
deformazione a rottura	ordito	%	ISO 4606:1995(E) (textile glass)
	trama	%	ISO 13934-1:1999(E)

#### Caratteristiche del filato

Vedere scheda tecnica filato

#### Condizioni di Stoccaggio

Descrizione

#### Precauzioni d'uso e sicurezza

Descrizione

limitarsi ad una parte di quelle indicate).

La normativa generale di riferimento è la UNI 8099:1980.

Per tessuti multiassiali, oltre alle indicazioni generali riguardanti il tipo di filato e le altre caratteristiche del tessuto, deve essere riportata anche l'orientazione di ciascuno strato di fibre.

Nel seguito sono illustrati esempi relativi alla determinazione di alcune quantità caratteristiche dei tessuti utilizzati per il rinforzo strutturale.

Nel caso in cui siano forniti solo il titolo del filato e la geometria, è possibile determinare il peso per unità di superficie delle fibre in una determinata direzione utilizzando la seguente relazione:

$$p_x = \frac{T_x \cdot N_f}{10}, \quad (2.2)$$

essendo  $p_x$  il peso del tessuto o della componente del tessuto nella direzione interessata, espressa in  $[g/m^2]$ ;  $T_x$  il titolo del filato riferito alla direzione in esame, espresso in  $Tex [g/km]$ ;  $N_f$  è il numero di filati per unità di larghezza riferiti alla direzione in esame  $[n^0/cm]$ .

Ad esempio, dato un tessuto unidirezionale caratterizzato da 3.8 fili/cm e con un titolo del filo di 800 Tex, il peso per unità di superficie risulta essere:

$$p_x = \frac{800 [Tex] \cdot 3.8 [fili/cm]}{10} = 304 g/m^2.$$

Nel caso in cui sia necessario determinare o verificare il numero di fili in un'assegnata direzione per unità di lunghezza nella direzione ortogonale, si può operare secondo la norma ISO 4602:1997(E): si contano cioè i fili disposti in quella direzione su una base prescelta del tessuto (ortogonale alla direzione assegnata e larga ad esempio 10 cm) e si riconduce tale numero proporzionalmente all'unità di lunghezza.

### 2.2.3 Matrici

Le matrici più utilizzate per la fabbricazione dei compositi fibrorinforzati sono quelle polimeriche a base di resine termoindurenti. Tali resine sono disponibili in forma parzialmente polimerizzata e si presentano liquide o pastose a temperatura ambiente. Per miscelazione con un opportuno reagente esse polimerizzano (reticolano) fino a diventare un materiale solido vetroso. Poiché la reazione può essere accelerata agendo sulla temperatura, le suddette resine sono anche dette termoindurenti. I vantaggi da esse presentati sono diversi: sono caratterizzate da una bassa viscosità allo stato fluido e quindi da una relativa facilità di impregnazione delle fibre, da ottime proprietà adesive, dalla possibilità di avere formulazioni che reticolano a temperatura ambiente, da una buona resistenza agli agenti chimici, dall'assenza di una temperatura di fusione, ecc. I principali svantaggi sono invece rappresentati dall'ampiezza del campo di temperature di esercizio, limitato superiormente dalla temperatura di transizione vetrosa, dalla modesta tenacità a frattura (comportamento "fragile") e dalla sensibilità all'umidità in fase di applicazione sulla struttura.

Le resine termoindurenti più utilizzate nei compositi fibrorinforzati per il settore civile sono le epossidiche. In alcuni casi è possibile impiegare resine poliestere o vinilestere.

Poiché il materiale viene miscelato a partire dai diversi componenti direttamente in cantiere e assume le sue caratteristiche strutturali finali attraverso una reazione chimica, esso dovrebbe sempre essere applicato da personale specializzato.

Sono anche disponibili materiali compositi fibrorinforzati con matrici polimeriche termoplastiche, che possono richiedere tecniche di applicazione diverse dalle precedenti. Ad esempio, sono allo studio barre in composito con matrice termoplastica le quali, rispetto all'analogo prodotto con ma-

trice termoindurente, hanno il vantaggio di poter essere piegate in qualsiasi momento mediante un opportuno trattamento termico.

### 2.2.3.1 Resine epossidiche

Le resine epossidiche presentano una buona resistenza all'umidità ed agli agenti chimici ed inoltre esibiscono ottime proprietà adesive. Sono perciò particolarmente indicate per la realizzazione di compositi da impiegare nel settore civile.

La temperatura massima di esercizio dipende dalla formulazione e dalla temperatura di reticolazione. Per temperature di esercizio superiori a 60 °C, la resina deve essere opportunamente selezionata tenendo conto delle competenti variazioni delle sue caratteristiche meccaniche. Al contrario non sussistono, di solito, limiti per la temperatura minima di esercizio.

Il reagente principale è costituito da liquidi organici a basso peso molecolare che contengono un certo numero di gruppi epossidici, anelli composti da un atomo di ossigeno e da due atomi di carbonio:

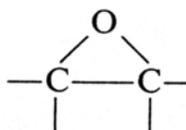


Figura 2-9 – Gruppo epossidico.

Tali sostanze possono, ad esempio, essere prodotte per reazione di epichloridrina con composti amminici o acidi del bisfenolo A.

Il prepolimero epossidico, solitamente, è un fluido viscoso, la cui viscosità dipende dal grado di polimerizzazione. Alla suddetta miscela, che in termini di composizione costituisce il reagente principale, viene aggiunto un agente reticolante (di solito un'ammina alifatica).

La reazione, di tipo radicalico, è esotermica e ha luogo senza la formazione di prodotti secondari. Può essere condotta sia a temperatura ambiente che ad elevata temperatura, a seconda delle necessità tecnologiche e delle proprietà finali desiderate.

La struttura chimica della resina può essere variata a piacere in base alla composizione chimica del prepolimero epossidico.

La resina epossidica più comunemente utilizzata per materiali compositi è il diglicidil etero del bisfenolo A (DGEBA).

### 2.2.3.2 Resine poliestere

Le resine poliestere sono caratterizzate da una viscosità inferiore rispetto alle epossidiche e presentano una notevole versatilità ed un'elevata reattività. La resistenza meccanica e le proprietà adesive sono solitamente inferiori rispetto a quelle esibite dalle resine epossidiche.

Le poliestere insature sono polimeri lineari ad alto peso molecolare, che contengono doppi legami C=C in grado di reagire chimicamente. Il grado di polimerizzazione, e quindi la lunghezza della molecola, può essere variato; tuttavia, a temperatura ambiente, la resina si presenta solitamente come una sostanza solida. Per poter essere impiegata deve quindi essere disciolta in un opportuno solvente: di solito quest'ultimo consiste in un monomero reattivo, che riduce la viscosità della resina e facilita quindi il processo di impregnazione delle fibre. Il monomero (in genere stirene) deve contenere anch'esso dei doppi legami C=C, che consentano di creare dei ponti di reticolazione tra le molecole di poliestere.

La reazione è esotermica e ha luogo senza la formazione di prodotti secondari. Può essere condotta sia a temperatura ambiente che ad elevata temperatura a seconda delle necessità tecnologiche e delle proprietà finali desiderate.

La struttura chimica delle resine poliestere può essere variata a piacere, sia cambiando l'acido e il glicole utilizzati nella sintesi del polimero, sia impiegando un monomero reattivo diverso.

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

### **2.2.3.3 Altre tipologie di resine**

I limiti intrinseci delle resine termoindurenti, sopra elencati, in particolare la modesta tenacità, le temperature di esercizio piuttosto basse e la tendenza ad assorbire umidità dall'ambiente, hanno portato in anni recenti allo sviluppo di compositi a matrice termoplastica. Tali resine sono caratterizzate dalla capacità di fluire una volta riscaldate ad una temperatura sufficientemente elevata, superiore, cioè, alla  $T_g$  (temperatura di transizione vetrosa) nel caso di materiali amorfi e superiore alla  $T_m$  (temperatura di fusione) nel caso di materiali semicristallini. La forma dei componenti può quindi essere modificata a piacere, riscaldando semplicemente il materiale ad un'opportuna temperatura (formatura a caldo). Pur essendo al momento il loro impiego in campo civile piuttosto limitato, sono allo studio applicazioni di potenziale notevole importanza (ad esempio barre di rinforzo per conglomerato cementizio armato). Rispetto alle resine termoindurenti, quelle termoplastiche sono mediamente più tenaci e, in alcuni casi, presentano temperature di esercizio più elevate. Sono inoltre caratterizzate da una migliore resistenza nei confronti dei fattori ambientali.

La principale limitazione al loro uso è rappresentata dalla viscosità elevata, che rende problematica l'impregnazione delle fibre e richiede apparecchiature di lavorazione complesse e costose.

Per impieghi ad elevata temperatura in ambienti chimicamente aggressivi, sono state sviluppate le resine vinilestere, che, dal punto di vista applicativo, rappresentano un compromesso tra le prestazioni delle resine poliestere tradizionali e quelle delle resine epossidiche.

Vanno infine ricordate le matrici di natura inorganica (cementizie, metalliche, ceramiche, ecc.), il cui utilizzo per la realizzazione di compositi fibrorinforzati in campo civile sta progressivamente diffondendosi. Pur non essendo esaminate nel presente documento, il loro impiego è tuttavia ritenuto possibile a condizione che risulti suffragato da una documentazione tecnica e da una campagna sperimentale adeguate, comprovanti un'efficacia almeno pari a quella delle matrici organiche qui trattate.

### 2.2.3.4 Scheda tecnica della resina

Di seguito viene riportata a titolo di esempio una scheda tecnica tipo per le resine (le schede

#### 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	Note
colore						
viscosità a 25 °C	Pa·s				ISO 2555:1989(E) ISO 3219:1993(E)	(1)
indice di tissotropia					ASTM D2196-99	(1)
densità	g/cm <sup>3</sup>				ISO 1675:1985(E)	
rapporto di miscelazione	in volume	%				
	in peso	%				
condizioni di stoccaggio (contenitore sigillato)	tempo	mesi				
	temperatura	°C				

(1) 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:

Descrizione

##### Condizioni di applicazione:

Descrizione

Proprietà	Unità di misura	Metodo di prova normativa di riferimento	Note
tempo di lavorabilità (a 35 °C)		ISO 10364:1993(E)	(2)
tempo di gelo	a 5 °C	min ISO 9396:1997(E) ISO 2535:2001(E) ISO 15040:1999(E)	(3)
	a 20 °C		
	a 35 °C		
temperatura minima di applicazione	°C		
picco esotermico	tempo	min ISO 12114:1997(E)	
	temperatura		
tempo di completa reticolazione ( <i>full cure</i> )	a 5 °C	min ISO 12114:1997(E)	
	a 20 °C		
	a 35 °C		

(2) Tempo di lavorabilità (*pot life* o *working life*) = tempo massimo di lavorabilità dopo la miscelazione.

(3) 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	Temperatura 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, <i>T<sub>g</sub></i>	°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**

Descrizione

**Precauzioni d'uso e sicurezza**

Descrizione

tecniche delle resine in commercio potrebbero riportare anche altre informazioni o limitarsi ad una parte di quelle indicate).

**2.2.4 Adesivi e principi generali di incollaggio**

La messa in opera di alcuni tipi di rinforzo strutturale a base di FRP, come ad esempio le lamine pultruse, richiede l'utilizzo di adesivi. La scelta più appropriata dell'adesivo e del tipo di trattamento superficiale da effettuare prima dell'applicazione va fatta in base alla natura del substrato della struttura da riparare e del materiale di rinforzo. Risulterebbe quindi complesso trattare in modo analitico l'argomento, in quanto sarebbe necessario innanzitutto distinguere i vari casi (strutture in acciaio, conglomerato armato, muratura o legno) secondo un'articolazione esuberante per i limiti del presente documento.

Le schede tecniche dei materiali da rinforzo riportano solitamente indicazioni sul tipo di adesivo da utilizzare in funzione della natura della struttura che si intende rinforzare. Anche l'applicazione di tessuti secchi da impregnare in cantiere può essere considerata in senso lato come un caso di assemblaggio mediante adesivi, in quanto la stessa resina utilizzata per l'impregnazione svolge la funzione di adesivo.

Molto importante, per il corretto utilizzo degli adesivi, è il tipo di trattamento superficiale da eseguire prima della loro applicazione. Per tale motivo si è ritenuto utile in questo paragrafo soffermarsi soprattutto sui motivi che rendono necessaria un'adeguata preparazione del substrato, illustrando i meccanismi fisici, chimici e meccanici alla base dell'adesione.

Per una trattazione più approfondita si rimanda ai testi specifici sull'argomento.

Si definisce adesivo un materiale, quasi sempre di natura polimerica, in grado di realizzare un collegamento tra almeno due superfici e di trasmettere forze di entità anche rilevante (collegamento strutturale). Esistono molte tipologie di adesivi naturali e sintetici (elastomeri, resine termoplastiche e termoindurenti mono o bicomponente); i più adatti per i materiali compositi sono gli adesivi a ba-

se di resine epossidiche. Gli adesivi epossidici si presentano come una miscela viscosa bicomponente; una volta induriti, a seguito di una reazione chimica di reticolazione, essi realizzano il collegamento strutturale.

I vantaggi delle giunzioni adesive rispetto a quelle meccaniche sono molteplici: possibilità di unire materiali diversi, maggior rigidità, distribuzione dei carichi più uniforme, consolidamento delle parti, assenza di fori potenzialmente dannosi per le conseguenti concentrazioni tensionali, resistenza a fatica, minori costi di intervento. Esistono anche alcuni limiti che richiedono una particolare attenzione nelle applicazioni in campo civile: gli adesivi sono infatti sensibili alle condizioni ambientali, quali l'umidità, e non sono idonei per esposizioni ad alte temperature (resistenza al fuoco) [3]. Nel caso delle giunzioni adesive si possono individuare le seguenti tre tipologie di frattura (Figura 2-10).

- **Frattura coesiva:** avviene all'interno di uno dei materiali che costituiscono il giunto. Lo stesso materiale è dunque presente su entrambe le superfici di frattura, le quali possono presentarsi lisce o rugose. È il tipo di frattura che si osserva nelle condizioni ideali di applicazione dell'adesivo.
- **Frattura adesiva:** avviene all'interfaccia tra l'adesivo e l'aderendo, quando la resistenza dell'interfaccia (forza di adesione) è minore di quella dell'aderendo. Le superfici di frattura sono solitamente lisce e costituite da due materiali differenti. Questo tipo di frattura è indice di una non corretta applicazione dell'adesivo.
- **Frattura mista:** si presenta alternativamente sia come coesiva che adesiva. Le superfici di frattura sono molto irregolari e sono caratterizzate dalla coesistenza di entrambi i materiali. Si manifesta in presenza di un substrato debole e non consolidato, come ad esempio una muratura o un calcestruzzo molto degradati, in concorso con modalità di applicazione dell'adesivo non ottimali.



**Figura 2-10** – Confronto tra le diverse tipologie di frattura.

L'efficienza del giunto adesivo dipende da molti aspetti, tra cui il tipo di trattamento superficiale, già richiamato, la composizione chimica e la viscosità dell'adesivo, la tecnica di applicazione ed infine il processo di indurimento o di reticolazione dello stesso adesivo.

I meccanismi di adesione consistono principalmente nell'aggrappaggio meccanico (*interlocking*) dell'adesivo con la superficie dell'aderendo e nella formazione di legami chimici tra le molecole polimeriche e quelle del substrato. Conseguentemente, nel determinare la resistenza dell'adesivo, risultano fondamentali quei trattamenti superficiali tesi ad incrementare la tensione superficiale all'interfaccia ovvero a modificare chimicamente la superficie dell'aderendo, aumentandone la rugosità e quindi l'area effettiva di contatto.

In letteratura sono descritte diverse tipologie di meccanismi di adesione che vengono qui nel seguito riassunti.

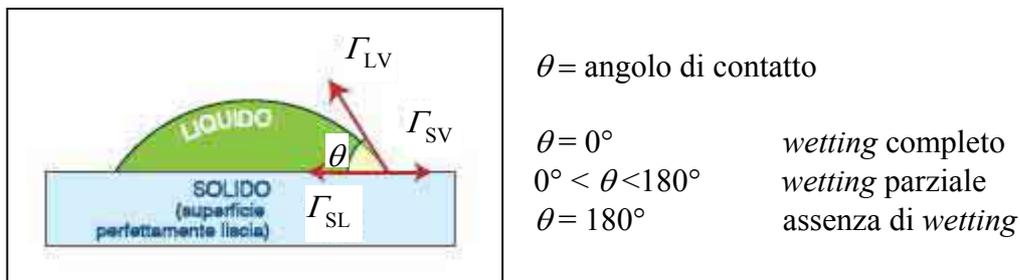
**Legame di tipo fisico:** coinvolge legami secondari, quali forze di Van der Waals, legami ionici e idrogeno tra le molecole dell'adesivo e dell'aderendo. Per l'interpretazione di tale legame è necessario rifarsi alla teoria dell'attrazione elettrostatica e dell'assorbimento. Quest'ultima afferma che una buona adesione è garantita, innanzitutto, se l'adesivo è in grado di bagnare il substrato (*wetting*), cioè è in grado di spandersi sulla superficie solida. A tal fine è necessario che l'energia superficiale

dell'aderendo  $\Gamma_{SV}$  (energia specifica riferita all'unità di superficie) sia maggiore di quella dell'adesivo  $\Gamma_{LV}$  (Figura 2-11): ad esempio le resine epossidiche bagnano molto bene l'acciaio, circostanza che non si verifica per altri materiali, quali ad esempio il polietilene.

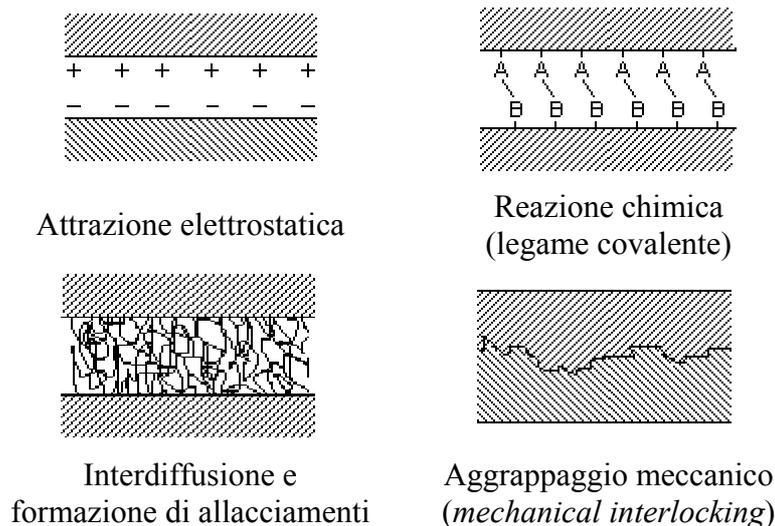
**Legame chimico-covalente:** coinvolge legami primari (legami covalenti) tra le molecole del substrato e dell'adesivo (Figura 2-12). La frattura implica quindi la rottura dei suddetti legami. Ciò giustifica, ad esempio, nel caso delle fibre di vetro, l'utilizzo di agenti compatibilizzanti: essi si legano agli ossidi presenti in superficie per poi reagire con l'adesivo durante la reticolazione ovvero per dare luogo a fenomeni diffusivi (vedere punto successivo).

**Fenomeni diffusivi o interdiffusivi:** in seguito alla diffusione o interdiffusione degli atomi o delle molecole attraverso l'interfaccia, si instaura un'unione tra le due superfici (Figura 2-12). Il meccanismo descritto è peculiare per i compositi a matrice polimerica, in cui la mobilità delle catene rende possibile la formazione di "allacciamenti" (*entanglements*); in tal caso il fattore tempo assume una notevole importanza nei confronti della resistenza finale mobilitata dal giunto.

**Aggrappaggio meccanico (*mechanical interlock theory*):** il legame sfrutta la resistenza allo scorrimento reciproco tra superfici localmente compenstrate; da qui l'importanza di avere superfici molto irregolari su scala microscopica (rugosità) sulle quali l'adesivo possa spandersi, riempire i pori e le fessure presenti e quindi solidificare (Figura 2-12).



**Figura 2-11** –Teoria dell'adsorbimento e angolo di contatto.



**Figura 2-12** – Meccanismi di adesione.

Qualsiasi tipo di trattamento superficiale ha come obiettivo primario il conseguimento di una superficie "pulita", ossia la rimozione di tutte le eventuali contaminazioni superficiali, quali ossidi, particelle estranee, oli, grassi, polveri, umidità, ecc. Quasi sempre, inoltre, il trattamento posto in essere modifica chimicamente la superficie dell'aderendo favorendo la formazione di legami più forti con

l'adesivo, tali da resistere ad agenti ambientali aggressivi, tendenti nel tempo a degradare la resistenza dell'incollaggio. Contestualmente, il trattamento deve inoltre garantire un'adeguata rugosità superficiale [4].

I trattamenti più semplici che vengono usualmente utilizzati nei placcaggi con compositi fibrorinforzati consistono nella decontaminazione con opportuni solventi e nell'abrasione della superficie mediante sabbiatura. Quest'ultima consente non solo di rimuovere sostanze estranee (ad esempio ossidi) ma anche di assicurare la rugosità superficiale necessaria. In alcune situazioni, prima di stendere l'adesivo, può essere opportuno applicare sul substrato un *primer* con funzione di compatibilizzante. Ovviamente, l'utilizzo di lamine pultruse preformate richiede in aggiunta un'adeguata pulizia della faccia della lamina che verrà poi incollata sul supporto. In alcuni casi esse sono protette da una pellicola che mantiene la faccia in questione al riparo da agenti contaminanti esterni. La pellicola va rimossa solo al momento dell'applicazione.

È importante sottolineare che qualsiasi trattamento superficiale deve essere necessariamente eseguito subito prima dell'applicazione del rinforzo onde evitare il pericolo di ricontaminazione.

Tra gli agenti contaminanti, accanto a tutte le possibili sostanze estranee presenti in cantiere, va inclusa l'umidità: è infatti buona norma assicurare che le superfici di incollaggio siano ben asciutte prima dell'applicazione dell'adesivo.

#### 2.2.4.1 Scheda tecnica dell'adesivo

Gli adesivi più adatti per i materiali compositi sono quelli a base di resine epossidiche bicomponenti. La competente scheda tecnica dovrebbe quindi riportare non solo le proprietà fisico-chimiche dei singoli componenti, ma anche le proprietà adesive. Poiché le prime sono già state elencate nel § 2.2.3.4, la scheda tecnica qui riprodotta fa riferimento alle sole proprietà adesive.

#### **SCHEMA TECNICA: 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.

#### **Proprietà adesive della resina**

Proprietà	Unità di misura	Temperatura di prova	Valore		Metodo di prova normativa di riferimento
			stagionato 5 gg. a 22 °C	stagionato 1 ora a 70 °C	
resistenza a taglio (valore medio e caratteristico)	MPa				<i>single lap shear</i> ISO 4587:2003(E)
resistenza a <i>peeling</i> (valore medio e caratteristico)	kN/m				<i>floating-roller method</i> ISO 4578:1997(E)

N.B. per il rinforzo esterno con lamine/nastri in 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". Per l'adesione sull'acciaio tale norma non propone prove specifiche. Esiste però un'analogia normativa Giapponese (JSCE-E544-2000 in "Test methods for continuous fiber sheets") che propone un test di lap shear strength tra FRP e acciaio.

%

**Condizioni di Stoccaggio**

Descrizione

**Precauzioni d'uso e sicurezza**

Descrizione

**2.3 SISTEMI DI RINFORZO**

I sistemi in FRP idonei per il rinforzo esterno delle strutture possono essere suddivisi nelle seguenti categorie [5,6]:

- sistemi preformati (*preured systems*);
- sistemi impregnati in situ (*wet lay-up systems*);
- sistemi preimpregnati (*prepreg systems*).

**2.3.1 Sistemi preformati**

Sono componenti di varia forma preparati in stabilimento mediante pultrusione o laminazione, che vengono applicati all'elemento strutturale da rinforzare mediante adesivi.

**SCHEMA 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	Metodo di prova	Note
spessore (lamina)	mm		
larghezza	mm		
lunghezza	mm		
geometria della sezione (barre, cavi)			
area nominale (barre, cavi)	mm <sup>2</sup>		
perimetro nominale (barre, cavi)	mm		(1)
colore			
	fibra	g/cm <sup>3</sup>	
	matrice	g/cm <sup>3</sup>	
	in peso	%	
	in volume	%	
temperatura di transizione vetrosa della resina	°C	ISO 11357-2:1999(E) (DSC)	
temperatura limite massima di utilizzo	°C		

%

temperatura limite massima di utilizzo	°C		
conducibilità elettrica	S/m		

- (1) Valore utile nel caso di barre e cavi di sezione non circolare per il calcolo della lunghezza di ancoraggio.  
(2) Valore utile per calcolare la frazione in peso di fibra quando è nota quella in volume o viceversa.

### **Proprietà**

Proprietà	Unità di misura	Metodo di prova normativa di riferimento	Note
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		ISO 899-1:2003(E)	(3)
rilassamento (barre, cavi)			(4)
aderenza: tensione tangenziale (barre, cavi)		prova di pull-out	(4)

(3) 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 in FRP ("Test Method for creep failure").

(4) Nella norma ISO (TC71/SC6N) riguardante barre e cavi in 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.

### **Condizioni di Stoccaggio**

Descrizione

### **Precauzioni d'uso e sicurezza**

Descrizione

Problemi di durabilità: resistenza a UV, alcali, acidi (caso cavi post-tesi esterni), umidità, ecc.

Problemi individuati: resistenza al fuoco, conducibilità termica ed elettrica (ad es. CFRP nel caso di placcaggio di strutture metalliche), resistenza all'impatto, attrito e usura dovuta a strisciamento su guaina o deviatori, comportamento alle basse temperature.

Immediatamente sopra, a titolo di esempio, viene proposta una scheda tecnica tipo per compositi preformati (lamine, barre, cavi, ecc.). Come già precedentemente osservato, le schede tecniche dei compositi in commercio potrebbero includere anche altre informazioni o riportare solo parte di quelle appresso indicate.

### **2.3.2 Sistemi impregnati *in situ***

Sono costituiti da fogli di fibre unidirezionali o multidirezionali o da tessuti che vengono impregnati con una resina, la quale funge anche da adesivo con il substrato interessato (calcestruzzo, ecc.).

Per tali compositi, non essendo disponibile una scheda tecnica analoga alla precedente, è indispensabile fare riferimento alle caratteristiche tecniche dei tessuti non impregnati (secchi) per definire l'area resistente delle fibre. Tale grandezza, comunemente riferita alle direzioni principali del tessu-

to, è espressa per unità di larghezza di quest'ultimo (di solito in  $\text{mm}^2/\text{m}$ ) ed è calcolabile mediante la seguente relazione generale:

$$A_{rt} = \frac{T_x \cdot N_f}{10\rho}, \quad (2.3)$$

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

Nel caso di tessuti che presentano lo stesso numero di fibre nelle direzioni di trama ed ordito (bilanciati), detto  $p_t$  il peso del tessuto per unità di area espresso in  $\text{g}/\text{m}^2$ , è anche possibile ricavare l'area resistente utilizzando la seguente relazione:

$$A_{rt} = \frac{p_t}{2\rho}. \quad (2.4)$$

Nel caso di un tessuto unidirezionale, con lo stesso significato dei simboli, l'area resistente è valutabile come:

$$A_{rt} = \frac{p_t}{\rho}. \quad (2.5)$$

Talvolta si usa riferire l'area resistente del tessuto allo spessore di una lastra equivalente costituita dalle sole fibre. Tale spessore,  $t_{eq}$ , espresso in mm, è ottenibile mediante la seguente relazione:

$$t_{eq} = \frac{A_{rt}}{1000}. \quad (2.6)$$

Un inconveniente di tale modo di procedere consiste nel fatto che ad uno stesso tessuto non bilanciato, cioè con grammature diverse nelle direzioni di trama ed ordito, verrebbero ad essere associati due diversi spessori della lastra equivalente.

A titolo di esempio viene riportato il calcolo dell'area resistente per tre diverse tipologie di tessuti a base di fibre di carbonio: un tessuto a tela semplice (*plain weave*) non bilanciato (tessuto A); uno a tela semplice ma bilanciato (tessuto B); ed infine un tessuto unidirezionale (tessuto C). Le caratteristiche di tali tessuti sono riassunte in Tabella 2-6.

**Tabella 2-6**

Proprietà		Unità di misura	Tessuto A	Tessuto B	Tessuto C
Peso del tessuto		$\text{g}/\text{m}^2$	187	286	304
Densità della fibra		$\text{g}/\text{cm}^3$	1.76	1.76	1.8
$\text{n}^\circ$ di fili/cm	trama	$\text{n}^\circ/\text{cm}$	4	6	--
	ordito	$\text{n}^\circ/\text{cm}$	8	6	3.8
Titolo	trama	Tex	67	200	--
	ordito	Tex	200	200	800

Nel caso di tessuto non bilanciato (tessuto A), applicando la relazione (2.3) si perviene a:

$$A_{rt}^{\text{trama}} = \frac{67 [\text{Tex}] \cdot 4 [\text{fili/cm}]}{10 \cdot 1.76 [\text{kg/dm}^3]} = 15.2 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \quad (\text{area resistente nella direzione della trama}),$$

$$A_{rt}^{\text{ordito}} = \frac{200 [\text{Tex}] \cdot 8 [\text{fili/cm}]}{10 \cdot 1.76 [\text{kg/dm}^3]} = 90.9 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \quad (\text{area resistente nella direzione dell'ordito}).$$

Nel caso del tessuto B, per entrambe le direzioni, si ottiene:

$$A_{rt} = \frac{200 [\text{Tex}] \cdot 6 [\text{fili/cm}]}{10 \cdot 1.76 [\text{kg/dm}^3]} = 68.2 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} .$$

Alternativamente, sempre nel caso del tessuto B, se si utilizza la relazione (2.4), si perviene allo stesso risultato:

$$A_{rt} = \frac{p_t \left[ \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right]}{2\rho \left[ \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \right]} = \frac{240}{2 \cdot 1.76} = 68.2 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} .$$

Infine, nel caso del tessuto unidirezionale (tessuto C), applicando la (2.5) risulta:

$$A_{rt} = \frac{p_t \left[ \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right]}{\rho \left[ \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \right]} = \frac{304}{1.80} = 168.9 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} .$$

### 2.3.3 Sistemi preimpregnati

Sono costituiti da fogli di fibre unidirezionali o multidirezionali o da tessuti preimpregnati con resina parzialmente polimerizzata. Possono essere incollati al substrato da rinforzare con (o senza) l'uso di resine aggiuntive. I *prepreg* sono impregnati direttamente negli stabilimenti di produzione e, dopo un eventuale trattamento di pre-polimerizzazione della resina stessa, sono avvolti in rotoli. Il preimpregnato è un foglio sottile (di solito di spessore pari a circa 0.15 mm), flessibile e moderatamente appiccicoso, racchiuso tra due strati di film distaccante (carta siliconata o simili). Il preimpregnato deve essere conservato in condizioni controllate di umidità e temperatura e la sua reticolazione deve avvenire al momento dell'applicazione con l'ausilio di un opportuno trattamento termico.

### 2.3.4 Classificazione

I materiali compositi oggetto delle presenti Istruzioni possono essere classificati in funzione del tipo di resina, del tipo di rinforzo (fibra e tessitura), del tipo di geometria e di laminato.

- Tipo di resine. Le resine più comunemente utilizzate sono quelle epossidiche. In alcuni casi è anche possibile utilizzare resine poliestere e vinilestere. Qualora si utilizzino matrici inorganiche, è necessario verificare che esse posseggano caratteristiche meccaniche e fisiche tali da renderle idonee per il rinforzo strutturale. Non sono ammesse miscele di resine diverse.
- Tipi di rinforzo (fibre). Possono essere utilizzate fibre di vetro, carbonio, aramidiche e altre tipologie di fibre purché le loro caratteristiche meccaniche siano adeguate all'impiego previsto. Le fibre possono essere disposte unidirezionalmente nella forma di *rovings* o *tows* (con qualsiasi dimensione – vedere § 2.2.1.1) oppure possono essere nella forma di tessuti cuciti, intessuti, intrecciati o non-tessuti senza alcuna limitazione in dimensione e peso.

- Tipo di geometria del rinforzo. Una possibile classificazione dei tipi di rinforzo è quella che fa riferimento alla direzione longitudinale del laminato. Lo schema seguente discende dalla proposta iniziale di Bank [7] e si articola nei seguenti tipi:
  - tipo A: presenta almeno il 95% di fibre continue disposte in direzione longitudinale e possiede una percentuale volumetrica in fibre,  $V_{fib}$  (vedere Appendice, § 6.2), maggiore del 50%;
  - tipo B: presenta almeno il 95% di fibre continue in direzione longitudinale del laminato con un  $V_{fib}$  maggiore del 30%;
  - tipo C: presenta almeno il 40% di fibre continue in direzione longitudinale del laminato con un  $V_{fib}$  maggiore del 30%.

La suddetta tipologia si applica a lamine, barre e cavi (tipo A), a tessuti unidirezionali impregnati in cantiere (tipo B) ed a tessuti bidirezionali impregnati in cantiere.

Si è soliti non ritenere influente ai fini della determinazione delle proprietà meccaniche del rinforzo l'eventuale presenza di uno strato di fibre discontinue (*chopped*) o *mats*.

La classificazione proposta potrebbe essere utilizzata in futuro per individuare requisiti differenziati nell'ambito della qualificazione e della certificazione dei materiali oggetto delle presenti Istruzioni.

## 2.4 QUALIFICAZIONE DEI MATERIALI

Il processo di qualificazione di un prodotto FRP con le competenti prove sperimentali deve prevedere tre specifici obiettivi:

- assicurare la qualità del prodotto ed il rispetto di valori minimi richiesti;
- fornire un numero statisticamente significativo di risultati sperimentali atti a garantire le caratteristiche fisiche e meccaniche del prodotto per scopi ingegneristici;
- fornire dati relativi a prove accelerate a carico di quest'ultimo, da cui possano desumersi informazioni sul suo comportamento reologico.

Le prove di qualificazione riguardano le caratteristiche meccaniche (rigidezza e resistenza) e fisiche possedute dai materiali compositi, indipendentemente dalla particolare applicazione. Il tipo ed il numero di prove da eseguire dovrà essere commisurato all'importanza dell'intervento. In quest'ottica, sarà opportuno distinguere situazioni in cui il rinforzo interessa edifici o infrastrutture strategiche ai sensi della Normativa vigente, ovvero elementi strutturali primari (es. travi e pilastri) ovvero ancora solo elementi strutturali secondari (es. solai). Un ulteriore elemento di graduazione deriverà dalla maggiore o minore estensione dell'intervento in rapporto alle dimensioni dell'intera struttura.

Per quanto attiene al livello di qualità dell'installazione ed al suo monitoraggio nel tempo, si rinvia ai successivi paragrafi dedicati a tali specifici argomenti.

E' possibile distinguere le seguenti due fasi di qualificazione dei prodotti.

- Fase A: atta a definire le caratteristiche fisiche e meccaniche del composito attraverso un'analisi statistica di una serie sufficientemente ampia di prove.
- Fase B: atta a definire le caratteristiche fisiche e meccaniche del composito a lungo termine.

Le prove meccaniche e fisiche di qualificazione devono essere condotte da un laboratorio qualificato che disponga di tutte le attrezzature necessarie e che abbia una comprovata esperienza nella caratterizzazione dei materiali compositi.

E' opportuno che ciascun produttore fornisca le caratteristiche meccaniche ricavate su base statistica e comprendenti i valori caratteristici, di cui devono essere definiti i corrispondenti frattili, i valori medi, gli scarti quadratici, l'intervallo di confidenza ed il numero di campioni esaminati. A tali va-

lori possono essere applicati gli opportuni coefficienti parziali definiti anche in base alla tecnica di produzione.

**2.4.1 Fase A: Proprietà fisico-meccaniche**

I campioni utilizzati per le prove devono essere riconducibili alle classi suddette (in base alla frazione volumetrica, all'orientamento delle fibre, al tipo di fibre ed al tipo di resina) e devono presentare le stesse caratteristiche geometriche.

