

**CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE**

COMMISSIONE INCARICATA DI FORMULARE PARERI IN MATERIA  
DI NORMATIVA TECNICA RELATIVA ALLE COSTRUZIONI

**Studi Preliminari finalizzati alla redazione di**  
**Istruzioni**  
**per Interventi di Consolidamento Statico di**  
**Strutture Metalliche**  
**mediante l'utilizzo di**  
**Compositi Fibrorinforzati**

**CNR-DT 202/2005**

**Proprietà letteraria riservata**  
**del**

**Consiglio Nazionale delle Ricerche**

## INDICE

|          |                                                                                            |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>PREMESSA .....</b>                                                                      | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>INTRODUZIONE .....</b>                                                                  | <b>3</b>  |
| 2.1      | GENERALITÀ .....                                                                           | 3         |
| 2.2      | SCOPO E CONTENUTO DEL DOCUMENTO .....                                                      | 4         |
| 2.3      | SIMBOLOGIA .....                                                                           | 5         |
| <b>3</b> | <b>CONCETTI BASILARI DEL RINFORZO CON FRP E PROBLEMI SPECIALI .....</b>                    | <b>7</b>  |
| 3.1      | PRINCIPI GENERALI .....                                                                    | 7         |
| 3.2      | COEFFICIENTI PARZIALI .....                                                                | 8         |
| 3.2.1    | Generalità .....                                                                           | 8         |
| 3.2.1.1  | Coefficienti parziali del substrato metallico ( $\gamma_s$ ) .....                         | 8         |
| 3.2.1.2  | Coefficienti parziali del rinforzo di FRP ( $\gamma_f$ ) .....                             | 9         |
| 3.2.1.3  | Coefficienti parziali dell'adesivo/interfaccia ( $\gamma_a$ ) .....                        | 9         |
| 3.2.1.4  | Coefficienti parziali per le incertezze di modello ( $\gamma_{rd}$ ) .....                 | 9         |
| 3.3      | PROBLEMI SPECIALI DI PROGETTO E RELATIVI FATTORI DI<br>CONVERSIONE .....                   | 9         |
| 3.3.1    | Azioni ambientali e fattore di conversione ambientale ( $\eta_a$ ) .....                   | 9         |
| 3.3.2    | Modalità di carico e fattore di conversione per effetti di lunga durata ( $\eta_l$ ) ..... | 11        |
| 3.3.3    | Resistenza alle azioni causate da impatto ed esplosione .....                              | 12        |
| 3.3.4    | Resistenza alle azioni causate da atti vandalici .....                                     | 12        |
| 3.3.5    | Limiti del rinforzo nel caso di esposizione al fuoco .....                                 | 12        |
| <b>4</b> | <b>RINFORZO DI ELEMENTI TESI .....</b>                                                     | <b>14</b> |
| 4.1      | GENERALITÀ .....                                                                           | 14        |
| 4.2      | RIPRISTINO DELLA CAPACITÀ PORTANTE ULTIMA DI ELEMENTI<br>DANNEGGIATI .....                 | 14        |
| 4.3      | INCREMENTO DEL CARICO ULTIMO DI ELEMENTI NON DANNEGGIATI .....                             | 15        |
| 4.4      | STATI LIMITE DI ESERCIZIO .....                                                            | 16        |
| <b>5</b> | <b>RINFORZO DI ELEMENTI INFLESSI .....</b>                                                 | <b>17</b> |
| 5.1      | MODALITÀ DI CRISI .....                                                                    | 17        |
| 5.2      | FONDAMENTI DEL CALCOLO .....                                                               | 19        |
| 5.3      | STATI LIMITE DI ESERCIZIO .....                                                            | 20        |
| 5.3.1    | Stato della struttura all'atto del rinforzo .....                                          | 20        |
| 5.3.2    | Verifiche relative al materiale di supporto .....                                          | 20        |
| 5.3.3    | Verifiche relative al composito fibrorinforzato .....                                      | 20        |
| 5.3.3.1  | Tensioni locali .....                                                                      | 20        |
| 5.4      | STATI LIMITE ULTIMI .....                                                                  | 20        |
| 5.4.1    | Stato della struttura all'atto del rinforzo .....                                          | 20        |
| 5.4.2    | Momento resistente .....                                                                   | 21        |
| 5.4.2.1  | Fondamenti del calcolo .....                                                               | 21        |
| 5.4.2.2  | Substrato di metallo duttile .....                                                         | 22        |
| 5.4.2.3  | Substrato di metallo fragile .....                                                         | 23        |
| <b>6</b> | <b>VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA ALLA DELAMINAZIONE .....</b>                               | <b>24</b> |
| 6.1      | GENERALITÀ .....                                                                           | 24        |
| 6.2      | APPROCCIO AGLI SFORZI .....                                                                | 25        |
| 6.2.1    | Calcolo delle tensioni tangenziali nello strato adesivo .....                              | 27        |

|           |                                                                        |           |
|-----------|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.2.2     | Calcolo delle tensioni normali nello strato adesivo.....               | 29        |
| 6.2.3     | Verifica della resistenza alla delaminazione .....                     | 30        |
| <b>7</b>  | <b>RINFORZO DI ELEMENTI SOGGETTI A FATICA .....</b>                    | <b>32</b> |
| 7.1       | MODALITÀ DI COLLASSO PER FATICA .....                                  | 32        |
| 7.2       | DELAMINAZIONE PER FATICA DEL RINFORZO.....                             | 32        |
| 7.3       | DANNEGGIAMENTO A FATICA DEL METALLO .....                              | 32        |
| 7.3.1     | Generalità .....                                                       | 32        |
| 7.3.2     | Fondamenti del calcolo.....                                            | 34        |
| 7.3.3     | Dimensionamento del rinforzo a fatica .....                            | 36        |
| <b>8</b>  | <b>INSTALLAZIONE, CONTROLLO E MANUTENZIONE .....</b>                   | <b>38</b> |
| 8.1       | GENERALITÀ .....                                                       | 38        |
| 8.2       | RACCOMANDAZIONI PER L'INSTALLAZIONE .....                              | 38        |
| 8.2.1     | Generalità .....                                                       | 38        |
| 8.2.2     | Preparazione della superficie del substrato .....                      | 38        |
| 8.2.3     | Particolari costruttivi .....                                          | 39        |
| 8.3       | CONTROLLO DELL'ESECUZIONE .....                                        | 40        |
| 8.3.1     | Generalità .....                                                       | 40        |
| 8.3.2     | Prove semi-distruttive.....                                            | 41        |
| 8.3.3     | Prove non-distruttive .....                                            | 41        |
| 8.3.4     | Qualifica degli operatori per l'esecuzione delle prove.....            | 42        |
| 8.4       | SUGGERIMENTI PER LA MANUTENZIONE.....                                  | 42        |
| <b>9</b>  | <b>APPENDICE A.....</b>                                                | <b>44</b> |
| 9.1       | RASSEGNA DELLE PRINCIPALI APPLICAZIONI SU STRUTTURE<br>ESISTENTI.....  | 44        |
| 9.1.1     | Ponte Hythe .....                                                      | 44        |
| 9.1.2     | Ponte Tickford .....                                                   | 45        |
| 9.1.3     | Ponte Slattocks Canal .....                                            | 45        |
| 9.1.4     | Ponte Acton .....                                                      | 45        |
| 9.1.5     | Ponte King Street.....                                                 | 45        |
| 9.1.6     | Ponte Corona .....                                                     | 46        |
| 9.1.7     | Strutture compresse di una galleria della metropolitana di Londra..... | 46        |
| 9.1.8     | Ponte Christina Creek.....                                             | 46        |
| 9.2       | STATO DELL'ARTE: SPERIMENTAZIONI .....                                 | 48        |
| 9.2.1     | Crisi per delaminazione .....                                          | 49        |
| 9.2.2     | Rinforzo a flessione .....                                             | 49        |
| 9.2.3     | Rinforzo a fatica .....                                                | 50        |
| 9.2.4     | Rinforzo di elementi compressi.....                                    | 50        |
| <b>10</b> | <b>APPENDICE B: RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....</b>                    | <b>51</b> |

## 1 PREMESSA

Il presente documento tecnico concerne il rinforzo di strutture metalliche mediante compositi fibrorinforzati e si affianca alle Istruzioni contenute nel CNR-DT 200/2004.

Fra i metalli presi in esame si comprendono sia gli acciai più moderni sia le leghe più datate, come la ghisa grigia o il ferro puddellato, con le quali sono state realizzate diverse strutture ancor oggi in esercizio.

Benché sia organizzato in Principi e Regole, nello stile degli Eurocodici, come il già citato CNR-DT 200/2004, lo scopo principale del documento è la divulgazione, all'interno della Comunità tecnico-professionale, delle conoscenze necessarie per l'impiego dei materiali compositi fibrorinforzati (FRP) nel consolidamento statico di strutture metalliche e l'individuazione degli interventi che a tutt'oggi si possono ritenere idonei e di sicura efficacia.

A tale proposito si segnala l'analoga iniziativa di Enti di ricerca inglesi per la definizione di linee guida per il rinforzo di strutture metalliche mediante compositi FRP (CIRIA 2004, ICE 2001).

È ben noto che l'attuale stato dell'arte sull'argomento è meno avanzato di quello relativo alle costruzioni di c.a. o alle murature ed è in grado di fornire un'adeguata risposta solo ad un esiguo numero di problemi relativi ad alcune specifiche applicazioni.

Il lavoro rappresenta solo un primo passo verso il rilascio di Istruzioni progettuali, che potrà avvenire non appena gli studi teorici e sperimentali, in corso in campo internazionale, consentiranno di raggiungere una conoscenza più completa sull'argomento ed universalmente condivisa.

In tale ottica il documento risulta utile per l'identificazione di problemi ancora aperti, sui quali la Comunità scientifica potrà concentrarsi nei prossimi anni, agendo in tal modo da catalizzatore e indirizzo per gli studi nel settore, in particolare per quanto attiene alla crisi per delaminazione, al comportamento strutturale di elementi snelli nei riguardi della stabilità euleriana, agli effetti termici (rilevanti sui ponti metallici) ed all'esposizione prolungata alle radiazioni UV.

Nell'attuale versione il documento richiama dal CNR-DT 200/2004, completandoli opportunamente, alcuni concetti basilari del rinforzo con FRP limitatamente ad elementi tesi ed inflessi ed ai problemi speciali ad essi attinenti.

Sono inoltre trattati alcuni aspetti particolari della delaminazione e del rinforzo con FRP di membrature metalliche danneggiate a fatica.

Il documento comprende infine due Appendici nelle quali sono riportate, rispettivamente, le principali applicazioni effettuate in campo internazionale nonché i riferimenti bibliografici, suddivisi per argomenti.

Il documento fa seguito alla più recente evoluzione degli studi sull'argomento sviluppati in campo internazionale ed in particolare ad una serie di programmi scientifici che hanno meritato il finanziamento dei più importanti enti di ricerca italiani tra i quali il MIUR ed il 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 alcuni degli autori del presente documento, sia in qualità di coordinatori nazionali che di coordinatori locali di singole unità di ricerca.

Si segnala che l'insieme di principi e regole fornito nel documento non va interpretato come norma cogente ma rappresenta esclusivamente un aiuto per i tecnici a filtrare con discrezione l'ampia bibliografia, nazionale ed internazionale, che la letteratura specifica mette a disposizione, lasciando comunque ad essi la responsabilità finale delle scelte operate.

Si segnala, inoltre, esplicitamente l'opportunità per il lettore non esperto di materiali compositi di consultare, preventivamente, il primo capitolo e l'appendice A del CNR-DT 200/2004.

**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;
- 2003-2005 Ricerca dal titolo "Strutture in materiale composito" (Coordinatore: prof. Franco Maceri) nell'ambito del Progetto Strategico MIUR (legge 449/97) dal titolo "Materiali compositi per applicazione 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.

## 2 INTRODUZIONE

### 2.1 GENERALITÀ

Il patrimonio edilizio del nostro Paese comprende diversi esempi di costruzioni ad ossatura metallica, soprattutto tra quelle destinate ad ospitare attività di tipo industriale.

Come inevitabilmente accade anche per le altre tipologie strutturali, molte di esse necessitano di interventi di riabilitazione dovuti a difetti progettuali, a degrado di elementi portanti, a variazioni delle destinazioni d'uso.

In svariate situazioni però risulta conveniente l'impiego di rinforzi realizzati con compositi fibrorinforzati, cui il presente documento tecnico è specificamente dedicato.

In particolare il patrimonio architettonico storico italiano è ricco di significativi esempi in carpenteria metallica. Essi hanno avuto un ruolo essenziale nella crescita della civiltà industriale e hanno dato impulso allo sviluppo della teoria delle strutture ed agli studi sulla resistenza dei materiali.

Nelle prime realizzazioni si adoperarono ghisa grigia e/o ferro forgiato (o ferro lavorato o puddellato) che ebbero successivamente rapido sviluppo con l'evoluzione delle tecniche di fusione del minerale di ferro.

La principale motivazione culturale che spinge ad eseguire il restauro delle più antiche costruzioni metalliche, a garanzia della funzionalità strutturale, è la necessità di conservarne le origini storiche e di preservare i valori paesaggistici dei luoghi in cui la costruzione è inserita. Per i suddetti motivi, l'intervento deve porsi come scopo il mantenimento dell'originaria concezione strutturale.

I ricorrenti tipi di danno in tali strutture sono soprattutto legati alle caratteristiche dei materiali.

La ghisa grigia presenta spesso rotture da impatto, attesa la sua fragilità, e lesioni provocate da sbalzi termici, i quali inducono ripetutamente tensioni di trazione in un materiale dotato di bassa resistenza nei confronti di tale sollecitazione.

Elementi sottoposti a trazione, realizzati in passato con ferro forgiato capace di resistere a tale sollecitazione, presentano spesso riduzioni della sezione resistente a causa della corrosione.

I ponti con struttura di acciaio, della seconda metà del XIX secolo e della prima metà del XX secolo, rappresentano una parte consistente dei ponti veicolari, soprattutto ferroviari, ancora in servizio. La mancanza di un'adeguata manutenzione, la corrosione e i dettagli strutturali sensibili al fenomeno della fatica sono le cause più diffuse di degrado.

Inoltre, l'aumento del traffico rende spesso necessario l'adeguamento delle strutture esistenti ai nuovi carichi di esercizio. A confronto con la demolizione e la ricostruzione, l'adeguamento richiede generalmente costi inferiori, anche da un punto di vista sociale.

Attualmente, i metodi di rinforzo utilizzati per ripristinare o aumentare la capacità portante di strutture metalliche si basano sull'applicazione di piatti di acciaio da bullonare o saldare alla struttura originaria. Alcuni di essi presentano però aspetti negativi. I piatti di acciaio introducono, ad esempio, ulteriori carichi permanenti e sono essi stessi esposti a fenomeni di corrosione e fatica. La saldatura può risultare, inoltre, in molti casi problematica se non impraticabile (ad esempio nel caso di ghise o acciai storici).

Le operazioni di rinforzo di esistenti strutture veicolari metalliche devono essere progettate nell'ottica di ridurre drasticamente le fasi di lavoro che comportino interruzione di traffico.

Alcune difficoltà, legate all'uso di tecniche tradizionali, sono superabili con l'introduzione dei materiali compositi fibrorinforzati. Gli FRP presentano un elevato rapporto resistenza/peso, superiore a quello dell'acciaio, sono molto resistenti nei confronti della corrosione, se non del tutto esenti da questa, ed estremamente maneggevoli.

L'uso di tali materiali per il rinforzo delle strutture metalliche non è, allo stato attuale, altrettanto sviluppato come nel caso delle strutture di calcestruzzo o di muratura. Infatti, l'attenzione dei ricercatori si è finora concentrata solo su alcuni dei possibili interventi e precisamente:

- interventi su elementi chiodati per contrastare l'evoluzione del quadro fessurativo dovuto alla fatica;
- interventi su elementi tesi, oppure su zone tese di elementi strutturali pressoinflessi, per il contenimento delle tensioni di esercizio, a fronte di un aumento dei carichi agenti, oppure a fronte di una riduzione della sezione retta resistente per effetto di corrosione. L'eventuale pretensione della lamina di FRP prima dell'incollaggio consente, in particolare, di ridurre le trazioni di esercizio nell'elemento originario senza dover preventivamente desollecitare quest'ultimo in tutto o in parte.

L'uso di FRP risulta conveniente anche nelle più vecchie costruzioni metalliche, poiché le proprietà meccaniche dei materiali compositi ben si integrano con quelle della ghisa grigia. La notevole resistenza a trazione degli FRP, nella direzione delle fibre, e l'eventuale ricorso alla tecnica della pretensione suppliscono infatti alla modesta resistenza a trazione della ghisa grigia.

I compositi si applicano su strutture di acciaio per incollaggio di strati di tessuto sovrapposti *in situ*, intervallati da resine termoindurenti, oppure di lamine pultruse, eventualmente pretese. In tutti i casi, particolare attenzione deve essere rivolta all'efficacia dell'incollaggio.

Per quanto attiene alla scelta del tipo di fibra, quelle di carbonio risultano spesso le più idonee dal momento che presentano valori del modulo di elasticità normale prossimi a quello dell'acciaio. Lo stesso non accade per le fibre di vetro o per quelle aramidiche.

La scelta delle fibre di carbonio comporta però la necessità di un elemento isolante, da interporre fra il rinforzo e la membratura, per impedire il fenomeno della corrosione galvanica, assente nel caso delle fibre di vetro e di aramide.

I lavori di ricerca e le esperienze pratiche documentate in letteratura dimostrano che l'uso degli FRP per il rinforzo di strutture metalliche è versatile ed affidabile e, perciò, in costante aumento.

## **2.2 SCOPO E CONTENUTO DEL DOCUMENTO**

Scopo del presente documento è quello di rappresentare l'attuale stato dell'arte sulla progettazione, sull'esecuzione e sul controllo di interventi di consolidamento di strutture metalliche mediante compositi fibrorinforzati, in vista di una successiva redazione di apposite Istruzioni.

Gli argomenti trattati nel seguito sono:

- concetti basilari del rinforzo con FRP e problemi speciali;
- rinforzo di elementi tesi;
- rinforzo di elementi inflessi;
- resistenza alla delaminazione;
- rinforzo a fatica;
- installazione, controllo e manutenzione.

Il documento comprende due Appendici, di cui una dedicata ad una breve rassegna delle principali applicazioni in ambito nazionale ed internazionale, e l'altra recante i principali riferimenti bibliografici reperibili nella letteratura tecnica e distinti per argomenti.

La trattazione degli argomenti è sviluppata 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; 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*.

## 2.3 SIMBOLOGIA

### Notazioni generali

- $(.)_a$  valore della grandezza  $(.)$  riferita all'adesivo
- $(.)_d$  valore di progetto (o di calcolo) della grandezza  $(.)$
- $(.)_f$  valore della grandezza  $(.)$  riferita al composito fibrorinforzato
- $(.)_k$  valore caratteristico della grandezza  $(.)$
- $(.)_R$  valore della grandezza  $(.)$  intesa come resistenza
- $(.)_s$  valore della grandezza  $(.)$  riferita al metallo
- $(.)_S$  valore della grandezza  $(.)$  intesa come sollecitazione

### Lettere romane maiuscole

- $A_s$  area della sezione del substrato metallico
- $A_f$  area del rinforzo di FRP
- $E_s$  modulo di elasticità normale del substrato metallico
- $E_f$  modulo di elasticità normale del rinforzo di FRP
- $G_a$  modulo di elasticità tangenziale dell'adesivo
- $I$  momento di inerzia della sezione omogeneizzata
- $I_s$  momento di inerzia del substrato metallico rispetto al proprio asse baricentrico, parallelo all'asse neutro della sezione rinforzata
- $I_f$  momento di inerzia del rinforzo di FRP rispetto al proprio asse baricentrico, parallelo all'asse neutro della sezione rinforzata
- $M_{Rd}$  valore di progetto del momento resistente
- $M_{Sd}$  valore di progetto del momento flettente sollecitante
- $N_{Sd}$  valore di progetto dello sforzo normale sollecitante
- $S_e$  momento statico, rispetto all'asse neutro, della porzione di sezione omogeneizzata che sottende tale asse
- $T$  temperatura

### Lettere romane minuscole

- $f_{ak}$  valore caratteristico della resistenza dell'adesivo
- $f_{fd}$  valore di progetto della resistenza del composito fibrorinforzato per tensioni normali
- $f_{fk}$  valore caratteristico della tensione di rottura del materiale di rinforzo
- $f_{yk}$  valore caratteristico della tensione di snervamento nel caso di metallo duttile
- $f_{yd}$  valore di progetto della tensione di snervamento nel caso di metallo duttile
- $f_{uk}$  valore caratteristico della tensione di rottura
- $f_{sk,sup}$  valore caratteristico superiore (frattile 95%) della tensione di snervamento nel caso di metallo duttile o della tensione di rottura nel caso di metallo fragile
- $b_f$  larghezza del rinforzo di FRP
- $d$  altezza utile della sezione

|       |                                                                                         |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| $t_f$ | spessore del rinforzo di FRP                                                            |
| $t_s$ | spessore del substrato metallico                                                        |
| $x_e$ | profondità dell'asse neutro, misurata dal lembo compresso, per la sezione omogeneizzata |

**Lettere greche maiuscole**

|              |                                                                                      |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| $K_{eff}$    | fattore di intensificazione delle tensioni nei problemi di fatica                    |
| $K_{eff,th}$ | valore di soglia di $K_{eff}$ per la propagazione della frattura                     |
| $Y$          | fattore adimensionalizzato di intensificazione delle tensioni nei problemi di fatica |

**Lettere greche minuscole**

|                     |                                                                                     |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha_f$          | coefficiente di dilatazione termica del rinforzo                                    |
| $\alpha_s$          | coefficiente di dilatazione termica del substrato                                   |
| $\gamma$            | coefficiente parziale                                                               |
| $\gamma_{Rd}$       | coefficiente parziale per le incertezze del modello di resistenza                   |
| $\varepsilon_0$     | deformazione del substrato metallico prima del rinforzo                             |
| $\varepsilon^{(t)}$ | deformazione a trazione                                                             |
| $\varepsilon^{(c)}$ | deformazione a compressione                                                         |
| $\varepsilon_{fa}$  | deformazione all'interfaccia rinforzo-adesivo                                       |
| $\varepsilon_{sa}$  | deformazione all'interfaccia metallo-adesivo                                        |
| $\chi$              | curvatura                                                                           |
| $\eta$              | fattore di conversione                                                              |
| $\eta_a$            | fattore di conversione ambientale                                                   |
| $\eta_l$            | fattore di conversione per effetti di lunga durata                                  |
| $\sigma_0$          | tensione nel substrato metallico prima del rinforzo                                 |
| $\sigma_f$          | tensione normale nel rinforzo                                                       |
| $\sigma_{fp}$       | pretensione nel rinforzo di FRP                                                     |
| $\sigma_s$          | tensione normale nel substrato metallico                                            |
| $\sigma_{sp}$       | tensione normale nel substrato metallico indotta da pretensione nel rinforzo di FRP |
| $\tau_{fk}$         | valore caratteristico della resistenza a taglio del rinforzo di FRP                 |

## 3 CONCETTI BASILARI DEL RINFORZO CON FRP E PROBLEMI SPECIALI

### 3.1 PRINCIPI GENERALI

(1)P Allo stato attuale delle conoscenze, gli scopi che possono conseguirsi con l'applicazione di rinforzi di FRP alle strutture metalliche sono i seguenti:

- incremento o ripristino della resistenza a trazione di elementi tesi;
- incremento o ripristino della resistenza a flessione di elementi inflessi;
- incremento della resistenza a fatica.

Studi recenti indicano anche la possibilità di incrementare o ripristinare la capacità portante di elementi snelli compressi. Tuttavia, gli studi disponibili, sia teorici che sperimentali (Appendice B), non risultano ancora sufficienti, per numero e per casi esaminati, ad individuare protocolli sicuramente affidabili di progetto e verifica.

(2)P Gli interventi di rinforzo trattati nel presente documento consistono nell'applicazione di FRP, in forma di lamine pultruse o tessuti impregnati, sulla superficie esterna di elementi strutturali.

(3)P La progettazione degli interventi di rinforzo deve mirare, in linea generale, ad assicurare uno stato di trazione nei rinforzi di FRP per effetto delle azioni esterne di progetto. Infatti, in tal caso, i rinforzi di FRP possono avere piena funzionalità in ausilio alla trazione presente nel metallo a cui sono applicati. L'uso di FRP in zona compressa è attualmente sconsigliato soprattutto per la mancanza di adeguate modellazioni e sperimentazioni relative al fenomeno della delaminazione in presenza di tensioni di compressione.

(4)P Per le strutture metalliche rinforzate con FRP e soggette a sollecitazioni cicliche alternate, quali ad esempio quelle derivanti da variazioni termiche, l'adesione metallo-FRP può deteriorarsi nel tempo. Per mitigare tale rischio si può ricorrere all'applicazione di connessioni meccaniche aggiuntive lungo lo sviluppo del rinforzo.

(5)P I rinforzi di FRP devono applicarsi su elementi strutturali di adeguate caratteristiche. Qualora il metallo sia interessato da un avanzato stato di corrosione, si deve procedere ad una completa asportazione degli ossidi fino a far affiorare il "metallo vivo", avendo cura di ripristinare opportunamente il profilo originario del supporto.

(6)P Il composito fibrorinforzato deve essere scelto in modo che risulti compatibile con le condizioni ambientali (temperatura, umidità, radiazioni UV, etc), evitando in particolare la formazione di correnti galvaniche.

(7)P Gli interventi con FRP in ordine a problemi di fatica e quelli che ricorrono alla tecnica della pretensione devono tener in conto lo scorrimento viscoso dell'adesivo. Se necessario, in casi particolari, è possibile integrare il collegamento tra FRP e metallo con eventuali connessioni meccaniche permanenti.

(8)P Le strutture metalliche esistenti possono rinforzarsi mediante FRP solo quando la struttura originaria è verificata allo stato limite ultimo (SLU) considerando le azioni di calcolo relative alla combinazione quasi permanente (come definita dalla Normativa vigente) con i valori dei coefficienti parziali per situazioni eccezionali.

(9)P Nel progetto si deve mettere in conto l'eventuale danneggiamento o degrado accidentale che il rinforzo può subire nelle condizioni normali di esercizio, eventualmente predisponendo sistemi di protezione.

(10)P Qualora il rinforzo strutturale riguardi costruzioni di interesse storico o monumentale, occorre fornire una specifica giustificazione sull'indispensabilità, improrogabilità e compatibilità con la struttura esistente dell'intervento, in coerenza con i consolidati principi del Restauro. A tali costruzioni non va applicato il requisito di cui al precedente punto (8)P.

## 3.2 COEFFICIENTI PARZIALI

### 3.2.1 Generalità

(1)P I valori delle grandezze associate alle proprietà dei materiali e dei prodotti usati nel rinforzo devono essere determinati in accordo con le indicazioni fornite nel documento CNR-DT 200/2004, al quale si rinvia.

(2)P In particolare, la resistenza di calcolo di un elemento strutturale metallico rinforzato con FRP si può esprimere come:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot R\{X_{d,i}; a_{d,i}\} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot R\left\{\eta \cdot \frac{X_{k,i}}{\gamma_{m,i}}; a_{d,i}\right\}, \quad (3.1)$$

dove  $R\{\}$  è una opportuna funzione riconducibile allo specifico modello meccanico considerato (ad esempio quello per la trazione, per la flessione, per l'ancoraggio, ecc.) e  $\gamma_{Rd}$  è un coefficiente parziale che tiene conto delle incertezze insite nel suddetto modello di resistenza. Come argomenti della funzione  $R\{\}$  figurano, in generale, i valori di calcolo,  $X_{d,i}$ , dei materiali/prodotti usati per il rinforzo oppure dei materiali preesistenti, ed i valori nominali,  $a_{d,i}$ , dei parametri geometrici introdotti nel modello. Inoltre  $\eta$  è un fattore di conversione che tiene conto, in maniera moltiplicativa, di problemi speciali di progetto e  $\gamma_{m,i}$  è il coefficiente parziale dell'*i*-esimo materiale o dell'*i*-esimo prodotto.

#### 3.2.1.1 Coefficienti parziali del substrato metallico ( $\gamma_s$ )

(1)P Se il substrato è costituito da un metallo per il quale sia vigente una specifica Normativa, si possono applicare i coefficienti parziali in essa suggeriti.

(2)P In linea generale, il coefficiente parziale di un metallo duttile (acciaio, ferro 'antico') è diverso da quello di un metallo fragile (ghisa grigia). Nel caso di metallo fragile, in relazione alle conseguenze della crisi, vanno adottati valori più elevati di tale coefficiente.

(3) E' ben noto che le strutture di metallo fragile venivano progettate con il metodo delle tensioni ammissibili. La verifica con il metodo degli stati limite, seguita nel presente documento, richiede l'adozione di un coefficiente parziale del materiale. Nel caso di substrato duttile si adottano le indicazioni fornite dalla Normativa vigente. Nel caso di ferro 'antico' e di ghisa grigia si rinvia ad opportune indagini sperimentali.

### 3.2.1.2 Coefficienti parziali del rinforzo di FRP ( $\gamma_f$ )

(1)P I coefficienti parziali dei materiali compositi fibrorinforzati dipendono anche dal metodo di applicazione e dalla qualità dell'esecuzione. Con riferimento al documento CNR-DT 200/2004, per gli stati limite ultimi, si suggeriscono i valori indicati in Tabella 3-1:

**Tabella 3-1** – Coefficienti parziali  $\gamma_f$  per gli stati limite ultimi.

| Applicazione tipo A | Applicazione tipo B |
|---------------------|---------------------|
| 1.10                | 1.25                |

dove per Applicazioni di tipo A e di tipo B si intendono quelle sotto definite.

|                        |                                                                                                                         |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Applicazioni di tipo A | Sistemi di rinforzo di cui sono certificati sia i materiali che il sistema completo applicato ad un substrato definito. |
| Applicazioni di tipo B | Sistemi di rinforzo di cui sono certificati solo i materiali.                                                           |

(2) Per gli stati limite di esercizio si può utilizzare il valore  $\gamma_f = 1$ .

### 3.2.1.3 Coefficienti parziali dell'adesivo/interfaccia ( $\gamma_a$ )

(1)P I coefficienti parziali dell'adesivo/interfaccia, utilizzato per incollare il rinforzo al substrato, dipendono anche dal metodo di applicazione e dalla qualità dell'esecuzione. Particolare importanza per la definizione del coefficiente ha il controllo dello spessore dello strato adesivo. Si assume che nell'applicazione di tipo A sia previsto un controllo dello spessore dello strato adesivo. Per gli stati limite ultimi si suggeriscono i valori indicati in Tabella 3-2.

**Tabella 3-2** – Coefficienti parziali  $\gamma_a$  per gli stati limite ultimi.

| Applicazione tipo A | Applicazione tipo B |
|---------------------|---------------------|
| 1.20                | 1.50                |

### 3.2.1.4 Coefficienti parziali per le incertezze di modello ( $\gamma_{Rd}$ )

(1) I valori suggeriti per i coefficienti parziali  $\gamma_{Rd}$  dei diversi modelli di resistenza sono riportati nella Tabella 3-3.

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

| Modello di resistenza | $\gamma_{Rd}$ |
|-----------------------|---------------|
| Pressoflessione       | 1.00          |
| Taglio e torsione     | 1.00          |
| Delaminazione         | 1.20          |
| Fatica                | 1.20          |

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

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

### 3.3.1 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 di FRP degradano in presenza di determinate condi-

zioni ambientali: ambiente alcalino, umidità (acqua e soluzioni saline), temperature estreme, cicli termici, cicli di gelo e disgelo, radiazioni ultraviolette (UV).

(2) Effetti da ambiente alcalino. Il danneggiamento della resina dovuto all'attacco di alcali è in genere più grave di quello dovuto all'umidità. È 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 gli effetti osmotici possono causare la formazione di bolle nella resina, è consigliabile l'uso di rivestimenti protettivi.

(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 di 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 di possibili distacchi fra queste. 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 microfratture 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 a base di FRP, nonostante alcune resine possano rivelare, 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 a base di 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 alcuni tipi di materiale e condizioni di esposizione, i 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  $\eta_a \leq 1$ ) 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 del periodo di utilizzazione del sistema a base di FRP.

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

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

### 3.3.2 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 a base di FRP degradano per l'effetto della viscosità, del rilassamento e della fatica.

(2) Effetti di viscosità e rilassamento. In un sistema a base di 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 a base di fibre di carbonio sono i meno suscettibili ai fenomeni di 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 a base di 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, contrastano in modo efficace la formazione di fessure. Inoltre, la propagazione di eventuali fessure presenti è ostacolata dall'azione esplicata dalle fibre presenti nelle zone adiacenti.

(4) Per evitare la crisi del rinforzo di FRP sotto tensioni prolungate nel tempo, ovvero in condizioni di carico ciclico, possibili valori da attribuire al fattore di conversione  $\eta_l$  nelle verifiche agli stati limite di esercizio, sono suggeriti in Tabella 3-5. In presenza sia di carico persistente 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  $\eta_l$  per vari sistemi di FRP.

| Modalità di carico                        | Tipo di fibra / resina  | $\eta_l$ |
|-------------------------------------------|-------------------------|----------|
| Persistente<br>(viscosità e rilassamento) | Vetro / Epossidica      | 0.30     |
|                                           | Arammidica / Epossidica | 0.50     |
|                                           | Carbonio / Epossidica   | 0.80     |
| Ciclico<br>(fatica)                       | Tutte                   | 0.50     |

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

(1) Il comportamento dei sistemi a base di 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.

### 3.3.4 Resistenza alle azioni causate da atti vandalici

(1)P I materiali compositi fibrorinforzati sono particolarmente sensibili all'incisione ed alla lacerazione prodotte da strumenti da taglio.

(2) Nelle applicazioni di rinforzo in ambienti aperti al pubblico si suggerisce di predisporre adeguate misure di protezione del sistema di rinforzo. Va comunque verificata la sicurezza dell'elemento strutturale facendo riferimento alla situazione successiva ad un eventuale atto vandalico, in assenza di rinforzo. A tal fine, nei confronti dello SLU, si adotta la combinazione di azioni per situazioni quasi permanenti con i valori dei coefficienti parziali dei materiali per situazioni eccezionali.