Nel caso di compositi prodotti in stabilimento, i campioni saranno costituiti da spezzoni di barre o di lamine, estratti dalla produzione secondo criteri definiti.

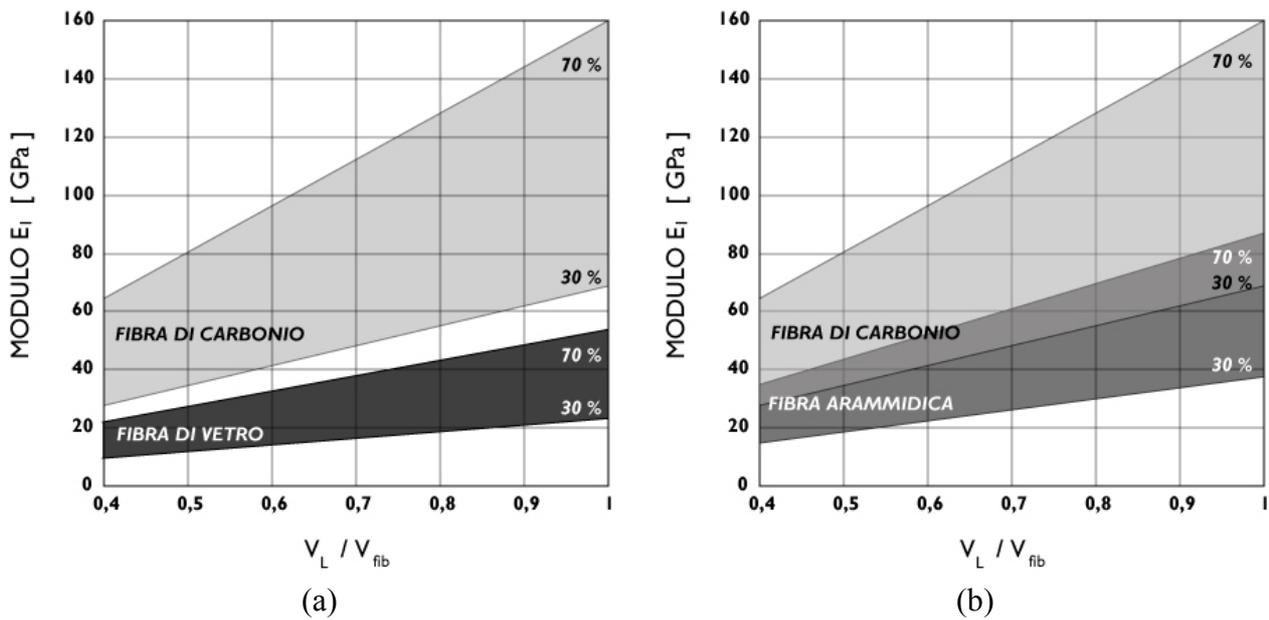
Nel caso invece di compositi prodotti *in situ*, i campioni dovranno essere realizzati con gli stessi componenti impiegati *in situ* ed in condizioni ambientali definite. Il campione da produrre è comunemente un laminato multistrato di forma rettangolare e di dimensioni tali da poter ricavare un numero di provini statisticamente significativo (almeno cinque provini per ogni tipo di prova).

In Tabella 2-7 sono riportate le prove di caratterizzazione più comuni e le rispettive norme tecniche più utilizzate (ISO ed ASTM).

**Tabella 2-7 – Caratteristiche meccaniche e fisiche dei compositi.**

Proprietà	Normativa di riferimento		Tipologia di prodotto
	ISO	ASTM	
<b>Proprietà meccaniche</b>			
modulo di elasticità normale a trazione	527-4, 5:1993(E)	D3039-00, D5083-02, D3916-02	A, B, C
resistenza a trazione	527-1, 4, 5:1993(E)	D3039-00, D5083-02, D3916-02	A, B, C
deformazione a rottura a trazione	527-1, 4, 5:1993(E)	D3039-00, D5083-02, D3916-02	A, B, C
modulo di elasticità normale a compressione	14126:1999(E)	D3410	A, B, C
resistenza a compressione	14126:1999(E)	D3410	A, B, C
deformazione a rottura a compressione	14126:1999(E)	D3410	A, B, C
resistenza a creep	899-1:2003(E)	D2990-01	A, B, C
<b>Proprietà fisiche</b>			
Densità	1183-1:2004(E)	D792-00	A, B, C
coefficiente di dilatazione termica	11359-2:1999(E)	E831, D696	A, B, C
temperatura di transizione vetrosa (della matrice)	11357-2:1999(E) (DSC) 11359-2:1999(E) (TMA)	E1356, E1640, D648, D2092	A, B, C
contenuto di fibre	11667:1997(E)	D3171, D2584	A, B, C

In Figura 2-13 è riportato il confronto tra valori indicativi del modulo di elasticità di compositi caratterizzati da diversi rapporti tra la frazione in volume di fibre disposte in direzione longitudinale e quella totale di tutte le fibre presenti ( $V_L / V_{fib}$ ).



**Figura 2-13** – Modulo di elasticità  $E_1$  in direzione longitudinale per un materiale composito fibrorinforzato con matrice epossidica al variare del tipo e della frazione in volume totale di fibra: (a): confronto tra fibra di carbonio e fibra di vetro; (b): confronto tra fibra di carbonio e fibra aramidica.

È possibile integrare le prove di qualificazione dei compositi con quelle relative ai singoli componenti come suggerito in Tabella 2-8 (tessuti) e Tabella 2-9 (resine).

**Tabella 2-8** – Caratteristiche meccaniche dei tessuti.

Proprietà	Normativa di riferimento ISO	Tipologia di prodotto
<b>Proprietà meccaniche</b>		
modulo di elasticità normale a trazione	4606:1995(E), 13934-1:1999(E)	tessuto
resistenza a trazione	4606:1995(E), 13934-1:1999(E)	tessuto
deformazione a rottura a trazione	4606:1995(E), 13934-1:1999(E)	tessuto

**Tabella 2-9** – Caratteristiche meccaniche e fisiche delle resine (matrice e adesivo).

Proprietà	Normativa di riferimento		Tipologia di prodotto
	ISO	ASTM	
<b>Proprietà meccaniche</b>			
modulo di elasticità normale a trazione	527-1:1993 (E)	D638-02	resina
resistenza a trazione	527-1:1993 (E)	D638-02	resina
deformazione a rottura a trazione	527-1:1993 (E)	D638-02	resina
modulo di elasticità normale a compressione	604:2002(E)	D695	resina
resistenza a compressione	604:2002(E)	D695	resina
deformazione a rottura a compressione	604:2002(E)	D695	resina
resistenza a taglio	4587:2003(E)	D3163-01	adesivo
resistenza a <i>peeling</i>	4578:1997(E)	D3167-03	adesivo
<b>Proprietà fisiche</b>			
viscosità	2555:1989(E), 3219:1993(E)	D2196-99	resina
indice di tissotropia		D2196-99	resina
densità	1675:1985(E)	D1217-93	resina
tempo di gelo	9396:1997(E), 2535:2001(E) 15040:1999(E)	D2471-99	resina
tempo di lavorabilità	10364:1993(E)	D1338-99	resina, adesivo
picco esotermico	12114:1997(E)	D2471-99	resina
tempo di completa reticolazione	12114:1997(E)	D4473-03	resina
ritiro volumetrico	12114:1997(E)	D6289-03	resina
coefficiente di dilatazione termica	11359-2:1999(E)	E831, D696	resina
temperatura di transizione vetrosa	11357-2:1999(E) (DSC) 11359-2:1999(E) (TMA)	E1356, E1640	resina

#### 2.4.2 Fase B: Proprietà a lungo termine

Si possono distinguere tre tipi di comportamenti reologici rilevanti:

- comportamento nel tempo in relazione a fenomeni di degrado chimico;
- comportamento nel tempo in relazione a fattori ambientali (es. cicli di gelo-disgelo);
- comportamento nel tempo sotto carico costante (*creep*) o variabile (fatica).

Le prove devono essere eseguite su provini di geometria opportuna, ricavati dal campione di riferimento secondo le modalità precedentemente descritte. La geometria del provino dipende dal particolare tipo di prova che si intende eseguire.

Per i primi due tipi di comportamenti reologici, le prove sono eseguite su provini sottoposti preventivamente a trattamenti di condizionamento termico o ambientale. Dopo aver condizionato il provino per un tempo opportuno, è possibile determinare la proprietà meccanica o fisica di interesse come prescritto dalla normativa ISO (o ASTM) (Tabella 2-7, 2-8, 2-9).

Se la variazione nel tempo di una particolare proprietà è correlata al degrado chimico del materiale è possibile prevedere il suo valore ad un certo istante di tempo applicando la relazione di Arrhenius, estrapolando cioè i risultati di prove condotte a breve termine ed a temperatura elevata. Si rileva che i valori così ottenuti non tengono assolutamente conto dell'effetto di sforzi agenti sul materiale o di fattori ambientali, quali l'esposizione prolungata a raggi ultravioletti, acidi, alcali, sali e altri agenti aggressivi di varia natura.

Per determinare la resistenza del sistema di rinforzo sotto particolari condizioni ambientali è necessario riferirsi alle normative specifiche. In alcune situazioni si può ottemperare a tale esigenza riferendosi a normative sviluppate per la qualificazione di altri materiali: ad esempio, nei riguardi dell'influenza dei cicli di gelo-disgelo sulle proprietà del rinforzo, ci si può avvalere della medesima procedura di condizionamento utilizzata per il calcestruzzo. Dopo aver condizionato il provino, si può risalire al valore della proprietà desiderata seguendo le indicazioni della normativa di riferimento opportuna (Tabella 2-7, 2-8, 2-9).

L'analisi del comportamento a lungo termine del materiale sottoposto a carico costante richiede l'esecuzione di prove di *creep*: la normativa di riferimento per i materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica è la ISO 899-1:2003(E); in alternativa ci si può riferire alla ASTM D2990-01.

Per il comportamento a fatica, la normativa di riferimento è la ISO 13003-2003(E) o la ASTM D 3479-02.

## 2.5 ACCETTAZIONE

La produzione dei materiali per il rinforzo (filamenti, tessuti e nastri pultrusi) deve essere costantemente oggetto di sistemi di assicurazione e di programmi di controllo della qualità. Quest'ultimi devono coprire tutti gli elementi che costituiscono il sistema di rinforzo (fibre, matrici, adesivi, compositi preformati ed altri componenti).

Le specifiche di progetto devono includere un piano di "*quality assurance*" comprendente ispezioni e prove che documentino l'accettabilità del sistema di rinforzo e dell'applicazione.

Le applicazioni di compositi per il rinforzo strutturale dovrebbero essere realizzate utilizzando prodotti qualificati all'origine, siano essi lamine o barre preformate in stabilimento o compositi realizzati *in situ*. I produttori dovrebbero fornire i certificati dei prodotti per assicurare la rispondenza di ogni lotto di fabbricazione con le specifiche dichiarate. Durante l'applicazione si dovrebbero prevedere campionamenti e prove sperimentali per valutare la qualità dei materiali e verificare la corrispondenza dei risultati con quelli ottenuti durante la fase di qualificazione. Sono possibili prove per la determinazione delle caratteristiche meccaniche e fisiche da eseguirsi su campioni semplici e su campioni preconditionati (ad esempio per verificare la permanenza delle caratteristiche al variare della temperatura o dell'umidità).

I criteri di accettazione potrebbero essere basati sulla massima deviazione ammissibile dei risultati ottenuti rispetto ai valori di qualificazione. In tal caso sarebbe necessario assicurare che le procedure di prova siano le stesse e che i campioni siano ottenuti con i medesimi materiali e le medesime tecniche di produzione.

## 2.6 TRASPORTO, STOCCAGGIO E MOVIMENTAZIONE

Le modalità di trasporto, stoccaggio, utilizzo e conservazione dei materiali di base del sistema in composito sono importanti sia per garantire che le proprietà dei singoli componenti non risultino alterate, sia per garantire il rispetto delle norme minime di sicurezza.

- Trasporto. I costituenti del sistema composito fibrorinforzato devono essere confezionati e trasportati in modo opportuno e nel rispetto degli eventuali regolamenti applicabili.
- Stoccaggio. Per preservare le proprietà del sistema fibrorinforzato e garantire il rispetto delle norme di sicurezza, i costituenti devono essere conservati osservando le raccomandazioni del produttore.

Per preservare le proprietà delle fibre e delle resine è importante che esse siano conservate in idonee condizioni di temperatura (intervallo consigliato 10°-24° C) ed in ambiente sufficientemente asciutto (grado di umidità inferiore al 20%), a meno di specifiche diverse suggerite dal produttore.

Le lamine e gli altri elementi preformati possono subire danneggiamenti a seguito di piegatura o inopportuna sovrapposizione.

Alcuni costituenti, quali ad esempio agenti reticolanti reattivi, iniziatori, catalizzatori, solventi per la pulizia delle superfici, ecc., richiedono specifici accorgimenti per motivi di sicurezza ed il loro immagazzinamento dovrebbe essere conforme alle modalità suggerite dal produttore o prescritte da eventuali normative. Catalizzatori ed iniziatori (generalmente perossidi) vanno immagazzinati separatamente dagli altri reagenti per evitare l'accidentale contatto ed il conseguente innesco della reazione di reticolazione.

Le proprietà delle resine non reticolate possono mutare nel tempo e, soprattutto, possono risentire delle condizioni di umidità e temperatura. Queste ultime possono influire anche sulla reattività della miscela e sulle proprietà della resina reticolata. Il produttore è tenuto ad indicare il tempo di stoccaggio (tempo di banco) entro cui le proprietà dei materiali a base di resine termoindurenti si conservano inalterate. Qualsiasi costituente che abbia superato il tempo di banco o che abbia subito un deterioramento od una contaminazione non deve essere adoperato. Tutti i costituenti ritenuti inutilizzabili devono essere dismessi secondo quanto specificato dal produttore, nonché secondo quanto prescritto dagli eventuali regolamenti vigenti in materia di salvaguardia ambientale.

- Movimentazione. Il produttore è tenuto a fornire per tutti i costituenti del sistema fibrorinforzato le schede tecniche riportanti le informazioni relative alla sicurezza (MSDS – *Materials Safety Data Sheet*).

Le sostanze utilizzate in combinazione con le resine termoindurenti sono generalmente agenti indurenti, reticolanti, iniziatori (perossidi), isocianati e riempitivi. Tra i potenziali pericoli, cui si può andare incontro quando si lavora con resine termoindurenti, solventi e fibre di rinforzo, si elencano:

- irritazioni e sensibilizzazione della pelle;
- inalazione di vapori di solventi, diluenti e monomeri;
- rischio di incendio o esplosione per effetto di elevate concentrazioni nell'aria di sostanze infiammabili o per contatto con fiamme o scintille (sigarette incluse);
- reazioni esotermiche tra i reagenti, che possono essere causa di incendi o incidenti a persone;
- presenza di polveri derivanti dalla lavorazione o dalla movimentazione di compositi fibrorinforzati.

E' quindi necessario assumere le opportune precauzioni quando si lavora con tali prodotti o con i loro componenti. La complessità delle resine termoindurenti e dei materiali ad esse associati richiede che tutti gli operatori leggano attentamente le etichette e gli MSDS di tali materiali al fine di evitare spiacevoli incidenti.

Per maneggiare fibre e resine si consiglia l'uso di guanti monouso, nonché di vestiti o tute. I guanti, di gomma o di plastica, devono essere resistenti ai solventi; inoltre, quando si lavora con solventi o con i componenti delle resine, si devono indossare occhiali di protezione. Infine, in presenza di frammenti di fibre, polvere o vapori di solventi, o mentre si miscelano e si stendono le resine, è necessario ricorrere a protezioni respiratorie, come richiesto specificamente dai produttori. Il luogo di lavoro deve risultare sempre adeguatamente ventilato.

### **3 CONCETTI BASILARI DEL PROGETTO DI RINFORZO E PROBLEMATICHE SPECIALI**

(1)P Formano oggetto del presente capitolo le strutture esistenti in conglomerato cementizio armato normale e precompresso ed in muratura nelle quali si vogliono impiegare compositi fibrorinforzati per il consolidamento statico di elementi strutturali non soddisfacenti i requisiti e le verifiche di sicurezza prescritte dalla Normativa vigente. Gli stessi concetti sono validi anche per le strutture esistenti in metallo ed in legno, non comprese nel documento.

(2)P Si assume che:

- la scelta ed il progetto del sistema di rinforzo siano eseguiti da tecnici qualificati ed esperti,
- la successiva esecuzione dell'intervento sia effettuata da maestranze in possesso di un adeguato livello di capacità ed esperienza,
- siano garantite un'adeguata supervisione ed un controllo di qualità durante lo sviluppo del processo,
- i materiali da costruzione ed i prodotti utilizzati siano impiegati come appresso specificato.

(3)P Il progetto del sistema di rinforzo deve soddisfare requisiti di resistenza, di esercizio e di durabilità. In caso di incendio, la resistenza del rinforzo deve essere adeguata al tempo di esposizione che si vuole garantire.

(4)P Il sistema di rinforzo deve essere posizionato nelle zone in cui è necessario resistere a tensioni di trazione. Non si deve fare affidamento sul composito fibrorinforzato per resistere a tensioni di compressione.

#### **3.1 REQUISITI FONDAMENTALI**

(1)P Il progetto del sistema di rinforzo deve presupporre i seguenti requisiti fondamentali:

- i rischi ai quali la struttura potrebbe essere soggetta vanno accuratamente individuati, eliminati o attenuati,
- la configurazione del rinforzo deve risultare poco sensibile ai suddetti rischi,
- la stessa configurazione deve inoltre sopportare l'occorrenza di danneggiamenti localizzati,
- sistemi di rinforzo che collassino senza segnali di preavviso vanno opportunamente evitati.

(2)P I requisiti fondamentali sopra definiti potranno ritenersi soddisfatti se si garantisce:

- la scelta di materiali opportuni,
- un progetto adeguato con un'accorta cura dei particolari costruttivi,
- la definizione, nell'ambito di ogni intervento, di procedure di controllo per la progettazione, la produzione, l'esecuzione e l'uso.

#### **3.2 VITA UTILE DELLA STRUTTURA RINFORZATA**

(1)P Ai fini delle verifiche di sicurezza della struttura rinforzata si fa riferimento alla vita utile che la struttura dovrebbe avere se fosse di nuova realizzazione. Ne consegue la prescrizione di adottare le stesse azioni di calcolo previste dalle Normative vigenti per le nuove costruzioni.

### 3.3 REQUISITI DI DURABILITÀ

(1)P Il rinforzo deve essere progettato in modo che il degrado atteso nel corso della vita utile della struttura rinforzata non ne riduca le prestazioni al di sotto di quelle previste, tenendo conto sia delle condizioni ambientali sia del livello programmato di manutenzione.

(2) Per assicurare durevolezza all'intervento di rinforzo vanno tenuti in debito conto:

- l'uso previsto della struttura rinforzata,
- le condizioni ambientali attese,
- la composizione, le proprietà e le prestazioni dei materiali preesistenti e di quelli nuovi, nonché dei prodotti utilizzati per la messa in opera di questi ultimi,
- la scelta della configurazione del rinforzo e dei particolari costruttivi,
- la qualità delle maestranze ed il livello di controllo,
- particolari misure protettive, ad esempio, nei confronti del fuoco o dell'impatto,
- la manutenzione attesa durante la vita utile.

(3)P Le condizioni ambientali devono essere identificate in fase di progetto così che possa essere valutata la loro importanza in relazione agli aspetti di durabilità del rinforzo ed inoltre possano essere previsti adeguati accorgimenti per la protezione dei materiali impiegati.

(4)P Il livello di qualsiasi tipo di degrado a carico del rinforzo deve essere stimato in maniera accurata. Tale stima può essere eseguita sulla base di modelli teorici, di indagini sperimentali, di esperienze dedotte da interventi precedenti o sulla base di una combinazione di essi.

### 3.4 PRINCIPI GENERALI DEL PROGETTO DI RINFORZO

#### 3.4.1 Generalità

(1)P Le verifiche degli elementi rinforzati devono essere condotte sia nei riguardi degli stati limite di esercizio (SLS) che nei riguardi degli stati limite ultimi (SLU), come definiti nella Normativa vigente.

(2) La verifica nei riguardi di uno stato limite può essere surrogata da quella nei confronti di un altro stato limite, sempre che si disponga di informazioni sufficienti a provare che la prima è una conseguenza della seconda.

(3)P Si deve verificare, mediante il metodo dei coefficienti parziali, che, in tutte le situazioni di progetto, adottando i valori di calcolo delle azioni, delle sollecitazioni e delle resistenze, non sia violato alcuno stato limite. Deve cioè risultare:

$$E_d \leq R_d, \quad (3.1)$$

dove  $E_d$  ed  $R_d$  sono, rispettivamente, i valori di calcolo del generico effetto preso in considerazione (domanda) e della corrispondente resistenza (capacità) nell'ambito dello stato limite esaminato.

(4) I valori di calcolo si ricavano da quelli caratteristici attraverso opportuni coefficienti parziali, i cui valori, per i vari stati limite, sono codificati nella Normativa vigente, ovvero sono indicati nel presente documento con riferimento allo specifico ambito qui trattato.

### 3.4.2 Azioni di calcolo

(1) Le azioni di calcolo da adottare nel progetto di rinforzo sono quelle indicate nella Normativa vigente.

### 3.4.3 Proprietà dei materiali

(1)P I valori delle proprietà dei materiali o dei prodotti usati nel rinforzo devono essere stati determinati mediante prove normalizzate di laboratorio, come quelle indicate nel capitolo relativo ai materiali.

(2)P I valori delle proprietà dei materiali preesistenti nella struttura da rinforzare devono essere desunti dai risultati di prove normalizzate, *in situ* o in laboratorio, ed inoltre, se disponibili, dagli elaborati del progetto originale.

(3) Le proprietà meccaniche di resistenza e di deformazione dei materiali o dei prodotti usati nel rinforzo, nonché quelle dei materiali preesistenti nella struttura da rinforzare, sono quantificate dai corrispondenti valori caratteristici. La derivazione del valore caratteristico di una proprietà meccanica attraverso prove *in situ* deve tenere in conto: la dispersione dei risultati delle prove, l'incertezza statistica associata al numero di prove eseguite, l'eventuale conoscenza statistica precedente.

(4) I soli parametri di rigidezza (moduli elastici) dei materiali o dei prodotti usati nel rinforzo e quelli dei materiali preesistenti sono valutati attraverso i corrispondenti valori medi.

(5) Il valore di calcolo,  $X_d$ , della generica proprietà di resistenza o di deformazione di un materiale o di un prodotto usato nel rinforzo può essere espresso in forma generale mediante una relazione del tipo:

$$X_d = \eta \frac{X_k}{\gamma_m}, \quad (3.2)$$

dove  $X_k$  è il valore caratteristico della proprietà in questione,  $\eta$  è un fattore di conversione che tiene conto, in maniera moltiplicativa, di problemi speciali di progetto,  $\gamma_m$  è infine il coefficiente parziale del materiale o del prodotto.

(6) Il valore di calcolo,  $X_d$ , della generica proprietà di un materiale preesistente nella struttura da rinforzare può determinarsi come:

$$X_d = \eta \frac{X_{k(n)}}{\gamma_m} = \frac{\eta}{\gamma_m} m_x (1 - k_n V_x), \quad (3.3)$$

dove  $m_x$  è il valore medio della proprietà  $X$  risultante dalle  $n$  prove eseguite, il valore di  $k_n$  è fornito in Tabella 3-1 in funzione del suddetto numero  $n$ , il coefficiente di variazione  $V_x$  è supposto noto. Il valore del coefficiente di variazione può essere assunto pari a 0.10 per l'acciaio, a 0.20 per il calcestruzzo ed a 0.30 per la muratura e per il legno.

**Tabella 3-1** – Valori di  $k_n$  per la determinazione del valore caratteristico.

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	$\infty$
$k_n$	2.31	2.01	1.89	1.83	1.80	1.77	1.74	1.72	1.68	1.67	1.64

### 3.4.4 Capacità resistente di calcolo

(1) La capacità resistente di calcolo,  $R_d$ , è esprimibile come:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R\{X_{d,i}; a_{d,i}\} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R\left\{\eta \frac{X_{k,i}}{\gamma_{m,i}}; a_{d,i}\right\}. \quad (3.4)$$

Nella (3.4)  $R\{\cdot\}$  è una opportuna funzione riconducibile allo specifico modello meccanico considerato (ad esempio quello per la flessione, per il taglio, per l'ancoraggio, ecc.) e  $\gamma_{Rd}$  è un coefficiente parziale che tiene conto delle incertezze insite nel suddetto modello. Come argomenti della funzione  $R\{\cdot\}$  figureranno, in generale, un certo numero di parametri meccanici e geometrici, di cui  $X_{d,i}$  e  $a_{d,i}$  sono, rispettivamente, i valori di calcolo ed i valori nominali;  $\eta$  è un fattore di conversione che tiene conto, in maniera moltiplicativa, di problemi speciali di progetto;  $\gamma_m$  è il coefficiente parziale del materiale o del prodotto

(2)P Di regola, per l'elemento rinforzato, non può essere considerato un incremento della capacità resistente di calcolo superiore al 100% di quella dell'elemento non rinforzato.

## 3.5 COEFFICIENTI PARZIALI

### 3.5.1 Coefficienti parziali $\gamma_m$ per i materiali ed i prodotti

(1) Per gli stati limite ultimi, possibili valori da attribuire ai coefficienti parziali  $\gamma_m = \gamma_f$  dei materiali e dei prodotti in composito fibrorinforzato sono suggeriti nella seguente Tabella 3-2:

**Tabella 3-2** – Coefficienti parziali  $\gamma_m$  per i materiali ed i prodotti.

Materiale/Prodotto	Applicazione tipo A <sup>(1)</sup>	Applicazione tipo B <sup>(2)</sup>
Lamine e tessuti FRP	1.20	1.30

<sup>(1)</sup> Applicazione di sistemi di rinforzo prefabbricati in condizione di controllo di qualità ordinario; applicazione di tessuti a mano in cui siano stati presi tutti i necessari accorgimenti per assicurare un elevato controllo di qualità sulle condizioni e sul processo di applicazione.

<sup>(2)</sup> Applicazione di tessuti a mano in condizione di controllo di qualità ordinario; applicazione di qualsiasi sistema di rinforzo in condizioni di difficoltà ambientale o operativa.

(2) Per gli stati limite di esercizio, si suggerisce di attribuire un valore unitario a tutti i coefficienti parziali  $\gamma_m = \gamma_f$  dei materiali e dei prodotti in composito fibrorinforzato, ad eccezione di casi specificamente indicati.

### 3.5.2 Coefficienti parziali $\gamma_{Rd}$ per i modelli di resistenza

(1) Per gli stati limite ultimi i valori suggeriti per i coefficienti parziali  $\gamma_{Rd}$  dei diversi modelli di resistenza sono riportati nella seguente Tabella 3-3.

**Tabella 3-3** – Coefficienti parziali  $\gamma_{Rd}$ .

Modello di resistenza	Applicazione tipo A <sup>(1)</sup>	Applicazione tipo B <sup>(2)</sup>
Aderenza	1.20	1.35
Flessione	1.00	1.00
Taglio	1.10	1.20
Confinamento	1.00	1.00

<sup>(1)</sup> Applicazione di sistemi di rinforzo prefabbricati in condizione di controllo di qualità ordinario; applicazione di tessuti a mano in cui siano stati presi tutti i necessari accorgimenti per assicurare un elevato controllo di qualità sulle condizioni e sul processo di applicazione.

<sup>(2)</sup> Applicazione di tessuti a mano in condizione di controllo di qualità ordinario; applicazione di qualsiasi sistema di rinforzo in condizioni di difficoltà ambientale o operativa.

### 3.6 PROBLEMI SPECIALI DI PROGETTO E RELATIVI FATTORI DI CONVERSIONE

(1) Sono di seguito riportati alcuni valori di riferimento da attribuire al fattore di conversione  $\eta$ , (§ 3.4.3 (5)) in relazione ad aspetti che possono influenzare la durabilità ed il comportamento degli FRP in particolari condizioni.

#### 3.6.1 Azioni ambientali e fattore di conversione ambientale $\eta_a$

(1)P Le proprietà meccaniche (per esempio la resistenza a trazione, la deformazione ultima ed il modulo di elasticità normale) di alcuni sistemi in FRP degradano in presenza di determinate condizioni ambientali quali: ambiente alcalino, umidità (acqua e soluzioni saline), temperature estreme, cicli termici, cicli di gelo e disgelo, radiazioni ultraviolette (UV).

(2) Effetti da ambiente alcalino. L'acqua contenuta nei pori del calcestruzzo può provare un degrado della resina e delle zone di interfaccia. Il danneggiamento della resina dovuto all'attacco di alcali è in genere più grave di quello dovuto all'umidità. E' opportuno che la resina completi il processo di maturazione prima dell'esposizione ad ambienti alcalini.

(3) Effetti dell'umidità (acqua e soluzioni saline). I principali effetti dell'assorbimento di umidità riguardano la resina e sono: plasticizzazione, riduzione della temperatura di transizione vetrosa, riduzione di resistenza e riduzione (meno pronunciata) di rigidità. L'assorbimento di umidità dipende dal tipo di resina, dalla composizione e qualità delle lamine, dallo spessore, dalle condizioni di maturazione, dall'interfaccia resina-fibra e dalle condizioni di lavorazione. In ambiente marino, dove effetti osmotici possono causare la formazione di bolle nella resina, è consigliabile l'uso di rivestimenti protettivi in gel.

(4) Effetti di temperature estreme e di cicli termici. Gli effetti primari della temperatura riguardano la risposta viscosa della resina e quindi del composito. Al crescere della temperatura si manifesta una diminuzione del modulo di elasticità normale della resina. Se la temperatura supera quella di transizione vetrosa, il livello di prestazione del composito in FRP si abbassa in maniera significativa. I cicli termici, in generale, non sortiscono effetti deleteri, anche se possono favorire la formazione di microfratture nei sistemi che utilizzano resina ad alto modulo. Per gli intervalli di temperatura tipici delle infrastrutture civili è possibile evitare indesiderati decadimenti delle prestazioni scegliendo il sistema in modo che la temperatura di transizione vetrosa sia sempre più elevata della temperatura massima alla quale opererà il componente o la struttura.

(5) Effetti di cicli di gelo e disgelo. In generale, l'esposizione a cicli di gelo e disgelo non influisce sulla prestazione delle fibre; riduce invece quella della resina e dell'interfaccia tra fibre e resina, a causa del verificarsi di distacchi fra esse. Per temperature al di sotto dello 0 °C, i sistemi a base di resina polimerica possono migliorare le proprie prestazioni sviluppando valori più elevati di resistenza e rigidità. Gli effetti del degrado prodotto da cicli termici possono essere amplificati dalla

presenza di umidità: la ciclicità favorisce infatti la crescita e la propagazione delle microfrazioni provocate dalla presenza di soluzioni saline in ambiente umido.

(6) Effetti di radiazioni ultraviolette (UV). Raramente le radiazioni UV degradano le prestazioni meccaniche dei sistemi in FRP, nonostante alcune resine possano accusare, per effetto di esse, una certa fragilizzazione ed erosione superficiale. In generale, l'effetto più deleterio legato all'esposizione UV è la penetrazione di umidità e di altri agenti aggressivi attraverso la superficie danneggiata. I sistemi in FRP possono essere protetti in tal senso con l'aggiunta di appropriati additivi nella resina e/o con l'uso di opportuni rivestimenti.

(7) La Tabella 3-4 suggerisce, per differenti tipi di materiale e condizioni di esposizione, alcuni valori da attribuire al fattore di conversione ambientale  $\eta_a$ . Essi rappresentano delle stime conservative basate sulla durabilità dei diversi tipi di fibra. I valori in tabella possono essere aumentati del 10% (in ogni caso deve sempre risultare  $\eta_a < 1$ ) qualora si impieghino rivestimenti protettivi le cui proprietà di mitigazione degli effetti dell'esposizione ambientale risultino sperimentalmente comprovate e sempre che tali rivestimenti siano mantenuti per tutta la durata della vita di utilizzo del sistema in FRP.

**Tabella 3-4** – Fattore di conversione ambientale  $\eta_a$  per varie condizioni di esposizione e vari sistemi in FRP.

Condizione di esposizione	Tipo di fibra / resina	$\eta_a$
Esposizione interna	Carbonio / Epossidica	0.95
	Vetro / Epossidica	0.75
	Aramidica / Epossidica	0.85
Esposizione esterna (ponti, colonne e parcheggi)	Carbonio / Epossidica	0.85
	Vetro / Epossidica	0.65
	Aramidica / Epossidica	0.75
Ambiente aggressivo (centrali chimiche e centrali di trattamento delle acque)	Carbonio / Epossidica	0.85
	Vetro / Epossidica	0.50
	Aramidica / Epossidica	0.70

### 3.6.2 Modalità di carico e fattore di conversione per effetti di lunga durata $\eta_l$

(1)P Le proprietà meccaniche (per esempio la resistenza a trazione, la deformazione ultima ed il modulo di elasticità normale) di alcuni sistemi in FRP degradano per l'effetto di fenomeni reologici, quali la viscosità, il rilassamento e la fatica.

(2) Effetti di viscosità e rilassamento. In un sistema in FRP la viscosità ed il rilassamento dipendono dalle proprietà delle resine e delle fibre di rinforzo. In genere le resine termoindurenti (poliesteri insaturi, esteri vinili, resine epossidiche e fenoliche) sono meno viscosi di quelle termoplastiche (polipropilene, nylon, policarbonati, ecc.). Poiché la presenza di fibre diminuisce la viscosità delle resine, tali fenomeni sono più pronunciati quando il carico è applicato trasversalmente alle fibre o quando il composito è caratterizzato da una bassa percentuale in volume di fibre.

La viscosità può essere ridotta assicurando, in esercizio, un livello tensionale sufficientemente basso. I sistemi in FRP a base di carbonio sono i meno suscettibili a rotture per viscosità; quelli a base di fibre aramidiche sono moderatamente suscettibili; quelli a base di fibre di vetro sono i più suscettibili.

(3) Effetti di fatica. Le prestazioni dei sistemi in FRP in condizioni di fatica sono generalmente molto buone. Esse dipendono dalla composizione della matrice e, moderatamente, dal tipo di fibre. Nei compositi unidirezionali le fibre presentano di solito pochi difetti e conseguentemente contra-

stano in modo efficace la formazione di fessure. Inoltre, la propagazione di eventuali fessure presenti è ostacolata dall'azione esplicata delle fibre presenti nelle zone adiacenti.

(4) Per evitare la rottura del rinforzo in FRP sotto tensioni prolungate nel tempo, ovvero in condizioni di carico ciclico, possibili valori da attribuire al fattore di conversione  $\eta_1$  nelle verifiche agli stati limite di esercizio, sono suggeriti in Tabella 3-5. In presenza sia di carico durevole che ciclico il fattore di conversione complessivo è ottenuto come prodotto dei relativi fattori di conversione.

**Tabella 3-5** – Fattore di conversione per effetti di lunga durata  $\eta_1$  per vari sistemi in FRP (carichi di servizio).

Modalità di carico	Tipo di fibra / resina	$\eta_1$
Durevole (viscosità e rilassamento)	Vetro / Epossidica	0.30
	Aramidica / Epossidica	0.50
	Carbonio / Epossidica	0.90
Ciclico (fatica)	Tutte	0.50

### 3.6.3 Resistenza alle azioni causate da impatto ed esplosione

(1) Il comportamento dei sistemi in FRP soggetti ad azioni causate da impatto o da esplosione è tuttora oggetto di studio. Prime indicazioni consigliano di orientare la scelta verso sistemi a base di fibre aramidiche (più resistenti all'impatto) e/o di fibre di vetro piuttosto che verso sistemi a base di fibre di carbonio.