### 3.3.5 Limiti del rinforzo nel caso di esposizione al fuoco

(1)P I materiali compositi fibrorinforzati 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 di FRP diminuiscono drasticamente. Nei casi di FRP applicato esternamente su elementi metallici, l'esposizione ad elevate temperature produce, inoltre, un rapido deterioramento dell'aderenza FRP-substrato, con conseguente delaminazione del composito e perdita di efficacia del rinforzo.

(2) In condizioni di esposizione al fuoco, le proprietà meccaniche di sistemi a base di 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. È comunque consigliato l'impiego di sistemi di isolamento certificati. Ulteriori specifiche sull'applicazione dei sistemi protettivi sono contenute nel documento CNR-DT 200/2004.

(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'effetto dell'azione termica indiretta viene indicato con il simbolo  $E_d$ .

- Situazione eccezionale in presenza del rinforzo ( $E_d \neq 0$ ), 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, come previsto dalla Normativa vigente (per il composito fibrorinforzato e per l'adesivo  $\gamma_f = 1$ ;  $\gamma_a = 1$ ).

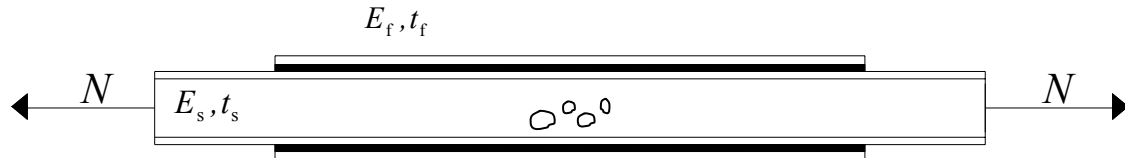


- Situazione successiva all'evento eccezionale ( $E_d = 0$ ), in assenza di rinforzo. In questo caso sono da considerare le azioni sulla struttura per la combinazione quasi permanente. Le capacità degli elementi, opportunamente ridotte per tener conto del tempo di esposizione al fuoco, sono da calcolare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

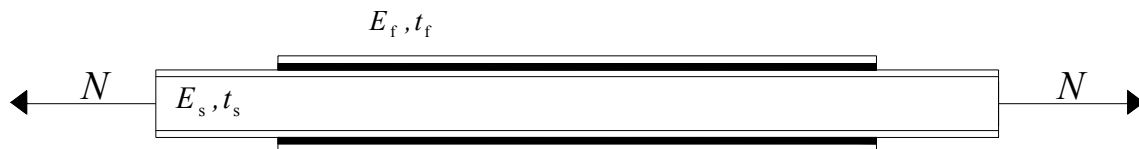
## 4 RINFORZO DI ELEMENTI TESI

### 4.1 GENERALITA'

(1)P Il presente capitolo tratta del rinforzo di elementi tesi di metallo mediante FRP. Il rinforzo può essere applicato sia per il ripristino della capacità portante di elementi parzialmente corrosi (Figura 4-1) sia per l'incremento del carico ultimo di elementi integri (Figura 4-2).



**Figura 4-1** – Elemento teso con sezione originaria parzialmente corrosa e rinforzo simmetrico.



**Figura 4-2** – Elemento teso integro con rinforzo simmetrico.

(2) Nel seguito si farà riferimento a rinforzi doppi simmetrici in quanto tale configurazione evita la nascita di momenti flettenti parassiti.

(3)P La crisi di un elemento teso rinforzato con FRP può avvenire con una delle seguenti modalità:

- crisi per trazione dell'elemento metallico;
- crisi del rinforzo di FRP;
- delaminazione.

Le indicazioni che seguono valgono per il controllo dei primi due meccanismi di rottura. La resistenza alla delaminazione va verificata a parte, utilizzando le indicazioni fornite al capitolo 6.

(4)P Il calcolo della resistenza della sezione rinforzata si basa sulle seguenti ipotesi:

- conservazione della pianeità della sezione retta dell'elemento rinforzato;
- perfetta aderenza tra i vari materiali;
- comportamento elastico lineare dei vari materiali (isotropo per il metallo, ortotropo per il rinforzo di FRP).

### 4.2 RIPRISTINO DELLA CAPACITÀ PORTANTE ULTIMA DI ELEMENTI DANNEGGIATI

(1)P In via cautelativa, il progetto del ripristino della capacità portante di elementi danneggiati per cause diverse dalla fatica (situazione per la quale si rinvia al capitolo 7) viene effettuato assegnando la funzione di trasferimento delle tensioni a cavallo della zona danneggiata al solo coprigiunto di FRP, il quale quindi deve essere dimensionato in modo tale che risulti soddisfatta la seguente disequaglianza:

$$2 \cdot A_f \cdot \frac{f_{fk}}{\gamma_f} \cdot \eta \geq A_s \cdot f_{sk,sup}, \quad (4.1)$$

essendo:

- $A_f$  l'area della sezione trasversale del rinforzo di FRP;
- $f_{fk}$  il valore caratteristico (inferiore) della tensione di rottura per trazione del composito fibro-rinforzato;
- $\gamma_f$  il coefficiente parziale del materiale di rinforzo (§ 3.2.1.2);
- $\eta$  il fattore di conversione (§ 3.3.1);
- $A_s$  l'area della sezione trasversale del substrato metallico;
- $f_{sk,sup}$  il valore caratteristico superiore (frattile 95%) della tensione di snervamento ( $f_y$ ) nel caso di metallo duttile, o della tensione di rottura ( $f_u$ ) nel caso di metallo fragile.

Si rileva che nella (4.1) non compare esplicitamente il coefficiente parziale di modello,  $\gamma_{Rd}$ , essendo stato quest'ultimo assunto pari ad 1 (Tabella 3-3, § 3.2.1.4).

(2) In mancanza di determinazioni più accurate il valore caratteristico superiore della tensione di snervamento o della tensione di rottura può essere ottenuto moltiplicando il valore caratteristico nominale per 1.35.

### 4.3 INCREMENTO DEL CARICO ULTIMO DI ELEMENTI NON DANNEGGIATI

(1) Tenendo conto delle possibili differenze tra i coefficienti di dilatazione termica del rinforzo e del substrato, la tensione normale,  $\sigma_s$ , nell'elemento metallico è valutabile nel modo seguente:

$$\sigma_s = \frac{[N_{Sd} + 2 \cdot E_f \cdot A_f \cdot (\alpha_f - \alpha_s) \cdot \Delta T] \cdot E_s}{2 \cdot E_f \cdot A_f + E_s \cdot A_s}. \quad (4.2)$$

(2) La tensione normale,  $\sigma_f$ , nel materiale di rinforzo è invece valutabile come:

$$\sigma_f = \frac{[N_{Sd} + E_s \cdot A_s \cdot (\alpha_s - \alpha_f) \cdot \Delta T] \cdot E_f}{2 \cdot E_f \cdot A_f + E_s \cdot A_s}, \quad (4.3)$$

essendo:

- $N_{Sd}$  lo sforzo normale sollecitante di progetto;
- $E_f$  e  $A_f$ , rispettivamente, il modulo di elasticità normale e l'area della sezione trasversale del rinforzo;
- $\alpha_f$  il coefficiente di dilatazione termica del rinforzo;
- $\alpha_s$  il coefficiente di dilatazione termica del substrato;
- $\Delta T$  la variazione di temperatura dopo l'applicazione del rinforzo;
- $E_s$  e  $A_s$ , rispettivamente, il modulo di elasticità normale e l'area della sezione trasversale del substrato.

(3) La verifica di resistenza dell'elemento rinforzato consiste nel soddisfacimento delle seguenti disuguaglianze:

$$\begin{aligned}\sigma_s &\leq \frac{f_{sk}}{\gamma_s \cdot \gamma_{Rd}}, \\ \sigma_f &\leq \frac{f_{fk}}{\gamma_f \cdot \gamma_{Rd}} \cdot \eta,\end{aligned}\tag{4.4}$$

dove le quantità  $f_{sk}$ ,  $f_{fk}$ ,  $\gamma_s$ ,  $\gamma_f$ ,  $\gamma_{Rd}$ ,  $\eta$ , sono state definite nel § 4.2.

#### 4.4 STATI LIMITE DI ESERCIZIO

(1)P In condizioni di esercizio le tensioni nel composito fibrorinforzato, calcolate per la combinazione di carico quasi permanente, devono soddisfare la limitazione  $\sigma_f \leq \eta \cdot f_{fk}$ , essendo  $f_{fk}$  la tensione caratteristica di rottura del rinforzo e  $\eta$  il fattore di conversione, i cui valori sono suggeriti nel § 3.3.

(2)P Nel materiale di supporto vanno effettuate tutte le verifiche previste dalle Normative vigenti.

## 5 RINFORZO DI ELEMENTI INFLESSI

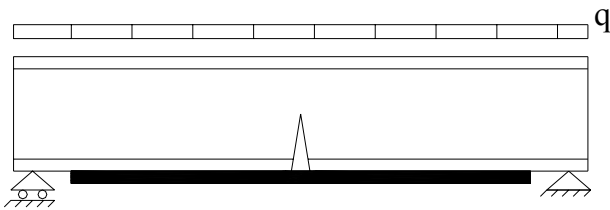
### 5.1 MODALITA' DI CRISI

(1)P Nel caso di travi prevalentemente inflesse, può manifestarsi uno dei modi di crisi elencati di seguito:

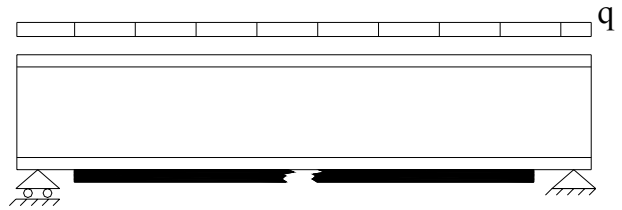
- crisi per trazione da flessione della trave metallica (frattura o snervamento in relazione al tipo di materiale metallico) o del rinforzo di FRP (Figura 5-1(a) e Figura 5-1(b));
- crisi per compressione da flessione della trave metallica (schiacciamento o instabilità locale) (Figura 5-1(c));
- delaminazione (del collegamento adesivo, interna o di interfaccia, oppure interna al composito) (Figura 5-1(d));
- instabilità locale a taglio sull'appoggio (Figura 5-1(e));
- instabilità globale (da carico di punta o per flessotorsione) della trave metallica.

In ogni situazione, va tenuto conto del solo contributo resistente del composito fibrorinforzato applicato in zona tesa.

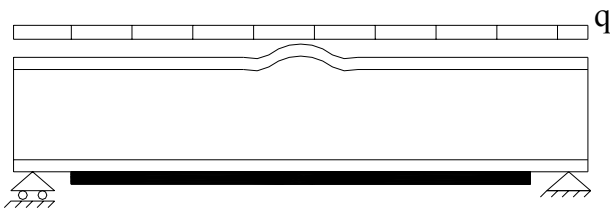
a) Rottura a trazione del substrato



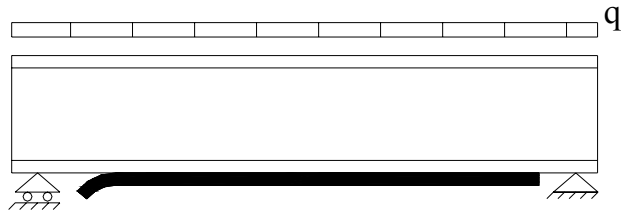
b) Rottura a trazione del rinforzo



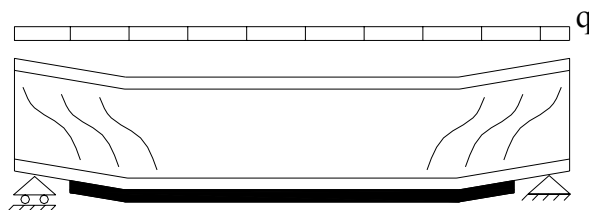
c) Instabilità locale del supporto



d) Delaminazione



e) Instabilità locale all'appoggio



**Figura 5-1** – Modalità di crisi di una trave metallica con rinforzo di FRP, soggetta a flessione.

Nel seguito si descrivono brevemente le suddette modalità di crisi fornendo alcune indicazioni progettuali relativamente alla crisi per trazione flessionale, alla crisi da schiacciamento per compressione flessionale, alla delaminazione.

### 1) Crisi per trazione della trave metallica o del rinforzo di FRP

Alcune travi metalliche antiche sono realizzate in ghisa grigia, un materiale che esibisce rottura fragile per trazione. In tal caso, il progetto dell'intervento di rinforzo mira alla diminuzione del valore della tensione normale prodotta nella trave metallica dai carichi di esercizio, in modo da aumentare adeguatamente il coefficiente di sicurezza nei riguardi della rottura per trazione. Tale circostanza rappresenta una fondamentale differenza rispetto al caso del rinforzo di travi di c.a., laddove viene accettata l'ipotesi di fessurazione del calcestruzzo.

Con riferimento alle travi di ghisa grigia, un rinforzo preteso può risultare particolarmente conveniente, se non addirittura necessario, in quanto esso è in grado di produrre una riduzione del valore delle tensioni di trazione derivanti dai carichi permanenti, senza una preventiva desollecitazione nei confronti di questi ultimi.

Nel caso di travi metalliche con rottura duttile (ferro puddellato, acciaio) il rinforzo ha la funzione di diminuire le tensioni nella trave prodotte dai carichi di esercizio (in modo da aumentare, ad esempio la resistenza a fatica) e quella di conferire alla trave composita (metallo-FRP) un valore del carico di rottura più elevato di quello della trave originaria, sfruttando le riserve post-elastiche del metallo e l'elevata resistenza a trazione in campo elastico del materiale fibrorinforzato.

Nonostante la rottura per trazione del materiale fibrorinforzato avvenga in campo elastico, e quindi sia di tipo fragile, la concomitante plasticizzazione del metallo può conferire al meccanismo di collasso della trave rinforzata caratteristiche di duttilità, fino all'eventuale insorgenza del fenomeno della delaminazione.

### 2) Crisi per compressione della trave metallica

La crisi in compressione della trave metallica avviene con modalità differenti in relazione al tipo di metallo e alla geometria della sezione trasversale della trave. Alcuni metalli, come la ghisa grigia, esibiscono un comportamento fortemente non-lineare in trazione, con perdita graduale della rigidità. Il ferro puddellato e l'acciaio esibiscono invece un chiaro snervamento. Una volta stabilito il legame costitutivo del metallo, occorre valutare la snellezza locale della sezione trasversale, per stabilire la natura della crisi in compressione. Infatti, in relazione alla snellezza geometrica locale della trave e al rapporto tra la tensione di limite elastico e il modulo di Young, può manifestarsi l'instabilità locale prima dello schiacciamento. Nel caso di travi di acciaio, molte Normative moderne suggeriscono classificazioni delle sezioni che consentono di stabilire la natura della crisi in compressione, come ad esempio fa l'Eurocodice 3 (EN 1993-1-1). Nel caso della ghisa grigia o del ferro puddellato sono necessarie analisi *ad hoc*, per il controllo della stabilità locale. Comunque, una valutazione approssimata della resistenza all'instabilità locale della trave rinforzata può essere condotta con le formule classiche relative alle travi metalliche, considerando le proprietà di inerzia di una sezione equivalente ottenuta omogeneizzando il composito alla trave metallica.

### 3) Delaminazione

L'analisi della sezione composta metallo-FRP, illustrata più in dettaglio nel prosieguo, consente di controllare i meccanismi di rottura connessi alla crisi per trazione o compressione del substrato o del rinforzo. Tale analisi è basata sull'ipotesi di perfetta aderenza del rinforzo al substrato. Tuttavia, come è noto, il trasferimento degli sforzi tra il substrato e il rinforzo avviene attraverso lo strato adesivo, consistente in un materiale deformabile di piccolo spessore, in cui si mobilitano concentrazioni tensionali da valutare accuratamente. Indicazioni nel merito saranno fornite nel capitolo 6.

#### 4) Instabilità locale a taglio sull'appoggio

Il rinforzo a flessione della trave metallica, consentendo un aumento del carico trasversale di progetto, rende indispensabile la verifica a taglio e a compressione locale in corrispondenza degli appoggi.

#### 5) Instabilità globale della trave metallica

L'integrazione della sezione originaria di una trave metallica mediante elementi di FRP comporta un aumento di rigidità, conseguente all'incremento delle caratteristiche inerziali. Tale circostanza migliora il comportamento della trave nei confronti della stabilità euleriana ed in particolare della stabilità flessotorsionale.

Vale a riguardo quanto premesso al paragrafo 3.1

(2)P Nel progetto, se necessario, si deve tenere conto adeguatamente del fenomeno della fatica. La crisi per fatica può interessare non solo il substrato, ma anche il rinforzo e soprattutto lo strato adesivo. Indicazioni sui metodi utilizzabili per la verifica a fatica saranno forniti al capitolo 7.