## 3.7 LIMITI DEL RINFORZO NEL CASO DI ESPOSIZIONE AL FUOCO

(1)P I materiali compositi in FRP sono particolarmente sensibili all'esposizione alle alte temperature, circostanza che si può ad esempio verificare in caso di incendio. Quando la temperatura ambientale supera quella di transizione vetrosa della resina (o della temperatura di fusione nel caso di materiali semicristallini), la resistenza e la rigidità del sistema in FRP diminuiscono drasticamente. Nei casi di FRP applicato esternamente su elementi in calcestruzzo o in muratura, l'esposizione ad elevate temperature produce inoltre un rapido deterioramento dell'aderenza FRP/supporto, con conseguente delaminazione dell'FRP e perdita di efficacia del rinforzo.

(2) In condizioni di esposizione al fuoco, le proprietà meccaniche di sistemi in FRP applicati all'esterno possono essere notevolmente migliorate incrementando lo spessore del rivestimento protettivo utilizzato. È suggerito l'impiego di rivestimenti che riducano la propagazione delle fiamme e la produzione di fumi.

(3)P Nel caso di esposizione al fuoco, per prevenire il collasso della struttura rinforzata con FRP, fin quando non saranno disponibili ulteriori informazioni sul reale comportamento dei rivestimenti e dei diversi tipi di resine in siffatte condizioni, è consigliato contenere prudenzialmente il contributo richiesto al rinforzo.

(4) Si suggerisce che la combinazione di azioni per situazioni eccezionali (fuoco), come definita dalla Normativa vigente, faccia riferimento alle situazioni di seguito elencate, nelle quali il valore di calcolo dell'azione termica indiretta viene denotato da  $E_d$ .

- Situazione eccezionale in presenza del rinforzo (con  $E_d$ ), nel caso in cui il rinforzo stesso sia stato progettato per un prefissato tempo di esposizione al fuoco. In questo caso sono da considerare le azioni di esercizio sulla struttura per la combinazione frequente. Le capacità

degli elementi, opportunamente ridotte per tener conto del tempo di esposizione al fuoco, vanno calcolate con i coefficienti parziali relativi alle situazioni eccezionali.

- Situazione successiva all'evento eccezionale (con  $E_d = 0$ ), in assenza di rinforzo. In questo caso sono da considerare le azioni di esercizio sulla struttura per la combinazione quasi permanente. Le capacità degli elementi, opportunamente ridotte per tener conto del tempo di esposizione al fuoco, sono da calcolare con i coefficienti parziali relativi alle situazioni di esercizio.

## 4 RINFORZO DI STRUTTURE IN C.A. E IN C.A.P.

### 4.1 MODALITÀ DI ROTTURA DI ELEMENTI RINFORZATI CON FRP E VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA NEI RIGUARDI DELLA DELAMINAZIONE

#### 4.1.1 Meccanismi di rottura per delaminazione

(1)P Nel rinforzo di elementi in c.a. mediante lamine o tessuti in materiale composito, 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. In un dimensionamento strutturale che segua il criterio di gerarchia delle resistenze tale meccanismo di crisi non deve precedere il collasso per flessione o per taglio dell'elemento rinforzato.

(2)P La perdita di aderenza tra composito e calcestruzzo può riguardare sia lamine o tessuti applicati all'intradosso di travi in c.a. per il rinforzo a flessione, sia tessuti applicati sulle facce laterali di queste ultime per il rinforzo a taglio. In linea di principio (Figura 4-1), la delaminazione 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, poiché la resistenza dell'adesivo è in genere molto più elevata di quella a trazione del calcestruzzo, la delaminazione avviene 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.

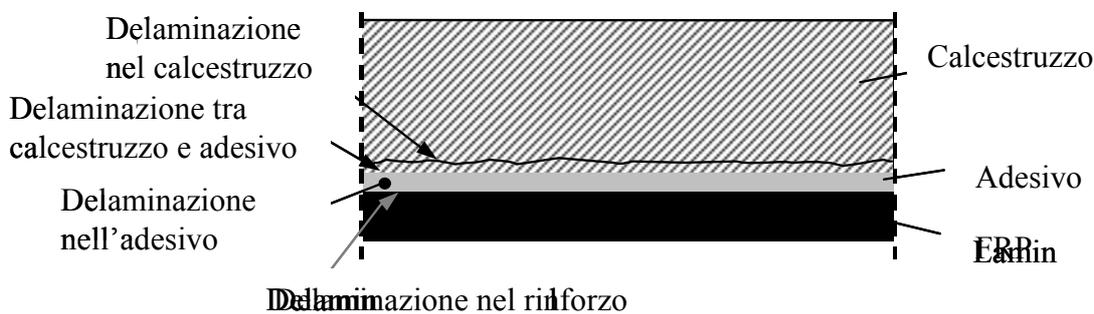


Figura 4-1 – Perdita di aderenza tra rinforzo e calcestruzzo.

(3)P I modi di collasso per delaminazione di lamine o tessuti utilizzati per il rinforzo a flessione possono essere classificati nelle seguenti quattro categorie, rappresentate schematicamente nella Figura 4-2.

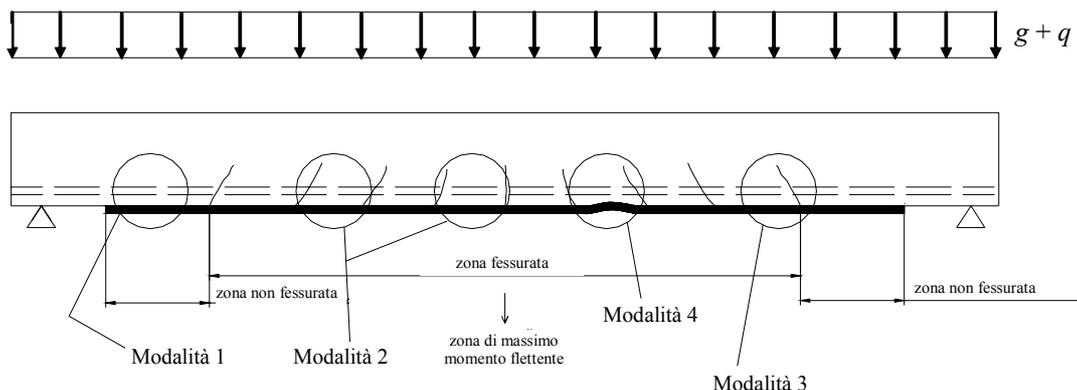
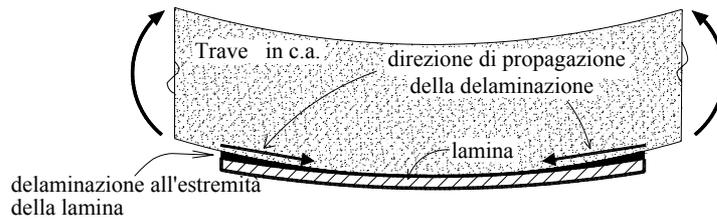
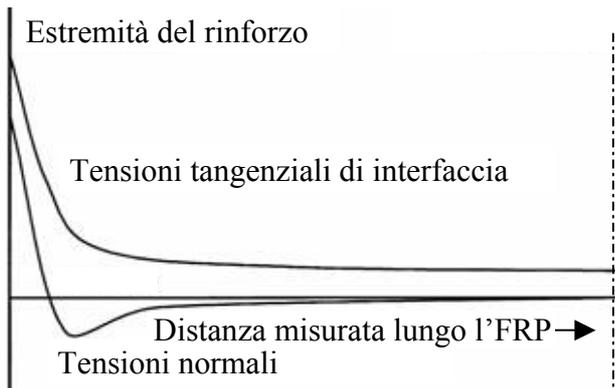


Figura 4-2 – Trave rinforzata a flessione con lamine in FRP: modalità di rottura per delaminazione.

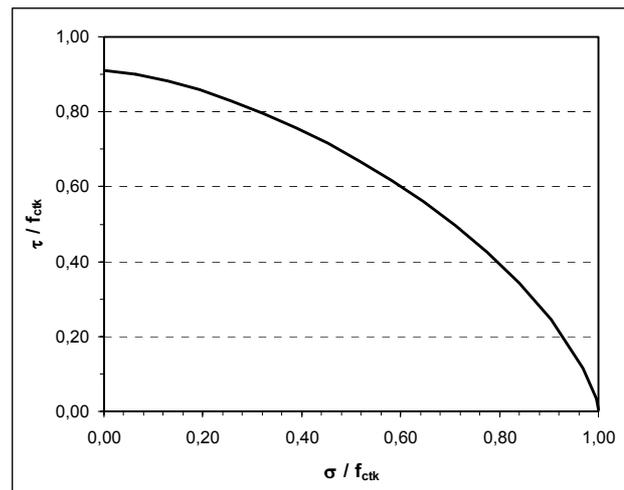
- Modalità 1 (Delaminazione di estremità)** (Figura 4-3). Le zone terminali del rinforzo, chiamate ad assolvere ad una funzione di ancoraggio di quest'ultimo, per una lunghezza di circa 100÷200 mm, sono soggette ad elevati sforzi tangenziali di interfaccia. Inoltre, nel caso di rinforzo con lamine, la competente rigidità flessionale può indurre significativi sforzi di trazione in direzione normale all'interfaccia (sforzi di *peeling*) (Figura 4-4(a)). Essi riducono sensibilmente l'entità dell'azione tangenziale trasmissibile, come risulta dal dominio di resistenza riportato in Figura 4-4(b). La modalità di collasso per delaminazione alle estremità del rinforzo è particolarmente fragile.



**Figura 4-3** – Delaminazione dalle estremità del rinforzo.



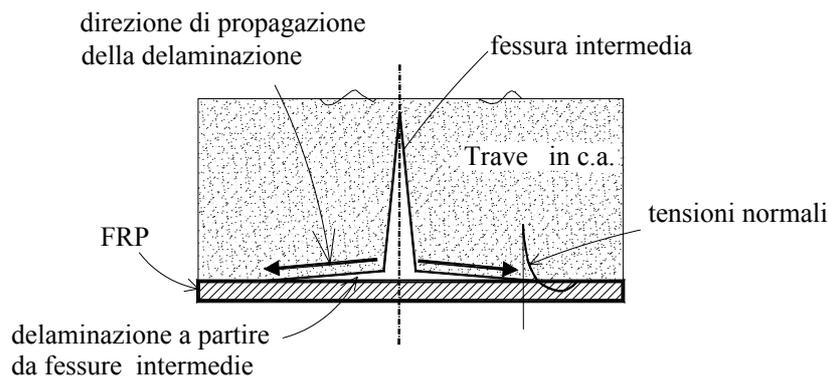
(a)



(b)

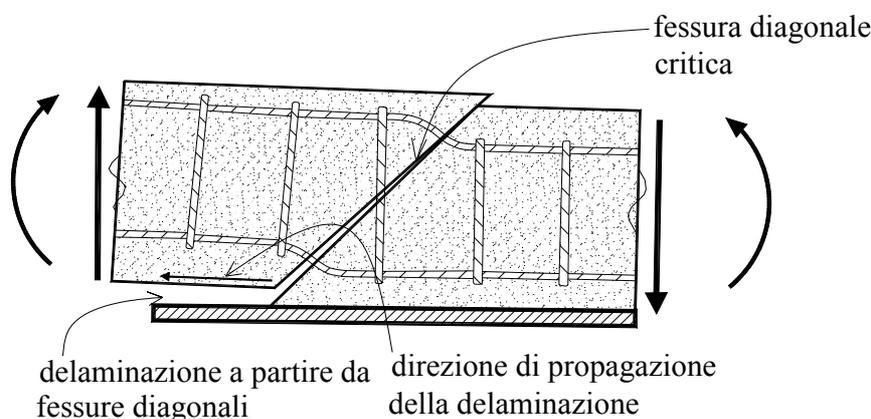
**Figura 4-4** – (a) Concentrazione delle tensioni tangenziali e normali all'interfaccia in prossimità dell'estremità del placcaggio (ottenute mediante un calcolo elastico-lineare); (b) Dominio di resistenza in termini di tensioni tangenziali e normali di interfaccia (rif. Eq. (4.14)).

- Modalità 2 (Delaminazione causata da fessure per flessione nella trave)** (Figura 4-5). In presenza di fessure trasversali nel calcestruzzo teso all'intradosso della trave, le conseguenti discontinuità nel supporto generano concentrazioni tensionali all'interfaccia che possono innescare una delaminazione completa o parziale. Le fessure possono essere ortogonali all'asse della trave, per sollecitazione flessionale prevalente, ovvero inclinate, per sollecitazione combinata di flessione e taglio.



**Figura 4-5** - Delaminazione a partire da fessure trasversali nel calcestruzzo.

- Modalità 3 (Delaminazione causata da fessure diagonali da taglio)** (Figura 4-6). Quando la sollecitazione da taglio è prevalente su quella flessionale, si produce uno spostamento relativo tra le facce delle fessure inclinate. La componente verticale dello spostamento mobilita, all'interfaccia calcestruzzo-FRP, sforzi di trazione particolarmente elevati con conseguente pericolo di delaminazione. Numerosi studi sperimentali hanno dimostrato che tale tipo di delaminazione si manifesta anche in presenza di staffe, sia che esse lavorino in fase elastica o in fase plastica. La suddetta modalità di collasso si è inoltre manifestata principalmente in prove di laboratorio del tipo *four point bending* (flessione a 4 punti); meno frequentemente in situazioni di carico trasversale ripartito. Per travi con debole armatura a taglio, ma fortemente rinforzate (ad esempio con lamine di larghezza confrontabile con la larghezza della trave), la delaminazione si innesca generalmente in corrispondenza della sezione terminale del rinforzo, per effetto delle tensioni da *peeling*.



**Figura 4-6** - Delaminazione causata da fessure diagonali da taglio.

- Modalità 4 (Delaminazione causata da irregolarità e rugosità della superficie di calcestruzzo)**. La delaminazione localizzata dovuta ad irregolarità superficiali del substrato di calcestruzzo può propagarsi e provocare una delaminazione completa del rinforzo. Tale modalità di rottura può essere evitata introducendo opportuni accorgimenti per regolarizzare la superficie di applicazione del rinforzo.

(4) Nel prosieguo si farà riferimento esclusivamente alle Modalità 1 e 2 di delaminazione, in quanto sono quelle che si verificano con maggiore frequenza in situazioni ordinarie. Il pericolo che le suddette altre modalità si manifestino può essere mitigato attuando le indicazioni fornite al successivo paragrafo 4.8.1 sul controllo e preparazione del substrato.

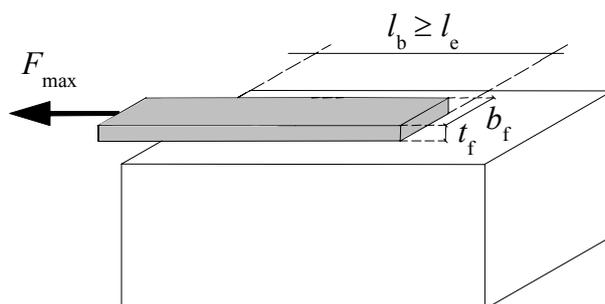
#### 4.1.2 Modellazione del legame di aderenza tra rinforzo e calcestruzzo

(1)P La verifica di sicurezza nei confronti della crisi per delaminazione richiede la valutazione della forza trasmissibile dal calcestruzzo al rinforzo, nonché la valutazione delle tensioni tangenziali e normali all'interfaccia calcestruzzo-FRP. La prima di esse risulta necessaria per la verifica allo stato limite ultimo, la seconda per la verifica dello stato tensionale in esercizio. In entrambi i casi, una corretta descrizione del fenomeno presuppone la modellazione del legame costitutivo di interfaccia tra rinforzo e calcestruzzo.

(2)P Il legame di aderenza tra rinforzo e calcestruzzo viene generalmente espresso sotto forma di una relazione tra la tensione tangenziale all'interfaccia ed il competente scorrimento (relazione “ $\tau_b - s$ ”). In essa intervengono sia le caratteristiche meccaniche dei materiali a contatto, sia le geometrie dell'elemento rinforzato e del rinforzo, che influiscono sul fenomeno di diffusione delle tensioni.

(3)P Con riferimento ad una tipica prova di aderenza, come quella rappresentata schematicamente in Figura 4-7, il valore ultimo della forza sopportabile dal rinforzo in 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 precisa 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 quest'ultimo che assicura la trasmissione del massimo sforzo di aderenza.



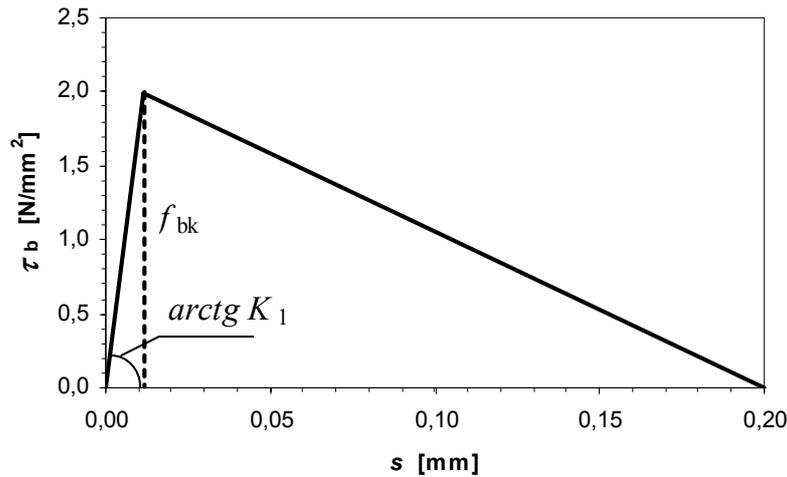
**Figura 4-7** – Forza massima trasmissibile da un rinforzo con FRP.

(4)P I valori delle grandezze  $f_{bk}$  (massima tensione tangenziale di aderenza),  $\Gamma_{Fk}$  (energia di frattura specifica),  $F_{max,k}$  (massima forza trasmissibile) introdotte successivamente in questo paragrafo sono da intendersi come caratteristici (frattile del 5%).

(5) Il legame di aderenza, tipicamente non lineare con un ramo discendente (Figura 4-8), può essere approssimato mediante una legge bilineare. Il grafico di tale legge comprende un primo ramo lineare, crescente con  $s$  fino alla massima tensione tangenziale di interfaccia,  $f_{bk}$ . Esso è seguito da un secondo ramo, anch'esso lineare che però, a differenza del primo, è decrescente con  $s$ : ciò per tenere conto del progressivo danneggiamento del calcestruzzo.

Per definire il primo dei due rami è necessario tenere in conto sia la deformabilità dello strato di adesivo (con spessore dell'ordine del millimetro), sia quella di un opportuno strato superficiale di calcestruzzo.

In assenza di risultati sperimentali specifici, i parametri meccanici che definiscono il legame di aderenza “ $\tau_b - s$ ” possono essere valutati con le modalità appresso descritte.



**Figura 4-8** – Tipico legame di aderenza “ $\tau_b - s$ ” ( $f_{ck} = 20$  MPa,  $k_b=1$ ).

- Massima tensione tangenziale di aderenza,  $f_{bk}$ :

$$f_{bk} = 0.3 \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}} \quad [f \text{ in N/mm}^2]. \quad (4.1)$$

Nella (4.1),  $f_{ck}$  ed  $f_{ctm}$  sono rispettivamente il valore caratteristico della resistenza a compressione del calcestruzzo e quello medio della competente resistenza a trazione;  $k_b$  è un fattore di tipo geometrico (effetto scala) il cui valore è funzione della larghezza della trave rinforzata,  $b$ , e di quella del rinforzo,  $b_f$ :

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1 \quad [\text{lunghezze in mm}], \quad (4.2)$$

sempre che  $b_f/b \geq 0.33$  (per  $b_f/b < 0.33$  si adatterà il valore di  $k_b$  corrispondente a  $b_f/b = 0.33$ ).

- Rigidezza del ramo lineare crescente,  $K_1$ :

$$K_1 = \frac{c_1}{t_a/G_a + t_c/G_c}, \quad (4.3)$$

essendo rispettivamente  $G_a$  e  $G_c$  i moduli di elasticità tangenziale dell’adesivo e del calcestruzzo;  $t_a$  lo spessore nominale dell’adesivo;  $t_c$  lo spessore efficace di calcestruzzo che partecipa alla deformabilità dell’interfaccia (generalmente si può assumere  $t_c = 20 \div 30$  mm;  $c_1 = 0.5 \div 0.7$ ).

- Scorrimento di interfaccia corrispondente alla completa delaminazione,  $s_f$ :

$$s_f = 0.2 \text{ mm}. \quad (4.4)$$

Conseguentemente, l’energia specifica di frattura  $\Gamma_{Fk}$ , pari all’area sottesa dal diagramma di Figura 4-8, sarà:

$$\Gamma_{Fk} = \frac{1}{2} \cdot f_{bk} \cdot s_f = 0.03 \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}} \quad [f_{bk} \text{ in N/mm}^2, s_f \text{ in mm}]. \quad (4.5)$$

(6) Il valore della massima forza trasmissibile da un rinforzo di lunghezza pari o superiore a quella ottimale di ancoraggio,  $l_e$ , dipende dalle caratteristiche geometriche e meccaniche del rinforzo stesso e dalle caratteristiche dell'interfaccia in accordo con la relazione (Figura 4-7):

$$F_{\max,k} = b_f \sqrt{2E_f t_f \Gamma_{Fk}}, \quad (4.6)$$

dove  $t_f$ ,  $b_f$ ,  $E_f$  sono, rispettivamente, lo spessore e la larghezza del rinforzo ed il suo modulo di elasticità normale nella direzione della forza.

La lunghezza ottimale di ancoraggio,  $l_e$ , può essere stimata nel modo seguente:

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2f_{ctm}}} \quad [\text{lunghezze in mm}] \quad (4.7)$$

(7) Nel calcolo delle tensioni per le verifiche allo stato limite di servizio, il legame “ $\tau_b - s$ ” si riduce al solo ramo lineare crescente, il cui coefficiente angolare  $K_1$  è fornito dalla (4.3) per  $c_1 = 1$ .

#### 4.1.3 Resistenza alla delaminazione allo stato limite ultimo dalle estremità del rinforzo (Modalità 1)

(1)P Un aspetto peculiare nell'analisi della Modalità 1 di delaminazione riguarda la valutazione della lunghezza ottimale di ancoraggio,  $l_e$ , e della competente massima forza trasmissibile (Figura 4-7).

(2) Per lunghezze di ancoraggio maggiori o uguali a quella ottimale, utilizzando l'equazione (4.6), è possibile risalire al valore di progetto della tensione alla quale il rinforzo può lavorare nella sezione terminale di ancoraggio, una volta avvenuto il trasferimento degli sforzi dal calcestruzzo al rinforzo in FRP.

Innanzitutto, con l'ausilio della (4.5), può essere calcolato il valore di progetto dell'energia specifica di frattura,  $\Gamma_{Fd}$ , dividendo il risultato da essa fornito per il coefficiente parziale  $\gamma_c$  del calcestruzzo, come fornito dalla Normativa vigente:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{\Gamma_{Fk}}{\gamma_c}. \quad (4.8)$$

La tensione di progetto nel rinforzo vale pertanto:

$$f_{idd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} k_c \sqrt{\frac{2E_f \Gamma_{Fd}}{t_f}}, \quad (4.9)$$

dove si assume per il coefficiente  $\gamma_{Rd}$  il valore indicato in Tabella 3-3 (§ 3.5.2) e per il coefficiente correttivo  $k_c$ , di natura sperimentale e dipendente dallo stato della superficie di applicazione del rinforzo, usualmente il valore 1 (0.67 nel caso di superfici non compatte).

La suddetta relazione può essere utilizzata:

- nel caso di rinforzi a flessione, per valutarne l'entità della lunghezza di ancoraggio,  $l_b$ , supponendo noti il diagramma del momento flettente e la lunghezza ottimale di ancoraggio  $l_e$ ;

- nel caso di rinforzi a taglio, per valutare la massima tensione di lavoro delle strisce di rinforzo.

(3) Nel caso di lunghezze di ancoraggio,  $l_b$ , inferiori a quella ottimale,  $l_e$ , la tensione di progetto deve essere opportunamente ridotta in accordo con la relazione:

$$f_{\text{fdd,rid}} = f_{\text{fdd}} \cdot \frac{l_b}{l_e} \left( 2 - \frac{l_b}{l_e} \right). \quad (4.10)$$

(4) Quando si faccia ricorso a particolari dispositivi di ancoraggio (barre trasversali in composito, fasciatura dell'estremità mediante tessuti, ecc.), la forza massima di ancoraggio deve essere valutata mediante apposite indagini sperimentali.

#### 4.1.4 Resistenza alla delaminazione allo stato limite ultimo in corrispondenza di fessure da flessione (Modalità 2)

(1)P Allo scopo di prevenire il meccanismo di delaminazione secondo la Modalità 2, occorre verificare che la variazione di tensione  $\Delta\sigma_f$  nel rinforzo in 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 (come definito nel § 4.1.3), dalla distanza tra le fessure e dal livello di tensione  $\sigma_f$  nel rinforzo.

(2) In alternativa, è possibile ricorrere ad una procedura semplificata consistente nel verificare che allo stato limite ultimo (SLU) la deformazione dell'FRP non ecceda un valore massimo,  $\varepsilon_{f,\text{max}}$ , fornito dalla seguente relazione:

$$\varepsilon_{f,\text{max}} = k_{\text{cr}} \cdot \frac{f_{\text{fdd}}}{E_f} = \frac{k_{\text{cr}} \cdot k_c}{\gamma_{\text{Rd}}} \sqrt{\frac{2\Gamma_{\text{Fd}}}{E_f t_f}}, \quad (4.11)$$

nella quale, in mancanza di dati specifici, il coefficiente  $k_{\text{cr}}$  può essere assunto pari a 5.0.

#### 4.1.5 Verifica delle tensioni di interfaccia allo stato limite di servizio

(1)P 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.

(2)P È opportuno che, in condizioni di servizio, ciò non capiti, 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.

(3) Si deve controllare che, all'interfaccia adesivo-calcestruzzo, per la combinazione di carico rara o frequente, la tensione tangenziale "equivalente",  $\tau_{b,e}$ , appresso definita, sia inferiore alla resistenza di adesione tra il rinforzo ed il substrato di calcestruzzo,  $f_{\text{bd}}$ :

$$\tau_{b,e} \leq f_{\text{bd}}. \quad (4.12)$$

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

$$\tau_{b,e} = k_{id} \cdot \tau_m, \quad (4.13)$$

dove:

-  $k_{id}$  è un coefficiente ( $\geq 1$ ) che tiene conto della concentrazione di tensioni tangenziali e normali nelle zone terminali e fa riferimento al dominio di Figura 4-4(b):

$$k_{id} = \left( k_\sigma^{1.5} + 1.15 \cdot k_\tau^{1.5} \right)^{2/3}; \quad (4.14)$$

- i coefficienti  $k_\sigma$  e  $k_\tau$  valgono rispettivamente:

$$k_\tau = 1 + \alpha a \cdot \frac{M_{(x=a)}}{V_{(x=a)} \cdot a}, \quad (4.15)$$

$$k_\sigma = k_\tau \cdot \beta \cdot t_f; \quad (4.16)$$

-  $M_{(x=a)}$  è il momento agente nella sezione di interruzione del rinforzo;

-  $\alpha$  e  $\beta$  sono due costanti elastiche dipendenti dalle caratteristiche dell’interfaccia e del rinforzo in FRP:

$$\alpha = \sqrt{\frac{K_1}{E_f t_f}}, \quad (4.17)$$

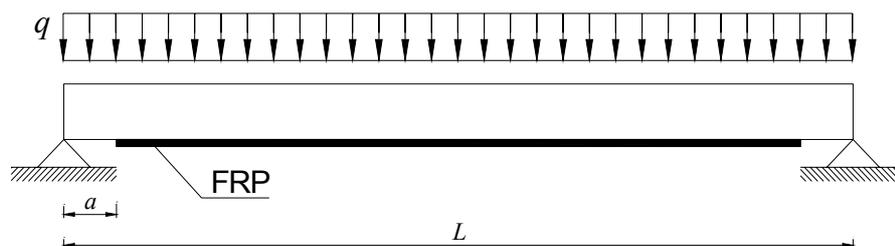
$$\beta = \left( \frac{b_f \cdot 2.30 K_1}{4 E_f I_f} \right)^{1/4}, \quad (4.18)$$

essendo  $E_f$ ,  $t_f$  e  $I_f$ , rispettivamente, il modulo di elasticità normale, lo spessore ed il momento d’inerzia del rinforzo di FRP, ed inoltre  $K_1$  la rigidezza del ramo lineare crescente (§ 4.1.2(7));

-  $\tau_m$  è la tensione tangenziale media alla Jourawski:

$$\tau_m = \frac{V_{(x=a)} \cdot t_f \cdot (h - x_e)}{I_c / n_f}, \quad (4.19)$$

-  $V_{(x=a)}$  è il taglio agente nella sezione di interruzione del rinforzo, posta a distanza  $x=a$  dall’estremità della trave (Figura 4-9);



**Figura 4-9** – Definizione dei parametri geometrici.

- $n_f = E_f/E_c$  è il coefficiente di omogeneizzazione (con  $E_c$  modulo di elasticità normale del calcestruzzo corrispondente alla combinazione di carico considerata, rara o frequente);
- $x_e$  ed  $I_c$  sono, rispettivamente, la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso ed il momento d'inerzia della sezione omogeneizzata, eventualmente parzializzata se in presenza di fessurazione.

(5) Qualora sia previsto un ancoraggio terminale, realizzato mediante fasciatura ad U, l'effetto delle tensioni normali ai fini della verifica dell'interfaccia può essere trascurato e pertanto il coefficiente  $k_\sigma$  nella (4.14) può essere assunto pari a zero.

(6) La resistenza di adesione (valore di progetto),  $f_{bd}$ , tra rinforzo e calcestruzzo è funzione della resistenza caratteristica a trazione del calcestruzzo ed è fornita dalla relazione:

$$f_{bd} = k_b \cdot \frac{f_{ctk}}{\gamma_b}, \quad (4.20)$$

dove il coefficiente parziale  $\gamma_b$  vale 1.0 per la combinazione di carico rara, 1.2 per la combinazione di carico frequente ed inoltre il fattore di scala  $k_b \geq 1$  è deducibile dalla relazione (4.2).

(7) Nel calcolo delle tensioni di ancoraggio, in condizioni di servizio (SLS), è possibile riferirsi allo stato di sollecitazione corrispondente all'incremento di carico che interviene successivamente all'applicazione del rinforzo.

## 4.2 RINFORZO A FLESSIONE

### 4.2.1 Generalità

(1)P Il rinforzo a flessione si rende necessario per elementi strutturali soggetti ad un momento flettente di calcolo maggiore della corrispondente resistenza. In particolare, nel prosieguo sarà esaminato il caso piano di flessione retta con asse di sollecitazione coincidente con un asse di simmetria della sezione trasversale dell'elemento rinforzato.

(2)P Il rinforzo a flessione con materiali compositi può essere eseguito applicando una o più lamine, ovvero uno o più strati di tessuto, al lembo teso dell'elemento da rinforzare.

## 4.2.2 Analisi del comportamento agli stati limite ultimi

### 4.2.2.1 Generalità

(1)P Il progetto allo stato limite ultimo richiede il dimensionamento del rinforzo in FRP in modo che il momento resistente ultimo della sezione rinforzata sia maggiore di quello di progetto.

(2)P Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo stato limite ultimo delle sezioni in c.a. rinforzate con FRP sono le seguenti:

- conservazione della pianeità delle sezioni rette fino a rottura, in modo che il diagramma delle deformazioni normali sia lineare,
- perfetta aderenza tra i materiali componenti (acciaio-calcestruzzo, FRP-calcestruzzo),
- incapacità del calcestruzzo di resistere a sforzi di trazione,
- legami costitutivi del calcestruzzo e dell'acciaio conformi alla Normativa vigente,
- legame costitutivo dell'FRP elastico lineare fino a rottura.

(3) L'intervento di rinforzo risulta efficace per sezioni a debole armatura (acciaio teso snervato allo SLU: dilatazione dell'acciaio,  $\varepsilon_s$ , maggiore o uguale del valore di progetto della deformazione di snervamento,  $\varepsilon_{yd}$ ) e le regole appresso riportate si riferiscono esclusivamente a tale situazione.

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

- raggiungimento della massima deformazione plastica nel calcestruzzo compresso,  $\varepsilon_{cu}$ , come definita dalla Normativa vigente;
- raggiungimento di una deformazione massima nella rinforzo in FRP,  $\varepsilon_{fd}$ , calcolata come:

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_a \frac{\varepsilon_{fu}}{\gamma_f}, \varepsilon_{f,max} \right\}, \quad (4.21)$$

dove  $\varepsilon_{fu}$  è la deformazione ultima del rinforzo,  $\eta_a$  e  $\gamma_f$  sono i coefficienti definiti rispettivamente nella Tabella 3-4 e nella Tabella 3-2,  $\varepsilon_{f,max}$  è la deformazione massima per delaminazione intermedia come definita al § 4.1.4 (Modalità 2), ed  $E_f$  è il competente modulo di elasticità normale della lamina. Generalmente il valore minimo nella (4.21) corrisponde ad  $\varepsilon_{f,max}$ .

(5)P E' importante verificare che il taglio resistente dell'elemento rinforzato sia superiore a quello associato al diagramma del momento flettente di progetto. L'incremento del taglio resistente, eventualmente necessario, deve essere conseguito in accordo con le prescrizioni fornite nel § 4.3.

(6)P Poiché generalmente il rinforzo in FRP viene applicato su una struttura già sollecitata, si deve tenere conto dello stato di deformazione della struttura all'atto del rinforzo.

### 4.2.2.2 Stato della struttura all'atto del rinforzo

(1)P Nell'ipotesi che il rinforzo in FRP sia applicato su un elemento soggetto ad una sollecitazione preesistente, cui corrisponda un momento applicato  $M_o$ , maggiore del momento di fessurazione, si deve procedere alla valutazione dello stato deformativo iniziale. In caso contrario, quest'ultimo può generalmente essere trascurato.

(2)P Il calcolo viene eseguito nell'ipotesi di comportamento elastico lineare dei due materiali costituenti la trave ed in particolare di incapacità del calcestruzzo a sopportare sforzi di trazione.

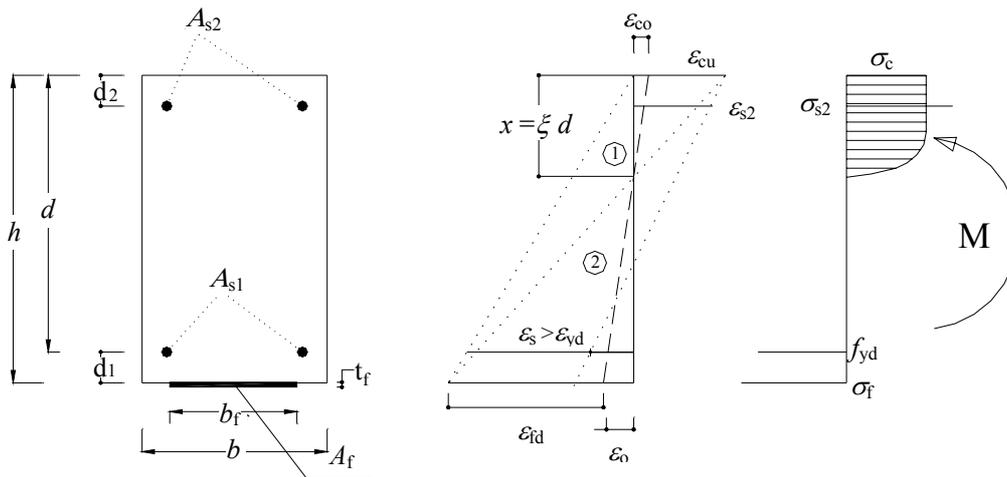
(3)P Le deformazioni significative sono quella al lembo compresso,  $\varepsilon_{co}$ , ed al lembo teso,  $\varepsilon_o$ , dove viene applicato il rinforzo in FRP. Esse possono essere ricavate in base alla linearità del diagramma delle deformazioni normali sulla sezione retta, in funzione delle caratteristiche meccaniche e geometriche della sezione reagente.

#### 4.2.2.3 Valutazione del momento resistente

(1)P La valutazione della resistenza flessionale della sezione si effettua secondo quanto indicato nel § 4.2.2.1.

(2) 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.

(3) Con riferimento alla situazione esemplificativa rappresentata in Figura 4-10, si possono distinguere due tipi di rottura, a seconda che si raggiunga la massima dilatazione del rinforzo in FRP (zona 1) o la massima contrazione del calcestruzzo (zona 2).



**Figura 4-10** – Modalità di rottura di una sezione in c.a. rinforzata esternamente con lamine in FRP.

(4) Nella zona 1 la rottura si attinge per raggiungimento della deformazione (dilatazione) elastica limite di progetto nelle fibre: un qualunque diagramma delle deformazioni corrispondente a tale modalità di rottura ha come punto fisso il valore limite della deformazione delle fibre,  $\varepsilon_{fd}$ , definito dalla relazione (4.21).

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 le seguenti relazioni:

- FRP:  $\varepsilon_f = \varepsilon_{fd}$ ,
- calcestruzzo al lembo compresso:  $\varepsilon_c = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_o) \cdot \frac{x}{(h-x)} \leq \varepsilon_{cu}$ ,
- acciaio in compressione:  $\varepsilon_{s2} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_o) \cdot \frac{x-d_2}{(h-x)}$ ,

- acciaio in trazione: 
$$\varepsilon_{s1} = (\varepsilon_{fd} + \varepsilon_0) \cdot \frac{d-x}{(h-x)},$$

nelle quali si è utilizzata la simbologia di Figura 4-10 e dove  $\varepsilon_{cu}$  è la deformazione limite a compressione del calcestruzzo (massima contrazione) in conformità a quanto prescritto dalla Normativa vigente.

Generalmente è superfluo verificare l'entità della deformazione esibita dall'acciaio teso allo stato limite ultimo, in quanto, per i valori usuali della deformazione limite delle fibre,  $\varepsilon_{fd}$ , e del calcestruzzo,  $\varepsilon_{cu}$ , il valore di progetto di tale deformazione non viene mai attinto. Nel caso in cui la deformazione ultima dell'acciaio stabilita dalla Normativa vigente dovesse essere superato, occorre tenerne conto nel calcolo del momento resistente.

(5) Nella zona 2 la rottura avviene per schiacciamento del calcestruzzo con acciaio teso snervato, mentre nelle fibre la deformazione limite non è stata ancora raggiunta: in tal caso resta fissata la deformazione massima del calcestruzzo compresso,  $\varepsilon_{cu}$ , in funzione della quale si ricavano, per linearità, le deformazioni normali negli altri materiali. Ancora una volta 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 le seguenti relazioni:

- FRP: 
$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} \cdot (h-x) - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fd},$$

- calcestruzzo al lembo compresso: 
$$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu},$$

- acciaio in trazione: 
$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{d-x}{x},$$

- acciaio in compressione: 
$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{x-d_2}{x},$$

nelle quali si è utilizzata la simbologia di Figura 4-10.

(6) Per entrambe le tipologie di rottura (asse neutro in zona 1 o in zona 2), il valore del momento resistente,  $M_u$ , 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:

$$M_u = \psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} \cdot (d - \lambda \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (d - d_2) + A_f \cdot \sigma_f \cdot d_1. \quad (4.22)$$

La posizione dell'asse neutro  $x$  sarà invece determinata a partire dall'equazione di equilibrio alla traslazione lungo l'asse della trave:

$$0 = \psi \cdot b \cdot x \cdot f_{cd} + \sigma_{s2} \cdot A_{s2} - A_{s1} \cdot f_{yd} - A_f \cdot \sigma_f. \quad (4.23)$$

Nelle equazioni (4.22) e (4.23) i coefficienti adimensionali  $\psi$  e  $\lambda$  rappresentano, rispettivamente, l'intensità del risultante degli sforzi di compressione e la distanza di quest'ultimo dall'estremo lembo compresso, rapportati nell'ordine a  $b \cdot x \cdot f_{cd}$  ed a  $x$ .

(7) Se gli acciai sono in fase elastica, le loro tensioni di lavoro sono ottenute moltiplicando le competenti deformazioni per il modulo di elasticità normale; altrimenti sono assunte pari al limite di snervamento,  $f_{yd}$ . Nelle zone 1 e 2 l'entità della deformazione esibita dalle barre d'acciaio in trazione è sempre superiore a quella di progetto,  $\varepsilon_{yd}$ .

- (8) Poiché il rinforzo in FRP ha un comportamento elastico-lineare fino a rottura, la sua tensione di lavoro può essere calcolata come prodotto della competente deformazione per il modulo di elasticità normale dell'FRP (nella direzione dell'asse della trave).
- (9) Per evitare che allo stato limite ultimo l'acciaio teso sia in campo elastico, il coefficiente adimensionale  $\xi = x/d$  non deve eccedere il valore limite  $\xi_{lim}$  fornito dalla seguente relazione:

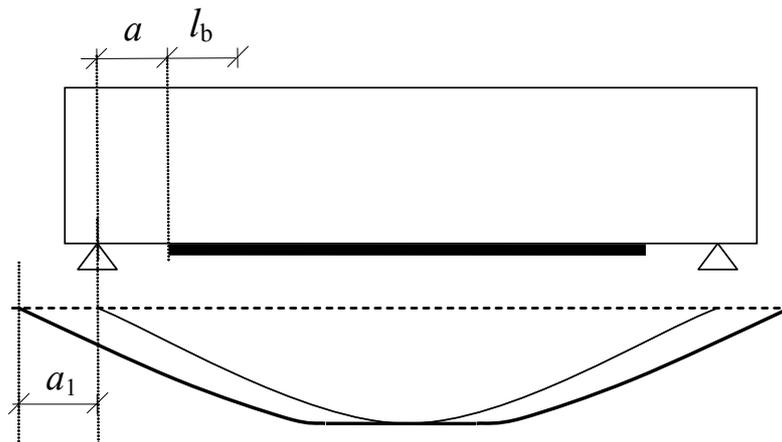
$$\xi_{lim} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yd}} \quad (4.24)$$

#### 4.2.2.4 Collasso per delaminazione

(1)P La delaminazione dipende da una serie di fattori quali l'ubicazione della zona di formazione delle fessure e la tipologia di queste ultime (fessure taglianti e/o flessionali), la presenza di irregolarità sulla superficie di applicazione del rinforzo, la concentrazione di tensioni nelle zone di ancoraggio. Tali fattori sono descritti in dettaglio nel § 4.1.

(2) Nel caso di travi in c.a., la massima distanza dall'appoggio "a", alla quale è possibile applicare il rinforzo in FRP senza temere il collasso per delaminazione, può essere calcolata imponendo l'uguaglianza tra il valore di progetto della massima forza di trazione trasferibile al rinforzo esterno,  $F_{max,d}$ , e quello della trazione mobilitata nel composito ad una distanza  $a+l_e$  dall'appoggio sotto l'azione del carico ultimo agente sull'elemento rinforzato. La quantità  $F_{max,d}$  è valutabile a partire dalla tensione di progetto,  $f_{fd}$ , fornita dalla (4.9); la lunghezza ottimale di ancoraggio,  $l_e$ , dalla relazione (4.7).

(3) 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  $a+l_e$ , deve essere calcolata dopo aver operato un'opportuna traslazione del diagramma del momento flettente, di entità  $a_1$ . Tale traslazione dovrà avvenire nel verso che dà luogo ad un aumento del valore assoluto del momento flettente (Figura 4-11).



**Figura 4-11** – Profilo delle tensioni e deformazioni della sezione in c.a. rinforzata esternamente con FRP.

In altri termini la forza di ancoraggio deve essere valutata incrementando il momento di calcolo sollecitante della seguente quantità:

$$M = V_{sd} \cdot a_1 \quad (4.25)$$

dove  $V_{sd}$  è il taglio sollecitante di progetto,  $a_1=0.9 \cdot d \cdot (1-\cot\alpha)$ ,  $\alpha$  è l'inclinazione dell'armatura a taglio e  $d$  è l'altezza utile della sezione.

(4) In presenza di dispositivi speciali per l'ancoraggio delle estremità di lamine o tessuti, è possibile omettere le verifiche di cui al § 4.1.3 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 per la preparazione delle superfici, i tempi di esecuzione e le condizioni ambientali.

### 4.2.3 Analisi del comportamento agli stati limite di servizio

#### 4.2.3.1 Basi del calcolo

(1)P Questo capitolo tratta gli stati limite di servizio (SLS) più comuni, ed in particolare relativi:

- alla limitazione delle tensioni (§ 4.2.3.2);
- al controllo dell'inflessione (§ 4.2.3.3);
- al controllo della fessurazione (§ 4.2.3.4).

Altri stati limite di servizio possono risultare importanti in particolari situazioni, pur non essendo inclusi nelle presenti Istruzioni.

(2)P Sotto i carichi di servizio 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 attingano 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, dal momento che la presenza di fessure troppo numerose 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.

(3)P Le verifiche in condizioni di servizio possono essere svolte in campo elastico-lineare tenendo conto sia del comportamento per sezione interamente reagente che per sezione fessurata. Va tenuta in conto 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:

- comportamento elastico lineare dei materiali;
- conservazione della pianeità delle sezioni rette;
- assenza di scorrimenti (perfetta aderenza) tra calcestruzzo ed armatura metallica e tra calcestruzzo e rinforzo in FRP.

(4)P La prima ipotesi comporta l'assunzione di un modulo di elasticità normale (nella direzione dell'asse della trave) costante per ciascun materiale; la seconda implica la linearità del diagramma

delle deformazioni sulla sezione retta dell'elemento inflesso; la terza, insieme con la prima, permette di definire un rapporto di proporzionalità tra la tensione dell'acciaio e quella di una fibra di calcestruzzo posta alla stessa quota ( $\sigma_s/\sigma_c=E_s/E_c=n_s$ ), nonché tra la tensione del rinforzo in FRP e quella della fibra di calcestruzzo ad essa adesa ( $\sigma_f/\sigma_c=E_f/E_c=n_f$ ).

Tali rapporti sono definiti come coefficienti di omogeneizzazione: nell'ordine, dell'acciaio e del rinforzo rispetto al calcestruzzo compresso. Essi permettono di rappresentare il diagramma delle tensioni su una sezione in c.a. rinforzata con FRP come quello di una sezione omogenea, purché si intendano i valori delle tensioni sull'acciaio e sul rinforzo amplificati, rispettivamente,  $n_s$  e  $n_f$  volte. I valori dei coefficienti di omogeneizzazione devono essere stabiliti tenendo conto della viscosità e quindi facendo riferimento a situazioni sia a breve che a lungo termine.

(5)P Per effettuare le verifiche in condizioni di servizio è necessario valutare la posizione dell'asse neutro ed il momento di inerzia della sezione in c.a. fessurata e non fessurata, prima e dopo l'applicazione del rinforzo in FRP.

(6)P Nel calcolo delle tensioni, se del caso, è necessario considerare, oltre agli effetti dei carichi, anche quelli delle variazioni termiche, della viscosità, del ritiro e di eventuali altre distorsioni.

#### 4.2.3.2 Verifica delle tensioni

(1)P In condizioni di servizio le tensioni nelle fibre, calcolate per la combinazione di carico quasi permanente, devono soddisfare la limitazione  $\sigma_f \leq \eta f_{fk}$ , essendo  $f_{fk}$  la tensione caratteristica di rottura delle fibre ed  $\eta$  il fattore di conversione, i cui valori sono suggeriti nel § 3.6.

Le tensioni nel calcestruzzo e nell'acciaio vanno limitate in accordo con quanto prescritto nella Normativa vigente.

(2) 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 in maniera additiva, nel modo seguente:

- tensioni nel calcestruzzo:  $\sigma_c = \sigma_{c0} + \sigma_{c1}$ ,  $\sigma_{c0} = M_0 / W_{0,c}^s$ ,  $\sigma_{c1} = M_1 / W_{1,c}^s$ ;
- tensioni nell'acciaio teso:  $\sigma_s = \sigma_{s0} + \sigma_{s1}$ ,  $\sigma_{s0} = n_s M_0 / W_{0,s}^i$ ,  $\sigma_{s1} = n_s M_1 / W_{1,s}^i$ ;
- tensioni nelle fibre:  $\sigma_f = n_f M_1 / W_{1,f}^i$ .

Nelle relazioni sopra riportate, con riferimento alla Figura 4-10, i moduli di resistenza sono così definiti:

- $W_{0,c}^s = I_0/x_0$ : modulo di resistenza della sezione in c.a. relativo al lembo di calcestruzzo più compresso;
- $W_{0,s}^i = I_0/(d-x_0)$ : modulo di resistenza della sezione in c.a. relativo all'acciaio in trazione;
- $W_{1,c}^s = I_1/x_1$ : modulo di resistenza della sezione in c.a. rinforzata relativo al lembo di calcestruzzo più compresso;
- $W_{1,s}^i = I_1/(d-x_1)$ : modulo di resistenza della sezione in c.a. rinforzata relativo all'acciaio in trazione;
- $W_{1,f}^i = I_1/(H-x_1)$ : modulo di resistenza della sezione in c.a. rinforzata relativo alle fibre.

Inoltre, 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 in c.a. fessurata e non rinforzata, e di sezione in c.a. fessurata e rinforzata con FRP.

Anche in questo caso i coefficienti di omogeneizzazione utilizzati devono tenere conto della viscosità del calcestruzzo e quindi della distinzione tra verifiche a breve ed a lungo termine.

#### 4.2.3.3 Verifica delle frecce

(1)P Le deformazioni esibite dalle strutture rinforzate con FRP devono rispettare le limitazioni imposte dalla Normativa vigente.

(2)P Il modello 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.

(3)P Se risulta appropriato, il modello meccanico adottato deve consentire di tenere conto:

- degli effetti della viscosità e del ritiro;
- dell'effetto irrigidente del calcestruzzo teso tra le fessure;
- della fessurazione preesistente, provocata da carichi antecedenti all'applicazione del rinforzo;
- dell'influenza di distorsioni eventualmente agenti, quali ad esempio quelle di origine termica;
- della modalità di applicazione del carico, sia essa statica o dinamica;
- del 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.

(4)P È opportuno rilevare che, in caso di calcolo non lineare delle frecce, non vale il principio di sovrapposizione degli effetti.

(5) Il calcolo della freccia per travi in c.a. rinforzate con FRP può essere effettuato mediante integrazione del diagramma delle curvature. Queste ultime possono essere valutate attraverso un'analisi non lineare che tenga conto della fessurazione e dell'effetto irrigidente del calcestruzzo teso.

In alternativa sono possibili analisi semplificate del tipo di quelle in uso per le ordinarie sezioni in c.a., sempre che siano suffragate da adeguate sperimentazioni.

(6)P La presenza di una deformazione iniziale, preesistente all'applicazione del rinforzo, può essere tenuta in conto sommando le frecce che competono alle diverse fasi.

#### 4.2.3.4 Verifica dell'apertura delle fessure

(1)P Per proteggere l'armatura metallica interna e garantire la funzionalità degli elementi, occorre prevedere opportune limitazioni sui valori dell'apertura delle fessure in condizioni di servizio.

(2)P I limiti di fessurazione delle strutture rinforzate con FRP devono soddisfare le prescrizioni contenute nella Normativa vigente.

(3) 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 le espressioni in uso per le ordinarie sezioni in c.a. onde tener conto della presenza del rinforzo esterno.

L'evidenza sperimentale dimostra che le membrature in c.a. placcate con FRP presentano generalmente fessure di ampiezza inferiore anche se più ravvicinate.

(4)P Sono possibili modellazioni più complesse ed accurate purché siano supportate da adeguate sperimentazioni.

#### **4.2.4 Duttività**

(1)P Per elementi inflessi la duttilità, intesa come capacità di deformazione in campo plastico, dipende sia dal comportamento della sezione, sia dalle modalità effettive di collasso dell'elemento strutturale nel suo complesso.

(2)P Per quanto riguarda la sezione, una maggiore duttilità è assicurata quando il collasso avviene per schiacciamento del calcestruzzo. La rottura del rinforzo in FRP, per superamento della sua resistenza a trazione, comporta invece un collasso di tipo fragile.

La duttilità è soprattutto influenzata dalla modalità di rottura dell'elemento strutturale nel suo complesso, indipendentemente dal tipo di sezione, ed è decisamente più bassa se si innesca il fenomeno di delaminazione.

### **4.3 RINFORZO A TAGLIO**

#### **4.3.1 Generalità**

(1)P 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 presente.

(2)P Il rinforzo a taglio con materiali compositi si realizza applicando uno o più strati di tessuto in aderenza alla superficie esterna dell'elemento da rinforzare. Essi possono essere continui, sotto forma di fogli, oppure discontinui, sotto forma di strisce.

(3)P Elementi distintivi del rinforzo sono: la geometria degli strati di tessuto adesi alla membratura rinforzata, l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale di quest'ultima.

#### **4.3.2 Configurazioni per il rinforzo a taglio**

(1) In aggiunta alle tipologie sopra presentate, se ne possono adottare anche altre non trattate in queste Istruzioni, purché ne sia dimostrata l'efficacia e ne sia quantificato il contributo resistente a taglio.

(2) La disposizione del rinforzo può essere in forma di rinforzi laterali, rinforzi ad U e rinforzi in avvolgimento.

(3) Nel caso di rinforzi ad U su sezioni rettangolari, 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 in materiale composito. In tale eventualità, se è possibile dimostrare l'efficacia del vincolo offerto dai suddetti dispositivi, il comportamento del rinforzo ad U può considerarsi equivalente a quello del rinforzo in avvolgimento.

(4) Il rinforzo a taglio può anche essere realizzato mediante l'inserimento di barre o lamine in materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale tipologia di rinforzo non è oggetto delle presenti Istruzioni.

#### **4.3.3 Resistenza di calcolo a taglio dell'elemento rinforzato con FRP**

##### **4.3.3.1 Resistenza di calcolo a taglio**

(1) La resistenza di calcolo a taglio dell'elemento rinforzato allo SLU si valuta come:

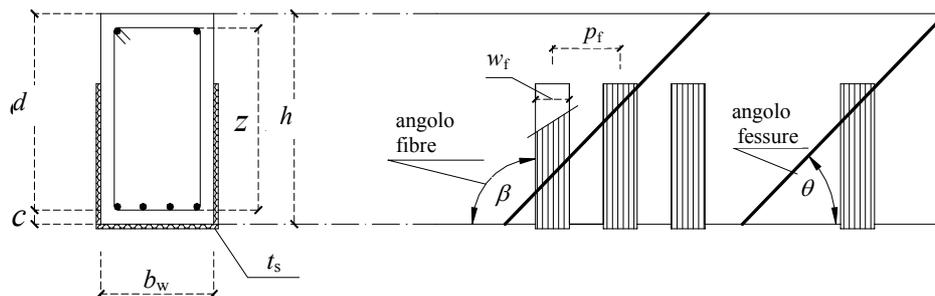
$$V_{Rd} = \min \left\{ \phi_c V_{Rd,ct} + \phi_s V_{Rd,s} + V_{Rd,f}, V_{Rd,max} \right\}, \quad (4.26)$$

dove  $V_{Rd,ct}$  e  $V_{Rd,s}$  sono, rispettivamente, i contributi del calcestruzzo e dell'armatura trasversale in acciaio, da valutarsi in accordo con la Normativa vigente;  $V_{Rd,f}$  è il contributo del rinforzo in FRP, da valutarsi come indicato nel seguito;  $V_{Rd,max}$  è la resistenza della biella compressa di calcestruzzo, da valutarsi in accordo con la Normativa vigente. Il coefficiente  $\phi_c$  tiene conto della progressiva riduzione del contributo del calcestruzzo alla resistenza ultima a taglio legata all'aumento della percentuale di rinforzo in FRP. In assenza di valutazioni più accurate, suffragate da adeguate sperimentazioni, si suggerisce prudenzialmente di adottare per tale coefficiente il valore 0.5. Per il coefficiente  $\phi_s$  si adotterà invece il valore 1.0.

(2) Nel caso di rinforzo laterale su una sezione rettangolare, il contributo del rinforzo in FRP,  $V_{Rd,f}$ , può essere valutato in base al meccanismo di "cucitura" delle fessure da taglio, nel modo seguente:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot \frac{\sin \beta}{\sin \theta} \cdot \frac{w_f}{p_f}, \quad (4.27)$$

dove  $\gamma_{Rd}$  è il coefficiente parziale fornito nella Tabella 3-3 del §3.5.2,  $d$  è l'altezza utile della sezione,  $f_{fed}$  è la resistenza efficace di calcolo del rinforzo, da valutarsi come nel § 4.3.3.2,  $t_f$  è lo spessore del rinforzo in FRP,  $\beta$  è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento,  $\theta$  è l'angolo di inclinazione delle fessure da taglio rispetto all'asse dell'elemento (in mancanza di determinazione più accurata, si può assumere  $\theta = 45^\circ$ ),  $p_f$  ed  $w_f$  sono, rispettivamente, il passo e la larghezza delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre (Figura 4-12).



**Figura 4-12** – Elementi distintivi di un rinforzo a taglio sotto forma di strisce.

(3) Nel caso di rinforzo ad U o di rinforzo in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del rinforzo in FRP,  $V_{Rd,f}$ , è basato sul meccanismo a traliccio di Moersch e risulta:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot \left( \frac{w_f}{p_f} \right)^2 \cdot (\cot \theta + \cot \beta) \cdot \sin \beta. \quad (4.28)$$

(4) Nel caso di rinforzo in avvolgimento con fibre ortogonali all'asse dell'elemento da rinforzare ( $\beta = 90^\circ$ ), avente sezione circolare di diametro  $D$ , il contributo del rinforzo in FRP,  $V_{Rd,f}$ , risulta essere invece:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot D \cdot f_{fed} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot t_f \cdot \cot \theta. \quad (4.29)$$

(5) Nelle espressioni che forniscono  $V_{Rd,f}$  è possibile introdurre il passo  $p'_f$  delle strisce misurato lungo l'asse dell'elemento, al posto di  $p_f$ . Conseguentemente, nelle relazioni sopra riportate si sostituirà a  $p_f$  la quantità  $p'_f \cdot \sin \beta$ .

#### 4.3.3.2 Resistenza efficace di calcolo del rinforzo

(1) In corrispondenza delle fessure da taglio si manifestano delle concentrazioni tensionali all'interfaccia calcestruzzo-FRP che possono innescare la delaminazione del rinforzo.

Un approccio semplificato al problema consiste nell'introdurre la cosiddetta "resistenza efficace" del rinforzo, definita come la tensione che lo cimenta all'atto della delaminazione.

(2) Nel caso di applicazione laterale su una sezione rettangolare, la resistenza efficace di calcolo del rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \frac{z_{rid,eq}}{0.9d} \cdot \left( 1 - 0.6 \sqrt{\frac{L_{eq}}{z_{rid,eq}}} \right)^2, \quad (4.30)$$

dove  $f_{fdd}$  è la resistenza di calcolo alla delaminazione, da valutarsi mediante la (4.9),  $d$  è l'altezza utile della sezione, ed inoltre:

$$z_{rid,eq} = z_{rid} + L_{eq}, \quad z_{rid} = z - l_e \cdot \sin \beta, \quad L_{eq} = \frac{u_1}{f_{fdd} / E_f} \cdot \sin \beta, \quad (4.31)$$

essendo  $l_e$  la lunghezza efficace di ancoraggio, fornita dalla (4.7),  $\beta$  l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento,  $s_f$  lo scorrimento ultimo di delaminazione, valutabile mediante la (4.4), ed  $E_f$  il modulo di elasticità normale del rinforzo in FRP nella direzione delle fibre.

(3) Nel caso di configurazione ad U su una sezione rettangolare, la resistenza efficace di calcolo del rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{3} \frac{l_e \sin \beta}{0.9d} \right]. \quad (4.32)$$

(4) Nel caso di avvolgimento su una sezione rettangolare, la resistenza efficace di calcolo del rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = f_{fdd} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{6} \frac{l_e \sin \beta}{0.9d} \right] + \frac{1}{2} (\eta_R \cdot f_{fd} - f_{fdd}) \cdot \left[ 1 - \frac{l_e \sin \beta}{0.9d} \right], \quad (4.33)$$

dove  $f_{fd}$  è la resistenza di calcolo del rinforzo in FRP, da valutarsi come nel §3, ed inoltre:

$$\eta_R = 0.2 + 1.6 \frac{r_c}{b_w}, \quad 0 \leq \frac{r_c}{b_w} \leq 0.5, \quad (4.34)$$

essendo  $r_c$  il raggio di curvatura dell'arrotondamento dello spigolo della sezione attorno a cui è avvolto il rinforzo,  $b_w$  la larghezza dell'anima della sezione. Nell'equazione (4.33) il secondo termine va considerato solo se positivo.

(5) Nella valutazione (equazione (4.9)) della resistenza di calcolo alla delaminazione,  $f_{fdd}$ , interviene il coefficiente di ricoprimento  $k_b$  fornito dalla (4.2): nel presente contesto, nel caso di rinforzi discontinui sotto forma di strisce, si porrà  $b_f = w_f$  e  $b = p_f$ , mentre nel caso di rinforzi continui sotto forma di fogli, si porrà  $b_f = b = \min\{0.9d, h_w\} \cdot \sin(\theta + \beta) / \sin \theta$ , essendo  $h_w$  l'altezza dell'anima della trave.

(6) Se si adottano dispositivi atti a vincolare le estremità libere di rinforzi ad U e si dimostra che la loro resistenza è almeno pari a quella del rinforzo avvolto attorno allo spigolo della sezione, la resistenza efficace di calcolo sarà fornita dalla (4.33). In caso contrario, la resistenza efficace di calcolo del rinforzo sarà ricavata dalla (4.32).

(7) Nel caso di avvolgimento in fogli con  $\beta = 90^\circ$ , applicato su una sezione circolare avente diametro  $D$ , la resistenza efficace di calcolo del rinforzo è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = E_f \cdot \varepsilon_{f,max}, \quad (4.35)$$

dove  $E_f$  è il modulo di elasticità normale del rinforzo in FRP e  $\varepsilon_{f,max}$  è un opportuno valore limite da imporre alla deformazione di quest'ultimo. In mancanza di una determinazione più accurata, si può assumere  $\varepsilon_{f,max} = 0.005$ .

## 4.4 RINFORZO A TORSIONE

### 4.4.1 Generalità

(1)P 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 trasversale presente.

(2)P Il rinforzo a torsione con materiali compositi si realizza applicando in avvolgimento completo sulla superficie esterna dell'elemento da rinforzare uno o più strati di tessuto, le cui fibre presentano un'inclinazione di  $90^\circ$  rispetto all'asse longitudinale dell'elemento.

(3)P Le Istruzioni che seguono si applicano agli elementi prismatici in cui si possa individuare una sezione anulare fittizia resistente.

#### 4.4.2 Configurazioni per il rinforzo a torsione

(1) Il rinforzo può essere continuo, sotto forma di fogli, oppure discontinuo, sotto forma di strisce. Possono essere impiegati altri tipi di rinforzo non trattati in queste Istruzioni, qualora sia dimostrata la loro efficacia e quantificato il loro contributo resistente a torsione.

(2) Il rinforzo a torsione può anche essere realizzato mediante l'inserimento di barre o lamine in materiale composito in apposite fessure praticate sulle facce esterne dell'elemento. Tale tipologia di rinforzo non è oggetto delle presenti Istruzioni.

#### 4.4.3 Resistenza di calcolo a torsione dell'elemento rinforzato con FRP

##### 4.4.3.1 Resistenza di calcolo a torsione

(1) Allo SLU, la resistenza di calcolo a torsione dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$T_{Rd} = \min \left\{ \phi_s T_{Rd,s} + T_{Rd,f}, T_{Rd,max} \right\}, \quad (4.36)$$

dove  $T_{Rd,s}$  e  $T_{Rd,f}$  sono, rispettivamente, i contributi dell'armatura in acciaio e del rinforzo in FRP,  $T_{Rd,max}$  è la resistenza della biella compressa di calcestruzzo. In analogia a quanto già detto per il rinforzo a taglio, il coefficiente  $\phi_s$  tiene conto della progressiva riduzione del contributo dell'acciaio alla resistenza ultima a torsione legata all'aumento della percentuale di rinforzo in FRP. In assenza di valutazioni più accurate, suffragate da adeguate sperimentazioni, si suggerisce prudenzialmente di adottare per tale coefficiente il valore 0.5.

(2) Il contributo dell'armatura in acciaio,  $T_{Rd,s}$ , è fornito da:

$$T_{Rd,s} = \min \left\{ \frac{A_{sw}}{p} \cdot 2B_e \cdot f_{ywd}, \frac{A_l}{u_e} \cdot 2B_e \cdot f_{yd} \right\}, \quad (4.37)$$

dove  $A_{sw}$  è l'area della sezione di un braccio di una staffa,  $p$  è il passo delle staffe,  $B_e$  è l'area racchiusa dal poligono avente per vertici i baricentri delle armature longitudinali,  $f_{ywd}$  è la resistenza di calcolo allo snervamento dell'acciaio dell'armatura trasversale,  $A_l$  è l'area totale delle armature longitudinali,  $u_e$  è il perimetro del predetto poligono ed  $f_{yd}$  è la resistenza di calcolo allo snervamento dell'acciaio dell'armatura longitudinale.

(3) La resistenza della biella compressa di calcestruzzo nella (4.36), è data da:

$$T_{Rd,max} = 0.50 \cdot f_{cd} \cdot B_e \cdot h_s, \quad (4.38)$$

dove  $f_{cd}$  è la resistenza di calcolo a compressione del calcestruzzo,  $h_s$  è lo spessore della sezione anulare fittizia resistente, pari ad 1/6 del diametro del cerchio massimo inscritto nel poligono avente per vertici i baricentri delle armature longitudinali.

(4) Nel caso in cui dalla (4.37) risulti che la minima resistenza a torsione è quella dell'armatura trasversale, il contributo del rinforzo in FRP nella (4.36) è fornito da:

$$T_{Rd,f} = 2f_{fed} \cdot t_f \cdot b \cdot d \cdot \frac{w_f}{p_f} \cdot \cot \theta, \quad (4.39)$$

dove  $f_{fed}$  è la resistenza efficace di calcolo del rinforzo, da valutarsi come nel § 4.3.3.2,  $d$  è l'altezza utile della sezione,  $t_f$  è lo spessore della striscia o del foglio in FRP,  $\beta$  è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento,  $\theta$  è l'angolo di inclinazione delle fessure di taglio rispetto all'asse dell'elemento (in mancanza di determinazione più accurata, si può assumere  $\theta=45^\circ$ ),  $p_f$  e  $w_f$  sono, rispettivamente, il passo e la larghezza delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione delle fibre.

(5) Se dalla (4.37) risulta che la minima resistenza a torsione è quella dell'armatura longitudinale, non è possibile effettuare un rinforzo in FRP.

(6) Nel caso di sollecitazione combinata di torsione  $T_{Sd}$  e taglio  $V_{Sd}$ , deve essere soddisfatta la limitazione:

$$\frac{T_{Sd}}{T_{Rd,max}} + \frac{V_{Sd}}{V_{Rd,max}} \leq 1, \quad (4.40)$$

in cui  $T_{Rd,max}$  si valuta con l'ausilio della (4.38) e  $V_{Rd,max}$  si valuta secondo la Normativa vigente. Il calcolo del rinforzo a torsione si esegue indipendentemente da quello del rinforzo a taglio: le corrispondenti aree di rinforzo vanno quindi tra loro sommate.

## 4.5 CONFINAMENTO

(1)P Un appropriato confinamento degli elementi in c.a. può determinare un miglioramento delle proprietà meccaniche del calcestruzzo in condizioni ultime. In particolare, esso consente di incrementare:

- la resistenza ultima, e quindi la competente deformazione ultima, per elementi sollecitati da sforzo normale centrato o con piccola eccentricità;
- la duttilità ed, in misura comunque ridotta, la resistenza ultima, per membrane pressoinflesse.

(2)P Per la redistribuzione dei carichi verticali non è consentito fare affidamento sulla duttilità di elementi soggetti a sforzo normale centrato o con piccola eccentricità.

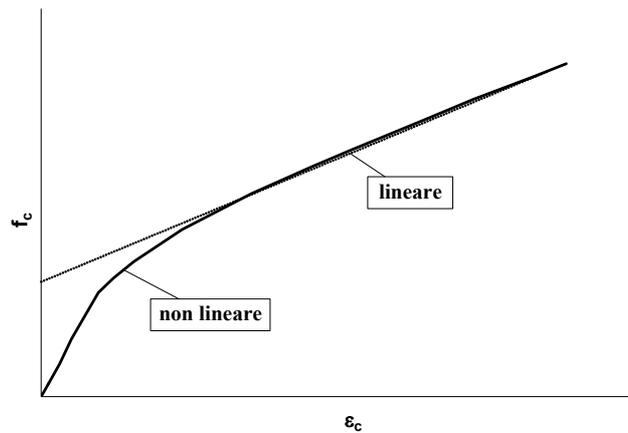
(3)P L'incremento della resistenza a compressione e della corrispondente deformazione ultima del calcestruzzo confinato con FRP dipendono dalla pressione di confinamento applicata. Quest'ultima risulta funzione della rigidezza del sistema e della forma della sezione trasversale dell'elemento da confinare.

(4)P Il confinamento di elementi in c.a. può essere realizzato con tessuti o lamine in FRP disposti sul contorno a mo' di fasciatura esterna continua (ricoprimento) o discontinua (cerchiatura).

### 4.5.1 Generalità

(1)P Un sistema confinante in FRP, a differenza di uno in acciaio, esercita una pressione laterale crescente all'aumentare della dilatazione trasversale dell'elemento confinato.

(2)P Un tipico legame tensione-deformazione “ $\sigma$ - $\varepsilon$ ” relativo a prove di compressione condotte su provini confinati con FRP è riportato in Figura 4-13.



**Figura 4-13** – Andamento del legame tensione-deformazione per calcestruzzo confinato con FRP.

(3)P Per valori della deformazione assiale  $\varepsilon_c$  pari allo 0.2%, la tensione nel calcestruzzo confinato è solo di poco superiore a quella esibita dal calcestruzzo non confinato, e cioè alla resistenza di quest'ultimo.

(4)P Per deformazioni superiori allo 0.2% il legame tensione-deformazione è non lineare e la pendenza della corrispondente curva “ $\sigma$ - $\varepsilon$ ” diminuisce progressivamente fino ad assumere, nell'ultimo tratto, 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 estesa.

Il collasso dell'elemento confinato si raggiunge per rottura delle fibre. Tuttavia, a partire da un certo valore della deformazione assiale, l'elemento è assimilabile ad un recipiente dalle pareti molto esili riempito di materiale incoerente. Da questo momento in poi, esso perde di fatto la propria funzionalità potendo assorbire solo modeste sollecitazioni trasversali.

#### 4.5.2 Resistenza a compressione centrata

(1)P Il confinamento di un elemento in c.a. con FRP si rende necessario quando occorra incrementare la sua resistenza a compressione.

(2)P 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.

(3)P In assenza di una pretensione iniziale, il rinforzo in 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. In maniera esplicita, si rileva che nella fase precedente alla plasticizzazione il sistema in FRP risulta praticamente scarico.

(4) In assenza di fenomeni di instabilità per carico di punta, la resistenza di calcolo a sforzo normale centrato o con piccola eccentricità di un elemento in c.a. confinato mediante FRP può essere calcolata utilizzando la seguente relazione:

$$N_{Rcc,d} = A_c \cdot f_{ccd} + A_s \cdot f_{yd}, \quad (4.41)$$

dove  $A_c$  ed  $f_{ccd}$  sono, rispettivamente, l'area e la resistenza di calcolo del calcestruzzo confinato, di seguito definita,  $A_s$  ed  $f_{yd}$ , rispettivamente, l'area e la resistenza di calcolo dell'armatura metallica eventualmente presente (quest'ultima valutata come previsto nella Normativa vigente).

(5)P La resistenza di calcolo  $N_{Rcc,d}$  va confrontata con la corrispondente sollecitazione che compete alle diverse combinazioni di carico previste dalla Normativa vigente.