## 5.2 FONDAMENTI DEL CALCOLO

(1)P L'analisi dello stato tenso-deformativo di una trave metallica inflessa, rinforzata con FRP, deve essere condotta tenendo in debito conto la condizione iniziale, all'atto di applicazione del rinforzo. In particolare, le tensioni e le deformazioni finali nella parte metallica sono la somma di quelle esistenti nella suddetta condizione iniziale più quelle mobilitate sulle sezioni rinforzate acciaio-FRP dagli ulteriori carichi, che intervengono successivamente all'avvenuta maturazione dell'adesivo. Per le verifiche agli stati limite di esercizio è possibile sommare alle tensioni iniziali quelle derivanti dai carichi applicati successivamente alla maturazione del rinforzo. Per le verifiche agli stati limite ultimi è possibile sommare alle deformazioni iniziali quelle derivanti dai carichi applicati successivamente alla maturazione del rinforzo.

(2)P Nel caso di rinforzo a flessione di travi esistenti, interessate da corrosione e/o danni di origine diversa, le dimensioni geometriche da utilizzare nel calcolo devono derivare da misurazioni *in situ*.

(3) L'analisi dello stato tenso-deformativo di una trave metallica inflessa rinforzata con FRP si effettua sulla base delle seguenti ipotesi:

- perfetta aderenza tra rinforzo e substrato;
- conservazione della pianeità delle sezioni rette;
- trascurabilità dello spessore del rinforzo rispetto all'altezza della trave;
- trascurabilità del contributo dello strato adesivo alla formazione della rigidità flessionale.

Il significato delle prime due ipotesi è ben noto. La terza ipotesi consente di assimilare lo strato di materiale composito ad un'unica fibra, priva di spessore, posta alla stessa quota della fibra metallica cui è adesa. L'ultima ipotesi è legittimata dai valori modesti del modulo di elasticità normale della resina rispetto a quelli del metallo e delle fibre (circa 1/100 di questi ultimi), nonché dai valori dello spessore, solitamente esiguo, di tale strato.

## 5.3 STATI LIMITE DI ESERCIZIO

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

(1)P Per l'analisi allo SLE occorre tener conto della tensione iniziale,  $\sigma_0$ , nella fibra estrema della trave metallica adesa al composito all'atto del rinforzo.

(2)P Per le verifiche nei confronti degli stati limite di esercizio si assume l'ipotesi di comportamento elastico-lineare di tutti i materiali costituenti la sezione.

### 5.3.2 Verifiche relative al materiale di supporto

(1)P Vanno effettuate tutte le verifiche nei confronti degli stati limite di esercizio prevedibili e/o previste dalla Normativa vigente.

### 5.3.3 Verifiche relative al composito fibrorinforzato

(1)P Lo stato tensionale che compete al composito fibrorinforzato per effetto della combinazione di carico quasi permanente deve essere opportunamente limitato.

(2) Nel caso di stati tensionali piani tale limitazione è fornita dalla seguente relazione:

$$\left(\frac{\sigma}{f_{rk}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{rk}}\right)^2 \leq \eta^2. \quad (5.1)$$

Nella (5.1) i simboli introdotti hanno il significato appresso specificato:

- $\sigma$  e  $\tau$  sono, rispettivamente, i valori della tensione normale e di quella tangenziale nel generico punto del composito fibrorinforzato;
- $f_{rk}$  è il valore caratteristico della resistenza a trazione del composito fibrorinforzato;
- $\tau_{rk}$  è il valore caratteristico della resistenza a taglio del composito fibrorinforzato in direzione trasversale all'asse della trave;
- $\eta$  è il fattore di conversione (§ 3.2).

#### 5.3.3.1 Tensioni locali

(1) Per il calcolo delle tensioni locali, sia normali che tangenziali, si possono utilizzare tutte le note formulazioni dell'analisi elastico-lineare di sezioni composte da strati di più materiali: esse sono riconducibili ad una sezione omogenea equivalente introducendo i ben noti coefficienti di omogeneizzazione, consistenti nei rapporti tra il modulo di Young del materiale dell'*i*-esimo strato e quello del materiale assunto come riferimento.

## 5.4 STATI LIMITE ULTIMI

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

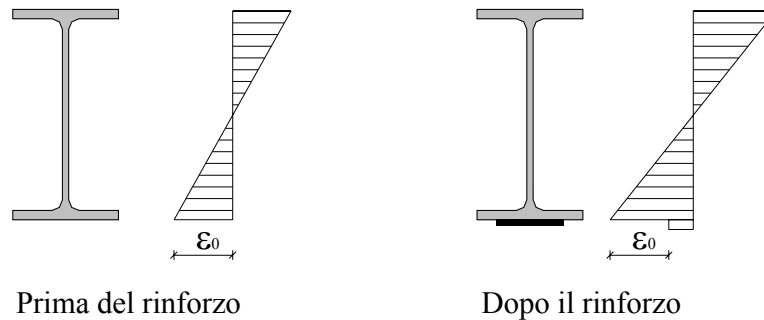
(1)P La verifica nei confronti dello stato limite ultimo consiste nell'accertare che sia soddisfatta la relazione:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd}, \quad (5.2)$$

essendo  $M_{Sd}$  il momento sollecitante di progetto e  $M_{Rd}$  il momento resistente di progetto.



(2)P Per l'analisi dello SLU occorre tenere conto della deformazione iniziale,  $\varepsilon_0$ , esibita dalla fibra estrema della trave metallica adesa al composito all'atto del rinforzo (Figura 5-2).



**Figura 5-2** – Deformazione iniziale.

## 5.4.2 Momento resistente

### 5.4.2.1 Fondamenti del calcolo

(1)P Lo SLU corrisponde al raggiungimento di un valore limite della deformazione in una delle fibre estreme degli strati che costituiscono la sezione. I valori limite da considerare sono quelli corrispondenti ai meccanismi di crisi flessionale precedentemente introdotti. Ad esempio, nel caso di una trave metallica rinforzata in zona tesa, i limiti da considerare sono i due seguenti:

$$\varepsilon_d^{(t)} = \min \left\{ \varepsilon_{sd}^{(t)}; \varepsilon_{fd}^{(t)} + \varepsilon_0 \right\}, \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_d^{(c)} = \varepsilon_{sd}^{(c)}, \quad (5.4)$$

essendo, rispettivamente,  $\varepsilon_{sd}^{(t)}$  ed  $\varepsilon_{fd}^{(t)}$  le deformazioni a trazione di progetto del substrato e del rinforzo,  $\varepsilon_0$  la deformazione iniziale sopra introdotta e  $\varepsilon_{sd}^{(c)}$  la deformazione di progetto a compressione del substrato.

Il più piccolo dei momenti flettenti relativi alle condizioni limite (5.3) e (5.4) rappresenta il momento resistente di progetto della sezione rinforzata.

(2) I valori di progetto delle deformazioni si calcolano a partire dai valori caratteristici, applicando i coefficienti parziali e i fattori di conversione introdotti al § 3.2.

(3) Il valore di progetto del momento resistente,  $M_{Rd}$ , può essere calcolato secondo la procedura di seguito sinteticamente descritta:

- a) si suppone attinto il valore di progetto della deformazione in una delle fibre estreme degli strati della sezione, secondo quanto indicato in (1)P;
- b) si fissa un valore di tentativo della profondità dell'asse neutro, cui corrisponde, per la conservazione di planeità della sezione retta, un ben determinato diagramma delle deformazioni;
- c) si valutano le tensioni nei diversi strati utilizzando i competenti legami costitutivi tenendo conto dei coefficienti di conversione di cui al § 3.3 relativamente agli strati di rinforzo;
- d) si verifica il rispetto dell'equilibrio alla traslazione, nella direzione dell'asse della trave, da parte delle forze che complessivamente sollecitano i diversi strati; ad esempio con riferimento al caso di Figura 5-3 (substrato duttile), deve risultare:

$$F_1 + F_2 + F_3 = F_4 + F_5; \quad (5.5)$$

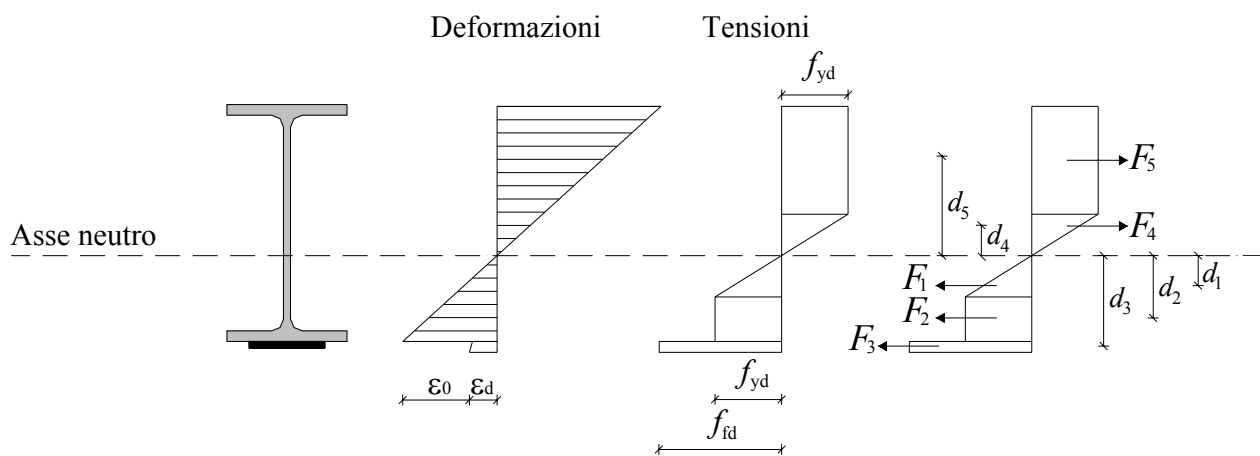
- e) qualora la condizione (5.5) non fosse soddisfatta si reiterano i passi *b)*, *c)* e *d)* a partire da una scelta differente della posizione dell'asse neutro, fino al soddisfacimento di tale condizione;
- f) una volta determinata la posizione dell'asse neutro che consente di soddisfare la (5.5), è possibile calcolare il valore di progetto del momento resistente della sezione rinforzata; sempre con riferimento al caso di Figura 5-3, si ha:

$$M_{Rd} = \sum F_i \cdot d_i, \quad (5.6)$$

essendo stato assunto il coefficiente parziale  $\gamma_{Rd}$  pari ad 1 (Tabella 3-3, § 3.2.1.4).

- (4) Si ricorda che il legame costitutivo del rinforzo di FRP è elastico lineare fino a rottura. Il competente modulo di Young da utilizzare nella procedura sopra descritta è quello relativo alla direzione individuata dall'asse della trave. Spesso, quest'ultimo coincide con il modulo di Young nella direzione delle fibre, poiché queste ultime sono disposte parallelamente all'asse della trave in modo da massimizzare l'efficienza del rinforzo in zona tesa.

Il legame costitutivo del substrato risulta differente a seconda che si tratti di un metallo duttile (acciaio, ferro 'antico') o di un metallo fragile (ghisa grigia), come indicato nei successivi §§ 5.4.2.2 e 5.4.2.3.



**Figura 5-3** – Calcolo del momento resistente.

#### 5.4.2.2 Substrato di metallo duttile

- (1) Se il substrato è costituito da un metallo duttile, ossia da un metallo che esibisce un evidente snervamento (acciaio, ferro "antico"), si può utilizzare un legame costitutivo elastico-perfettamente plastico, il cui valore di progetto della tensione resistente può essere calcolato come indicato nel § 3.2.

- (2) Nel caso di substrato duttile, in relazione alla classe della sezione, è possibile escludere, *a priori*, alcuni meccanismi di rottura. Più precisamente, utilizzando le definizioni dell'Eurocodice 3, se la sezione è di classe 1 o 2 la rottura si manifesterà per raggiungimento della deformazione di progetto a trazione del rinforzo; se la sezione è di classe 3 la rottura si manifesterà non appena si sia stata attinta la deformazione di snervamento delle fibre estreme del substrato oppure quella di progetto a trazione del rinforzo; se infine la sezione è di classe 4 la condizione di rottura coincide con

quella di instabilità locale delle parti compresse della sezione oppure con il raggiungimento della deformazione di progetto a trazione del rinforzo. Conseguentemente, i valori limite delle deformazioni del substrato e del rinforzo, da considerare nel calcolo del momento resistente, sono i seguenti:

$$\begin{aligned}
 & \text{- sezione di classe 1 o 2:} && \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_d^{(t)} = \varepsilon_{fd}^{(t)} + \varepsilon_0 \\ \varepsilon_d^{(c)} = \infty \end{array} \right. , \\
 & \text{- sezione di classe 3:} && \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_d^{(t)} = \min \{ \varepsilon_{yd}; \varepsilon_{fd}^{(t)} + \varepsilon_0 \} \\ \varepsilon_d^{(c)} = \varepsilon_{yd} \end{array} \right. , \\
 & \text{- sezione di classe 4:} && \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_d^{(t)} = \varepsilon_{fd}^{(t)} + \varepsilon_0 \\ \varepsilon_d^{(c)} = \varepsilon_d^{(LB)} \end{array} \right. ,
 \end{aligned}$$

dove  $\varepsilon_{yd}$  è la deformazione limite di snervamento del substrato (assunta uguale in trazione e in compressione),  $\varepsilon_d^{(LB)}$  è la deformazione della fibra maggiormente compressa, corrispondente all'instabilità locale ed inoltre gli altri simboli hanno il significato precedentemente dichiarato. La deformazione corrispondente all'instabilità locale in zona compressa può essere calcolata come rapporto tra la tensione limite,  $\sigma_d^{(LB)}$ , ed il modulo di Young,  $E_s$ , del substrato.

#### 5.4.2.3 Substrato di metallo fragile

- (1) Nel caso di substrato fragile (ad esempio ghisa grigia), può essere utilizzato un legame elastico non-lineare in trazione e lineare in compressione. I valori di progetto delle tensioni resistenti devono rispettare le indicazioni fornite nel § 3.2.
- (2) Nel caso di substrato fragile, non esiste una classificazione delle sezioni che consenta di selezionare, a priori, i possibili meccanismi di crisi. Pertanto, si devono controllare tutti i limiti, sia in trazione che in compressione.
- (3) Nel caso in cui il substrato sia fragile e si presenti già fessurato all'atto dell'intervento, il rinforzo può essere disposto come 'ricucitura' della lesione e progettato in modo da assorbire interamente lo sforzo di trazione. In tal caso, particolare cautela deve essere riposta nella scelta del valore limite della deformazione del rinforzo, la quale deve essere mantenuta sufficientemente bassa per evitare la delaminazione locale. Infatti, come sarà più diffusamente discusso nel capitolo 6, non esistono metodi comprovati di verifica della resistenza alla delaminazione in corrispondenza di fessure a carico del substrato metallico.

## 6 VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA ALLA DELAMINAZIONE

### 6.1 GENERALITÀ

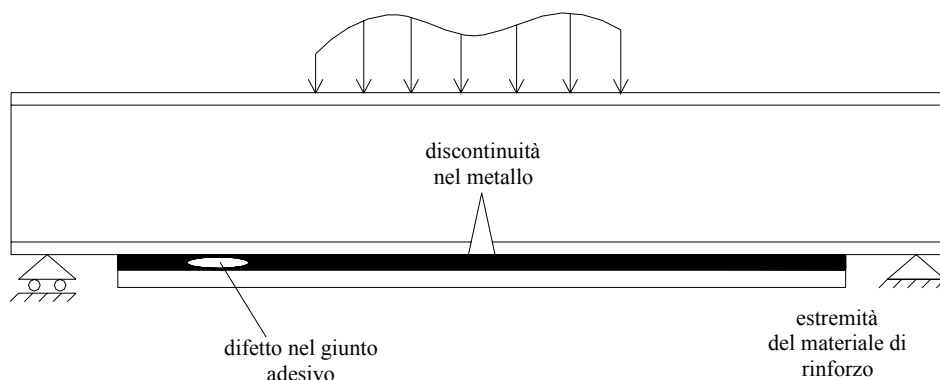
(1) Il presente capitolo riguarda il problema della crisi dell'elemento rinforzato per delaminazione del rinforzo di FRP. Con il termine "delaminazione" si intende il distacco del rinforzo dal substrato metallico con conseguente drastica diminuzione della capacità portante dell'elemento strutturale rinforzato. La delaminazione è imputabile alle tensioni, sia normali che tangenziali, che si sviluppano nello strato di adesivo. Analoghe tensioni si mobilitano nel rinforzo di FRP e possono originare una crisi per delaminazione interna a quest'ultimo. In linea di principio, una crisi analoga potrebbe interessare anche il substrato, relativamente al suo strato superficiale, dove è adeso il rinforzo. Tuttavia, nel caso di placcaggio di strutture metalliche con compositi fibrorinforzati, l'usuale gerarchia delle resistenze per delaminazione (in senso crescente di resistenza) è la seguente: giunto adesivo, rinforzo, substrato. Tale gerarchia non è la stessa di quella attesa usualmente nel caso di strutture di c.a. o di muratura, per le quali l'elemento più debole è rappresentato dal substrato dove si localizza la crisi per delaminazione.

In letteratura sono stati proposti due differenti approcci per studiare il fenomeno della delaminazione:

- un approccio agli sforzi, di tipo convenzionale, basato sull'analisi elastica lineare delle sollecitazioni;
- un approccio energetico, basato sulle leggi della meccanica della frattura elastica lineare.