(6) Alla resistenza di un elemento confinato e soggetto ad valore  $f_1$  della pressione di confinamento contribuisce soltanto una quota parte di quest'ultima,  $f_1'$ , detta pressione efficace di confinamento. Essa è funzione della forma della sezione e delle modalità di intervento. Indicato con  $V_c$  il volume dell'elemento in calcestruzzo e con  $V_{c,eff}$  quello efficacemente confinato, si introduce il seguente coefficiente di efficienza ( $\leq 1$ ):

$$k_{eff} = \frac{V_{c,eff}}{V_c}, \quad (4.42)$$

in funzione del quale può essere definita la pressione efficace di confinamento.

Il coefficiente di efficienza può essere fattorizzato nel prodotto del coefficiente di efficienza orizzontale,  $k_H$ , e per quello verticale,  $k_V$ :

$$f_1' = k_{eff} f_1 = k_H k_V f_1. \quad (4.43)$$

(7) Nel caso di elementi a sezione circolare completamente fasciati (soluzione di massima efficacia:  $k_{eff}=1$ ), la resistenza di calcolo del calcestruzzo confinato,  $f_{ccd}$ , può essere valutata con la seguente relazione:

$$\frac{f_{ccd}}{f_{cd}} = 1 + 2.6 \left( \frac{f_1}{f_{cd}} \right)^{2/3}, \quad (4.44)$$

nella quale  $f_{cd}$  è la resistenza di calcolo del calcestruzzo non confinato, da calcolarsi come prescritto nella Normativa vigente, ed  $f_1$  è la pressione laterale di confinamento, da determinarsi come indicato nel successivo § 4.5.2.1.

#### 4.5.2.1 Stima della pressione laterale di confinamento

##### 4.5.2.1.1 Sezioni circolari

(1)P L'intervento di confinamento con FRP risulta particolarmente efficace per elementi a sezione circolare soggetti a compressione centrata.

(2)P In presenza di fibre disposte in direzione trasversale all'asse longitudinale dell'elemento, il sistema in FRP induce una pressione laterale uniforme sulla superficie di contatto, che si oppone all'espansione radiale dell'elemento compresso.

(3) Tale pressione può essere valutata nel modo seguente:

$$f_1 = \frac{1}{2} \rho_f E_f \varepsilon_{fd,rid} \quad (4.45)$$

dove  $\rho_f = 4t_f/D$ ,  $D$  è il diametro della sezione circolare,  $t_f$  è lo spessore del ricoprimento in FRP,  $E_f$  è il modulo di elasticità normale del materiale in direzione delle fibre ed  $\varepsilon_{fd,rid}$  è un'opportuna deformazione ridotta di calcolo dell'FRP. Essa è ottenuta a partire dalla deformazione ultima della fasciatura in FRP,  $\varepsilon_{fu}$ , tenendo conto opportunamente dei fattori ambientali.

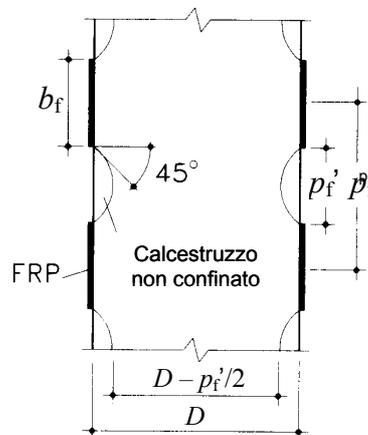
(4) La deformazione ridotta di calcolo dell'FRP può essere valutata nel modo seguente:

$$\varepsilon_{fd,rid} = \min \{ \eta_a \varepsilon_{fu} / \gamma_f ; 0.004 \} , \quad (4.46)$$

dove  $\eta_a$  e  $\gamma_f$  sono, rispettivamente, il fattore di conversione ambientale ed il coefficiente parziale, i cui valori sono suggeriti, nell'ordine, nella Tabella 3-4 e nella Tabella 3-2 delle presenti Istruzioni.

(5) Il coefficiente di efficienza orizzontale,  $k_H$ , di una fasciatura esterna continua di una colonna circolare viene assunto pari ad 1. Qualora, per ragioni di montaggio, la disposizione delle fibre sia ad elica, si deve ridurre opportunamente l'efficienza in funzione dell'inclinazione delle fibre.

(6) In caso di una fasciatura discontinua (Figura 4-14), realizzata cioè con strisce di FRP disposte ad interasse  $p_f$  e distanza netta  $p_f'$ , si dovrà tenere conto della riduzione di efficacia dovuta al fenomeno di diffusione delle tensioni tra due fasciature consecutive. Per effetto della diffusione, in una sezione verticale diametrale (Figura 4-14), si creano delle zone che non risentono del confinamento, aventi approssimativamente un contorno parabolico con angoli di attacco pari a  $45^\circ$ .



**Figura 4-14** – Sezione circolare confinata in maniera discontinua.

Il coefficiente di efficienza verticale,  $k_v$ , pari al rapporto fra l'area di calcestruzzo effettivamente confinato e quella complessiva depurata dell'area delle armature longitudinali (supposto trascurabile) può essere calcolato mediante la seguente relazione:

$$k_v = k_{eff} = \left( 1 - \frac{p_f'}{2D} \right)^2 \quad (4.47)$$

#### 4.5.2.1.2 Sezioni quadrate e rettangolari

(1)P Il confinamento con FRP di elementi a sezione quadrata o rettangolare produce incrementi solo marginali della resistenza a compressione. Conseguentemente, applicazioni di questo genere devono essere attentamente vagliate ed analizzate.

(2)P Prima dell'applicazione del sistema in FRP è opportuno procedere ad un arrotondamento degli spigoli della sezione, allo scopo di evitare pericolose concentrazioni di tensione, in essi localizzate, che potrebbero provocare una rottura prematura del sistema.

(3)P Il raggio di curvatura dello spigolo deve soddisfare la seguente limitazione:

$$r_c \geq 20 \text{ mm} . \quad (4.48)$$

(4) Riferendosi alla Figura 4-15 si può ritenere, con buona approssimazione, che l'area di calcestruzzo effettivamente confinata sia solo un'aliquota di quella complessiva. La motivazione di tale comportamento è da attribuirsi all' "effetto arco" che si manifesta all'interno della sezione, in dipendenza del valore del raggio di curvatura  $r_c$ .

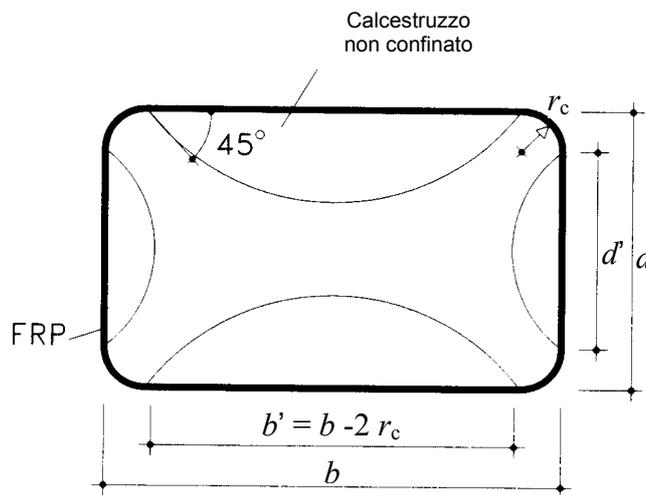


Figura 4-15 – Confinamento di sezioni rettangolari.

(5) La pressione di confinamento esplicita da un rivestimento continuo in FRP applicato ad un elemento di sezione rettangolare di dimensioni  $b$  e  $d$ , può essere calcolata mediante la seguente relazione:

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_f E_f \varepsilon_{f,rid} = \frac{E_f \varepsilon_{f,rid} t_f}{\max\{b, d\}} . \quad (4.49)$$

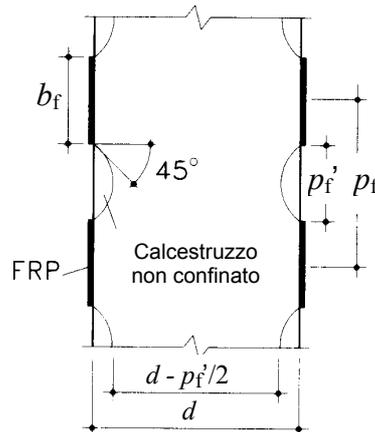
(6) Per la situazione di cui al punto (5), il coefficiente di efficienza orizzontale,  $k_H$ , è fornito dal rapporto tra l'area confinata e quella totale,  $A_g$ :

$$k_H = k_{eff} = 1 - \frac{b'^2 + d'^2}{3A_g \cdot (1 - \rho_{sg})} , \quad (4.50)$$

in cui  $b'$  e  $d'$  sono le dimensioni indicate in Figura 4-15,  $A_g$  è l'area della sezione trasversale ed il parametro adimensionale  $\rho_{sg}$  rappresenta la percentuale geometrica di armatura longitudinale.

(7) In caso di una fasciatura discontinua (Figura 4-16), realizzata cioè con strisce di FRP disposte ad interasse  $p_f$  e distanza netta  $p_f'$ , il coefficiente di efficienza verticale può essere calcolato mediante la seguente relazione:

$$k_v = \left( 1 - \frac{p_f'}{2 \min\{b, d\}} \right)^2 \quad (4.51)$$



**Figura 4-16** – Sezione rettangolare confinata in maniera discontinua.

(8) In assenza di adeguate prove sperimentali, che ne comprovino l'efficacia, non va considerato l'effetto del confinamento su sezioni rettangolari per le quali  $b/d > 2$ , ovvero  $\max\{b, d\} > 900\text{mm}$ .

#### 4.5.3 Duttilità di elementi presso-inflessi confinati con FRP

(1)P Il confinamento con FRP può essere realizzato anche su elementi in calcestruzzo soggetti a pressoflessione; in tal modo è possibile incrementarne la duttilità e, solo in misura ridotta, la resistenza.

(2) In mancanza di determinazioni più accurate, la valutazione della curvatura ultima di una sezione presso-inflessa può essere perseguita adottando un classico legame parabola-rettangolo, il cui tratto costante si estenda fino ad un valore della deformazione ultima,  $\varepsilon_{ccu}$ , fornito dalla seguente relazione:

$$\varepsilon_{ccu} = 0.0035 + 0.015 \sqrt{\frac{f_1}{f_{cd}}} \quad (4.52)$$

(3) Determinazioni più accurate della curvatura ultima e del conseguente incremento di resistenza flessionale possono essere conseguite con l'ausilio di appropriati legami costitutivi del calcestruzzo confinato con FRP in grado di modellare più fedelmente il comportamento descritto nel § 4.5.1 ed in particolare nella Figura 4-13.

## 4.6 RINFORZO A FLESSIONE DI STRUTTURE IN C.A.P.

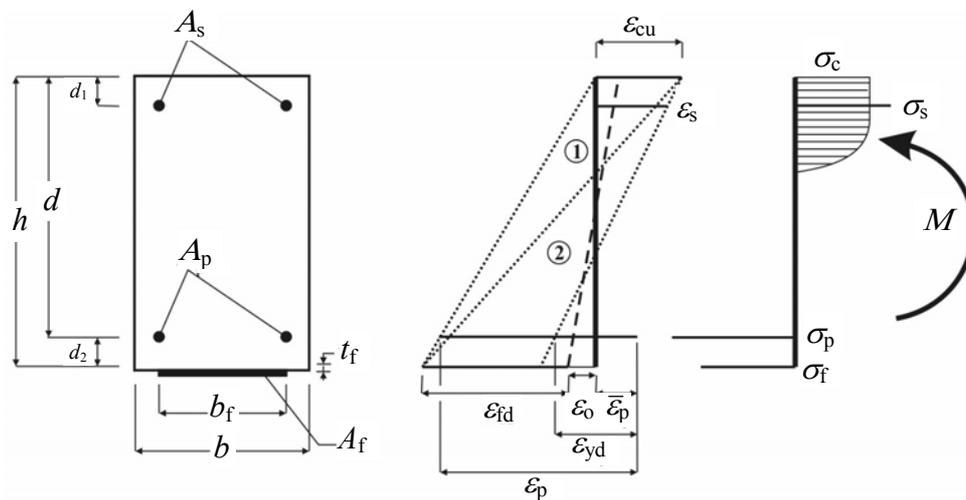
### 4.6.1 Utilizzo di compositi FRP per elementi pre-tesi o post-tesi in c.a.

(1) P I metodi ed i criteri di seguito descritti si applicano nel rinforzo di elementi in conglomerato cementizio armato precompresso, eseguito con lamine in FRP non presollecitate.

#### 4.6.1.1 Analisi del comportamento allo stato limite ultimo

(1)P La determinazione della capacità resistente ultima per flessione di sezioni precomprese si eseguirà secondo procedure analoghe a quelle descritte nel § 4.2.2 per le sezioni in conglomerato cementizio armato normale, con le sole varianti di seguito specificate.

- 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 4-17).



**Figura 4-17** – Modalità di rottura di una sezione in c.a.p. rinforzata esternamente con lamine in FRP.

- La deformazione ultima dell'armatura di precompressione è pari a  $(0.01 + \bar{\varepsilon}_p)$ .
- 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 la 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.

(2)P Il raggiungimento dello stato limite ultimo deve essere preceduto dallo snervamento dell'armatura di precompressione.

(3) Per la verifica nei confronti della delaminazione si rinvia a quanto già detto nei §§ 4.1 e 4.2.

#### **4.6.1.2 Analisi del comportamento agli stati limite di esercizio**

(1)P In condizioni di esercizio le tensioni di lavoro del calcestruzzo, dell'acciaio e del rinforzo in FRP devono soddisfare le limitazioni previste nella Normativa vigente ed in particolare, per quanto attiene al rinforzo in FRP, quelle introdotte nel § 4.2.3.2.

(2)P Di regola non si devono considerare i rinforzi se temporaneamente compressi (ad esempio a seguito della deformazione viscosa del conglomerato).

### **4.7 INTERVENTI IN ZONA SISMICA**

#### **4.7.1 Principi generali di intervento**

##### **4.7.1.1 Obiettivi della progettazione**

(1)P In zona sismica è possibile rinforzare con FRP strutture in conglomerato cementizio armato che non soddisfino i requisiti di sicurezza nei confronti dell'azione sismica di progetto relativamente ad uno o più stati limite.

(2)P Questa parte del documento recepisce le prescrizioni della Normativa Sismica vigente, relativamente a:

- valutazione della sicurezza sismica,
- requisiti di sicurezza (verifica di stati limite),
- livelli di protezione antisismica (intensità dell'azione sismica associata),
- metodi di analisi,
- criteri di verifica (distinzione fra elementi "duttili" e "fragili"),
- caratteristiche dei materiali da impiegare nelle verifiche di sicurezza.

##### **4.7.1.2 Criteri per la scelta dell'intervento con FRP**

(1) Tipologia, entità ed urgenza dell'intervento con FRP devono dipendere dall'esito di una preventiva valutazione della sicurezza sismica, tenendo conto in particolare che:

- errori grossolani vanno eliminati;
- forti irregolarità degli edifici (in termini di resistenza e/o rigidità) non possono essere sanate con tale tecnica;
- una maggiore regolarità in 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.

(2)P L'intervento con FRP è classificabile come:

- rinforzo o ricostruzione totale o parziale degli elementi (interventi selettivi).

(3)P La progettazione di un intervento con FRP deve comprendere le seguenti attività:

- scelta motivata del tipo di intervento;
- scelta delle tecniche e/o dei materiali;
- dimensionamento preliminare dei rinforzi;
- analisi strutturale che tenga conto delle caratteristiche della struttura post-intervento, in accordo con la Normativa Sismica vigente; in particolare per gli elementi riparati o rinforzati con FRP vanno osservate le indicazioni riportate nei paragrafi successivi, adottando per i materiali nuovi o aggiunti i corrispondenti valori di calcolo.

(4)P In zona sismica il rinforzo con FRP di elementi in c.a. è finalizzato principalmente al conseguimento degli obiettivi di seguito elencati:

- incrementare la resistenza a flessione semplice o composta mediante l'applicazione di compositi con fibre disposte nella direzione dell'asse dell'elemento e, in aggiunta, anche in altre direzioni;
- incrementare la resistenza a taglio di elementi mediante applicazione di FRP con le fibre disposte ortogonalmente all'asse dell'elemento e, in aggiunta, anche in altre direzioni;
- incrementare la duttilità delle sezioni terminali di travi e/o pilastri mediante fasciatura con FRP a fibre continue disposte lungo il perimetro;
- migliorare l'efficienza delle giunzioni per sovrapposizione, mediante fasciatura con FRP a fibre continue disposte lungo il perimetro;
- impedire lo svergolamento delle barre longitudinali soggette a compressione mediante fasciatura con FRP a fibre continue disposte lungo il perimetro;
- incrementare la resistenza a trazione dei pannelli dei nodi trave-pilastro mediante applicazione di fasce di FRP con le fibre disposte secondo le isostatiche di trazione.

(5)P Per le verifiche di sicurezza degli elementi rinforzati con FRP si possono adottare le procedure e le formule riportate nei paragrafi seguenti.

#### 4.7.2 Strategie di intervento

(1)P In quanto selettiva, la strategia di intervento con FRP deve essere ispirata ai seguenti 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 conseguibile in uno dei seguenti modi:
  - incrementando la duttilità delle potenziali cerniere plastiche senza variane la posizione;
  - rilocalizzando le potenziali cerniere plastiche nel rispetto del criterio della gerarchia delle resistenze.

##### 4.7.2.1 Eliminazione dei meccanismi di collasso di tipo fragile

(1)P 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 in FRP le zone in cui la lunghezza di sovrapposizione delle barre longitudinali risulta insufficiente;

- crisi per svergolamento delle barre longitudinali in compressione: si interviene confinando mediante avvolgimento in 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 in FRP.

#### 4.7.2.2 Eliminazione dei meccanismi di collasso di piano

(1)P 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 quel 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.

#### 4.7.2.3 Incremento della capacità deformativa globale di una struttura

(1)P La capacità deformativa ultima di una struttura è una misura della sua attitudine a sopportare l'azione sismica.

(2) La capacità deformativa ultima di una struttura può essere saggiata utilizzando i risultati di un'analisi statica non lineare.

(3)P La capacità deformativa ultima di una struttura dipende dalla capacità deformativa in campo plastico dei singoli elementi resistenti (travi, pilastri e pareti).

##### 4.7.2.3.1 Incremento della capacità deformativa locale degli elementi

(1) 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:  $L_v = M/V$ . Tale rotazione è anche pari al rapporto tra lo spostamento relativo fra le due sezioni suddette e la luce di taglio.

(2)P 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.

##### 4.7.2.3.2 Applicazione del criterio della gerarchia delle resistenze

(1)P L'applicazione del criterio della gerarchia delle resistenze comporta l'eliminazione 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 incrementarne la resistenza a flessione composta con l'obiettivo di ricondurre la struttura intelaiata ad una situazione di "pilastro forte-trave debole".

(2)P L'applicazione del criterio della gerarchia delle resistenze conduce ad un incremento della resistenza a flessione dei pilastri e quindi ad un incremento del taglio agente in condizioni ultime. È opportuno pertanto eseguire le verifiche a taglio previste dalla Normativa, incrementando eventualmente la resistenza nei confronti di tale caratteristica allo scopo di evitare un collasso di tipo fragile.

### 4.7.3 Verifiche di sicurezza

#### 4.7.3.1 Elementi e meccanismi duttili

##### 4.7.3.1.1 Flessione composta

- (1) La capacità flessionale di elementi duttili può essere incrementata mediante l'applicazione di rinforzi in FRP.
- (2) Per il progetto dei rinforzi in FRP a carico di elementi inflessi o pressoinflessi si applicano i criteri e le indicazioni fornite nei §§4.2 e 4.5.
- (3) Quando si incrementi la resistenza flessionale, la trasmissione dell'azione del rinforzo alle zone nodali deve essere assicurata attraverso l'adozione di opportuni particolari costruttivi.
- (4) Le fibre longitudinali impiegate per il rinforzo a pressoflessione devono essere adeguatamente confinate al fine di evitare, sotto azioni cicliche, il distacco delle stesse e l'espulsione del materiale di supporto.

##### 4.7.3.1.2 Rotazione rispetto alla corda

- (1) La "rotazione rispetto alla corda" di elementi monodimensionali (prevalentemente travi e pilastri) può essere incrementata mediante un confinamento con FRP.
- (2) Per la valutazione della rotazione ultima rispetto alla corda,  $\theta_u$ , di elementi rinforzati mediante confinamento con FRP, si può fare ricorso alla seguente relazione:

$$\theta_u = \theta_y + (\varphi_u - \varphi_y)L_{pl} \left( 1 - \frac{0.5L_{pl}}{L_v} \right). \quad (4.53)$$

In essa:

-  $\theta_y$  è la "rotazione rispetto alla corda" esibita dalla sezione terminale quando l'acciaio teso attinge la deformazione di snervamento  $\varepsilon_{sy}$  :

$$\theta_y = \varphi_y \frac{L_v}{3} + 0,0013 \left( 1 + 1,5 \frac{h}{L_v} \right) + 0,13 \varphi_y \frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}}; \quad (4.54)$$

-  $\varphi_u$  è la curvatura ultima della sezione terminale valutata attribuendo alla deformazione ultima del conglomerato,  $\varepsilon_{ccu}$ , il valore definito nel § 4.5.3;

-  $\varphi_y$  è la curvatura esibita dalla sezione terminale quando l'acciaio teso attinge la deformazione di snervamento,  $\varepsilon_{sy}$  ;

-  $L_v$  è la luce di taglio dell'elemento (distanza fra il punto di massimo momento ed il punto di momento nullo);

-  $L_{pl}$  è l'ampiezza della cerniera plastica valutabile come:

$$L_{pl} = 0.1L_v + 0.17h + 0.24 \frac{d_{bl} f_y (MPa)}{\sqrt{f_c (MPa)}}, \quad (4.55)$$

dove  $h$  è l'altezza della sezione,  $d_b$  è il diametro (medio) delle barre longitudinali, ed inoltre  $f_c$  e  $f_y$  sono, rispettivamente, la resistenza a compressione del calcestruzzo e la tensione di snervamento dell'acciaio longitudinale (in MPa), ottenute da prove *in situ* sui materiali esistenti, in accordo con la Normativa Sismica vigente.

#### 4.7.3.2 Elementi e meccanismi fragili

##### 4.7.3.2.1 Taglio

(1) Per il progetto di rinforzi a taglio con materiali fibrorinforzati si applicano i criteri e le indicazioni fornite nel § 4.3, con le seguenti ulteriori prescrizioni:

- sono consentite unicamente le configurazioni ad U o in avvolgimento;
- sono consentiti unicamente rinforzi la cui direzione di maggior resistenza sia ortogonale all'asse longitudinale dell'elemento ( $\beta = 90^\circ$ ).

##### 4.7.3.2.2 Zone di sovrapposizione

(1) Il pericolo di scorrimento delle giunzioni per aderenza nei pilastri può essere eliminato mediante l'applicazione di una fasciatura di confinamento in FRP.

(2) Per sezioni circolari di diametro  $D$ , lo spessore da attribuire a tale fasciatura può essere valutato mediante la seguente relazione:

$$t_f = \frac{D(f_1 - \sigma_{sw})}{2 \cdot 0.001 E_f}. \quad (4.56)$$

In essa:

- $\sigma_{sw}$  è la tensione circonferenziale nelle staffe corrispondente alla deformazione dell'1‰, o la pressione di iniezione della malta tra FRP e pilastro, se presente;
- $f_1$  è la pressione di confinamento nella zona di sovrapposizione di lunghezza  $L_s$ , pari a:

$$f_1 = \frac{A_s f_{yd}}{\left[ \frac{u_e}{2n} + 2(d_b + c) \right] L_s}, \quad (4.57)$$

dove  $u_e$  è il perimetro della sezione all'interno del poligono che circonda le barre longitudinali,  $n$  è il numero di barre giuntate lungo  $u_e$  e  $c$  è lo spessore del copriferro.

(3) Per sezioni rettangolari, di dimensioni  $b$  e  $d$ , si possono utilizzare le espressioni precedenti sostituendo  $D$  con  $\max\{b, d\}$ , e riducendo l'efficacia dell'incamiciatura in FRP attraverso il fattore  $k_s$  definito nel § 4.5.2.1.2.

##### 4.7.3.2.3 Svergolamento delle barre longitudinali

(1) Il pericolo di svergolamento delle barre longitudinali di armatura può essere eliminato mediante l'applicazione di una fasciatura di confinamento in FRP.

(2) Lo spessore da attribuire a tale fasciatura può essere valutato mediante la seguente relazione:

$$t_f = \frac{0.45 n f_y^2 d}{4 E_{ds} E_f} \approx \frac{10 n d}{E_f}, \quad (4.58)$$

essendo:

- $n$  il numero totale di barre longitudinali in condizioni di potenziale svergolamento;
- $f_y$  la tensione di snervamento delle barre longitudinali ottenuta da prove *in situ* sui materiali esistenti, in accordo con la Normativa Sismica vigente;
- $d$  la dimensione della sezione parallela al piano di flessione;
- $E_f$  il modulo di elasticità normale della fasciatura in FRP;
- $E_{ds}$  un opportuno “modulo ridotto” fornito dalla seguente relazione:

$$E_{ds} = \frac{4E_s E_i}{(\sqrt{E_s} + \sqrt{E_i})^2}, \quad (4.59)$$

dove  $E_s$  ed  $E_i$  sono, rispettivamente, il modulo di elasticità normale iniziale e quello tangente in campo plastico delle barre longitudinali.

#### 4.7.3.2.4 Nodi

(1) Il calcolo dell'incremento di resistenza a trazione conseguibile nei pannelli dei nodi non confinati va eseguito tenendo conto del contributo dell'FRP nella direzione delle tensioni principali di trazione e limitando la massima deformazione di quest'ultimo al valore del 4%. L'intervento risulterà efficace solo se le estremità del rinforzo sono perfettamente ancorate, attraverso l'adozione di opportuni particolari costruttivi. In caso contrario il rinforzo non può essere considerato come efficace.

### 4.8 INSTALLAZIONE, MONITORAGGIO E CONTROLLO

(1)P Il funzionamento ottimale di un rinforzo strutturale in 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, trattati nel presente paragrafo. 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). A titolo esemplificativo, possono essere omesse alcune verifiche relative alla qualità del substrato quando la configurazione del rinforzo lo consenta (per esempio nel caso di fasciature chiuse di confinamento) ovvero quando siano previsti appositi dispositivi di ancoraggio collaudati indipendentemente.

(2)P 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.

(3)P Il presente documento descrive 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 dovrà 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. so-lai),
- quale sia l'estensione dell'intervento in rapporto alle dimensioni della struttura.

(4)P I valori numerici appresso indicati sono da intendersi come valori suggeriti.

#### **4.8.1 Controllo e preparazione del substrato**

(1)P Il controllo delle condizioni del substrato coinvolge aspetti legati alla valutazione del grado di deterioramento di quest'ultimo, alla rimozione e ricostruzione dell'eventuale calcestruzzo ammalorato con eventuali provvedimenti di pulizia e verniciatura delle armature metalliche corrose, al condizionamento e preparazione del substrato.

(2)P 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 per la preparazione delle superfici, i tempi di esecuzione, le condizioni ambientali, ecc.. L'indagine deve saggiare anche l'eventuale sensibilità dei risultati nei confronti di tali parametri.

##### **4.8.1.1 Valutazione del deterioramento del substrato**

(1) Prima dell'applicazione del rinforzo è necessario verificare le caratteristiche del substrato. In ogni caso la resistenza a compressione del calcestruzzo non deve essere inferiore a  $15 \text{ N/mm}^2$ . In caso contrario, la tecnica di rinforzo descritta nel presente documento non può essere applicata.

(2) E' opportuno eseguire delle prove di omogeneità su tutta l'area da rinforzare.

##### **4.8.1.2 Rimozione e ricostruzione del substrato ed eventuale trattamento delle barre metalliche**

(1) Il substrato in calcestruzzo può risultare danneggiato a causa di un deterioramento fisico-chimico, fisico-meccanico o di un eventuale impatto. Il calcestruzzo ammalorato va rimosso da tutta la zona danneggiata.

(2) La suddetta rimozione consente di accertare lo stato delle armature metalliche e quindi di progettare l'esecuzione di eventuali interventi che eliminino le cause responsabili del deterioramento dello stesso calcestruzzo. Tali interventi sono assolutamente necessari prima di procedere alla ricostruzione delle parti in 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.

(3) 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 espansivi da ripristino.

Al ripristino delle parti di calcestruzzo ammalorate è opportuno associare il livellamento di eventuali asperità superficiali superiori a 10 mm, da effettuarsi con stucco epossidico compatibile; nel caso in cui la zona da colmare abbia profondità superiore a 20 mm si dovrà utilizzare un apposito mate-

riale 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.

#### **4.8.1.3 Preparazione del substrato**

- (1) Dopo aver accertato la qualità del substrato ed aver eventualmente provveduto al ripristino del calcestruzzo ammalorato ed al trattamento delle barre metalliche, è necessario sabbare la superficie interessata dal rinforzo. La sabbatura 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.
- (2) 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*.
- (3) Nel caso in cui si operi 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 generale, è necessario verificare che sulla superficie di applicazione del rinforzo non siano presenti polveri, grassi, idrocarburi e tensioattivi.
- (4) Nel confinamento di pilastri, nel rinforzo a taglio ed in generale in tutti i casi in cui il rinforzo in 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.

#### **4.8.2 Raccomandazioni per l'esecuzione a regola d'arte**

- (1) 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. In aggiunta alle suddette precauzioni, da assumersi indipendentemente dal tipo di rinforzo, si segnalano ulteriori specifiche precauzioni atte a garantire la qualità dell'installazione di sistemi in FRP con polimerizzazione *in situ* e quindi non controllata in stabilimento.

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

- (1) Si sconsiglia di installare rinforzi in 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*.
- (2) 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. L'umidità del substrato può essere misurata mediante un misuratore di umidità per malte oppure semplicemente con l'utilizzo di carta assorbente.
- (3) Il rinforzo, inoltre, non va installato se la temperatura ambiente e quella superficiale sono molto basse, in quanto potrebbe essere pregiudicata la perfetta stagionatura delle resine e l'impregnazione delle fibre. È sconsigliato installare il rinforzo se le suddette temperature non ricadono nell'intervallo 10°-35° C. In ambienti a bassa temperatura, se la tempistica di cantiere non consente di differire l'installazione, è opportuno riscaldare artificialmente le zone interessate dal rinforzo. Parimente, è sconsigliato installare il rinforzo nel caso in cui la superficie di calcestruzzo sia esposta a forte soleggiamento.

(4) 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**

(1) 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.

(2) Durante la posa in opera di sistemi con polimerizzazione *in situ*, è importante rispettare l'allineamento delle fibre previsto in progetto ed evitare ondulazioni delle stesse.

(3) Nei casi di applicazione di fibre di carbonio che potrebbero venire a diretto contatto con parti in acciaio, è opportuno prevedere strati di materiale isolante in grado di evitare l'innescio di corrosione galvanica.

(4) 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 totale 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.

#### **4.8.3 Controllo di qualità dell'esecuzione**

(1) Se del caso, 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.

##### **4.8.3.1 Prove semi-distruttive**

(1) 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  $5 \text{ m}^2$  di applicazione, e comunque in numero totale non inferiore a 2 per tipo.

(2) Prova di strappo normale. La prova, utile per il solo accertamento delle proprietà del substrato ripristinato, viene eseguita utilizzando piastre circolari in 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  $\leq 3 \text{ mm}$ , 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.

(3) 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.

#### 4.8.3.2 Prove non distruttive

(1) 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 4-1.

(2) 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.

**Tabella 4-1** – Risoluzione minima per lo spessore di difetti da identificare mediante prove non distruttive.

Trasf. di tensioni di taglio all'interfaccia	Esempio	Controllo non distruttivo	Maglia di mappatura della superficie	Risoluzione minima per lo spessore del difetto
assente	Fasciature, con eccezione della zona di sovrapposizione nel caso di realizzazioni a singolo strato	facoltativo	250 mm	3 mm
debole	zona centrale di rinforzi piani molto estesi	facoltativo	250 mm	3 mm
moderato o potenziale	zona centrale di rinforzi longitudinali a flessione	consigliato	100 mm	0.5 mm
critico	zone di ancoraggio, zone di sovrapposizione tra gli strati, staffe di rinforzo a taglio, zone di interfaccia con i connettori, zone con pesanti asperità o fessurazioni del substrato	obbligatorio	50 mm	0.1 mm

(3) 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.

(4) 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.

(5) 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 difet-

ti dell'applicazione del composito alla struttura in c.a. e per rilevare l'inizio del distacco dalla struttura medesima.

#### 4.8.4 Qualifica degli operatori per l'esecuzione delle prove

(1) I profili professionali degli operatori preposti alle prove devono corrispondere ai seguenti tre livelli di qualifica appresso specificati, in conformità con la normativa di riferimento UNI EN 473 e UNI EN 45013.

**Tabella 4-2 – Livelli di specializzazione per l'esecuzione di prove di monitoraggio e collaudo.**

Livello 1	regolare l'apparecchiatura; eseguire le prove; registrare e classificare i risultati in relazione a criteri scritti; stendere un resoconto sui risultati.
Livello 2	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.
Livello 3	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 e stabilire le tecniche e collaborare alla definizione di criteri di accettazione quando non ne esistano; avere una conoscenza nei diversi campi di applicazione; avere la capacità di guidare il personale di livello inferiore al livello 3.

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.

#### 4.8.5 Monitoraggio dell'intervento di rinforzo

(1) La disponibilità, relativamente modesta, di dati relativi al comportamento a lungo termine dei materiali compositi consiglia, in situazioni di particolare rilevanza, 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:

- temperatura del rinforzo;
- umidità dell'ambiente;
- andamento di spostamenti e deformazioni;
- continuità e livello di danneggiamento delle fibre;
- estensioni di difetti e distacchi dell'applicazione.

## 5 RINFORZO DI STRUTTURE MURARIE

### 5.1 GENERALITÀ

#### 5.1.1 Oggetto ed ambito di applicazione

(1)P Oggetto del presente capitolo sono le regole per il dimensionamento e la verifica di elementi strutturali murari rinforzati per il tramite di FRP.

(2)P L'intervento di rinforzo ha 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, in subordine, un aumento dei valori degli spostamenti esibiti all'atto del collasso.

#### 5.1.2 Criteri per il progetto del consolidamento strutturale

(1) Gli interventi di rinforzo oggetto delle presenti Istruzioni consistono nell'applicazione di lamine, tessuti, reti e barre in FRP sugli elementi strutturali della costruzione, per adesione o mediante dispositivi meccanici di ancoraggio. La suddetta applicazione può avvenire sulle superfici esterne della muratura (paramenti murari) o in alloggiamenti e scanalature realizzate all'interno della muratura stessa. In particolare, gli alloggiamenti possono essere ricavati nei giunti di malta.

(2) L'inserimento dei rinforzi è motivato dalle seguenti ragioni:

- trasmissione di sforzi di trazione all'interno di singoli elementi strutturali o tra elementi contigui (rinforzi a flessione, taglio, ecc.);
- collegamento tra elementi che collaborano a resistere all'azione esterna (catene di volte e di pareti, connessioni tra pareti ortogonali, ecc.);
- irrigidimento di solai nel proprio piano per conseguire un funzionamento a diaframma rigido;
- limitazione dell'apertura di fessure;
- confinamento di colonne al fine di incrementare la resistenza e la duttilità del materiale.

(3)P La progettazione degli interventi di rinforzo deve essere mirata ad assicurare uno stato di trazione nei rinforzi in FRP per effetto delle azioni esterne di progetto; infatti, in tal caso, i rinforzi in FRP possono avere piena funzionalità sopperendo alla resistenza trascurabile del materiale muratura nei confronti della trazione. Per contro, i rinforzi in FRP soggetti a compressione non sono generalmente in grado di incrementare le prestazioni delle murature, in quanto, a parità di contrazione, la forza risultante degli sforzi di compressione a carico della muratura prevale solitamente di gran lunga su quella a carico dell'FRP, a causa della notevole differenza di area tra la muratura ed il rinforzo. Inoltre, i rinforzi compressi sono soggetti a possibile delaminazione per instabilità locale.

(4) Per le strutture murarie rinforzate con FRP e soggette a sollecitazioni cicliche di trazione e compressione, quali quelle causate da eventi sismici e da variazioni termiche, l'adesione muratura-FRP può deteriorarsi notevolmente nel corso della vita della struttura. A tal riguardo potrebbe essere necessario inserire il rinforzo in intagli atti a prevenire l'instabilità locale ovvero applicare dispositivi meccanici di connessione.

(5) Nella progettazione del consolidamento deve essere riposta la massima cura nell'estendere i rinforzi in FRP fino alle zone di muratura compresse, in modo da garantire una collaborazione alla resistenza strutturale di tutto l'organismo murario.

(6)P L'applicazione di rinforzi in FRP deve essere effettuata su elementi strutturali di adeguate proprietà meccaniche. Qualora la muratura si presenti danneggiata, disomogenea o viziata da qualsiasi difetto che precluda la corretta trasmissione degli sforzi mutui con il rinforzo, si deve procedere al suo preconsolidamento secondo tecniche tradizionali. Inoltre, attese le varieguate tipologie di rinforzo disponibili sul mercato (fibre di vetro, di carbonio, aramidiche), la scelta del sistema in FRP deve tener conto delle proprietà fisiche e chimiche della muratura allo scopo di evitare incompatibilità di qualsiasi genere.

(7)P Quando si applicano tessuti o lamine in FRP su superfici murarie, si deve tener presente la 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.

### **5.1.3 Articolazione degli interventi**

(1) L'intervento di rinforzo si inserisce nell'ambito di un progetto complessivo di consolidamento strutturale. Il consolidamento, sia esso adeguamento o miglioramento nell'accezione precisata dalla Normativa vigente, può essere realizzato:

- incrementando la resistenza di pannelli, archi o volte;
- cercando 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.

### **5.1.4 Interventi di restauro su strutture di interesse storico e monumentale**

(1)P Qualora il rinforzo strutturale riguardi costruzioni di interesse storico o monumentale, si richiede una specifica giustificazione sull'indispensabilità, improrogabilità e compatibilità dell'intervento con i canoni del restauro.

## **5.2 VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA**

### **5.2.1 Criteri di verifica**

(1)P Premesso che le modalità di crisi dei materiali costituenti la struttura in muratura rinforzata con FRP sono:

- fessurazione per trazione della muratura,
- schiacciamento della muratura,
- taglio-scorrimento della muratura,
- rottura dell'FRP,
- delaminazione (o decoesione) del rinforzo in FRP dalla muratura,

lo scopo del presente paragrafo è la verifica della costruzione rinforzata nei riguardi dell'insacco di modi di collasso locali e globali dell'intero organismo strutturale.

Si evidenzia che le modalità di collasso relative alle strutture rinforzate coinvolgono, in generale, una combinazione delle possibili modalità di crisi dei materiali.

### 5.2.2 Modellazione della struttura

(1)P Il progetto degli interventi di consolidamento deve basarsi su uno schema strutturale che rispecchi il comportamento dell'edificio nelle condizioni di futuro esercizio.

(2)P Per determinare le azioni sui singoli elementi strutturali della costruzione muraria si adottano i metodi della Scienza e della Tecnica delle Costruzioni. In particolare, 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.

(3) Possono altresì essere utilizzare schematizzazioni semplificate, sinteticamente rappresentative del comportamento della struttura in esame, purché adeguatamente giustificate. Ad esempio, le sollecitazioni nelle diverse membrature possono essere determinate adottando una qualsiasi distribuzione equilibrata delle tensioni, anche prescindendo dalla congruenza, purché le eventuali tensioni di trazione siano assorbite direttamente dal rinforzo in composito all'uopo dimensionato e solidarizzato. Come ulteriore esempio, 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.

### 5.2.3 Verifiche di sicurezza

(1) 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 dall'aggregazione degli elementi resistenti artificiali o naturali e della tipologia della malta di allettamento.

(2) Sottoposto a prove di carico monoassiali, il materiale muratura presenta un comportamento contraddistinto da valori della resistenza a trazione di gran lunga inferiori a quelli della resistenza a compressione. Un'ipotesi di lavoro largamente accettata è quella di considerare nulla la resistenza a trazione della muratura; tale ipotesi è confortata, soprattutto per gli edifici esistenti (antichi e monumentali), dall'aleatorietà della resistenza a trazione e dal suo progressivo decadimento nel tempo.

(3)P Per quanto riguarda il comportamento a compressione, le esperienze di laboratorio dimostrano che, nella sua forma più completa, il legame costitutivo della muratura 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.

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

(5)P 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.

(6)P I valori caratteristici della resistenze sono:

- a compressione verticale,  $f_{mk}$ ,
- a compressione orizzontale,  $f_{mk}^h$ ,
- a taglio,  $f_{vk}$ .

Essi devono essere determinati mediante idonee prove sperimentali su campioni di muro, secondo le modalità definite dalla Normativa vigente.

(7) I valori delle proprietà meccaniche di progetto della muratura sono calcolati dividendo i valori caratteristici per un opportuno coefficiente parziale  $\gamma_m = \gamma_M$ . La Normativa vigente attribuisce a  $\gamma_M$  i valori 1.50, 2.00 o 3.00 in funzione del livello di conoscenza delle proprietà meccaniche della muratura.

(8)P Nella maggior parte delle applicazioni ingegneristiche, il comportamento della muratura, per stati tensionali monoassiali, può essere schematizzato più semplicemente come di seguito specificato:

- trazione: resistenza nulla;
- compressione: comportamento lineare fino alla resistenza di progetto,  $f_{md}$ , cui corrisponde il valore della deformazione  $\bar{\varepsilon}_m$ ; tensione costante, pari ad  $f_{md}$ , per deformazioni comprese nell'intervallo  $\bar{\varepsilon}_m \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{mu}$ ; tensione nulla per deformazioni maggiori di  $\varepsilon_{mu}$ .

(9)P La deformazione ultima da considerare per la muratura è prescritta nella Normativa vigente; in particolare per la muratura compressa si assume  $\varepsilon_{mu} = 0.0035$ .

(10) In alternativa, possono essere utilizzati legami costitutivi più completi, in grado di cogliere i diversi tipi di comportamento descritti al punto (3)P, purché tali legami siano adeguatamente comprovati sulla base di idonee indagini sperimentali.

(11)P I materiali compositi fibrorinforzati sono caratterizzati da comportamento non isotropo, come descritto in dettaglio nel § 6.2. 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 in FRP è:

$$\varepsilon_{fd} = \min \left\{ \eta_a \frac{\varepsilon_{fu}}{\gamma_f}, \varepsilon_{f,max} \right\}, \quad (5.1)$$

dove  $\varepsilon_{fu}$  è la deformazione a rottura dell'FRP e  $\varepsilon_{f,max}$  è la deformazione massima nell'FRP all'atto della decoesione incipiente del rinforzo dalla muratura, fenomeno descritto nel paragrafo successivo. In assenza di dati più precisi, per la deformazione  $\varepsilon_{f,max}$  si può assumere il valore fornito al punto (7) del successivo § 5.3.2.

I valori da attribuire al fattore di conversione  $\eta_a$  ed al coefficiente parziale  $\gamma_m = \gamma_f$  sono suggeriti, rispettivamente, nella Tabella 3-4 e nella Tabella 3-2 delle presenti Istruzioni.

(12)P Le verifiche di sicurezza devono essere condotte agli stati limite ultimi. 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.

Quest'ultimo è valutato utilizzando le combinazioni di carico prescritte dalla Normativa vigente. Inoltre, si deve riporre particolare cura nel 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 per il tramite di 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 di cui al punto (8)P.

(13)P Verifiche allo stato limite di danno sono necessarie per strutture soggette ad azioni sismiche. Tali verifiche devono essere effettuate seguendo le prescrizioni della Normativa vigente.

### 5.3 VALUTAZIONE DELLA FORZA DI ANCORAGGIO

(1)P Nel rinforzo di paramenti murari mediante applicazione di lamine o tessuti in 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. Infatti, in un dimensionamento strutturale che segua il criterio di gerarchia delle resistenze, il meccanismo di rottura fragile per perdita di aderenza del rinforzo non dovrebbe mai precedere l'entrata in campo inelastico per compressione della muratura stessa. Nel caso si adottino speciali dispositivi di ancoraggio del rinforzo alla muratura, la rottura per delaminazione è accettata purché si tenga conto della variazione dello schema resistente.

(2) Tenuto 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, la delaminazione si manifesta attraverso interazioni tra materiali differenti. Peraltro, nel caso di murature con paramenti irregolari, allo scopo di realizzare un piano di posa adeguato per il rinforzo, si procede di norma all'apposizione di uno strato di malta di regolarizzazione sul quale effettuare l'incollaggio. In definitiva, uno stesso rinforzo lungo il suo sviluppo può risultare connesso a materiali differenti, caratterizzati da diverse proprietà di interfaccia.

(3) 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. Nel caso di rinforzi a rete con elevata superficie specifica e montaggio mediante matrici cementizie, il distacco può avvenire anche tra la rete stessa e lo strato di adesione.

#### 5.3.1 Considerazioni generali e modi di collasso

(1)P La delaminazione dal paramento murario di lamine o tessuti applicati a strisce isolate per il rinforzo secondo direttrici rettilinee può essere classificata 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÷200 mm a partire dalla sezione di discontinuità.

(2) 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 o quando la rigidezza 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. Inoltre, 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.

(3) La delaminazione a taglio, che si verifica in corrispondenza della parte terminale del rinforzo (ancoraggio), può essere accompagnata dall'asportazione di un consistente strato di mattone (*rip-off failure*), soprattutto quando le tensioni tangenziali di estremità si associano a 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 5-1).

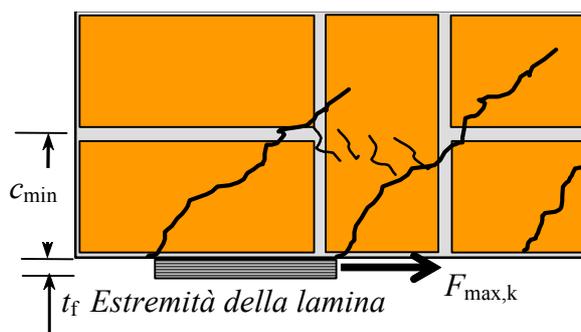


Figura 5-1 –Schema di rottura per estrazione del mattone di ancoraggio.

### 5.3.2 Forza di ancoraggio radente allo stato limite ultimo

(1)P Sperimentalmente, attraverso prove di trasmissione dell'azione radente trasferita ad un substrato coesivo da un rinforzo in FRP ad esso incollato, si rileva che il valore ultimo della forza sopportabile dal rinforzo 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 precisa 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 quest'ultimo che assicura la trasmissione del massimo sforzo di aderenza.

(2) I valori di progetto della massima tensione tangenziale di aderenza, dell'energia specifica di frattura e della massima forza trasmissibile sono denotati nel prosieguo del documento, rispettivamente, con i simboli  $f_{bd}$ ,  $\Gamma_{Fd}$  e  $F_{max,d}$ .

(3)P Il legame di aderenza tra rinforzo e muratura viene generalmente espresso sotto forma di una relazione tra la tensione tangenziale all'interfaccia ed il competente scorrimento (relazione “ $\tau_b - s$ ”). Essa dipende sia dalle caratteristiche meccaniche dei materiali a contatto, sia dalle geome-

trie dell'elemento rinforzato e del rinforzo, che influiscono sul fenomeno di diffusione delle tensioni.

(4) Il legame di aderenza, di tipo non lineare con ramo discendente, può essere approssimato con una legge bilineare, caratterizzata da un ramo lineare crescente fino alla massima tensione tangenziale di interfaccia  $f_{bk}$  e da un ramo discendente che tiene conto del progressivo danneggiamento del paramento murario. Per una corretta definizione dei parametri di rigidità dell'interfaccia per bassi livelli tensionali, è necessario tenere in conto la deformabilità sia dello strato di adesivo, il cui spessore è dell'ordine del millimetro, che di uno strato superficiale di muratura. In assenza di risultati sperimentali specifici, il valore caratteristico (frattile del 5%) della massima tensione tangenziale di aderenza,  $f_{bk}$  si può assumere pari a:

$$f_{bk} = c_1 \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{mk} \cdot f_{mtm}} \quad [f \text{ in N/mm}^2], \quad (5.2)$$

dove  $k_b$  è un fattore geometrico che tiene conto dell'effetto di scala, il cui valore può essere posto pari a 1.0,  $c_1$  è un coefficiente da determinare sperimentalmente ed  $f_{mtm}$  è la resistenza media a trazione della muratura.

Lo scorrimento di interfaccia corrispondente alla completa delaminazione viene indicato con  $s_f$ ; il suo valore deve essere ottenuto effettuando idonee prove sperimentali ed è generalmente compreso tra 0.1 mm e 0.3 mm.

Il valore di progetto dell'energia specifica di frattura del legame di interfaccia,  $\Gamma_{Fd}$ , con riferimento ad una delaminazione che coinvolga i primi strati di muratura, è fornito dalla relazione:

$$\Gamma_{Fd} = \frac{1}{2} s_f \cdot f_{bd} = \frac{1}{2} s_f \cdot \frac{c_1 \cdot k_b}{\gamma_M} \cdot \sqrt{f_{mk} \cdot f_{mtm}} \quad [f \text{ in N/mm}^2, s_f \text{ in mm}], \quad (5.3)$$

dove  $f_{bd} = f_{bk} / \gamma_M$  è il valore di progetto della resistenza di adesione tra muratura ed FRP ( $\gamma_M$  coefficiente parziale della muratura).

(5) Nel caso di rinforzi ottenuti mediante incollaggio di lamine o tessuti, il valore di progetto della massima forza,  $F_{max,d}$ , trasmissibile da un rinforzo di lunghezza pari o superiore a quella ottimale di ancoraggio dipende dalle caratteristiche geometriche e meccaniche del rinforzo stesso e dalle caratteristiche dell'interfaccia in accordo con la relazione:

$$F_{max,d} = \frac{k_m}{\gamma_{Rd}} b_f \sqrt{2 E_f t_f \Gamma_{fd}}, \quad (5.4)$$

dove  $E_f$ ,  $t_f$ ,  $b_f$  sono, rispettivamente, il modulo di elasticità normale, lo spessore e la larghezza della lamina;  $\gamma_{Rd}$  è il coefficiente parziale per perdita di aderenza definito nel § 3.5.2; il coefficiente correttivo  $k_m$ , di natura sperimentale, dipende dallo stato della superficie su cui è applicato il rinforzo ed è usualmente compreso tra 0.5 e 1.0 in funzione dell'omogeneità e compattezza della superficie di adesione.

(6) La lunghezza ottimale  $l_e$  di ancoraggio, necessaria per poter utilizzare il valore della tensione di progetto  $f_{fd}$ , pari al rapporto tra la forza massima trasmissibile,  $F_{max,d}$ , e l'area della sezione trasversale del rinforzo,  $b_f t_f$ , può essere stimata utilizzando la seguente espressione:

$$l_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2 f_{mtm}}} \quad [ \text{lunghezze in mm} ]. \quad (5.5)$$

(7) La massima deformazione di progetto,  $\varepsilon_{f,max}$ , che può essere consentita al rinforzo in FRP senza che si manifestino problemi di decoesione ha per valore il rapporto tra la tensione di progetto  $f_{fd}$  ed il modulo di elasticità normale del rinforzo  $E_f$ .

(8) Nel caso di lunghezze di ancoraggio,  $l_b$ , inferiori a quella ottimale,  $l_e$ , la tensione di progetto deve essere opportunamente ridotta in accordo con la relazione:

$$f_{fd,rid} = \frac{F_{max,d}}{b_f \cdot t_f} \cdot \frac{l_b}{l_e} \left( 2 - \frac{l_b}{l_e} \right) \quad (5.6)$$

La lunghezza  $l_b$  deve essere stabilita sulla base della tessitura e del quadro fessurativo del paramento.

(9) Quando si faccia ricorso a particolari dispositivi di ancoraggio (barre trasversali in composito, fasciatura dell'estremità mediante tessuti), la forza massima di ancoraggio deve essere valutata mediante apposite indagini sperimentali.

### 5.3.3 Forza di ancoraggio in presenza di azione normale al piano di adesione

(1) 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.

(2) 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.

(3) Indicando con  $\Pi_{Sd}$  l'intensità della forza risultante generata dalle tensioni normali al paramento e distribuite sulla superficie di adesione, di lunghezza pari alla lunghezza di ancoraggio, il valore di progetto della componente radente della forza di ancoraggio,  $F_{pd}$ , può essere ottenuto mediante la relazione:

$$F_{pd} = F_{max,d} \cdot \left( 1 - \frac{\Pi_{Sd}}{\Pi_{Rd}} \right), \quad (5.7)$$

dove  $\Pi_{Rd} = f_{mtd} b_f l_b$  è l'intensità della forza che, agendo nella direzione ortogonale al paramento murario, è in grado di provocare da sola il distacco del rinforzo ed  $f_{mtd}$  è il valore di progetto della resistenza a trazione della muratura.

(4) Nel caso di rinforzi a sagoma curva, con raggio di curvatura  $r$ , sollecitati da una tensione di trazione costante  $\sigma_f$ , si può assumere:

$$\Pi_{Sd} = \sigma_f b_f t_f \frac{l_b}{r} \quad (5.8)$$

## 5.4 VERIFICHE DI ELEMENTI STRUTTURALI RICORRENTI

(1) I principi generali di verifica enunciati nel § 5.2 sono di seguito applicati a situazioni ricorrenti nella pratica tecnica.

### 5.4.1 Rinforzo di pannelli murari

(1) I pannelli in muratura possono essere rinforzati con FRP allo scopo di incrementarne la portanza o la duttilità nei confronti di azioni fuori dal piano ovvero di azioni nel piano del pannello. Di seguito sono suggerite alcune verifiche speditive per controllare il grado di sicurezza dei pannelli murari. Tali verifiche non sono esaustive e devono essere integrate con ulteriori controlli, adeguati alla complessità del caso in esame.

#### 5.4.1.1 Verifiche per azioni fuori dal piano

(1) Il collasso di pannelli fuori del piano della muratura, rappresenta una delle tipologie più frequenti di collasso locale di elementi strutturali murari. Tale tipologia può essere dovuta a varie cause, fra le quali innanzitutto l'azione sismica, ma anche l'effetto della spinta di archi e di volte o difetti di verticalità del pannello murario.

Può manifestarsi in varie forme:

- per ribaltamento semplice,
- per flessione verticale,
- per flessione orizzontale.

##### 5.4.1.1.1 Verifica per ribaltamento semplice

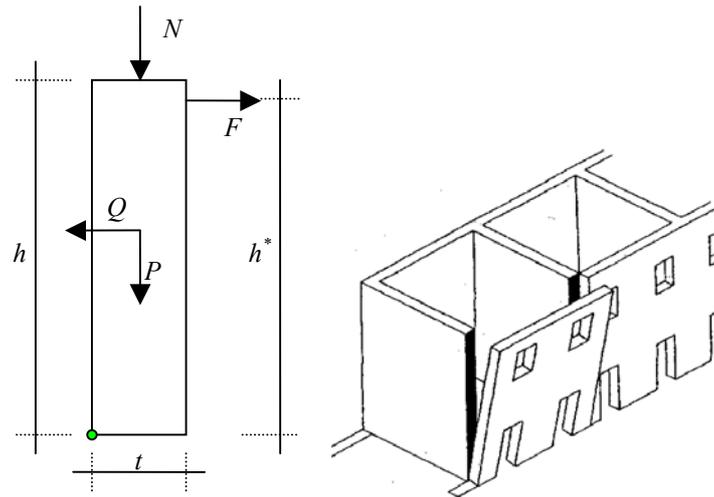
(1) Il cinematismo consiste in un ribaltamento rispetto ad una cerniera cilindrica alla base del pannello murario. Si evidenzia che tale cerniera cilindrica, dovuta alla ridotta resistenza a trazione della muratura, è posizionata in corrispondenza di una zona di limitato contatto posta fuori dal piano medio del pannello. In prima approssimazione si può assumere che la cerniera cilindrica sia posizionata sulla superficie esterna del pannello.

Il collasso per ribaltamento può avvenire in presenza di pareti non ammortate a pareti ad esse ortogonali, né 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 presidio *ad hoc* realizzato con rinforzi in FRP consiste, semplicemente, nell'inserimento di uno o più elementi orizzontali, incollati alla sommità 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 cercando completamente, quando possibile, la fabbrica muraria.

A titolo esemplificativo, si considera un pannello murario soggetto alle seguenti azioni:

- $P$  peso proprio del pannello,
- $N$  sforzo normale agente sulla sommità del pannello,
- $Q$  azione orizzontale dovuta a effetti sismici,
- $F$  forza di contenimento esercitata sul pannello dal rinforzo in FRP.

Si potrebbe tenere conto di ulteriori forze agenti in sommità e derivanti, ad esempio, dall'eventuale spinta del solaio di copertura.



**Figura 5-2** – Schema di calcolo per il meccanismo di collasso di ribaltamento semplice.

Con riferimento allo schema proposto in Figura 5-2, assumendo cioè che siano trascurabili le azioni di vincolo di eventuali solai e di muri ortogonali, l'intensità della forza di trazione nel rinforzo si determina scrivendo l'equazione di equilibrio alla rotazione intorno al piede del pannello:

$$F = \frac{1}{2 h^*} (Q h - N t - P t), \quad (5.9)$$

avendo indicato con  $h^*$  la distanza d'applicazione del composito in FRP da quest'ultimo.

Per prevenire il ribaltamento semplice del pannello murario è necessario effettuare le seguenti due verifiche:

- Verifica a trazione del rinforzo in FRP

Indicando con  $A_R$  l'area totale dei rinforzi in FRP e con  $f_{fd}$  la corrispondente tensione di rottura di progetto, la massima forza da essi esplicabile,  $F_{Rd}$ , vale  $2 A_f f_{fd}$ , per cui la verifica si effettua assicurando che risulti:

$$F \leq F_{Rd}; \quad (5.10)$$

- Verifica al distacco del rinforzo in FRP dalle pareti ortogonali

Indicando con  $F_{pd}$  la massima forza di ancoraggio del composito in FRP sulla muratura ortogonale al pannello in oggetto, la verifica consiste nel controllare che sia soddisfatta la relazione:

$$F \leq 2F_{pd}. \quad (5.11)$$

Generalmente, la seconda verifica risulta più gravosa della prima.

È necessario inoltre procedere alle verifiche a pressoflessione ed a taglio delle sezioni orizzontali del pannello, in accordo con quanto riportato nel § 5.4.1.2.

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

(1) Un pannello in 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 posiziona-

ta ad una certa altezza del pannello. La crisi sopravviene quando, alle sollecitazioni di sforzo assiale e momento flettente, corrisponde un centro di pressione esterno alla muratura.

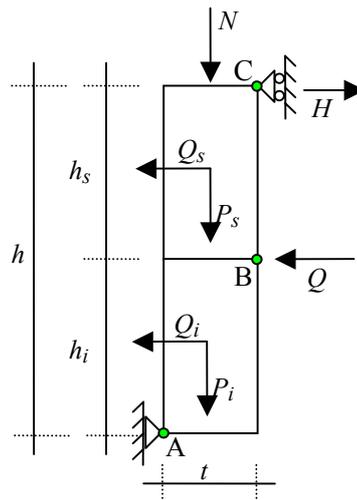
Il collasso per flessione verticale può manifestarsi in pannelli particolarmente alti e/o vincolati a maschi murari ortogonali molto distanti tra loro.

Inoltre sono particolarmente sensibili a tale tipologia di collasso, sotto azioni sismiche, 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 compositi con fibre verticali, 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 in FRP.

Si considera, a titolo esemplificativo, una striscia di larghezza unitaria del pannello murario rinforzato soggetta alle seguenti azioni:

- $P_s$  peso proprio della parte superiore del pannello,
- $P_i$  peso proprio della parte inferiore del pannello,
- $Q_s$  forza sismica della parte superiore del pannello,
- $Q_i$  forza sismica della parte inferiore del pannello,
- $N$  sforzo normale agente sulla sommità del pannello,
- $Q$  azione dovuta ad un'ulteriore spinta orizzontale.



**Figura 5-3** – Schema di calcolo per il meccanismo di collasso per flessione verticale.

Con riferimento allo schema di Figura 5-3, l'intensità della reazione esplicata dal vincolo in C può essere calcolata mediante l'equilibrio alla rotazione intorno alla cerniera in A:

$$H_C = \frac{(2Q + Q_i) h_i + Q_s (2h - h_s) - (N + P_s + P_i) t}{2h} \quad (5.12)$$

La sezione maggiormente sollecitata è soggetta ad uno sforzo normale ed ad un momento flettente, rispetto al piano medio del pannello, pari a:

$$\begin{aligned} N_{sd} &= N + P_s, \\ M_{sd} &= H_C h_s - Q_s \frac{h_s}{2}. \end{aligned} \quad (5.13)$$

La verifica a flessione verticale consiste nel controllare che sia soddisfatta la relazione:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} . \quad (5.14)$$

Il valore del momento resistente,  $M_{Rd}$ , della sezione di muratura rinforzata e di larghezza unitaria può essere determinato a partire dalle caratteristiche meccaniche della muratura e dell'FRP, dallo spessore,  $t$ , della muratura e dal valore dello sforzo normale agente.

In forma semplificata, la verifica a pressoflessione può essere condotta assumendo un diagramma costante delle tensioni di compressione, pari a  $0.85 f_{md}$ , ed esteso su una porzione di sezione profonda  $0.6 \div 0.8 x$ , essendo  $x$  la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso. Si ricorda che i valori delle deformazioni massime consentite alla muratura e al composito in FRP sono riportate nel § 5.2.3.

I rinforzi verticali devono essere posizionati ad un interasse,  $p_f$ , soddisfacente la limitazione:

$$p_f \leq 3 t + b_f \quad (5.15)$$

dove  $b_f$  è la larghezza dei rinforzi adottati. Distanze maggiori possono essere utilizzate solo se adeguatamente giustificate.

#### 5.4.1.1.3 Verifica per flessione della striscia orizzontale

(1) In un pannello in muratura ben vincolato al piede ed inoltre ben ammortato a muri trasversali in grado di esercitare un'azione di contrafforte, la resistenza alle azioni orizzontali è garantita da un funzionamento ad arco della striscia di sommità. Il valore del massimo carico orizzontale uniformemente ripartito,  $q$ , sopportabile da tale arco può essere valutato mediante la formula:

$$q = \frac{2t^2}{L^2} f_{md}^h , \quad (5.16)$$

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

Per un valore di  $q$ , superiore a quello restituito dalla formula (5.16), ovvero in presenza di muri trasversali incapaci di svolgere azione di contrafforte, il pannello murario può collassare, come illustrato in Figura 5-4, a seguito della formazione di tre cerniere cilindriche allineate.

Con riferimento alla striscia di altezza unitaria collocata in sommità del pannello, la crisi sopravviene quando alle sollecitazioni di sforzo assiale e di momento flettente corrisponde un centro di pressione esterno alla muratura.

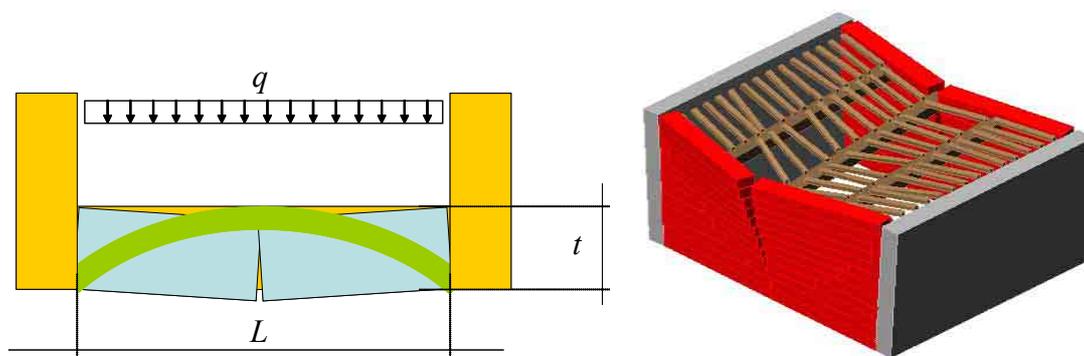


Figura 5-4 – Collasso per flessione orizzontale.

L'applicazione dei materiali compositi consente di contrastare tale meccanismo, trasformando il funzionamento del pannello da quello di un arco compresso a quello di una trave in muratura rinforzata con FRP.

Il momento sollecitante di progetto,  $M_{Sd}$ , viene determinato con riferimento all'azione sismica, a quella del vento e di eventuali altre azioni orizzontali spingenti originate dalla presenza di ulteriori elementi strutturali. La verifica a flessione orizzontale è soddisfatta se vale la seguente disequazione:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd},$$

dove il momento resistente  $M_{Rd}$  è determinabile in funzione delle caratteristiche meccaniche della muratura e dell'FRP, nonché dello spessore,  $t$ , della muratura. In assenza di valutazioni, adeguatamente giustificate, dello sforzo normale orizzontale generato dal meccanismo di collasso, il valore di quest'ultimo, ai fini del calcolo di  $M_{Rd}$ , viene assunto nullo.

#### 5.4.1.2 Verifiche per azioni nel piano del pannello

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

- a pressoflessione nel piano,
- a taglio.

##### 5.4.1.2.1 Pressoflessione nel piano

(1) In forma semplificata, la verifica a pressoflessione nel piano può essere condotta assumendo un diagramma costante delle tensioni di compressione, pari a  $0.85 f_{md}$ , ed esteso su una porzione di sezione profonda  $0.6 \div 0.8 x$ , essendo  $x$  la distanza dell'asse neutro dall'estremo lembo compresso. Si ricorda che le deformazioni massime consentite alla muratura e al composito in FRP sono riportate nel § 5.2.3.

##### 5.4.1.2.2 Taglio

(1) 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 in FRP,  $V_{Rd,f}$ , attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = V_{Rd,m} + V_{Rd,f}, \quad (5.17)$$

in cui:

$$V_{Rd,m} = \frac{d t f_{vk}}{\gamma_m}, \quad (5.18)$$

$$V_{Rd,f} = \frac{0.6 d A_{fw} f_{fd}}{p_f} (\cos \alpha + \sin \alpha), \quad (5.19)$$

essendo:

- $d$  la distanza tra il lembo compresso e il baricentro del rinforzo a flessione,
- $t$  lo spessore della parete,
- $f_{vk}$  la resistenza caratteristica a taglio della muratura,
- $A_{fw}$  l'area del rinforzo a taglio disposta in direzione parallela alla forza di taglio, con passo  $p_f$  misurato ortogonalmente alla direzione della forza di taglio,

- $f_{fd}$  la resistenza di progetto del rinforzo in FRP, definito come il minimo tra la tensione di rottura del composito e la tensione nel composito alla quale si ha la decoesione dalla muratura,
  - $\alpha$  l'inclinazione del rinforzo in FRP rispetto alla direzione della forza di taglio.
- Deve essere altresì verificato che il taglio agente non ecceda il seguente valore:

$$V_{Rd,m1} = 0.3 f_{md} t d, \quad (5.20)$$

dove  $f_{md}$  è la resistenza a compressione di progetto della muratura nella direzione dell'azione agente.

#### 5.4.2 Piattabande e fasce di piano

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

Con riferimento alla Figura 5-5, tenuto conto della duplice funzione delle fasce di piano, si individuano i due procedimenti di verifica da effettuare per tali elementi strutturali di cui ai paragrafi successivi.

##### 5.4.2.1 Verifica per funzionamento a piattabanda

(1) Per garantire il funzionamento dell'architrave, si applicano rinforzi orizzontali convenientemente estesi oltre la luce dell'apertura, atti ad assorbire, per flessione o tensoflessione, le azioni in grado di equilibrare il peso della muratura che incombe sull'apertura nonché i carichi verticali sovrastanti.

(2) La sezione in muratura rinforzata dell'architrave deve esplicitare un momento resistente di progetto,  $M_{Rd}$ , maggiore di quello sollecitante:

$$M_{sd} = \gamma_G \frac{1}{24} g t L^3, \quad (5.21)$$

dove  $g$  e  $t$  sono, 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.

Il rinforzo deve inoltre assorbire una forza di trazione pari a:

$$N_{sd} = \gamma_Q \frac{q_0 L^2}{8 h^*}, \quad (5.22)$$

dove  $q_0$  è il carico verticale ripartito trasmesso alla piattabanda dalla sovrastante parte dell'edificio,  $\gamma_Q$  è il coefficiente parziale che compete ai carichi variabili allo SLU e  $h^*$  è non maggiore del minimo tra la luce  $L$  dell'apertura e l'altezza  $h$  della fascia di piano.

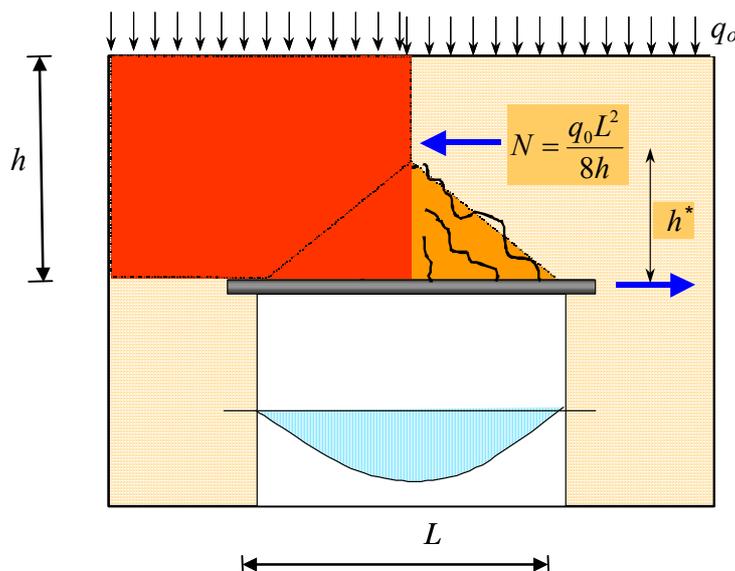


Figura 5-5 – Schema di calcolo delle architravi a tensoflessione.

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

(1) I rinforzi possono essere posizionati a mo' di catene lungo le fasce di piano, ad una quota prossima a quella dei solai. Tali rinforzi possono essere continui o discontinui e sono applicati sia sulle pareti esterne che su quelle interne. In particolare, l'applicazione sulle pareti esterne consente anche di realizzare la cerchiatura perimetrale dell'edificio.

Per assicurare un comportamento soddisfacente nei confronti delle azioni taglianti, si possono applicare rinforzi anche secondo le diagonali delle piattabande.

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.

### 5.5 RINFORZO DI ELEMENTI STRUTTURALI A SEMPLICE E DOPPIA CURVATURA

(1)P Gli elementi strutturali a singola o a doppia curvatura perdono generalmente la funzionalità per formazione di cerniere che attivano meccanismi di collasso. Le cerniere si formano nelle strutture murarie a semplice e doppia curvatura a causa della limitata resistenza a trazione della muratura.

(2)P Tali cerniere sono posizionate in corrispondenza di zone di limitato contatto, esterne alla superficie media della struttura. In prima approssimazione, possono essere ubicate o all'intradosso o all'estradosso.

La cerniera della muratura trasmette sforzo normale e taglio. Conseguentemente, la sezione incernierata trasmette uno sforzo normale di eccentricità pari a metà dello spessore della struttura.

(3)P Un rinforzo in FRP contrasta il meccanismo di rotazione relativa e quindi l'apertura dei cigli fessurativi, impedendo così la formazione di cerniere sulla porzione di contorno opposta a quella su cui lo stesso rinforzo è applicato. Conseguentemente, la presenza di un rinforzo all'intradosso (risp. estradosso) inibisce la formazione delle cerniere sull'opposta porzione di estradosso (risp. intradosso).

(4)P Scopo dell'applicazione di compositi in FRP è quello di interdire la formazione di determinate cerniere.