Il presente capitolo tratterà solo l'approccio agli sforzi in quanto l'approccio energetico, benché concettualmente più appropriato, richiede ulteriori approfondimenti teorici e validazioni sperimentali.

(2)P Come illustrato in Figura 6-1, la delaminazione del rinforzo avviene in zone ad elevata concentrazione tensionale, spesso caratterizzate dalla presenza di discontinuità o di cricche.

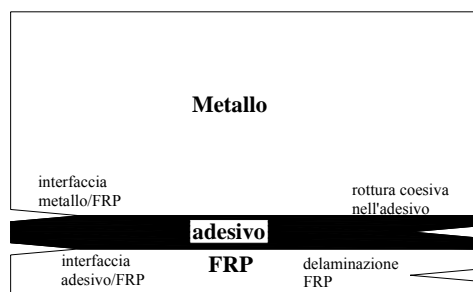


**Figura 6-1** – Esempi di discontinuità nel metallo, nell'adesivo e nel materiale di rinforzo.

(3)P La delaminazione di elementi rinforzati con FRP può aver luogo nel rinforzo, nel substrato o all'interfaccia. Negli elementi metallici rinforzati, la crisi per delaminazione avviene con le seguenti modalità, riportate in Figura 6-2:

- delaminazione all'interfaccia metallo-adesivo o adesivo-FRP;
- rottura coesiva nell'adesivo;
- delaminazione del materiale di rinforzo.

Come già rilevato, contrariamente a quanto si verifica per le strutture di c.a., la crisi non interessa il substrato metallico ma l'adesivo (rottura coesiva), l'interfaccia (rottura di interfaccia) o il rinforzo (delaminazione del composito fibrorinforzato). Tuttavia, nel caso in cui il substrato sia costituito da un metallo datato, realizzato con una tecnologia primordiale (ad esempio ferro puddellato), la delaminazione può manifestarsi nel substrato con modalità molto simili a quelle nelle tipiche delle strutture di c.a. o di muratura.



**Figura 6-2** – Modalità di delaminazione in elementi metallici rinforzati con FRP.

(4)P La compresenza di valori differenti dei coefficienti di dilatazione termica relativi al substrato metallico ed al rinforzo di FRP può generare sforzi considerevoli a carico dello strato adesivo, tali da condizionare il progetto del rinforzo.

Si raccomanda, pertanto, di tenerne in debito conto nella valutazione della resistenza alla delaminazione.

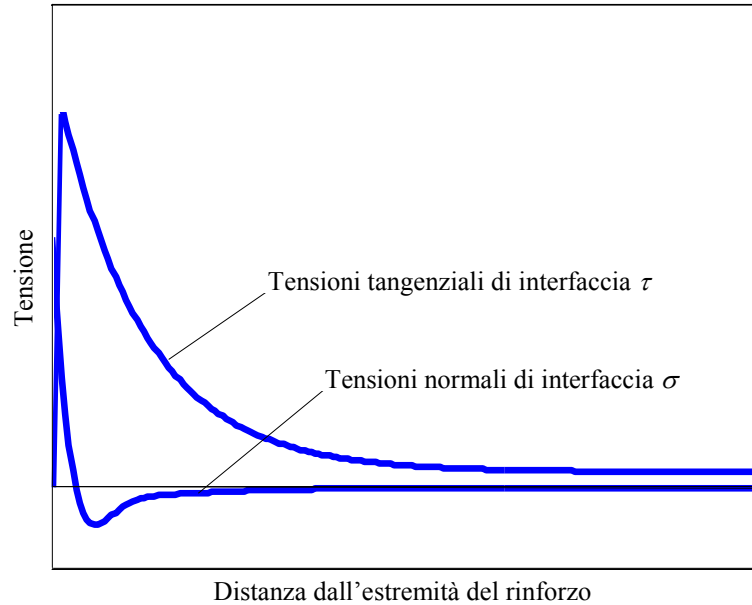
(5)P Particolari condizioni ambientali possono deteriorare le proprietà meccaniche dell'interfaccia e favorire il processo di delaminazione. In particolare, il deterioramento dell'interfaccia può derivare dall'esposizione a cicli termici severi ed a quella nei confronti di soluzioni acquose ricche di sali (ad esempio sali antighiaccio).

(6)P L'approccio agli sforzi, come anche quello energetico, utilizzano relazioni di tipo elastico lineare. La competente verifica del collegamento adesivo risulta, pertanto, valida nelle zone a comportamento elastico, quali quelle terminali del rinforzo.

In presenza di deformazioni plastiche del metallo non sono attualmente disponibili metodi affidabili per la valutazione della resistenza alla delaminazione.

## 6.2 APPROCCIO AGLI SFORZI

(1)P La resistenza dell'interfaccia si valuta convenzionalmente calcolando le tensioni massime (normali e tangenziali) mobilitate nello strato adesivo mediante analisi di tipo elastico lineare. La Figura 6-3 mostra l'andamento qualitativo delle tensioni normali e tangenziali all'estremità del rinforzo lungo l'asse di un elemento monodimensionale placcato.



**Figura 6-3** – Andamento qualitativo degli sforzi normali e tangenziali di interfaccia.

(2)P Le ipotesi fondamentali a base dell'approccio agli sforzi sono le seguenti:

- conservazione della planeità delle sezioni rette;
- trascurabile deformabilità a taglio della trave metallica e del rinforzo;
- perfetta aderenza tra i materiali;
- legami costitutivi elastico-lineari;
- tensioni normali e tangenziali costanti nello spessore dello strato adesivo.

(3)P Le tensioni tangenziali mobilitate nello strato adesivo risultano influenzate dalla differenza,  $\Delta\varepsilon_{fs}$ , tra le deformazioni longitudinali all'interfaccia metallo-adesivo e quelle all'interfaccia adesivo-FRP, esibite per effetto dei carichi applicati successivamente al placcaggio.

Le tensioni normali, invece, sono legate alla differenza,  $\Delta\chi_{fs}$ , tra la curvatura del rinforzo e quella della trave metallica, conseguenti sempre all'applicazione dei carichi sopravvenienti al placcaggio. Tali differenze possono essere valutate come segue:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{fs} &= (\varepsilon_{fa,t} - \varepsilon_{fa,0}) - (\varepsilon_{sa,t} - \varepsilon_{sa,0}) \\ \Delta\chi_{fs} &= (\chi_{f,t} - \chi_{f,0}) - (\chi_{s,t} - \chi_{s,0}) \end{aligned} \quad (6.1)$$

essendo:

- $\varepsilon_{fa,t}$  la deformazione all'interfaccia adesivo-FRP valutata in un istante di tempo successivo all'applicazione del rinforzo;
- $\varepsilon_{sa,t}$  l'analoga deformazione all'interfaccia metallo-adesivo;
- $\varepsilon_{fa,0}$  la deformazione all'atto dell'applicazione del rinforzo ( $t = 0$ ) all'interfaccia adesivo-FRP;
- $\varepsilon_{sa,0}$  l'analoga deformazione all'interfaccia metallo-adesivo;
- $\chi_{f,t}$  la curvatura nel composito fibrorinforzato valutata in un istante di tempo successivo all'applicazione del rinforzo;
- $\chi_{s,t}$  l'analoga curvatura nella trave;
- $\chi_{f,0}$  la curvatura all'atto dell'applicazione del rinforzo ( $t = 0$ ) nel composito fibrorinforzato;
- $\chi_{s,0}$  l'analoga curvatura nella trave.

Nello spirito dell'approccio qui richiamato, le suddette quantità sono da valutarsi nell'ipotesi in cui tra la trave ed il rinforzo non ci sia alcun collegamento.

(4) Si sottolinea che con il pedice "0" sono state denotate le deformazioni e le curvature a carico del substrato e del rinforzo prima della loro solidarizzazione. Esse sono imputabili a carichi preesistenti all'incollaggio oppure a stati di coazione. Ad esempio, in una trave metallica, uno stato di coazione può derivare dall'imposizione di una eventuale controfreccia a mezzo di puntelli o martinetti. Invece, in una lamina pultrusa, uno stato di coazione può conseguire ad una sua pretensione prima dell'incollaggio.

Analogamente, ad un istante di tempo successivo all'applicazione del rinforzo, le competenti deformazioni e curvature a carico del substrato sono da valutarsi con riferimento ai carichi complessivi sollecitanti ed agli eventuali stati di coazione sopravvenuti (es. distorsioni termiche). Relativamente al composito, le suddette quantità discendono, invece, dai soli eventuali stati di coazione sopravvenuti, a carico di quest'ultimo.

### 6.2.1 Calcolo delle tensioni tangenziali nello strato adesivo

(1)P In corrispondenza della discontinuità, la differenza di deformazione  $\Delta\varepsilon_{fs}$  può essere approssimata con la seguente espressione lineare:

$$\Delta\varepsilon_{fs}(x) = \Delta\varepsilon_0 + \Delta\varepsilon_1 \cdot x, \quad (6.2)$$

dove le quantità  $\Delta\varepsilon_0$  e  $\Delta\varepsilon_1$  dipendono dallo schema statico della membratura rinforzata.

(2) Nel caso di una trave inflessa rinforzata con FRP al lembo teso (Figura 6-4), assumendo per semplicità la completa desollecitazione della stessa prima dell'applicazione del rinforzo ( $\varepsilon_{sa,0} = 0$ ) e lo stato di coazione nullo nel rinforzo all'istante  $t = 0$  ( $\varepsilon_{fa,0} = 0$ ) e successivamente al placcaggio ( $\varepsilon_{fa,t} = 0$ ), le quantità  $\Delta\varepsilon_0$  e  $\Delta\varepsilon_1$  si specializzano come segue:

$$\Delta\varepsilon_0 = -\frac{\Delta M(0)}{E_s \cdot I_s} \cdot y_s = -\frac{p \cdot a \cdot \left(l + \frac{a}{2}\right)}{E_s \cdot I_s} \cdot y_s, \quad (6.3)$$

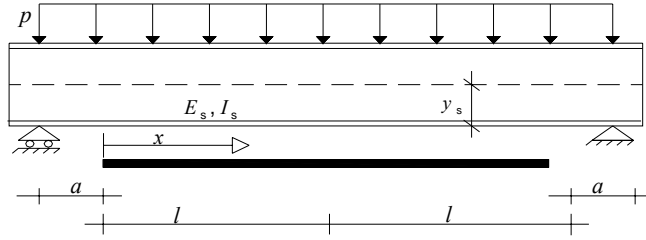
$$\Delta\varepsilon_1 = -\frac{\Delta T(0) \cdot x}{E_s \cdot I_s} \cdot y_s = -\frac{(p \cdot l) \cdot x}{E_s \cdot I_s} \cdot y_s, \quad (6.4)$$

essendo  $\Delta M(0)$  e  $\Delta T(0)$ , rispettivamente, il momento flettente e il taglio, valutati all'ascissa  $x = 0$  e competenti alle sole azioni applicate successivamente al placcaggio della trave (nel caso semplice ipotizzato tali azioni corrispondono alla totalità delle azioni);  $p$ ,  $a$ ,  $l$  le grandezze riportate in Figura 6-4;  $E_s$  ed  $I_s$ , rispettivamente, il modulo di elasticità normale ed il momento d'inerzia della trave metallica;  $y_s$  la distanza del bordo teso dall'asse della trave (Figura 6-4).

Si sottolinea che le suddette differenze sono state determinate utilizzando una approssimazione di tipo lineare del momento flettente  $\Delta M(x)$  nel substrato in prossimità della discontinuità, ovvero assumendo la seguente legge di variazione:

$$\Delta M(x) = \Delta M(0) + \Delta T(0) \cdot x. \quad (6.5)$$

Nel caso di andamenti non lineari del momento flettente, tale assunzione non conduce ad errori significativi, in ragione della limitata lunghezza del tratto di trave interessato dal fenomeno di amplificazione tensionale.



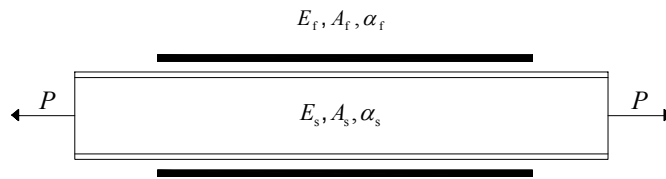
**Figura 6-4** – Calcolo di  $\Delta\varepsilon_{fs}$  per una trave metallica soggetta ad un carico distribuito  $p$  e rinforzata con una lamina di FRP.

(3) Nel caso di un elemento metallico teso rinforzato simmetricamente e soggetto ad una forza assiale  $P$  e ad una variazione di temperatura uniforme  $\Delta T$  (Figura 6-5), ammettendo per semplicità la completa desollecitazione dello stesso prima dell'applicazione del rinforzo ( $\varepsilon_{sa,0} = 0$ ) e uno stato di coazione nullo nel rinforzo all'istante  $t = 0$  ( $\varepsilon_{fa,0} = 0$ ), le quantità  $\Delta\varepsilon_0$  e  $\Delta\varepsilon_1$  assumono le seguenti espressioni:

$$\Delta\varepsilon_0 = (\alpha_f - \alpha_s) \cdot \Delta T - \frac{\Delta N(0)}{E_s \cdot A_s} = (\alpha_f - \alpha_s) \cdot \Delta T - \frac{P}{E_s \cdot A_s}, \quad (6.6)$$

$$\Delta\varepsilon_1 = 0, \quad (6.7)$$

dove  $\alpha_f$  e  $\alpha_s$  sono, rispettivamente i coefficienti di dilatazione termica del composito fibrorinforzato e del substrato;  $\Delta N(0)$  rappresenta lo sforzo normale, valutato all'ascissa  $x = 0$  e competente alle sole azioni applicate successivamente al placcaggio dell'elemento (nel caso semplice ipotizzato tali azioni corrispondono alla totalità delle azioni);  $A_s$  è l'area della sezione dell'elemento metallico.



**Figura 6-5** – Calcolo di  $\Delta\varepsilon_{fs}$  nel caso di un elemento metallico teso, rinforzato in modo simmetrico e soggetto ad una forza assiale  $P$  e ad una variazione di temperatura uniforme  $\Delta T$ .

(4) Il calcolo del valore massimo della tensione tangenziale nell'adesivo (atteso per  $x = 0$ ),  $\tau_{max}$ , può essere eseguito con l'ausilio della seguente espressione:

$$\tau_{max} = \frac{1}{b_f} \cdot \left[ \left( \Delta N_f(0) + \frac{\Delta\varepsilon_0}{f_2} \right) \cdot \lambda + \frac{\Delta\varepsilon_1}{f_2} \right], \quad (6.8)$$

dove:

$$\lambda = \sqrt{\frac{f_2}{f_1}}, \quad (6.9)$$



$$f_1 = \left( \frac{t_a}{G_a \cdot b_f} \right), \quad (6.10)$$

- per travi con rinforzo all'intradosso:

$$f_2 = \left( \frac{1}{E_f \cdot A_f} + \frac{1}{E_s \cdot A_s} + \frac{(y_s + t_f/2 + t_a) \cdot y_s}{E_s \cdot I_s} \right), \quad (6.11)$$

- per elementi tesi con rinforzo simmetrico:

$$f_2 = \left( \frac{1}{E_f \cdot A_f} + \frac{2}{E_s \cdot A_s} \right), \quad (6.12)$$

essendo:

- $b_f$  la larghezza del rinforzo di FRP;
- $t_a$  lo spessore dell'adesivo;
- $t_f$  lo spessore del rinforzo;
- $G_a$  il modulo di elasticità tangenziale dell'adesivo;
- $E_f$  e  $A_f$ , rispettivamente, il modulo di elasticità normale e l'area della sezione trasversale del rinforzo;
- $E_s, A_s, I_s, y_s$  le quantità sopra definite.

La quantità  $\Delta N_f(0)$ , introdotta nell'eq. (6.8), rappresenta lo sforzo normale nel composito valutato in corrispondenza della discontinuità ( $x = 0$ ) ed è funzione quindi del tipo di discontinuità presente (Figura 6-1). Ad esempio, in assenza di un'azione esterna applicata direttamente all'estremità del rinforzo si ha:  $\Delta N_f(0)=0$ .

## 6.2.2 Calcolo delle tensioni normali nello strato adesivo

(1)P La differenza di curvatura,  $\Delta\chi_{fs}$ , può essere determinata a partire dalla legge di variazione definita nella (6.5), come segue:

$$\Delta\chi_{fs}(x) = \Delta\chi_0 + \Delta\chi_1 \cdot x. \quad (6.13)$$

(2)P Il calcolo del valore massimo della tensione normale nell'adesivo (atteso per  $x = 0$ ),  $\sigma_{\max}$ , può essere effettuato con la seguente espressione:

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{b_f} \cdot \left[ + \frac{a_3 \cdot C_1 \cdot \lambda^2}{a_1 \cdot \lambda^4 + a_2} - 2 \cdot \beta^2 \cdot C_4 \right], \quad (6.14)$$

nella quale:

$$a_1 = \frac{t_a}{E_a \cdot b_f}, \quad (6.15)$$

$$a_2 = \frac{1}{E_f \cdot I_f} + \frac{1}{E_s \cdot I_s}, \quad (6.16)$$

$$a_3 = \frac{y_f}{E_f \cdot I_f} - \frac{(y_s + t_f/2 + t_a) - y_f}{E_s \cdot I_s}, \quad (6.17)$$

$$\beta = \left( \frac{a_2}{4 \cdot a_1} \right)^{0.25}, \quad (6.18)$$

essendo:

- $b_f$  la larghezza del rinforzo di FRP;
- $t_a$  lo spessore dell'adesivo;
- $t_f$  lo spessore del rinforzo;
- $E_a$  il modulo di elasticità normale dell'adesivo;
- $E_f$  e  $I_f$ , rispettivamente, il modulo di elasticità normale e l'area della sezione trasversale del rinforzo;
- $E_s$  e  $I_s$ , rispettivamente, il modulo di elasticità normale e l'area della sezione trasversale del substrato.