### 5.5.1 Archi

(1)P Si possono prevedere due possibili schemi strutturali:

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

(2)P Un arco o un portale collassano per la formazione di almeno quattro cerniere.

#### 5.5.1.1 Schema ad arco

(1)P Nello schema ad arco, per impedire il meccanismo caratterizzato dalla formazione delle quattro cerniere, di cui due all'estradosso e due all'intradosso, si può intervenire incollando tessuti o lamine in FRP all'estradosso ovvero all'intradosso.

Evidenze sperimentali mostrano che l'applicazione di tessuti o lamine in FRP sulle superfici laterali dell'arco non apporta sensibili miglioramenti al comportamento della struttura. Infatti si produce una prematura decoesione dell'FRP dal paramento murario localizzata nelle zone compresse per effetto di instabilità locale cui fa seguito un rapido degrado della connessione tra muratura e FRP esteso a tutta la superficie di applicazione del rinforzo.

(2) L'intervento di rinforzo sugli archi si esegue preferenzialmente applicando tessuti o lamine in FRP all'estradosso, allo scopo di inibire la formazione di cerniere all'intradosso; oppure trattando analogamente l'intradosso dell'arco per inibire la formazione di cerniere al suo estradosso.

Un'altra pratica possibile è quella di applicare il rinforzo sia all'estradosso che all'intradosso dell'arco per prevenire la formazione di qualsiasi cerniera. Tale modalità di applicazione è tuttavia meno frequente.

(3) Tra gli schemi strutturali finalizzati alla determinazione delle caratteristiche della sollecitazione sulla struttura rinforzata, devono essere sempre inclusi quelli che prevedono la formazione di cerniere alle imposte, a meno di non realizzare specifici interventi che ne impediscano la formazione.

(4) 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, contribuiscono ad incrementare il valore del carico di collasso. Di norma è preferibile:

- eseguire interventi completi sull'estradosso o sull'intradosso;
- preferire alle lamine in 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 deprimono la resistenza alla delaminazione.

(5) Lo schema di calcolo dell'arco rinforzato deve tener conto della formazione di cerniere, le quali, in prima approssimazione, possono considerarsi localizzate sul contorno dell'arco opposto alla superficie rinforzata. Uno schema di calcolo più aderente alla realtà 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.

(6)P Nell'ipotesi di incapacità da parte della muratura a resistere a sforzi di trazione si devono eseguire per l'arco rinforzato le seguenti verifiche:

- verifica di meccanismo, quando tale modo di crisi non sia inibito;
- verifica a pressoflessione, considerando la possibilità di rottura per schiacciamento della muratura e a trazione dell'FRP;
- verifica a taglio;
- verifica di delaminazione.

(7) La seconda e la terza di tali verifiche devono essere svolte conformemente alla procedura indicata per i pannelli murari. La verifica nei confronti della delaminazione va eseguita nella sezione posta a distanza  $l_e$  dall'estremità del rinforzo; il momento resistente di tale sezione deve essere calcolato ipotizzando sull'FRP il massimo sforzo possibile, fornito dalla (5.4).

### 5.5.1.2 Schema a portale

(1) Nello schema a portale non è sufficiente apporre il rinforzo in FRP, all'estradosso o all'intradosso dell'arco, per impedire il meccanismo attivabile con la formazione delle quattro cerniere. Si deve infatti intervenire estendendo l'applicazione di tessuti o lamine in FRP sui piedritti. Inoltre, sempre che sia possibile, si deve procedere all'eliminazione mediante opportune catene della spinta esercitata dall'arco sui piedritti.

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

### 5.5.2 Volte a semplice curvatura: volte a botte

(1)P In condizioni usuali, lo studio della volta a botte è riconducibile a quello di un arco di profondità unitaria il cui profilo corrisponde alla curva generatrice della volta. Ne consegue che le volte a botte possono essere rinforzate mediante tessuti applicati lungo la generatrice, sia all'estradosso che all'intradosso. Per soddisfare i requisiti di sicurezza, il rinforzo deve essere disposto in maniera diffusa lungo tutto lo sviluppo longitudinale della volta. Per tale motivo i rinforzi vanno posizionati ad un interasse,  $p_f$ , che soddisfi la disuguaglianza:

$$p_f \leq 3t + b_f, \quad (5.23)$$

dove  $b_f$  è la larghezza dei rinforzi adottati e  $t$  è lo spessore della volta. Distanze maggiori sono ammesse solo se adeguatamente giustificate.

(2) Rinforzi longitudinali, quali strisce disposte lungo la direttrice, hanno un'efficacia ridotta limitandosi ad esercitare un'azione di cucitura tra gli archi ideali formanti la volta a botte. Tale azione è particolarmente importante in presenza di azioni orizzontali.

(3) Generalmente, si consiglia di disporre lungo la direttrice una quantità di rinforzo per unità di area pari al 10% di quella disposta lungo la generatrice. La predetta percentuale deve essere innalzata fino 25% in zona sismica.

### 5.5.3 Volte a doppia curvatura: cupole

(1)P Le cupole presentano un regime tensionale sia di tipo membranale e che flessionale.

### 5.5.3.1 Regime membranale

(1) 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 sin oltre le reni. Poiché la muratura offre una modestissima resistenza a trazione, si spiega perché le cupole presentino frequentemente un caratteristico quadro fessurativo con lesioni disposte lungo i meridiani, con l'apice posizionato all'incirca alla metà di questi ultimi, ed estese 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 tessuti circonfenziali in FRP, disposti in prossimità della base della cupola, può servire a contrastare l'estensione della zona fessurata mitigando l'incremento di spinta all'imposta.

(2)P Per valutare il grado di sicurezza della cupola rinforzata vanno effettuate:

- la verifica a trazione del composito,
- la verifica di delaminazione, come indicato al § 5.3.3.

### 5.5.3.2 Regime flessionale

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

Per presidiare le zone soggette a flessione si applicano rinforzi lungo i meridiani allo scopo di assorbire il momento flettente sollecitante.

(2) P Per valutare il grado di sicurezza della cupola rinforzata vanno effettuate:

- la verifica a pressoflessione,
- la verifica a taglio,
- la verifica di 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 nei §§5.4.1.2.1 e 5.4.1.2.2.

Per il taglio ortogonale all'elementino non si deve tener conto del rinforzo in FRP e si deve procedere come nel caso delle murature non rinforzate, operando sempre in termini di caratteristiche specifiche.

Per la verifica di delaminazione va tenuto in conto l'azione normale al piano di adesione secondo quanto indicato al § 5.3.3.

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

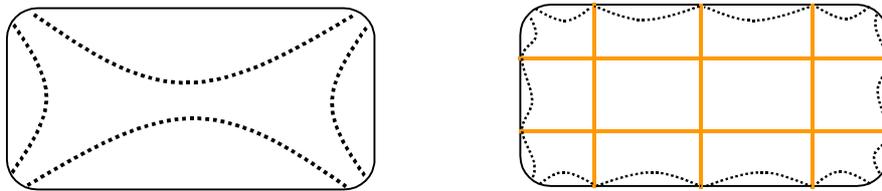
## 5.6 CONFINAMENTO DI COLONNE IN MURATURA

(1)P Il confinamento di elementi strutturali prevalentemente compressi ha lo scopo di incrementarne la capacità ultima e la duttilità. Inoltre esso può migliorare la risposta strutturale in condizioni di esercizio.

(2)P Il confinamento di elementi strutturali in muratura sottoposti a prevalente sollecitazione di sforzo assiale, si attua 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. Interventi di confinamento sono praticati 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 cui appartengono.

(3) Tale sistema può essere realizzato con tessuti, lamine e barre (altrimenti dette tiranti) in FRP; gli elementi di rinforzo sono disposti sul contorno a mo' di fasciatura esterna continua (ricoprimento) o discontinua (cerchiatura), o all'interno a mo' di cuciture armate (barre) opportunamente diffuse, ovvero in entrambi i modi.



**Figura 5-6** – Confinamento di elementi in muratura per mezzo di tessuti e/o barre in FRP.

(4) Le cuciture interne vengono realizzate alloggiando le barre in FRP in fori praticati secondo due direzioni ortogonali della sezione trasversale.

Tali 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.

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

### 5.6.1 Resistenza a compressione centrata

(1)P La verifica di elementi strutturali confinati viene condotta valutando l'effetto della fasciatura e dei tiranti, in dipendenza dalla geometria e dalla tipologia del sistema in FRP utilizzato.

(2)P 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.

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

$$N_{Sd} \leq N_{Rmc,d} \quad (5.24)$$

essendo  $N_{Sd}$  il valore di progetto dell'azione assiale agente e  $N_{Rmc,d}$  il valore di progetto della resistenza dell'elemento confinato.

(4)P La resistenza assiale di progetto,  $N_{Rmc,d}$ , è definita come segue :

$$N_{Rmc,d} = A_m \cdot f_{mcd} \quad (5.25)$$

ovvero come prodotto tra l'area,  $A_m$ , della sezione trasversale dell'elemento confinato ed il valore di progetto,  $f_{mcd}$ , della resistenza assiale dell'elemento confinato.

(5) Alla resistenza,  $f_{mck}$ , di un elemento confinato e soggetto ad un valore  $f_1$  della pressione di confinamento, contribuisce soltanto una quota parte di quest'ultima,  $f_1'$ , detta "pressione efficace di confinamento":

$$f_{mck} = f_{mk} + k' \cdot f_1', \quad (5.26)$$

dove  $f_{mk}$  rappresenta la resistenza della muratura non confinata e  $k'$  è un coefficiente (adimensionale) di incremento della resistenza.

(6) Il valore del coefficiente di incremento della resistenza  $k'$  può essere stabilito sulla base di risultati sperimentali relativi a provini di muratura di caratteristiche analoghe a quelle considerate nell'intervento di confinamento. In alternativa è possibile assumere la seguente relazione:

$$k' = \frac{g_m}{1250}, \quad (5.27)$$

con  $g_m$  densità di massa della muratura espressa in  $\text{kg/m}^3$ .

(7) La pressione efficace di confinamento è funzione della forma della sezione e delle modalità di intervento.

Indicato con  $V_m$  il volume dell'elemento murario e con  $V_{c,eff}$  quello efficacemente confinato, si introduce il seguente coefficiente di efficienza:

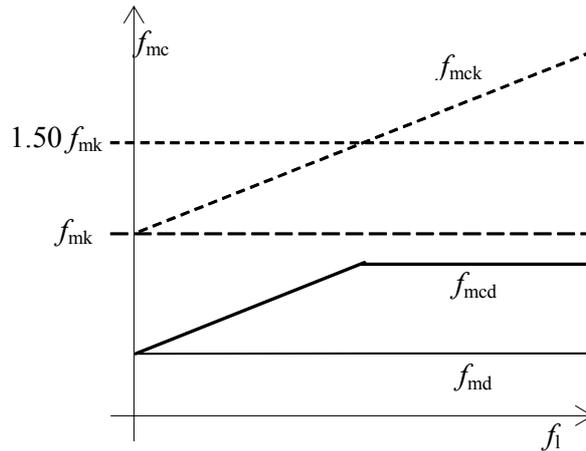
$$k_{eff} = \frac{V_{c,eff}}{V_m}, \quad (5.28)$$

in funzione del quale può essere definita la pressione efficace di confinamento. L'efficienza del confinamento può essere anche valutata esprimendo il coefficiente di efficienza come prodotto del coefficiente di efficienza orizzontale,  $k_H$ , per quello verticale,  $k_V$ :

$$f_1' = k_{eff} \cdot f_1 = k_H \cdot k_V \cdot f_1. \quad (5.29)$$

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

Conseguentemente il valore di progetto dello sforzo normale resistente della colonna confinata risulta definito dalla bilatera rappresentata in Figura 5-7.



**Figura 5-7** – Effetto del confinamento sul valore di progetto della resistenza a compressione.

(9) Possono anche essere condotte analisi non lineari, assumendo per la muratura confinata compressa il seguente legame costitutivo del tipo parabola-rettangolo:

$$\begin{aligned} \sigma_{mc} &= f_{mcd} \left( 2 \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{mo}} - \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon_{mo}^2} \right) & (0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{mo} = 0.002), \\ \sigma_{mc} &= f_{mcd} & (\varepsilon_{mo} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{muc}), \end{aligned} \quad (5.30)$$

dove  $\varepsilon$  è la contrazione generica (assunta positiva) della muratura confinata, mentre  $f_{mcd}$  ed  $\varepsilon_{muc}$  sono, rispettivamente, la resistenza di progetto e la massima deformazione che quest'ultima può esibire.

La deformazione  $\varepsilon_{muc}$  può essere valutata come:

$$\varepsilon_{muc} = \varepsilon_{mu} + k'' \cdot \varepsilon_1, \quad (5.31)$$

dove  $\varepsilon_1$  è la deformazione trasversale della muratura confinata.

In linea di principio, il coefficiente  $k''$  va calibrato sperimentalmente; in mancanza di informazioni più dettagliate si può assumere per esso il valore  $5.0 k'$ .

### 5.6.2 Confinamento di colonne circolari

(1) Si definiscono quali rapporti geometrici di rinforzo della fasciatura esterna e degli eventuali tiranti rispetto all'area della sezione retta della muratura le seguenti quantità:

$$\rho_f = \frac{2t_f b_f}{D \cdot p_f}, \quad \rho_b = \frac{n_b A_b}{D \cdot p_b}, \quad (5.32)$$

dove:

- $D$  è il diametro esterno della sezione trasversale,
- $t_f$  è lo spessore di ciascuna cerchiatura,
- $b_f$  è l'altezza di quest'ultima,
- $n_b$  è il numero di barre per ciascuno strato di eventuali cuciture,
- $A_b$  è l'area della sezione delle barre,
- $p_f$  è il passo delle cerchiature (misurato in asse),

-  $p_b$  è il passo degli strati delle eventuali cuciture (misurato in asse).

Nel caso di una fasciatura esterna continua il parametro adimensionale  $\rho_f$  si riduce al rapporto:  $2t_f / D$ .

(2) In condizione di equilibrio limite, la pressione di confinamento può essere calcolata con la relazione che segue:

$$f_1 = (\rho_f \cdot E_f + \rho_b \cdot E_b) \cdot \varepsilon_{fb,rid}, \quad (5.33)$$

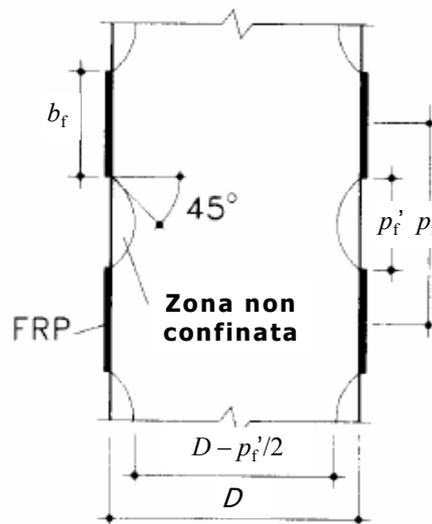
essendo  $E_f$  e  $E_b$ , rispettivamente, i moduli di elasticità normale del ricoprimento in FRP e dei tiranti, ed  $\varepsilon_{fb,rid}$  un opportuno valore ridotto di calcolo della deformazione del rinforzo all'atto del collasso della colonna.

(3)P La deformazione ridotta di calcolo del rinforzo,  $\varepsilon_{fb,rid}$ , può essere assunta pari a:

$$\varepsilon_{fd,rid} = \min \left\{ \eta_a \cdot \varepsilon_{fu}^{(r)} / \gamma_f^{(r)}; \eta_a \cdot \varepsilon_{fu}^{(b)} / \gamma_f^{(b)}; 0.004 \right\}, \quad (5.34)$$

essendo  $\varepsilon_{fu}^{(r)}$  e  $\varepsilon_{fu}^{(b)}$ , rispettivamente, la deformazione ultima della fasciatura e delle barre,  $\eta_a$  il fattore di conversione ambientale (Tabella 3-4),  $\gamma_f^{(r)}$  e  $\gamma_f^{(b)}$ , nell'ordine, i coefficienti parziali dell'FRP (Tabella 3-2; per le barre si suggerisce il valore  $\gamma_f^{(b)}=1.20$ ).

(4) Il coefficiente di efficienza orizzontale,  $k_H$ , di una fasciatura esterna continua di una colonna circolare viene assunto pari a 1.0. Qualora, per ragioni di montaggio, la disposizione delle fibre sia ad elica, si deve ridurre opportunamente l'efficienza in funzione dell'inclinazione delle fibre.



**Figura 5-8** – Sezione circolare confinata in maniera discontinua.

(5) In caso di una fasciatura discontinua di elementi murari a sezione circolare di diametro  $D$  (Figura 5-8), composta cioè da cerchiature di altezza  $b_f$  disposte ad interasse  $p_f$ , il coefficiente di efficienza verticale può essere calcolato mediante la relazione:

$$k_v = k_{\text{eff}} = \left(1 - \frac{p_f - b_f}{2D}\right)^2 \quad (5.35)$$

### 5.6.3 Confinamento di colonne quadrate o rettangolari

(1)P Il confinamento mediante rivestimento in 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.

(2)P Prima dell'applicazione del sistema in FRP è opportuno procedere ad un arrotondamento degli spigoli della sezione con raggio minimo di 20 mm, allo scopo di evitare pericolose concentrazioni di tensione, che potrebbero condurre ad una prematura rottura del sistema di confinamento.

(3) La pressione di confinamento fornita da un rivestimento continuo in FRP installato attorno ad un elemento di sezione rettangolare, di dimensioni  $b$  e  $d$ , può essere valutata mediante la formula (5.33), sostituendo nella (5.32) al diametro  $D$  la massima dimensione trasversale della sezione,  $\max\{b, d\}$ .

(4) Con riferimento ad una sezione siffatta, rappresentata in Figura 5-9, si può ritenere che l'area di muratura effettivamente confinata sia solo una parte di quella complessiva per l'instaurarsi di un "effetto arco" dipendente dal raggio di curvatura con cui è stato arrotondato lo spigolo della sezione.

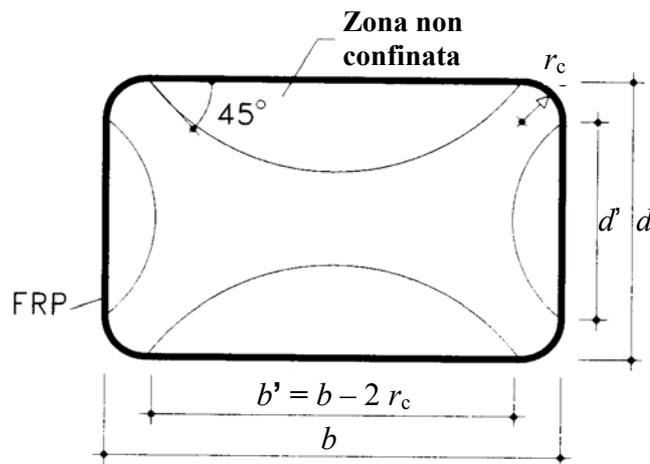


Figura 5-9 – Confinamento di sezioni rettangolari.

(5) Il coefficiente di efficienza orizzontale è fornito dal rapporto tra l'area confinata e quella totale,  $A_m$ :

$$k_H = k_{\text{eff}} = 1 - \frac{b'^2 + d'^2}{3A_m}, \quad (5.36)$$

dove  $b'$  e  $d'$  sono le dimensioni indicate in Figura 5-9.

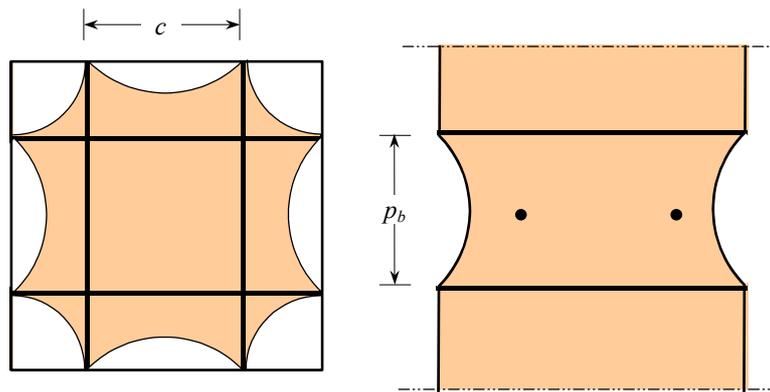
(6) In assenza di adeguate prove sperimentali, che ne comprovino l'efficacia, non va considerato l'effetto del confinamento esterno su sezioni rettangolari per le quali  $b/d > 2$ , ovvero  $\max\{b, d\} > 900\text{mm}$ .

(7) In caso di una fasciatura discontinua di elementi murari con rinforzi in FRP di altezza  $b_f$  disposti ad interasse  $p_f$  (Figura 5-8), il coefficiente di efficienza verticale può essere calcolato attraverso la relazione:

$$k_v = \left( 1 - \frac{p_f - b_f}{2 \cdot \min\{b, d\}} \right)^2 \quad (5.37)$$

(8) Nel caso di cucitura dell'elemento murario mediante barre in FRP, le barre disposte secondo una direzione vanno sfalsate in altezza rispetto a quelle disposte nella direzione ortogonale. Con riferimento alla Figura 5-10, si può ritenere che l'area di muratura effettivamente confinata risulti ridotta rispetto alla sezione complessiva per l'instaurarsi di un "effetto arco" tra le estremità dei tiranti disposti secondo le due direzioni ortogonali prescelte.

(9) L'azione delle barre può essere valutata in base alla percentuale di area della sezione trasversale effettivamente confinata dalle barre disposte secondo le due suddette direzioni. La riduzione della sezione confinata nelle zone intermedie tra due strati contigui di cuciture, similmente a quanto ipotizzato per le sezioni rettangolari fasciate, è da imputare al fenomeno di diffusione tensionale, schematizzabile attraverso una legge parabolica con angoli di attacco pari a  $45^\circ$ .



**Figura 5-10** – Zone di confinamento dei tiranti nella sezione trasversale e longitudinale.

(10) In assenza di valutazioni più approfondite del volume efficacemente confinato, il coefficiente di efficienza definito dalla relazione (5.28) nel caso di tiranti interni può essere determinato come segue:

$$k_{\text{eff}} = k_H \cdot k_v = \left( 1 - \frac{(2n_b - 1) \cdot c^2}{3 A_m} \right) \cdot \left( 1 - \frac{p_b}{3 \min\{b, d\}} \right), \quad (5.38)$$

dove  $c$  è il passo orizzontale delle barre all'interno dello strato.

(11) Al fine di assicurare l'efficacia del vincolo opposto dalle barre fino alla superficie della colonna, devono essere prese misure idonee a garantire che la forza di ancoraggio si espliciti completamente su di una lunghezza pari a 10 volte il diametro delle barre. Nel caso che tale lunghezza sia maggiore di 1/5 di quella delle barre, si deve adottare un sistema di diffusione della forza di ancoraggio alle estremità.

(12) Il passo orizzontale e verticale delle barre non può essere maggiore della metà del lato della colonna; la distanza della barra più esterna dallo spigolo non deve essere più grande di 1/4 del lato della colonna.

## **5.7 PRINCIPI GENERALI DI INTERVENTO PER COSTRUZIONI IN ZONA SISMICA**

### **5.7.1 Obiettivi della progettazione**

(1)P Gli interventi di rinforzo con FRP possono essere effettuati su strutture murarie in zona sismica che non soddisfino i requisiti di sicurezza previsti dalla Normativa vigente nei confronti di uno o più stati limite.

(2)P Questa parte del documento recepisce le indicazioni dell'attuale Normativa Sismica vigente, relativamente ai seguenti temi:

- valutazione della sicurezza sismica,
- requisiti di sicurezza (stati limite da verificare),
- livelli di protezione antisismica (intensità dell'azione sismica associata),
- metodi di analisi,
- criteri di verifica,
- caratteristiche dei materiali da impiegare nelle verifiche di sicurezza.

### **5.7.2 Criteri per la scelta dell'intervento con FRP**

(1)P La scelta del tipo e dell'estensione dell'intervento con FRP deriva dai risultati della fase di valutazione della sicurezza sismica della costruzione, tenendo conto degli aspetti sottoelencati.

- Le murature di qualità insufficiente a sopportare le azioni verticali ed 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 rigidità) 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.

(2)P Gli interventi con FRP hanno generalmente lo scopo di:

- rinforzare, sostituire o ricostruire in tutto o in parte alcuni elementi (interventi selettivi).
- modificare l'organismo strutturale attraverso il collegamento fra elementi strutturali diversi.

(3)P Il progetto dell'intervento con FRP deve comprendere le seguenti attività:

- scelta motivata del tipo di intervento;
- scelta delle tecniche e/o dei materiali;
- dimensionamento preliminare dei rinforzi;
- analisi strutturale considerando le caratteristiche della struttura post-intervento, in accordo alla Normativa Sismica vigente;
- verifiche coerenti con la Normativa Sismica vigente della struttura post-intervento eseguite sugli elementi esistenti, modificati e nuovi; per gli elementi esistenti, riparati o rinforzati, le verifiche devono essere eseguite in accordo con quanto indicato nelle presenti Istruzioni; per gli elementi di nuova costruzione le verifiche devono essere condotte in accordo con le prescrizioni normative valide per tali strutture.

(4)P In zona sismica l'applicazione dei rinforzi su strutture murarie è principalmente finalizzato ai seguenti obiettivi:

- 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;
- eliminazione di spinte e forze applicate ortogonalmente ai paramenti murari;
- collegamento tra elementi che collaborano a resistere alle azioni orizzontali in modo da ottenere un comportamento scatolare della costruzione;
- irrigidimento di solai nel proprio piano per ottenere un funzionamento a diaframma rigido;
- limitazione dell'apertura di fessure per migliorare la dissipazione di energia;
- confinamento di colonne al fine di incrementare la resistenza e la duttilità del materiale.

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

(6) L'efficienza sismica dell'intervento progettato può essere stimata dall'incremento di spostamento orizzontale a collasso derivante dall'applicazione del rinforzo.

## **5.8 INSTALLAZIONE, MONITORAGGIO E CONTROLLO**

(1)P Il funzionamento ottimale di un rinforzo strutturale in 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, che sono oggetto del presente paragrafo. 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 colonne o pilastri in muratura). A titolo esemplificativo, possono essere omesse alcune verifiche relative alla qualità del substrato in casi in cui la geometria del rinforzo ne garantisce il funzionamento intrinseco (per esempio nel caso di fasciature chiuse di confinamento) o sono previsti appositi elementi di ancoraggio collaudati indipendentemente.

(2)P Una volta che l'intervento sia stato realizzato è necessario procedere al suo controllo ed, in seguito, al suo eventuale monitoraggio nel tempo mediante prove non-distruttive o parzialmente distruttive che si elencano nei paragrafi che seguono.

(3)P Il presente paragrafo descrive alcune prove che possono effettuarsi per conseguire il desiderato livello di conoscenza, insieme ad ulteriori prove utili a valutare la qualità della messa in opera

dei materiali compositi e per monitorarne nel tempo il funzionamento. La progettazione del tipo e del numero di prove da eseguire deve essere condotta, per ciascuna applicazione, valutando:

- l'importanza funzionale e strategica che assume la costruzione durante gli eventi sismici, in relazione alle conseguenze di un eventuale collasso,
- la sua valenza storica e culturale,
- la rilevanza strutturale dell'intervento, a seconda che riguardi elementi strutturali primari (es. volte, cupole, colonne, archi, pareti, ecc.) o secondari (es. piattabande, tiranti ecc..),
- l'estensione dell'intervento in rapporto alle dimensioni della struttura.

(4)P I valori numerici appresso indicati sono da intendersi come valori suggeriti.

### **5.8.1 Controllo e preparazione del substrato**

(1)P Il controllo delle condizioni del substrato coinvolge aspetti legati alla valutazione del grado di deterioramento del paramento murario ed alla rimozione e ricostruzione della muratura ammalorata, con eventuali provvedimenti di pulizia ed asportazione di parti degradate per umidità, per presenza di microvegetazione o alterazione dei materiali lapidei o in laterizio.

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

#### **5.8.1.1 Valutazione del deterioramento del substrato**

(1) 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, per esempio mediante reticoli metallici. Il periodo di osservazione non dovrebbe essere inferiore a sei mesi.

(2) Le prove di caratterizzazione meccanica della muratura vanno previste in ragione di almeno 1 prova per 15 m<sup>2</sup> di area da rinforzare, con un minimo di 2 prove per ogni zona omogenea, secondo una almeno 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.

(3) Le prove di omogeneità su tutta l'area da rinforzare, qualora eseguite, vanno distribuite secondo una griglia a maglia quadrata con passo di 1 m 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.

### **5.8.1.2 Rimozione e ricostruzione del substrato**

(1) Il substrato della muratura può aver subito un deterioramento fisico-chimico, fisico-meccanico, biologico o da eventuale impatto. In tal caso è fondamentale rimuovere la muratura deteriorata per tutta la zona.

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

(3) 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) Allo scopo di migliorare l'aderenza del rinforzo sul substrato ricostruito, può essere necessario sabbiare la superficie interessata dall'applicazione del rinforzo. La sabbiatura è finalizzata ad 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.

(5) 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*.

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

(7) 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 non inferiore a 20 mm.

### **5.8.2 Raccomandazioni per l'esecuzione a regola d'arte**

(1) La qualità dell'esecuzione del rinforzo con materiali compositi dipende fortemente dalle condizioni di temperatura ed 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 pre-

cauzioni specifiche per garantire la qualità di installazione di sistemi in la polimerizzazione avviene *in situ* e quindi non è controllata in stabilimento.

#### **5.8.2.1 Condizioni di umidità e temperatura dell'ambiente e del substrato**

(1) Si sconsiglia di installare rinforzi in 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*.

(2) 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. L'umidità del substrato può essere misurata mediante un misuratore di umidità per malte oppure semplicemente con l'utilizzo di carta assorbente.

(3) Il rinforzo, inoltre, non va installato se la temperatura ambiente e quella superficiale sono molto basse, in quanto potrebbe essere pregiudicata la perfetta stagionatura delle resine e l'impregnazione delle fibre. È sconsigliato installare il rinforzo se le suddette temperature non ricadono nell'intervallo 10°-35° C. In ambienti a bassa temperatura, se la tempistica di cantiere non consente di differire l'installazione, è opportuno riscaldare artificialmente le zone interessate dal rinforzo. Parimente, è sconsigliato installare il rinforzo nel caso in cui la superficie muraria sia esposta a forte soleggiamento.

(4) 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.

#### **5.8.2.2 Particolari costruttivi e norme di esecuzione**

(1) Per il progetto dei particolari di estremità del rinforzo, è opportuno rispettare una lunghezza di ancoraggio minima pari a 300 mm o adottare sistemi alternativi di ancoraggio.

(2) Durante la posa in opera di sistemi con polimerizzazione *in situ*, è necessario rispettare l'allineamento di progetto ed evitare ondulazioni delle fibre.

(3) Nei casi di applicazione di fibre di carbonio che potrebbero andare a diretto contatto con parti in acciaio, è necessario prevedere opportuni strati di materiali isolanti onde evitare l'insorgere di fenomeni di corrosione galvanica.

(4) 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, suddivise in fazzoletti da almeno 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 all'atto dell'intervento con gli stessi materiali e modalità del rinforzo principale in zone in cui la loro rimozione non comporta alterazioni dei meccanismi di collasso. I fazzoletti devono inoltre essere esposti alle stesse condizioni ambientali del rinforzo e, se in numero maggiore di uno, distribuiti nell'intera costruzione.

#### **5.8.3 Controllo di qualità dell'esecuzione**

(1) Il controllo di qualità dell'installazione deve prevedere almeno un ciclo di prove semi-distruttive per la caratterizzazione meccanica della stessa ed almeno una mappatura non distruttiva che ne assicuri l'omogeneità di esecuzione.

### 5.8.3.1 Prove semi-distruttive

(1) 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.

(2) Prova di strappo normale. La prova, utile per il solo accertamento delle proprietà del substrato ripristinato, viene eseguita utilizzando piastre circolari in acciaio di spessore 20 mm e con diametro 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 soddisfacente se almeno l'80% delle prove (entrambe nel caso di due sole prove) fornisce una tensione di picco allo strappo non inferiore al 10% della resistenza a compressione del supporto ed inoltre se la crisi è prevalentemente localizzata al di sotto della superficie di interfaccia composito/substrato.

(3) 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 al 5% della resistenza a compressione del supporto.

### 5.8.3.2 Prove non distruttive

(1) 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.

(2) 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.

**Tabella 5-1** – Risoluzione minima per lo spessore di difetti da identificare mediante prove non distruttive.

Trasf. di tensioni di taglio all'interfaccia	Esempio	Controllo non distruttivo	Maglia di mappatura della superficie	Risoluzione minima per lo spessore del difetto
assente	Fasciature, con eccezione della zona di sovrapposizione per le realizzazioni a singolo strato	facoltativo	250 mm	3 mm
debole	zona centrale di rinforzi piani molto estesi	facoltativo	250 mm	3 mm
moderato o potenziale	zona centrale di rinforzi longitudinali a flessione	consigliato	100 mm	0.5 mm
critico	zone di ancoraggio, zone di sovrapposizione tra gli strati, staffe di rinforzo a taglio, zone di interfaccia con i connettori, zone con pesanti asperità o fessurazioni del substrato	obbligatorio	50 mm	0.1 mm

(3) Prove ultrasoniche ad alta frequenza. Devono essere condotte impiegando metodologie in riflessione con frequenze non inferiori a 1.0 MHz e sonde con diametro non superiore a 25 mm, adottando la tecnica basata sulla variazione dell'ampiezza del primo picco per la localizzazione dei difetti.

(4) 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.

(5) 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 in muratura e per rilevare l'inizio del distacco dalla struttura medesima.

#### 5.8.4 Qualifica degli operatori

(1) I profili professionali degli operatori preposti alle prove devono corrispondere ai seguenti tre livelli di qualifica appresso specificati, in conformità con la normativa di riferimento UNI EN 473, UNI EN 45013.

**Tabella 5-2 – Livelli di specializzazione per l'esecuzione di prove di monitoraggio e collaudo.**

Livello 1	regolare l'apparecchiatura; eseguire le prove; registrare e classificare i risultati in relazione a criteri scritti; stendere un resoconto sui risultati.
Livello 2	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.
Livello 3	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 e stabilire le tecniche e collaborare alla definizione di criteri di accettazione quando non ne esistano; avere una conoscenza nei diversi campi di applicazione; avere la capacità di guidare il personale di livello inferiore al livello 3.

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.

#### 5.8.5 Monitoraggio dell'intervento di rinforzo

(1) La disponibilità relativamente modesta di dati relativi al comportamento a lungo termine dei materiali compositi consiglia, in situazioni di particolare rilevanza, un'adeguata attività di monito-

raggio delle applicazioni mediante sensori incorporati o mediante l'esecuzione periodica di prove non distruttive e semi-distruttive. Scopo del monitoraggio è tenere sotto controllo i seguenti parametri o alcuni di essi:

- temperatura del rinforzo,
- umidità ambientale,
- andamenti di spostamenti e deformazioni,
- continuità e livello del danneggiamento delle fibre,
- estensioni di difetti e distacchi dell'applicazione.

## 6 APPENDICE

### 6.1 TECNICHE DI PRODUZIONE

#### 6.1.1 Pultrusione

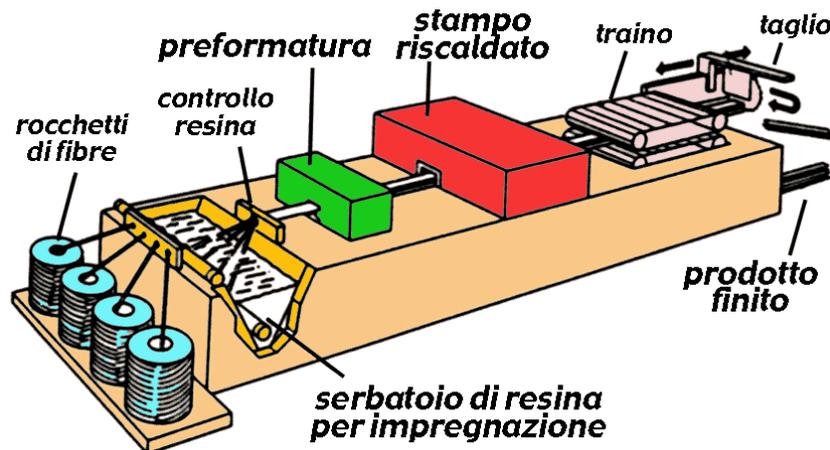
La pultrusione è una tecnologia utilizzata principalmente per la produzione di lamine fibrorinforzate, di largo impiego in ambito civile.