Le costanti  $C_1$  e  $C_4$  introdotte nell'eq. (6.14) sono così definite:

$$C_1 = \Delta N_f(0) + \frac{\Delta \varepsilon_0}{f_2}, \quad (6.19)$$

$$C_4 = + \frac{1}{\beta} \cdot \left( \Delta T_f(0) + \frac{\Delta \chi_1}{a_2} + \frac{a_3 \cdot \Delta \varepsilon_1}{a_2 \cdot f_2} + \frac{\lambda \cdot a_3 \cdot C_1}{a_1 \cdot \lambda^4 + a_2} \right) + C_3, \quad (6.20)$$

in cui:

$$C_3 = (\Delta M_f(0) + y_f \cdot \Delta N_f(0)) - \left[ - \frac{\Delta \chi_0}{a_2} - \frac{a_3 \cdot \Delta \varepsilon_0}{a_2 \cdot f_2} + \frac{a_3 \cdot C_1}{a_1 \cdot \lambda^4 + a_2} \right]. \quad (6.21)$$

I valori delle quantità  $\Delta N_f(0)$ ,  $\Delta T_f(0)$  e  $\Delta M_f(0)$  sono ancora funzione del tipo di discontinuità presente (Figura 6-1). Ad esempio, in assenza di azioni localizzate all'estremità del rinforzo, risulta:  $\Delta N_f(0) = \Delta T_f(0) = \Delta M_f(0) = 0$ .

### 6.2.3 Verifica della resistenza alla delaminazione

(1) Una volta noti i valori massimi della tensione normale,  $\sigma$ , e della tensione tangenziale,  $\tau$ , per la combinazione di carico allo SLU, la verifica di resistenza all'interfaccia può essere effettuata confrontando il valore della tensione principale di trazione,  $\sigma_1$ , con la resistenza di calcolo dell'adesivo:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{2} + \sqrt{\left( \frac{\sigma}{2} \right)^2 + \tau^2} \leq \frac{f_{ak}}{\gamma_a \cdot \gamma_{Rd}} \cdot \eta. \quad (6.22)$$

(2) Il valore della resistenza caratteristica,  $f_{ak}$ , può essere valutato attraverso una prova sperimentale su di un giunto *standard*, come ad esempio un giunto a semplice sovrapposizione (ISO 4587:2003(E)).

Nella (6.22) devono essere attribuiti opportuni valori al coefficiente parziale del materiale,  $\gamma_a$ , (§ 3.2.1.3), al fattore di conversione,  $\eta$ , (§ 3.3), e al coefficiente parziale di modello,  $\gamma_{Rd}$ , (Tabella 3-3, § 3.2.1.4).

## 7 RINFORZO DI ELEMENTI SOGGETTI A FATICA

### 7.1 MODALITÀ DI COLLASSO PER FATICA

(1)P Nelle strutture metalliche rinforzate con FRP, le modalità di collasso a fatica possono essere le seguenti:

- delaminazione per fatica del rinforzo;
- danneggiamento a fatica del metallo.

### 7.2 DELAMINAZIONE PER FATICA DEL RINFORZO

(1)P Le zone di concentrazione tensionale alle estremità degli elementi di rinforzo ed in corrispondenza di eventuali discontinuità del substrato (cricche) sono quelle più sensibili al danneggiamento per fatica del giunto adesivo.

(2) Si raccomanda di estendere il rinforzo in modo che le sue zone terminali siano ubicate in corrispondenza di sezioni poco sollecitate della trave rinforzata (ad esempio in prossimità degli appoggi), in modo da ridurre le tensioni responsabili della fatica a carico del giunto adesivo.

(3) Allo stato attuale non esistono metodi comprovati (ad esempio curve S-N) per la verifica a fatica di un giunto adesivo. In mancanza di adeguate verifiche sperimentali, la resistenza a fatica (limite di fatica) di un giunto adesivo può essere assunta, in prima approssimazione, pari al 20 ÷ 30% della resistenza statica.

### 7.3 DANNEGGIAMENTO A FATICA DEL METALLO

(1) Le seguenti considerazioni sono riferite al rinforzo di elementi strutturali metallici composti chiodati. Tale tipologia è stata ampiamente utilizzata nella prima metà del XX secolo per numerose strutture. Molte di esse sono ancora oggi in servizio e presentano frequentemente danneggiamenti a fatica.

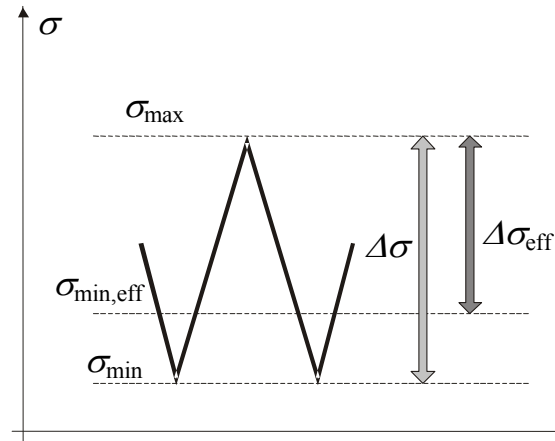
Il metodo di verifica qui proposto utilizza le leggi della meccanica della frattura.

#### 7.3.1 Generalità

(1)P La propagazione di una cricca nel substrato metallico è legata dalla variazione efficace,  $\Delta\sigma_{\text{eff}}$ , del ciclo di sforzo:

$$\Delta\sigma_{\text{eff}} = \sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min,eff}}, \quad (7.1)$$

dove per i simboli utilizzati si rinvia alla Figura 7-1 ed alle successive relazioni (7.2) e (7.3).



**Figura 7-1** – Variazione efficace del ciclo di sforzo.

(2)P Il valore di  $\sigma_{\min,eff}$  è funzione del rapporto di sforzo  $R$ :

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (7.2)$$

(3) Per il calcolo di  $\sigma_{\min,eff}$  può essere utilizzata la seguente espressione:

$$\sigma_{\min,eff} = \sigma_{\max} \cdot \max \left[ R; \frac{1}{1+\alpha} \cdot \left( 1 + \frac{R \cdot \sigma_{\max}}{\sigma_0} \right) \right], \quad (7.3)$$

essendo:

- $\alpha$  il fattore di confinamento ( $\alpha = 1$ , per stato di tensione piano e  $\alpha = 3$ , per stato di deformazione piana);
- $\sigma_0 \approx \frac{1}{2} (f_{yd} + f_{td})$  il valor medio tra la tensione di snervamento a trazione e la competente tensione di rottura.

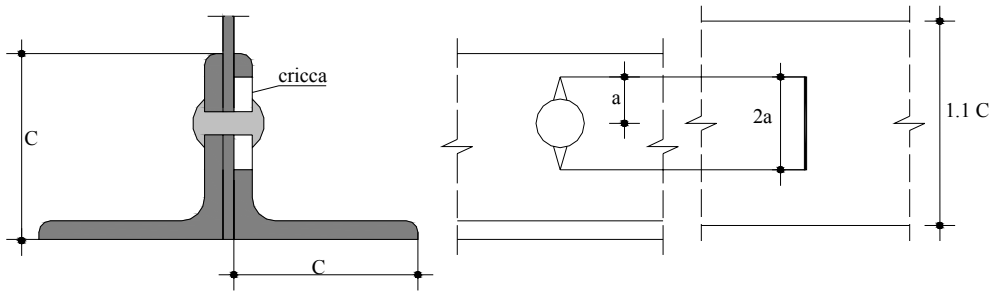
(4) La variazione efficace,  $\Delta K_{eff}$ , del fattore di intensificazione delle tensioni può essere calcolata nel seguente modo:

$$\Delta K_{eff} = \Delta \sigma_{eff} \cdot \rho \cdot Y \cdot \sqrt{\pi \cdot a} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min,eff}) \cdot \rho \cdot Y \cdot \sqrt{\pi \cdot a}, \quad (7.4)$$

essendo  $a$  la dimensione di cricca presente nell'elemento da rinforzare e  $Y$  il fattore adimensionale di intensificazione delle tensioni.

(5) Il fattore adimensionale di intensificazione delle tensioni,  $Y$ , può essere calcolato a prescindere dalla presenza del rinforzo, avendo trascurato l'effetto locale di ricoprimento della cricca. La sua valutazione può essere conseguita seguendo una procedura semplificata ovvero una procedura numerica.

Ricorrendo alla procedura semplificata, il calcolo di  $Y$  è effettuato sostituendo, come mostrato in Figura 7-2, all'elemento strutturale una piastra intagliata di dimensioni opportune.



**Figura 7-2** – Calcolo semplificato del fattore di intensificazione delle tensioni adimensionale  $Y$ .

(6)P L'arresto completo della propagazione della cricca è possibile se la variazione efficace,  $\Delta K_{\text{eff}}$ , del fattore di intensificazione delle tensioni nel ciclo di sforzo è inferiore al corrispondente valore di soglia,  $\Delta K_{\text{eff,th}}$ :

$$\Delta K_{\text{eff}} \leq \frac{\Delta K_{\text{eff,th}}}{\gamma_s}, \quad (7.5)$$

dove il coefficiente parziale  $\gamma_s$  deve essere assunto in accordo con il § 3.2.1.4.

(7) Per i moderni acciai da costruzione, la quantità  $\Delta K_{\text{eff,th}}$  è variabile tra  $90 \text{ N/mm}^{3/2}$  ( $R = 0.7$ ) e  $190 \text{ N/mm}^{3/2}$  ( $R < 0.15$ ). Per acciai datati sono possibili valori più elevati di  $\Delta K_{\text{eff,th}}$ . Ad esempio, per  $R = 0.7$  sono stati rilevati valori di tale quantità compresi tra  $145 \text{ N/mm}^{3/2}$  e  $180 \text{ N/mm}^{3/2}$ .

### 7.3.2 Fondamenti del calcolo

(1)P Rinforzando mediante FRP le strutture metalliche composte chiodate danneggiate a fatica, si intende perseguire uno o più dei seguenti scopi:

- riduzione dell'ampiezza di sforzo  $\Delta\sigma$  nel metallo rispetto alla situazione non rinforzata;
- introduzione di tensioni di compressione nel metallo nel caso di applicazione di lamine pretese;
- ricucitura della cricca.

Si può quindi distinguere un effetto "globale" associato alla riduzione di  $\Delta\sigma$  ed alla eventuale introduzione di tensioni di compressione nell'elemento rinforzato ed un effetto "locale" dovuto al ricoprimento (ricucitura) della cricca con il rinforzo.

(2) La riduzione dell'ampiezza di sforzo  $\Delta\sigma$  è valutabile mediante il parametro  $\rho$  appresso definito:

- per elementi soggetti a trazione 
$$\rho = \frac{E_s \cdot A_s}{E_s \cdot A_s + 2 \cdot E_f \cdot A_f}, \quad (7.6)$$

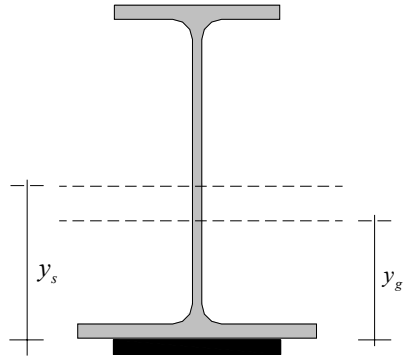
- per elementi soggetti a flessione 
$$\rho = \frac{I_s \cdot y_{gl}}{I \cdot y_s}, \quad (7.7)$$

essendo:

- $E_s \cdot A_s$  la rigidità estensionale del substrato;
- $E_f \cdot A_f$  la rigidità estensionale del rinforzo;

- $I_s$  il momento centrale d'inerzia della sezione metallica;
- $y_{g1}$  la distanza della fibra di FRP adesiva alla precedente, misurata a partire dal baricentro della sezione rinforzata (Figura 7-3);
- $I$  il momento centrale d'inerzia della sezione rinforzata;
- $y_s$  la distanza dell'estrema fibra metallica tesa dal baricentro della sezione metallica (Figura 7-3).

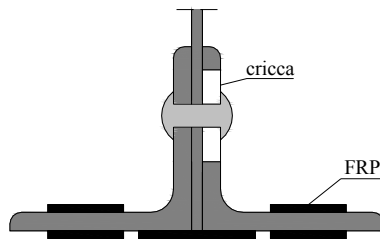
Il valore  $\rho \Delta\sigma_{\text{eff}}$  deve quindi essere utilizzato nella determinazione dell'ampiezza efficace del ciclo di sforzo nell'elemento rinforzato (eq. (7.4)), essendo  $\Delta\sigma_{\text{eff}}$  l'ampiezza in assenza di rinforzo



**Figura 7-3** – Caratteristiche geometriche della sezione rinforzata.

(3) In generale la riduzione dell'ampiezza del ciclo di sforzo  $\Delta\sigma$  nel metallo è di modesta entità a causa del contributo ridotto del rinforzo di FRP alla rigidità estensionale o flessionale della trave rinforzata.

(4) Inoltre, non è possibile ottenere una ricucitura, anche parziale, della cricca a causa della presenza di chiodature o bullonature nell'elemento da rinforzare. La Figura 7-4 mostra la configurazione da attribuire al rinforzo di una flangia tesa per la quale la presenza di chiodature impedisce il ricoprimento della cricca.



**Figura 7-4** – Esempio di configurazione di rinforzo a fatica.

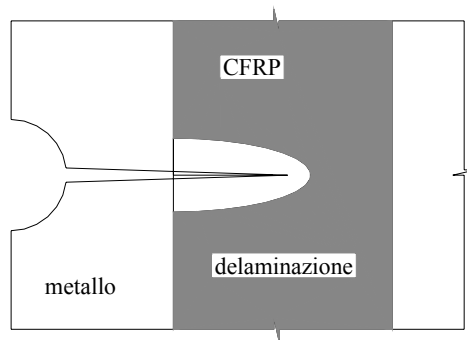
(5)P L'applicazione di lamine pretese prima dell'incollaggio risulta molto importante (se non addirittura necessaria) nel caso di problemi di fatica in quanto la pretensione riduce in modo significativo il rapporto di sforzo  $R$  attraverso l'introduzione di tensioni di compressione,  $\sigma_{sp}$ , nel metallo:

$$R = \frac{\sigma_{\min} - \sigma_{sp}}{\sigma_{\max} - \sigma_{sp}} \quad (7.8)$$

La riduzione del rapporto di sforzo riduce conseguentemente la velocità di propagazione di cricca sino eventualmente ad annullarla.

(6)P Indagini sperimentali hanno mostrato che la propagazione di cricche per fatica rimane confinata nel metallo, senza estendersi al rinforzo di FRP. La propagazione di cricca nella zona ricoper-

ta dal rinforzo provoca però una parziale delaminazione, come illustrato in Figura 7-5. Allo stato attuale non esistono modelli comprovati per la valutazione dell'entità del fenomeno.



**Figura 7-5** – Esempio di configurazione di rinforzo a fatica.

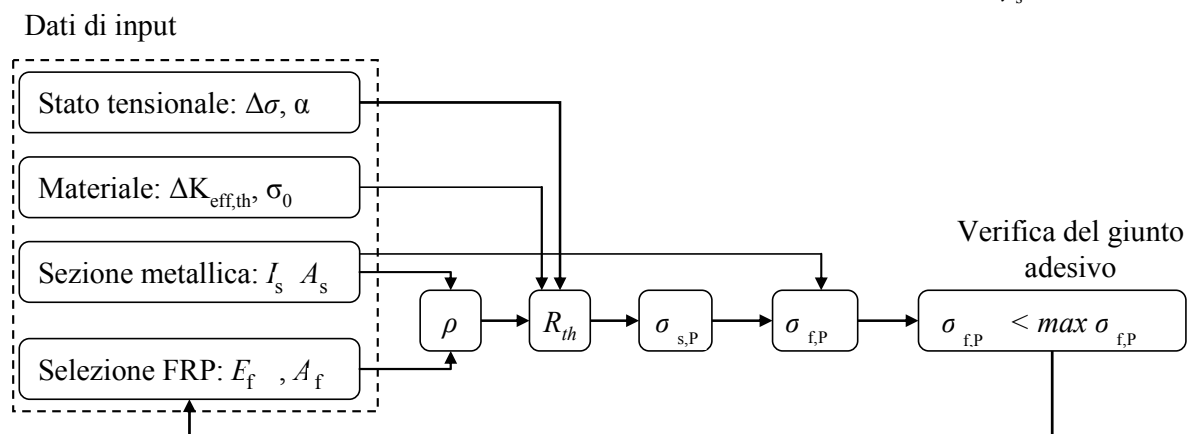
(7)P La verifica di elementi metallici danneggiati per fatica e rinforzati con FRP può essere effettuata sia attraverso le curve *S-N* che con le leggi della meccanica della frattura. Allo stato attuale sono disponibili leggi *S-N* solo per alcuni dettagli strutturali.

### 7.3.3 Dimensionamento del rinforzo a fatica

(1) Il metodo qui proposto utilizza le leggi della meccanica della frattura per valutare lo sforzo di pretensione nella lamina di FRP,  $\sigma_{fp}$ , in grado di arrestare la propagazione di cricca. Il metodo considera esclusivamente l'effetto globale, trascurando invece l'effetto locale dovuto al ricoprimento della cricca.

(2) Con riferimento al diagramma di flusso riportato in Figura 7-6, la procedura consente di determinare, una volta noti lo stato tensionale, le caratteristiche meccaniche dei materiali e la geometria del substrato e del rinforzo, il valore di  $\sigma_{sp}$  nell'elemento da rinforzare in grado di assicurare

l'arresto della propagazione di cricca, verificando cioè l'equazione:  $\Delta K_{eff} = \frac{\Delta K_{eff,th}}{\gamma_s}$ .



**Figura 7-6** – Procedura iterativa per il dimensionamento a fatica di lamine di FRP pretese.

(5) Il valore di  $R_{th}$  può essere valutato con la relazione:



$$\Delta\sigma = \frac{\eta \cdot (1 - R_{th}) \cdot \sigma_0 \cdot \alpha}{2 \cdot R_{th} \cdot \gamma_{Rd}} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{\Delta K_{eff,th}}{\gamma_s} \cdot \frac{4 \cdot R_{th} \cdot (1 + \alpha)}{\alpha^2 \cdot \sigma_0 \cdot \rho \cdot \sqrt{\pi \cdot a}}} \right). \quad (7.9)$$

Nella (7.9) devono essere attribuiti opportuni valori al coefficiente parziale del materiale,  $\gamma_s$ , (§ 3.2.1.1), al fattore di conversione,  $\eta$ , (§ 3.3) ed al coefficiente parziale di modello,  $\gamma_{Rd}$ , (Tabella 3-3, § 3.2.1.4).

A vantaggio di sicurezza la quantità  $\Delta K_{eff,th}$  può essere assunta pari a  $100 \text{ N/mm}^{3/2}$ . Per il fattore di confinamento si può assumere un valore pari a:  $\alpha = \sqrt{2 \cdot \sqrt{2}} = 1.68$ .

(6) Infine, il valore della tensione di compressione,  $\sigma_{sp}$ , da applicare all'elemento da rinforzare per ottenere un rapporto di sforzo pari a  $R_{th}$  può essere calcolato con la seguente relazione:

$$\sigma_{sp} = \frac{\rho}{\gamma_{Rd} \cdot (1 - R)} \cdot (\sigma_{min} - R_{th} \cdot \sigma_{max}). \quad (7.10)$$

(7) La valutazione del valore della tensione di pretensione,  $\sigma_{fp}$ , nel rinforzo può essere conseguita a partire da quello di  $\sigma_{sp}$  utilizzando gli usuali metodi della Scienza delle Costruzioni.

(8)P Si raccomanda di effettuare la verifica dell'ancoraggio al rilascio della pretensione della lamina al fine di evitarne la rottura o il danneggiamento, utilizzando i criteri descritti nel Capitolo 6.

## **8 INSTALLAZIONE, CONTROLLO E MANUTENZIONE**

### **8.1 GENERALITÀ**

(1)P Una struttura rinforzata richiede ispezione e controllo sia durante e immediatamente dopo l'applicazione del rinforzo, sia ad intervalli regolari, durante la vita della struttura. Nel caso di strutture rinforzate con FRP, tale attività di monitoraggio assume particolare rilevanza, dal momento che non si dispone di adeguate informazioni sul comportamento a lungo termine dei suddetti sistemi.

### **8.2 RACCOMANDAZIONI PER L'INSTALLAZIONE**

#### **8.2.1 Generalità**

(1)P La corretta installazione di un rinforzo di FRP dipende da diversi fattori, tra cui:

- lo stato di conservazione dei materiali di rinforzo;
- la preparazione della superficie del substrato;
- la preparazione dei materiali di rinforzo;
- le condizioni ambientali (temperatura, umidità);
- l'organizzazione del luogo di lavoro (pulizia, protezione da eventi accidentali).

(2) I materiali di rinforzo (fibre, resine, compositi) devono essere stoccati e conservati nelle condizioni specificate dal produttore.

(3) La preparazione dei materiali di rinforzo deve seguire scrupolosamente le indicazioni del produttore. Ad esempio le resine adesive sono solitamente ottenute per miscelazione di due parti, i cui rapporti quantitativi devono essere accuratamente controllati.

(4) Le condizioni di umidità e temperatura sono fondamentali per ottenere una buona aderenza del rinforzo al substrato. In particolare, la temperatura della struttura (e dell'ambiente) influisce sui tempi richiesti per la maturazione di una data percentuale della resistenza massima sviluppabile dal giunto adesivo. Il produttore fornisce intervalli di temperatura in cui l'applicazione può procedere in sicurezza e tali prescrizioni vanno accuratamente seguite. Un'umidità eccessiva potrebbe influire negativamente sulla durabilità del giunto adesivo, per cui si deve proteggere l'adesivo dal contatto con acqua durante il periodo di maturazione della resistenza.

(5)P Una buona organizzazione del cantiere è importante per un'applicazione a regola d'arte. In particolare, deve essere posta cura alla pulizia del luogo di lavoro, per evitare che particelle estranee si depositino sulla superficie pulita del substrato inficiando la qualità dell'aderenza del rinforzo.

#### **8.2.2 Preparazione della superficie del substrato**

(1) La corretta preparazione della superficie del substrato è fondamentale per ottenere una buona adesione del materiale composito al substrato. Tale preparazione coinvolge diverse fasi di trattamento della superficie, di seguito elencate.

- Rimozione di rivestimenti superficiali (pitture), ruggine e altri prodotti della corrosione. Questa operazione può essere effettuata utilizzando spazzole abrasive (o strumenti manuali simili), idropulitura, rimozione meccanica di scorie. Particolare attenzione dovrà essere posta nel caso di elementi di fragili (ghisa grigia), evitando l'uso di azioni percussive (trapani).

- Sgrassatura con solventi

Per rimuovere grasso ed evitare una diffusa contaminazione della superficie del substrato si possono utilizzare solventi appropriatamente scelti ed utilizzati con attenzione e moderazione.

- Abrasione

Per ottenere una superficie chimicamente attiva (abrasione) si può usare la sabbiatura, a secco o in umido. Residui di particelle solide possono essere rimossi lavando la superficie con acqua.

- Asciugatura

Se al termine della fase precedente la superficie è umida, occorre asciugarla immediatamente per evitare la formazione di ossidi (particolarmente rapida) sulla superficie già esposta.

- Trattamento chimico

Nel caso di acciaio zincato o acciaio inossidabile, si formano in superficie ossidi che devono essere rimossi con un opportuno trattamento acido della superficie, seguito dalla neutralizzazione. Questo trattamento non è richiesto nel caso di acciaio o ghisa grigia.

- *Primer*

Un primo strato di resina adesiva deve essere applicato il più presto possibile dopo la pulitura della superficie, e comunque non più tardi di due ore dal termine della pulitura. In alcuni casi può essere necessario applicare al substrato un *primer* con funzione di compatibilizzante.

- Regularizzazione della superficie

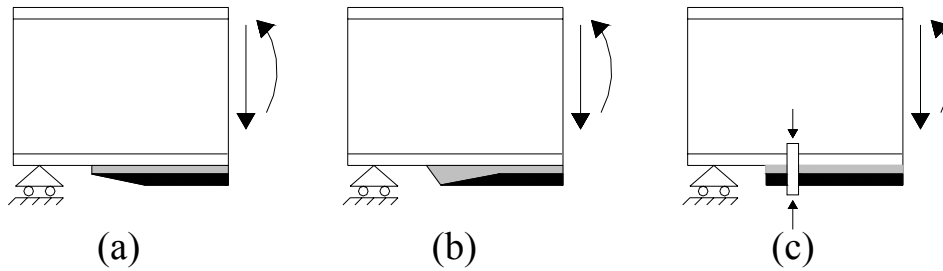
Piccole asperità o irregolarità della superficie possono essere regolarizzate con il *primer* e il successivo strato di resina. In alcuni casi queste irregolarità possono essere più marcate (ad esempio, nel caso di travi affette da corrosione o da elevata rugosità superficiale). In tal caso, si può utilizzare un adatto adesivo di riempimento.

### 8.2.3 Particolari costruttivi

(1) Si suggerisce di utilizzare una lunghezza di ancoraggio agli estremi del rinforzo non inferiore a 200 mm, a meno che non siano previsti connettori meccanici di validità comprovata.

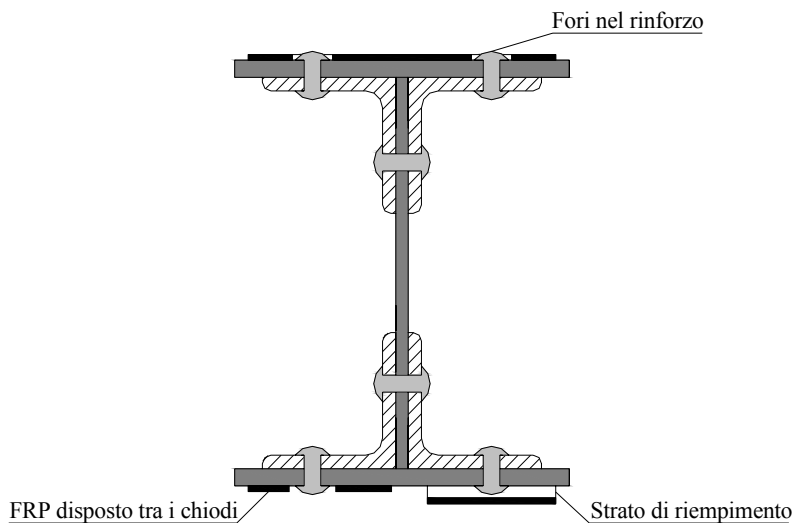
(2) Nel caso che si utilizzino fibre di carbonio, si suggerisce di evitare il loro diretto contatto con la superficie metallica, interponendo opportuni strati di materiale isolante, come ad esempio tessuti a base di fibre di vetro.

(3) Qualora la verifica della resistenza alla delaminazione abbia esito negativo e non sia possibile aumentare la lunghezza di ancoraggio, si dovranno studiare particolari costruttivi che consentano di ridurre i valori delle tensioni normali e/o tangenziali nello strato adesivo in corrispondenza delle estremità da ancorare. In Figura 8-1 sono riportati alcuni esempi di interventi idonei per conseguire la suddetta finalità. Le Figura 8-1(a) e Figura 8-1(b) rappresentano due modalità di rastremazione dello spessore del laminato composito utili allo scopo, mentre in Figura 8-1(c) è illustrato uno schema di ancoraggio meccanico.



**Figura 8-1** – Tipici interventi in zona di estremità per migliorare l’ancoraggio di estremità del rinforzo.

(4) Un dettaglio costruttivo da curare con particolare attenzione riguarda i collegamenti chiodati o bullonati. In Figura 8-2 sono rappresentate alcune soluzioni preferenziali per il trasferimento degli sforzi da flessione in corrispondenza di chiodi o bulloni.



**Figura 8-2** – Incollaggio di rinforzo in corrispondenza di giunti nella trave.

## 8.3 CONTROLLO DELL'ESECUZIONE

### 8.3.1 Generalità

(1) Il controllo della corretta esecuzione può essere condotto utilizzando prove semi-distruttive oppure non distruttive.

(2) Se si utilizzano materiali compositi preformati in stabilimento, il fornitore del materiale dovrà già aver condotto prove di qualificazione. Nel caso di materiali compositi formati *in situ* è necessario preparare campioni da sottoporre a prove di laboratorio. In ogni caso è necessario preparare provini per verificare la resistenza alla delaminazione.

(3) In vista di prove di controllo semi-distruttive da eseguirsi successivamente, è conveniente prevedere zone aggiuntive (“testimoni”) di rinforzo in parti selezionate della struttura. 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 in ogni caso 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 mec-

canismi 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.

### 8.3.2 Prove semi-distruttive

- (1) Potranno essere eseguite una prova di strappo normale ed un'altra a scelta tra quelle di seguito elencate. Le prove semi-distruttive vanno eseguite sui 'testimoni' e, se possibile, anche in zone non critiche del rinforzo, in ragione di un prova ogni 5m<sup>2</sup> di applicazione e comunque in numero totale non inferiore a due per tipo.
- (2) Prova di strappo normale. La prova è utile per l'accertamento della corretta preparazione della superficie e per verificare la compatibilità dell'adesivo utilizzato con la superficie del substrato. Si effettua con piastre di acciaio circolari di spessore 20mm e diametro 40mm. Il rinforzo deve essere tagliato intorno al bordo della piastra, con una fresa cilindrica retta di diametro < 3mm, rotante ad almeno 2500 giri/min, avendo cura di non surriscaldare il composito.
- (3) Prova di strappo a taglio. La prova risulta particolarmente significativa per l'accertamento della qualità dell'incollaggio. E' eseguibile solo se è possibile tirare una porzione di materiale composito nel proprio piano in corrispondenza di uno spigolo staccato dal substrato.
- (4) Prova di strappo a torsione. La prova viene eseguita con un dispositivo che consenta di applicare una coppia torcente.

### 8.3.3 Prove non-distruttive

- (1) Esistono diversi tipi di prove non distruttive, capaci di evidenziare vari tipi di difetti. In particolare, le prove non distruttive possono essere utilizzate per individuare la presenza di vuoti d'aria nell'adesivo. Nessuna prova non distruttiva può evidenziare una scarsa aderenza del rinforzo dovuta a ruggine o grasso sul substrato.
- (2) Le prove non distruttive possono essere utilizzate per caratterizzare l'omogeneità dell'applicazione del rinforzo. A tal fine, è necessaria un'adeguata mappatura bidimensionale della superficie rinforzata, con risoluzione variabile in relazione alla zona del rinforzo. La Tabella 8-1 suggerisce una possibile mappatura.

**Tabella 8-1** – Risoluzione minima per la mappatura di difetti mediante prove non distruttive.

| Trasferimento 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 dalla zona di sovrapposizione per fasciature 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. In presenza di difetti, come ad esempio una delaminazione o un distacco locale dal substrato oppure in presenza di vuoti, cambia il tempo di percorrenza delle onde ultrasoniche in riflessione. In tal modo la tecnica può essere utilizzata per evidenziare tali difetti. Sono richiesti un tecnico esperto ed un attrezzatura specialistica.

- (4) Prove di tipo acustico stimolato. Analoghe alle precedenti impiegano impulsi a bassa frequenza rispetto alle precedenti.
- (5) Prove in emissione acustica. La tecnica, basata sull'Emissione Acustica (EA), consente di cogliere e seguire la manifestazione e l'evoluzione 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. Appartiene ai metodi di controllo e monitoraggio passivi, che si attivano in funzione delle condizioni che si manifestano negli elementi strutturali in fase di esercizio. Tale tecnica è molto sensibile ai fini del rilievo di difetti dell'applicazione del composito e dell'inizio del distacco dal substrato.
- (6) Prove termografiche. Misurano piccole differenze di temperatura sulla superficie della struttura, in modo da evidenziare interruzioni del flusso termico dovute alla presenza di vuoti. Può essere una tecnica passiva (utilizzando l'esposizione termica naturale) oppure attiva (riscaldando artificialmente la superficie). Queste prove sono efficaci solo in presenza di materiali di rinforzo caratterizzati da bassi valori della conducibilità termica e non sono applicabili nel caso di fibre di carbonio o fibre metalliche, a meno di utilizzare accorgimenti particolari per aumentare adeguatamente la sensibilità del metodo. Occorre inoltre assicurare che il riscaldamento impartito nel corso della prova non danneggi il rinforzo con temperature troppo vicine a quella di transizione vetrosa.

#### 8.3.4 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, UNI EN 45013.

**Tabella 8-2 – 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 adatte 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. |

- (2) 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.

#### 8.4 SUGGERIMENTI PER LA MANUTENZIONE

- (1) I materiali compositi non richiedono nel tempo interventi di manutenzione. Nel caso in cui lo strato superficiale di resina in un sistema impregnato *in situ* risultasse parzialmente rimosso in seguito ad abrasione o degrado ambientale, si può facilmente ricostruire con una resina compatibile.
- (2) Le strutture metalliche rinforzate devono essere sottoposte agli usuali interventi di manuten-

zione. In particolare, si segnala l'opportunità di ripetere la verniciatura prima che lo strato precedente sia deteriorato, al fine di evitare le operazioni di pulizia della superficie del metallo che richiederebbero opportuni interventi di protezione dei compositi di rinforzo.