Essa si basa su un processo continuo di produzione, articolato essenzialmente in tre fasi:

- formatura,
- impregnazione,
- consolidamento.

Nella versione più comune, concepita per matrici termoindurenti, i componenti (resina e fibre) sono alimentati separatamente in una macchina in grado di afferrare e trascinare le fibre attraverso i diversi stadi di produzione.

Una versione molto diffusa del processo è quella con impregnazione a bagno di resina, illustrata in Figura 6-1.



**Figura 6-1** – Schema di funzionamento della pultrusione con impregnazione a bagno di resina.

Le fibre sono prelevate da un gruppo di rocchetti e convogliate, attraverso rastrelliere che ne uniformano la disposizione, verso un bagno di resina, dove avviene l'impregnazione. Il fascio di fibre impregnate entra quindi in uno stampo riscaldato (*die*), nel quale il materiale si consolida sotto pressione. Durante questa fase i vuoti presenti tra le fibre sono eliminati, garantendo così la continuità del materiale in direzione trasversale.

Il calore viene di solito fornito attraverso resistenze elettriche e la temperatura è controllata mediante termocoppie opportunamente posizionate. Il tempo di permanenza in temperatura è regolato dalla velocità di produzione. All'uscita dallo stampo, la matrice si è solidificata e il composito può essere afferrato dal dispositivo di traino che lo trascina a velocità costante. Una sega circolare taglia il prodotto nella lunghezza desiderata in prossimità della parte terminale della linea di produzione. È possibile aggiungere strati di *mat* o tessuti per rinforzare il materiale anche in direzioni diverse da quella di traino. Con speciali apparecchiature è anche possibile la tessitura, l'avvolgimento e l'intreccio di fibre direttamente sulla linea di produzione.

I compositi pultrusi sono leggeri, resistenti alla corrosione e presentano una sezione costante con spessori che possono raggiungere anche alcuni centimetri. I classici manufatti pultrusi sono lamine, barre, profili a sezione sagomata (ad angolo, a “C”, a doppio “T”, ecc.), pannelli e piastre. Tali manufatti trovano impiego come rinforzi esterni ed interni in campo civile, come componenti strutturali nel settore dei trasporti, come canaline passacavi nell’edilizia, come tiranti e montanti per scale, come supporti per illuminazione e cartellonistica stradale, come “riser” per l’industria petrolifera, ecc.

### 6.1.2 Laminazione

Questa tecnologia di produzione di laminati compositi trova impiego quasi esclusivamente per la fabbricazione di compositi innovativi. Si tratta di un processo di tipo discontinuo, che permette di produrre laminati compositi di spessore massimo fino ad alcuni centimetri, con struttura molto complessa.

Rispetto alla pultrusione consente una libertà pressoché assoluta in termini di orientazione delle fibre nelle diverse lamine e di curvatura dei pezzi prodotti. La principale limitazione consiste nella lentezza del ciclo di produzione, che è caratterizzato da una velocità dell’ordine di 0.5 kg/h per componenti non troppo complessi.

Nella realizzazione di un laminato tipico, è possibile identificare le seguenti fasi fondamentali:

- preparazione (dello stampo e del materiale);
- laminazione (taglio del materiale, sovrapposizione degli strati e compattazione);
- confezionamento del sacco da vuoto;
- reticolazione del materiale (a temperatura ambiente, in forno o in autoclave);
- ispezione (visiva, con ultrasuoni e con raggi X);
- finitura (taglio dei bordi con fresa o getto d’acqua ad alta pressione).

La laminazione (*lay-up*) può essere eseguita a partire da fibre secche che devono essere impregnate di resina durante l’applicazione, oppure a partire da un preimpregnato a fibre continue, unidirezionali o tessute.

La fase successiva della laminazione (fase c) prevede la preparazione del sacco da vuoto: una tipica composizione di quest’ultimo, con l’indicazione dei vari componenti, è illustrato in Figura 6-2.

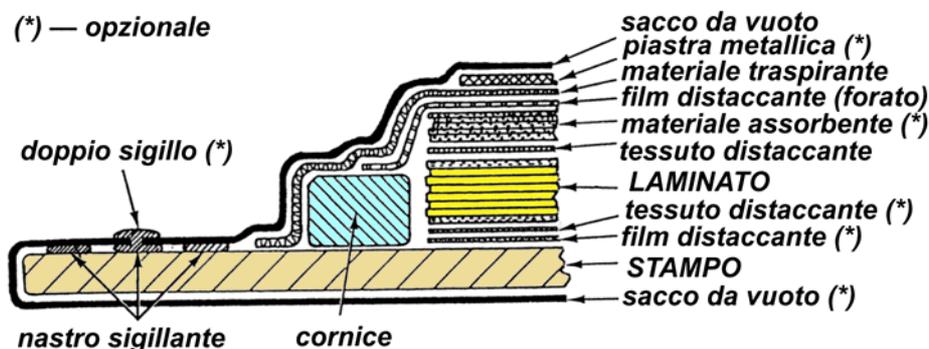


Figura 6-2 – Rappresentazione del sistema per laminazione.

All’interno del sacco viene praticato il vuoto attraverso una valvola collegata ad una pompa. Il vuoto ha essenzialmente il compito di consentire la rapida estrazione dei solventi e dell’aria contenuti nel laminato e di compattare gli strati tra di loro prima della reticolazione completa della resina. Il

sacco da vuoto assolve, inoltre, a diverse funzioni molto importanti per lo svolgimento del successivo processo di reticolazione (fase d), ma non è indispensabile.

Il principale vantaggio della suddetta tecnologia è l'estrema versatilità di impiego, che consente di produrre componenti di forma anche molto complessa senza richiedere stampi costosi.

Le applicazioni principali riguardano il settore aeronautico e quello aerospaziale, l'automobilismo da competizione, la nautica e il trasporto in generale. Un esempio di applicazione della laminazione (manuale) in campo civile è rappresentato dal confinamento di colonne o dal rinforzo a taglio di travi mediante l'applicazione di un tessuto secco (o un preimpregnato) sulla superficie delle membrature con successiva impregnazione di resina mediante rullatura.

## 6.2 COMPORTAMENTO MECCANICO DEI COMPOSITI

I materiali compositi fibrorinforzati sono materiali eterogenei (cioè costituiti da materiali diversi) e anisotropi (cioè aventi proprietà diverse nelle diverse direzioni). Poiché la scala delle applicazioni che interessano l'ingegneria civile è di gran lunga più grande di quella relativa alla microstruttura del materiale (cfr. Tabella 2-2), è possibile trascurare l'eterogeneità sostituendo il materiale reale con un continuo omogeneo. Com'è noto, se si assume che gli stati di sforzo e di deformazione in un punto generico di esso siano rappresentabili dalle componenti del tensore degli sforzi,  $\underline{\sigma}$  (Figura 6-3), e dalle relative componenti del tensore di deformazione,  $\underline{\varepsilon}$ , il comportamento meccanico di un solido omogeneo elastico e anisotropo è definibile mediante 21 costanti elastiche indipendenti attraverso una relazione matriciale del tipo:

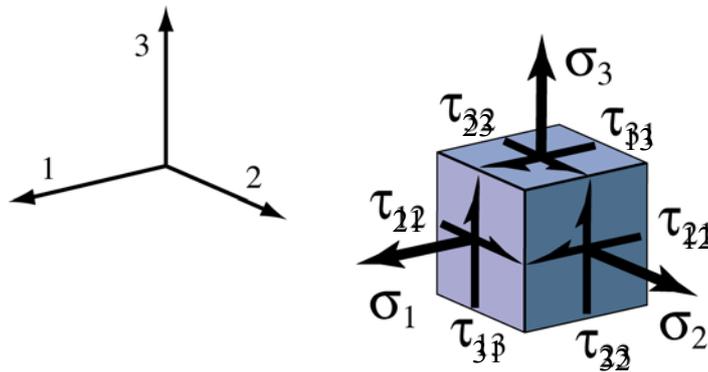


Figura 6-3 – Rappresentazione dello stato tensionale agente su un elemento infinitesimo.

$$\underline{\sigma} = [C] \underline{\varepsilon} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}, \quad (6.1)$$

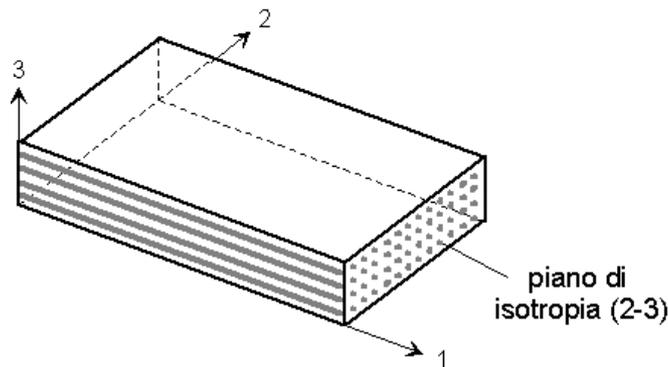
nella quale  $[C]$  è la matrice di rigidezza.

La caratterizzazione completa della matrice di rigidezza richiederebbe dunque la valutazione delle suddette 21 costanti attraverso opportune combinazioni di prove di trazione e di taglio. Il numero di prove può tuttavia essere sensibilmente ridotto se il materiale possiede qualche tipo di simmetria; la quasi totalità dei materiali compositi di interesse ingegneristico rientra in questa categoria.

Molti compositi unidirezionali costituiti di fibre allineate in modo compatto possono essere considerati trasversalmente isotropi, come nel caso di Figura 6-4, dove il piano 2-3 perpendicolare alle

fibre è il piano di isotropia. In tal caso le costanti elastiche indipendenti si riducono a 5 e la matrice di rigidità assume la forma:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{22} - C_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (6.2)$$



**Figura 6-4** – Composito unidirezionale con piano di isotropia trasversale.

Nella pratica è spesso conveniente riferirsi alle cosiddette costanti “ingegneristiche”:  $E$  (modulo di elasticità normale o modulo di Young),  $\nu$  (coefficiente di contrazione trasversale o di Poisson) e  $G$  (modulo di elasticità tangenziale) per le quali esistono tecniche consolidate di caratterizzazione sperimentale. Tali costanti avranno in generale valori diversi nelle diverse direzioni. E’ lecito ad esempio attendersi che il modulo di elasticità normale diretto in direzione delle fibre,  $E_1$ , sia maggiore di quello in direzione trasversale,  $E_2$ , che a sua volta può essere diverso da quello in direzione 3,  $E_3$ . Le stesse considerazioni valgono per i moduli  $G_{12}$ ,  $G_{13}$ ,  $G_{23}$ . (Le direzioni 1, 2 e 3 sono definite in Figura 6-4).

In funzione delle costanti ingegneristiche, la matrice di deformabilità del materiale,  $[S]$ , cioè l’inversa della matrice di rigidità  $[C]$ , può essere espressa nella maniera seguente:

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2(1+\nu_{23})}{E_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Le costanti ingegneristiche indipendenti sono ovviamente anch'esse in numero di cinque e risultano essere:

$$E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{23}, G_{12}.$$

Nel caso più particolare di una lamina unidirezionale sottile in stato piano di tensione, la matrice di deformabilità si specializza nella forma:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}. \quad (6.4)$$

In tal caso il comportamento meccanico della lamina unidirezionale può essere caratterizzato da quattro costanti elastiche indipendenti. Per la determinazione di tali costanti si effettuano solitamente prove di trazione monoassiale con le fibre inclinate di un angolo predefinito,  $\theta$ , rispetto alla direzione del carico applicato. Ponendo  $\theta=0^\circ$ , cioè con le fibre parallele alla direzione di carico, è possibile ricavare  $E_1$  e  $\nu_{12}$ ; mentre con  $\theta=90^\circ$  (fibre perpendicolari alla direzione di carico) si valuta  $E_2$ . Per quanto riguarda la determinazione di  $G_{12}$ , la scelta dell'angolo  $\theta$  sarà funzione della particolare geometria del rinforzo.

È anche possibile stimare, con buona approssimazione, alcuni valori delle suddette costanti mediante semplici modelli "micromeccanici" basati sulle proprietà dei singoli costituenti (fibra e matrice) e sulle frazioni in volume di questi ultimi. In particolare, nel caso di lamine unidirezionali, è possibile stimare le proprietà in direzione longitudinale utilizzando una relazione nota con il nome di "regola delle miscele". Essa deriva dall'applicazione di un semplice modello micromeccanico (*Slab Model*) in cui le fibre e la matrice sono disposte in parallelo. Il modello fornisce con ottima approssimazione il valore del modulo di elasticità normale in direzione delle fibre,  $E_1$ , e quello del coefficiente di Poisson,  $\nu_{12}$ :

$$\begin{aligned} E_1 &= V_{\text{fib}} \cdot E_{\text{fib}} + (1 - V_{\text{fib}}) \cdot E_{\text{m}}, \\ \nu_{12} &= V_{\text{fib}} \cdot \nu_{\text{fib}} + (1 - V_{\text{fib}}) \cdot \nu_{\text{m}}, \end{aligned} \quad (6.5)$$

essendo  $V_{\text{fib}}$  la frazione in volume delle fibre (rapporto tra il volume delle fibre ed il volume totale del composito);  $E_{\text{fib}}$  e  $E_{\text{m}}$ , rispettivamente, i moduli di elasticità normale delle fibre e della matrice;  $\nu_{\text{fib}}$  e  $\nu_{\text{m}}$ , i corrispondenti coefficienti di Poisson.

Spesso, in luogo delle frazioni in volume, sono note solo quelle in peso di fibre e matrice: rispettivamente  $P_{\text{fib}}$  e  $P_{\text{m}}$ . Se  $\rho_{\text{fib}}$  e  $\rho_{\text{m}}$  sono, nell'ordine, le densità della fibra e della matrice, è agevole verificare che risulta:

$$\begin{aligned} V_{\text{fib}} &= \frac{P_{\text{fib}}/\rho_{\text{fib}}}{P_{\text{fib}}/\rho_{\text{fib}} + P_{\text{m}}/\rho_{\text{m}}}, \\ P_{\text{fib}} + P_{\text{m}} &= 1. \end{aligned} \quad (6.6)$$

A titolo di esempio viene presentato il calcolo della frazione in volume relativa alle fibre per un composito a base di fibre di vetro, la cui frazione in peso sia pari al 60%. Le caratteristiche dei componenti siano:

	Frazione in peso	Densità [g/cm <sup>3</sup> ]
fibra	0.60	2.5
matrice	0.40	1.2

Applicando la (6.6) si ricava un valore della frazione in volume delle fibre di vetro pari al 42%. Infine, noti i valori delle proprietà meccaniche delle fibre ( $E_{\text{fib}} = 80$  GPa,  $\nu_{\text{fib}} = 0.3$ ) e della matrice ( $E_m = 3$  GPa,  $\nu_m = 0.34$ ), si ottengono i seguenti valori relativi al composito:

$$E_1 = 32.2 \text{ GPa,}$$

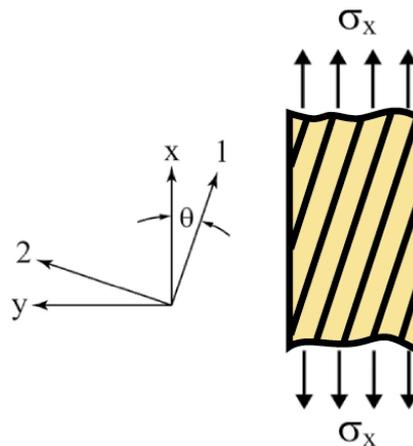
$$\nu_{12} = 0.32.$$

Per maggiori dettagli sui modelli micromeccanici si rimanda ai testi specialistici.

### 6.2.1 Effetto di carichi agenti in direzioni diverse dalle direzioni di simmetria del materiale

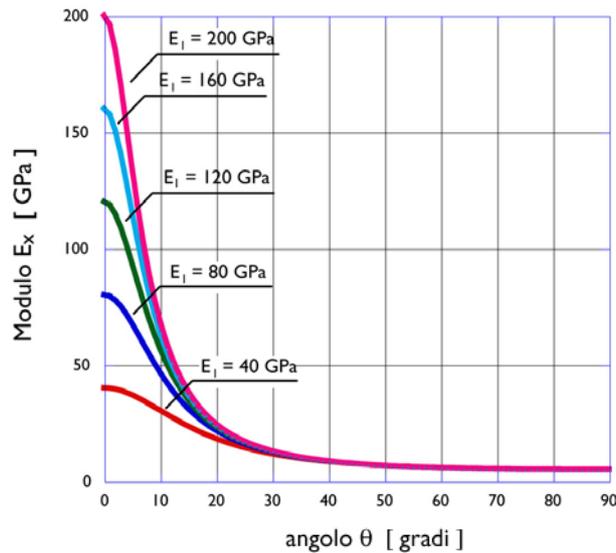
Una volta determinate le costanti elastiche del materiale, il comportamento del composito fibrorinforzato è completamente determinato per qualunque direzione di sollecitazione, comunque essa sia orientata rispetto agli assi di simmetria del materiale. Queste ultime non coincidono necessariamente con gli assi di simmetria del corpo o del sistema di carico.

Ad esempio, prendendo in esame la situazione rappresentata in Figura 6-5, relativa ad una lamina a fibre continue e unidirezionali, è possibile calcolare le costanti elastiche “equivalenti”,  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $G_{xy}$  e  $\nu_{xy}$ , riferite agli assi di riferimento  $x$  ed  $y$  del sistema di carico, ruotati di un angolo  $\theta$  rispetto agli assi di simmetria del materiale, 1 e 2, in funzione di  $\theta$  e delle costanti elastiche del materiale,  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_{12}$ ,  $\nu_{12}$ .

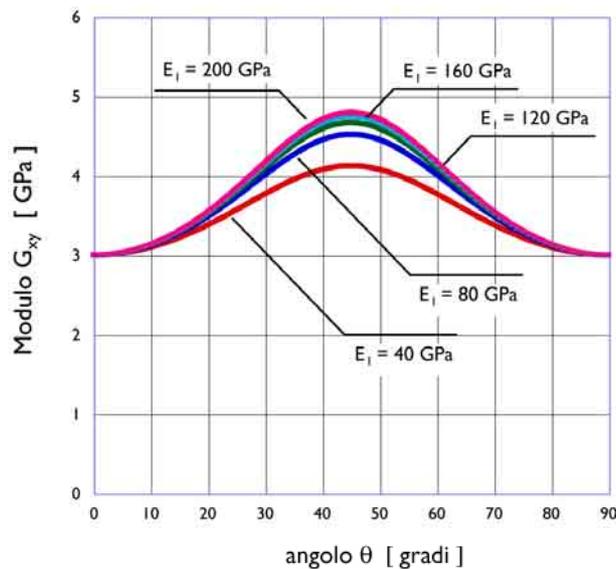


**Figura 6-5** – Definizione dei sistemi di riferimento  $x, y$  e  $1, 2$ .

In Figura 6-6 e Figura 6-7 sono diagrammati gli andamenti del modulo di elasticità  $E_x$  e del modulo di elasticità tangenziale  $G_{xy}$  al variare dell'angolo  $\theta$  tra la direzione delle fibre e la direzione di carico per diversi valori del modulo  $E_1$ .



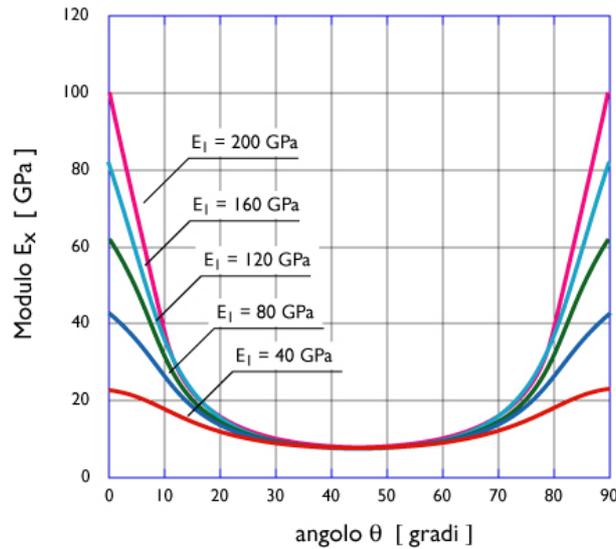
**Figura 6-6** – Modulo  $E_x$  al variare dell'angolo di rotazione  $\theta$  per compositi fibrorinforzati con diverso valore del modulo  $E_1$  ( $E_2 = 5$  GPa;  $G_{12} = 3$  GPa;  $\nu_{12} = 0.35$ ).



**Figura 6-7** – Modulo  $G_{xy}$  al variare dell'angolo di rotazione  $\theta$  per compositi fibrorinforzati con diverso valore del modulo  $E_1$  ( $E_2 = 5$  GPa;  $G_{12} = 3$  GPa;  $\nu_{12} = 0.35$ ).

Sono evidenti le variazioni significative dei moduli  $E_x$  e  $G_{xy}$  al variare dell'angolo  $\theta$ .

Nel caso di tessuti è necessario considerare che le fibre sono disposte lungo due o più direzioni (tessuti multiassiali). Trascurando l'effetto dell'ondulazione del filo dovuto alla tessitura e assumendo il tessuto come costituito da due strati sovrapposti di fibre unidirezionali orientati a  $90^\circ$ , è possibile stimare il modulo di elasticità normale  $E_x$  mediante metodi approssimati nell'ipotesi che non vi siano scorrimenti relativi tra gli strati. Nel caso di un tessuto semplice bilanciato, cioè con la stessa percentuale di fibre nelle due direzioni, l'andamento di  $E_x$  al variare dell'angolo  $\theta$  è mostrato in Figura 6-8.



**Figura 6-8** – Modulo di elasticità normale  $E_x$  al variare dell'angolo di rotazione  $\theta$  per un tessuto semplice bilanciato con diversi valori del modulo  $E_1$  ( $E_2 = E_1$ ;  $G_{12} = 3$  GPa;  $\nu_{12} = 0.35$ )

### 6.2.2 Criteri di rottura

Il comportamento a rottura dei compositi fibrorinforzati è, a livello micromeccanico, un fenomeno particolarmente complesso che dipende da diversi fattori quali la tipologia del carico e le proprietà dei materiali costituenti (fibra, matrice ed interfaccia). Per tale motivo, i criteri di rottura dei materiali compositi sono preferibilmente riferiti ad una scala macromeccanica e basati sull'assunzione di omogeneità. Inoltre, viene ipotizzato un comportamento lineare sino a collasso.

Nel caso di una lamina soggetta ad uno stato piano di tensione, uno dei criteri di rottura più semplici è quello dello sforzo massimo.

Indicando con  $\sigma_{1u,t}$  ( $\sigma_{1u,c}$ ) e  $\sigma_{2u,t}$  ( $\sigma_{2u,c}$ ), rispettivamente, le tensioni di rottura a trazione (a compressione) nelle direzioni di simmetria e con  $\tau_{12u}$  la corrispondente tensione di rottura a taglio, tale criterio si traduce analiticamente nelle seguenti disuguaglianze:

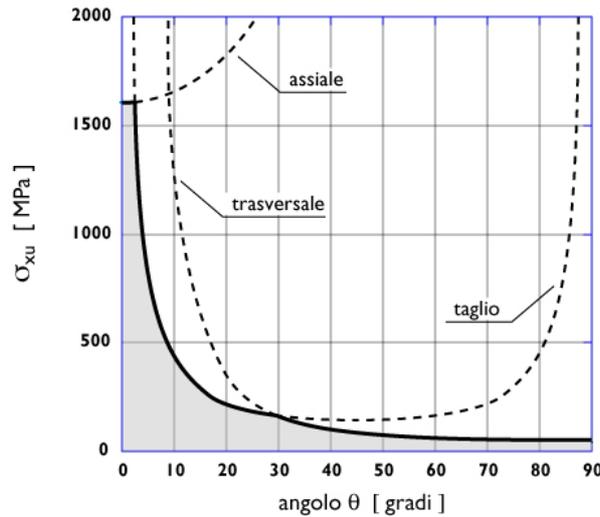
$$\begin{aligned}
 \sigma_1 & \begin{cases} \leq \sigma_{1u,t} & \text{per } \sigma_1 > 0, \\ \geq \sigma_{1u,c} & \text{per } \sigma_1 < 0, \end{cases} \\
 \sigma_2 & \begin{cases} \leq \sigma_{2u,t} & \text{per } \sigma_2 > 0, \\ \geq \sigma_{2u,c} & \text{per } \sigma_2 < 0, \end{cases} \\
 |\tau_{12}| & \leq \tau_{12u}.
 \end{aligned} \tag{6.7}$$

Si osserva che il criterio è indipendente dal segno dello sforzo di taglio ed inoltre non contempla le interazioni tra i diversi modi di rottura. Questi ultimi, infatti, possono manifestarsi l'uno indipendentemente dall'altro.

Con riferimento alla situazione di Figura 6-5, lo sforzo massimo che la lamina è in grado di sopportare è rappresentato dal minore tra i seguenti valori:

$$\begin{aligned}\sigma_{xu} &< \frac{\sigma_{1u}}{\cos^2 \theta}, \\ \sigma_{xu} &< \frac{\sigma_{2u}}{\sin^2 \theta}, \\ \sigma_{xu} &< \frac{\tau_{12u}}{\sin \theta \cdot \cos \theta}.\end{aligned}\tag{6.8}$$

La variazione di tale sforzo in funzione dell'angolo  $\theta$  è diagrammata in Figura 6-9.



**Figura 6-9** – Criterio dello sforzo massimo: sforzo a rottura a trazione al variare dell'angolo di rotazione  $\theta$  per una lamina unidirezionale ( $\sigma_{1u} = 1600$  MPa;  $\sigma_{2u} = 40$  MPa;  $\tau_{12u} = 70$  MPa).

In genere, il criterio dello sforzo massimo è in ragionevole accordo con i dati sperimentali solo per prove condotte a trazione ad angoli inferiori a  $15^\circ$  e superiori a  $45^\circ$ . I valori misurati in compressione sono invece notevolmente superiori.

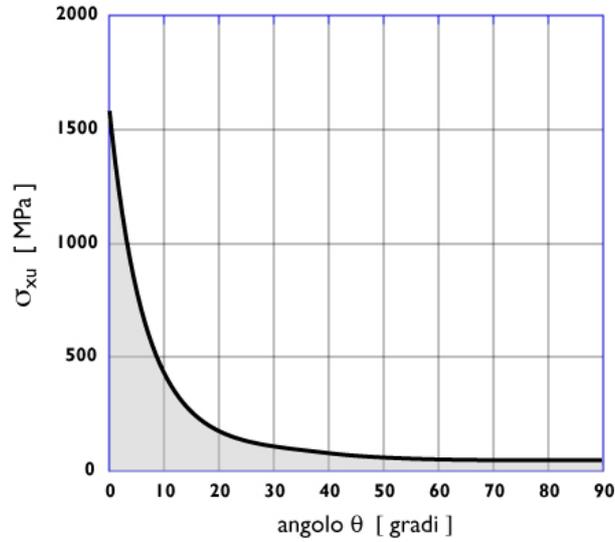
Un altro criterio molto utilizzato per prevedere la rottura di una lamina ed inoltre abbastanza aderente alla realtà è quello di Tsai-Hill, esprimibile nella forma:

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1u}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2u}}\right)^2 - \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\sigma_{1u}^2} + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12u}}\right)^2 \leq 1.\tag{6.9}$$

Sempre con riferimento alla situazione di Figura 6-5, il valore dello sforzo a rottura, al variare dell'angolo  $\theta$ , è fornito dalla seguente relazione:

$$\sigma_{xu} = \left[ \frac{\cos^4 \theta}{\sigma_{1u}^2} + \left( \frac{1}{\tau_{12u}^2} - \frac{1}{\sigma_{1u}^2} \right) \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{\sigma_{2u}^2} \right]^{-1/2}\tag{6.10}$$

ed è diagrammato in Figura 6-10.



**Figura 6-10** – Criterio di Tsai-Hill: sforzo a rottura a trazione al variare dell'angolo di rotazione  $\theta$  per una lamina unidirezionale ( $\sigma_{1u} = 1600$  MPa;  $\sigma_{2u} = 40$  MPa;  $\tau_{12u} = 70$  MPa).

Le considerazioni sopra riportate evidenziano ulteriormente la forte variabilità delle proprietà elastiche e di resistenza dei materiali fibrorinforzati al variare della direzione delle fibre rispetto alla direzione di carico.

## 7 BIBLIOGRAFIA RELATIVA AI CAPITOLI 2 E 6

- [1] Terminologia delle fibre chimiche, *UNITEX* (1994).
- [2] Technical Guide: Kevlar<sup>®</sup> Aramid Fiber, *DuPont* H-77848 4/00.
- [3] S. Rizkalla, T. Hassan, N. Hassan, “Design recommendations for the use of FRP for reinforcement and strengthening of concrete structures”, *Prog. Struct. Engng. Mater.* **5** (2003) 16-28.
- [4] Baldan, “Review: Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials: Adhesives, adhesion theories and surface pre-treatment”, *Journal of Materials Science* **39** (2004) 1-49.
- [5] ACI Committee Report 440.2R-02 “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures”.
- [6] A. Nanni, “North American design guidelines for concrete reinforcement and strengthening using FRP: principles, applications and unresolved issues”, *Construction and Building Materials* **17** (2003) 439–446.
- [7] L. C. Bank, T. R. Gentry, B. P. Thompson, J. S. Russel, “A model specification for FRP composites for civil engineering structures”, *Construction and Building Materials* **17** (2003) 405–437.
- [8] Concise Encyclopedia of Composite Materials, *A. Kelly Ed. Pergamon Press* (1994).
- [9] D. Hull, T. W. Clyne, *An Introduction to Composite Materials, Cambridge University Press* (1996).
- [10] N. L. Hancox, R. M. Mayer, *Design Data for Reinforced Plastics: a Guide for Engineers and Designers, Chapman & Hall* (1994).
- [11] M. Daniel, O. Ishai, *Engineering Mechanics of Composite Materials, Oxford University Press* (1994).
- [12] B. D. Agarwal, L. J. Broutman, *Analysis and performance of Fiber Composites, Wiley-Interscience* (1990).
- [13] P. C. Powell, *Engineering with Fibre-polymer Laminates, Chapman & Hall* (1994).
- [14] R. M. Jones, *Mechanics of Composite Materials, Hemisphere* (1975).

Il presente Documento Tecnico è stato predisposto da un Gruppo di studio così composto:

AIELLO Prof. Maria Antonietta	- Università di Lecce - Lecce
ASCIONE Prof. Luigi	- Università di Salerno - Salerno
BARATTA Prof. Alessandro	- Università "Federico II"- Napoli
BASTIANINI Ing. Filippo	- Università di Bologna - Bologna
BENEDETTI Prof. Andrea	- Università di Bologna - Bologna
BERARDI Ing. Valentino Paolo	- Università di Salerno - Salerno
BORRI Prof. Antonio	- Università di Perugia - Perugia
BRICCOLI BATI Prof. Silvia	- Università di Firenze - Firenze
CERONI Ing. Francesca	- Università del Sannio - Benevento
CERSOSIMO Ing. Giuseppe	- Interbau S.r.l.- Milano
COSENZA Prof. Edoardo	- Università "Federico II"- Napoli
CREDALI Dott. Lino	- Ardea S.r.l. – Casalecchio (BO)
DE LORENZIS Ing. Laura	- Università di Lecce - Lecce
FAELLA Prof. Ciro	- Università di Salerno - Salerno
FEO Prof. Luciano	- Università di Salerno - Salerno
FORABOSCHI Prof. Paolo	- IUAV - Venezia
FRASSINE Prof. Roberto	- Politecnico di Milano - Milano
GATTI Sig.ra Alessandra	- Ruredil S.p.a. - Milano
GIACOMIN Ing. Giorgio	- Maxfor - Quarto d'Altino (VE)
GRANDI Ing. Alberto	- Sika Italia S.p.a. - Milano
IMBIMBO Prof. Maura	- Università di Cassino - Cassino
LA TEGOLA Prof. Antonio	- Università di Lecce - Lecce
LAGOMARSINO Prof. Sergio	- Università di Genova - Genova
LUCIANO Prof. Raimondo	- Università di Cassino - Cassino
MACERI Prof. Franco	- Università "Tor Vergata" - Roma
MAGENES Prof. Guido	- Università di Pavia - Pavia
MANFREDI Prof. Gaetano	- Università "Federico II"- Napoli
MANTEGAZZA Dott. Giovanni	- Ruredil S.p.a. - Milano
MARTINELLI Ing. Enzo	- Università di Salerno - Salerno
MODENA Prof. Claudio	- Università di Padova - Padova
MONTI Prof. Giorgio	- Università "La Sapienza" - Roma
MORANDINI Ing. Giulio	- Mapei S.p.a. - Milano
NANNI Prof. Antonio	- Università "Federico II"- Napoli
NIGRO Prof. Emidio	- Università "Federico II"- Napoli
OLIVITO Prof. Renato Sante	- Università della Calabria - Cosenza
PASCALE Prof. Giovanni	- Università di Bologna - Bologna
PECCE Prof. Maria Rosaria	- Università del Sannio - Benevento
PISANI Prof. Marco Andrea	- Politecnico di Milano - Milano
POGGI Prof. Carlo	- Politecnico di Milano - Milano
PROTA Ing. Andrea	- Università "Federico II"- Napoli
REALFONZO Prof. Roberto	- Università di Salerno - Salerno
ROSATI Prof. Luciano	- Università "Federico II"- Napoli
SACCO Prof. Elio	- Università di Cassino - Cassino
SAVOIA Prof. Marco	- Università di Bologna - Bologna
SPACONE Prof. Enrico	- Università di Chieti - Chieti

Coordinatori:

- per il capitolo sui “Materiali”: FRASSINE Prof. Roberto, POGGI Prof. Carlo;
- per il capitolo sui “Concetti basilari del progetto di rinforzo e problematiche speciali”: MONTI Prof. Giorgio, NANNI Prof. Antonio;
- per il capitolo sulle “Strutture in c.a. e in c.a.p.”: ASCIONE Prof. Luigi, MANFREDI Prof. Gaetano, MONTI Prof. Giorgio;
- per il capitolo sulle “Strutture murarie”: BENEDETTI Prof. Andrea, SACCO Prof. Elio.

Coordinatore generale:

ASCIONE Prof. Luigi.

Segreteria:

FEO Prof. Luciano, ROSATI Prof. Luciano.

Il presente Documento Tecnico è stato approvato in data 13/07/04 dalla “Commissione incaricata di formulare pareri in materia di normativa tecnica relativa alle costruzioni” così composta:

ANGOTTI Prof. Franco	- Università di Firenze - Firenze
ASCIONE Prof. Luigi	- Università di Salerno - Salerno
BARATTA Prof. Alessandro	- Università “Federico II”- Napoli
CECCOLI Prof. Claudio	- Università di Bologna - Bologna
COSENZA Prof. Edoardo	- Università “Federico II”- Napoli
GIANGRECO Prof. Elio	- Università “Federico II”- Napoli
JAPPELLI prof. Ruggiero	- Università “Tor Vergata” - Roma
MACERI Prof. Franco	- Università “Tor Vergata” - Roma
MAZZOLANI Prof. Federico Massimo	- Università “Federico II”- Napoli
PINTO Prof. Paolo Emilio	- Università “La Sapienza” - Roma
POZZATI Prof. Piero	- Università di Bologna - Bologna
SOLARI Prof. Giovanni	- Università di Genova - Genova
URBANO Prof. Carlo	- Politecnico di Milano - Milano
ZANON Prof. Paolo	- Università di Trento - Trento