## 9 APPENDICE A

### 9.1 RASSEGNA DELLE PRINCIPALI APPLICAZIONI SU STRUTTURE ESISTENTI

Numerose sono le esperienze, in Europa, negli Stati Uniti ed in Italia, di ripristino della capacità portante di ponti ed altre strutture metalliche attraverso l'uso di FRP. Esse concernono diverse modalità di applicazione: *wet lay up*, incollaggio di elementi pultrusi e presollecitazione del sistema di rinforzo con lamine pultruse.

Nel prosieguo saranno discussi alcuni casi rappresentativi dei principali tipi di intervento riguardanti ponti ad arco, ponti a travata ed elementi compressi.

Esempi salienti di strutture tuttora in esercizio sono rappresentati, in Inghilterra, dai ponti *Hythe* (Luke 2001), *Tickford* (Lane 2000), *King Street* (Farmer et al. 2001), *Acton* (Moy et al. 2002) e dal ponte di *Slattocks Canal* (Luke 2001). Ulteriori casi degni di nota sono, a Londra, l'intervento di rinforzo dei puntoni di ghisa grigia di una galleria della metropolitana (Moy et al. 2000, Hill 2000, Leonard 2002) e negli Stati Uniti il rinforzo di travi longitudinali o trasversali di ponti a travata sulla *Interstate Highway- 704* (Miller 2001), *State Route 82* (Chacon et al. 2004), in *Delaware*, e sulla *State Highway 92*, in *Iowa* (Phares et al. 2003).

In Italia, l'unico esempio di simili applicazioni è quello relativo ad un ponte pedonale di ghisa grigia di Venezia, il ponte Corona, recentemente rinforzato mediante incollaggio di tessuti di arammi-de (Zerbo 2001, Ceriolo & Di Tommaso 2002, Zaffaroni et al. 2002, Bastianini et al. 2004).

#### 9.1.1 Ponte Hythe

Il ponte *Hythe*, costruito nel 1874 sul fiume Tamigi, consiste di una struttura a travata formata da due campate di luce pari a 7,8 m. Esso è composto da otto travi a T rovescia di ghisa grigia, collegate da arcate di mattoni che sostengono la carreggiata veicolare. L'intervento è consistito nel conferimento alle travate di uno stato di coazione per il tramite di una combinazione di lamine pultruse (due per ciascuna estremità delle travi) e tessuti di fibra di carbonio. Il livello di pretensione è stato stabilito in modo tale da assicurare la rimozione di tutti gli sforzi di trazione nelle travi di ghisa grigia per una ben definita ipotesi di transito veicolare (passaggio di veicoli fino a 400 kN).

La tecnica di precompressione adottata ha utilizzato: ancoraggi terminali, martinetti, telaio fisso, ancoraggi scorrevoli. La funzione degli ancoraggi terminali è stata quella di assicurare l'adesione del componente di FRP alla struttura preesistente, tenuto conto delle ben note concentrazioni di tensione alle estremità del laminato. La sollecitazione è stata trasferita al composito mediante martinetti collegati ad ancoraggi scorrevoli incollati al composito stesso. Martinetti ed ancoraggi scorrevoli hanno consentito il corretto allineamento del rinforzo all'asse delle travi in ghisa. Il completamento delle operazioni di presollecitazione del composito è avvenuto entro il termine di vita utile dell'adesivo.



Figura 9-1 – Ponte Hythe in Inghilterra.



### 9.1.2 Ponte Tickford

Il ponte *Tickford* fu realizzato in ghisa grigia da Thomas Wilson nel 1810 nei pressi di Newport Pagnell, in Gran Bretagna. Si tratta di un'elegante struttura formata da sei costole parallele che compongono una campata di luce pari a 18.29 m e sostengono un impalcato di larghezza di 7.2 m mediante sei cerchi che collegano le due parti. La struttura, a servizio di un intenso traffico veicolare che attraversa la cittadina di Newport Pagnell, è stata oggetto di un intervento di rinforzo con tessuti preimpregnati di fibre di carbonio. La scelta del tessuto ha facilitato il placcaggio delle superfici curvilinee dei cerchi che caratterizzano i pennacchi degli archi. Allo scopo di prevenire il fenomeno della corrosione galvanica è stato interposto, tra substrato e composito, un velo continuo di fibre di poliestere. Complessivamente sono stati applicati 14 strati di tessuto per uno spessore finale pari a 10 mm. L'applicazione alle nuove parti della stessa colorazione della struttura preesistente ha mascherato del tutto l'intervento.

### 9.1.3 Ponte Slattocks Canal

Il ponte veicolare *Slattocks* fu costruito nel 1936, in Inghilterra, sul canale Rochdale. Esso è caratterizzato da una campata di luce pari a 7.6 m con struttura portante composta di dodici travi a doppio "T" di metallo laminato. L'intervento di rinforzo è consistito nell'applicazione, all'intradosso delle membrature preesistenti, di due lamine di fibre di carbonio ciascuna dello spessore pari a 4 mm e di larghezza pari a 100 mm. L'intervento ha consentito di elevare la capacità portante del ponte da 170 kN a 400 kN.

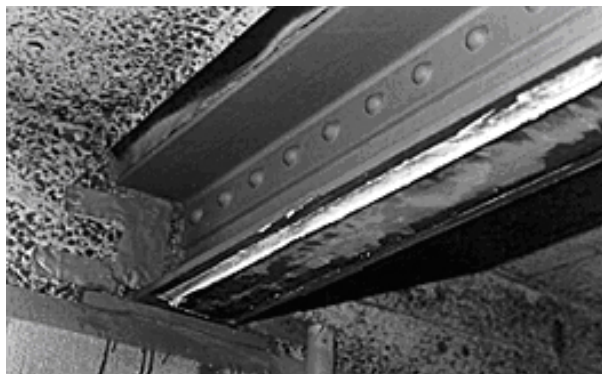


Figura 9-2 – Ponte Slattocks Canal in Inghilterra.

### 9.1.4 Ponte Acton

Il ponte *Acton* è una struttura a travata di acciaio con un impalcato di legno a servizio della metropolitana di Londra. Scopo dell'intervento è stata la riduzione dello stato tensionale indotto dai carichi di servizio di circa il 25%. Ciò ha consentito di aumentare la vita a fatica della struttura metallica, soggetta ad intensi cicli di carico dovuti al passaggio dei treni. Il ponte è stato rinforzato mediante l'applicazione di elementi pultrusi di carbonio alle flangie tese delle travi. Un accurato monitoraggio della risposta del sistema in fase di esercizio ha confermato l'efficacia dell'intervento.

### 9.1.5 Ponte King Street

Il ponte *King Street*, costruito nel 1870 in Inghilterra, è un ponte ferroviario adattato successivamente al transito veicolare. Esso è caratterizzato da sei travi metalliche che sostengono archi in muratura di larghezza pari a 2 m. Nel 1900 la sua unica campata fu ridotta da 8,9 m a 5,9 m mediante la creazione di un appoggio intermedio. Il rinforzo delle travi con l'uso di FRP ha permesso di ripristinare l'originale schema statico del ponte. Le travi sono state rinforzate all'intradosso con due laminati di 170 mm di larghezza e 33 mm di spessore. In senso longitudinale si è fatto uso di laminati

preimpregnati di fibra carbonio, mentre in senso trasversale si è ricorso a laminati di vetro con lo scopo di prevenire la corrosione galvanica. L'applicazione del rinforzo è avvenuta previo sollevamento della struttura preesistente mediante martinetti applicati in mezzzeria.

### 9.1.6 Ponte Corona

Il ponte *Corona*, realizzato nel 1850, è costituito da tre centine fuse di ghisa grigia sagomate inferiormente a formare un arco ribassato avente una luce pari a 4 m. Esso è il primo esempio di ponte di ghisa grigia pedonale realizzato a Venezia. Nel 2001 è stato restaurato con l'obiettivo di arrestare le lesioni e di ridurre la vulnerabilità della struttura agli impatti da imbarcazioni. Gli archi e le loro aperture decorative sono stati rinforzati, rispettivamente, con tessuto triassiale e con nastro unidirezionale, di arammide. Per quanto attiene agli archi laterali, si sottolinea che il rinforzo è stato applicato solo dal lato interno per la necessità di salvaguardare l'estetica del ponte; l'arco centrale, invece, è stato rinforzato da entrambi i lati. La resina è stata pigmentata di grigio in modo da mascherare l'intervento.



**Figura 9-3** – Arco del ponte Corona dopo l'intervento con FRP.

### 9.1.7 Strutture compresse di una galleria della metropolitana di Londra

Altro esempio di rinforzo strutturale con FRP è quello attuato nella copertura di una galleria della metropolitana di Londra. La struttura, composta di diciotto puntoni di ghisa grigia con sezione cruciforme, è stata rinforzata mediante l'incollaggio di ventisei strati di fibra di carbonio ad alto modulo sulle flangie di ciascun elemento. L'efficacia del sistema di rinforzo è stata preliminarmente testata su elementi, delle stesse dimensioni, aventi le medesime caratteristiche della struttura da rinforzare. Le prove sperimentali hanno dimostrato che il sistema di rinforzo con FRP ha innalzato la capacità portante della struttura di circa il 40%.

### 9.1.8 Ponte Christina Creek

Il ponte *Christina Creek* (I-704) di Delaware, in USA, è caratterizzato da una struttura mista acciaio-calcestruzzo che, recentemente, è stata interessata da un intervento di rinforzo basato sull'applicazione di FRP. L'intervento, proposto dal dipartimento dei Trasporti dell'Università di Delaware, ha rivestito un carattere puramente scientifico interessando una struttura perfettamente integra: la finalità è stata quella di indagare sull'efficienza di sistemi di rinforzo con FRP attuati su ponti con struttura mista acciaio-calcestruzzo, largamente diffusi negli Stati Uniti. Nello specifico, l'intervento ha avuto lo scopo di: verificare la durabilità dell'incollaggio all'esposizione agli agenti ambientali e nei confronti della fatica. Il ponte è caratterizzato da tre campate semplicemente appoggiate alle estremità, con una lunghezza totale di 35 m. Sei lamine pultruse di carbonio, ciascuna di lunghezza pari ad 1,5 m, sono state incollate in parallelo sulla superficie esterna della flangia tesa. Per assicurare il perfetto accostamento delle lamine e per facilitarne l'applicazione, alle estremità

tà di queste ultime si è realizzato un giunto a pettine con sfettatura a 45°. L'incollaggio delle lamine è stato eseguito con un adesivo bicomponente applicato con una pistola ad aria compressa. Per evitare il fenomeno della corrosione galvanica è stato interposto, tra la lamina di CFRP e la flangia tesa, uno strato di tessuto di fibra di vetro.



**Figura 9-4** – Pultrusi di carbonio applicati usando morsetti removibili sul ponte I-704 in USA (Miller et al. 2001).

I risultati della suddetta indagine hanno evidenziato, a seguito dell'applicazione di lamine pultruse di carbonio, un incremento di rigidità del 11,6% e una diminuzione di deformazione del 10%.

**Tabella 9-1** – Tabella riassuntiva delle applicazioni su strutture da ponte metalliche.

| Contesto di intervento                                                             | Tipologia                                           | Materiale     | Tecnica di rinforzo                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Finalità                                                                                                                                           | Data intervento |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Ponte Tickford</b><br>1810, Newport Pagnell, Inghilterra.<br>Ponte veicolare    | Archi e impalcato di conglomerato cementizio armato | Ghisa grigia  | Incollaggio di tessuti preimpregnati in fibra di carbonio e sottofondo di poliestere                                                                                                                                                                                                                                           | Riduzione delle tensioni di trazione nel materiale originale                                                                                       | 1999            |
| <b>Ponte Hyhte</b><br>1874, Oxford, Inghilterra.<br>Ponte veicolare                | Travi a T rovescia e archi di muratura              | Ghisa grigia  | Pretensionamento di piatti in fibra di carbonio                                                                                                                                                                                                                                                                                | Eliminazione delle tensioni di trazione sulle travi in conseguenza di una variazione delle condizioni di esercizio: passaggio di veicoli fino 40 t | 2000            |
| <b>Ponte Slattocks Canal</b><br>1936, Inghilterra.<br>Ponte veicolare              | Travi a I e impalcato di cemento armato             | Acciaio Early | Incollaggio di piatti in fibra di carbonio                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Incremento capacità portante per passaggio di veicoli fino a 40 t                                                                                  | 2000            |
| <b>Ponte King Street.</b><br>1870, Inghilterra.<br>Ponte veicolare                 | Travi a T e archi di muratura                       | Ghisa grigia  | Incollaggio di laminati preimpregnati in fibra di carbonio ed in fibra di vetro rispettivamente nelle due direzioni longitudinale e trasversale.<br>Sono state utilizzate strutture temporanee di supporto dell'impalcato, per scaricare le travi e rendere collaborante il composito già in presenza di in carichi permanenti | Incremento della capacità portante per passaggio di veicoli fino a 40 t                                                                            | 2000            |
| <b>Ponte Acton</b><br>London Underground, Inghilterra.<br>Ponte ferroviario        | Travi a I e impalcato di legno                      | Acciaio Early | Incollaggio di piatti in fibra di carbonio                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Riduzione delle tensioni di trazione nel materiale originale per incrementare la vita a fatica                                                     | 2000            |
| <b>Ponte de la Corona</b><br>1851, Venezia, Italia.<br>Ponte pedonale              | Archi e impalcato con travi di acciaio              | Ghisa grigia  | Incollaggio di tessuti triassiale e nastri in fibra di arammide                                                                                                                                                                                                                                                                | Riduzione della vulnerabilità nei confronti di shock termici e impatti di natanti                                                                  | 2002            |
| <b>Christina Creek bridge</b><br>I-704, Delaware, USA.<br>Ponte veicolare          | Travi e impalcato di calcestruzzo                   | Acciaio       | Incollaggio di piatti in fibra di carbonio                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Progetto pilota per analisi della resistenza a fatica e della sensibilità agli agenti ambientali                                                   | 2000            |
| <b>Ponte Ashland</b><br>Delaware, USA.<br>Ponte veicolare                          | Travi e impalcato di calcestruzzo                   | Acciaio       | Incollaggio di piatti in fibra di carbonio                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Riduzione delle tensioni di trazione nel materiale originale per incrementare la vita a fatica                                                     | 2002            |
| <b>Ponte 7838.5S092</b><br>Pottawattamie County, Delaware, USA.<br>Ponte veicolare | Travi e impalcato di calcestruzzo                   | Acciaio       | Incollaggio di piatti in fibra di carbonio                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Riduzione delle tensioni di trazione nel materiale originale per incrementare la vita a fatica                                                     | 2003            |

## 9.2 STATO DELL'ARTE: SPERIMENTAZIONI

Gli studi condotti sulle strutture metalliche rinforzate esternamente con FRP si sono concentrati, finora, sul miglioramento generale delle prestazioni: dalla capacità portante, alla rigidezza; dalla duttilità, alla durabilità ambientale, al comportamento a fatica nei confronti di carichi ciclici.

Le esperienze condotte su vari tipi di elementi strutturali metallici, come travi da ponte di acciaio e pilastri, brevemente richiamate nel paragrafo precedente, hanno dimostrato l'efficacia dell'uso di FRP come rinforzo di elementi strutturali siffatti. Da esse si evince che un aspetto di cruciale importanza è rappresentato dalle condizioni del substrato metallico e dalle caratteristiche dell'adesivo. Le

sperimentazioni condotte si possono raggruppare in funzione dello scopo: analisi del *debonding*, comportamento a flessione, comportamento a fatica, analisi del rinforzo di elementi compressi. Per ciascuno dei temi elencati si propone, nei paragrafi seguenti, una bibliografia ragionata.

### 9.2.1 Crisi per delaminazione

Le modalità di collasso di un elemento d'acciaio rinforzato con FRP sono state classificate in Buyukozturk et al. (2003), dove si sono individuate: collasso per instabilità della flangia compressa; collasso per instabilità dell'anima a taglio; rottura del rinforzo con FRP e *debonding* del composito. Il collasso nella resina, che potenzialmente avviene in zone di discontinuità geometrica nelle quali la concentrazione delle tensioni tangenziali nello strato adesivo determina un significativo trasferimento di carico dal substrato metallico al laminato composito fibrorinforzato, ovvero alle estremità di quest'ultimo e/o in corrispondenza delle fratture nell'elemento strutturale riparato mediante incollaggio di piastre in FRP, in concomitanza di un fenomeno di concentrazione di interazioni normali, è stato indagato in numerosi studi sperimentali, dove sono state anche individuate alcune misure precauzionali. La soluzione più usata nelle applicazioni correnti è stata proposta da Vinson & Sierakowski (1987), e consiste nel tagliare le estremità dell'elemento pultruso con un angolo di 45° e nella rastremazione delle estremità del laminato di rinforzo, come ben noto da applicazioni di ingegneria aeronautica (de Bruyne 1944, Hart-Smith 2001). Liu et al. (2001) hanno invece proposto di fasciare i laminati trasversalmente all'asse longitudinale, in corrispondenza delle estremità del composito.

La durabilità dell'incollaggio è, peraltro, condizionata dal fenomeno della corrosione galvanica che può originarsi dall'accoppiamento, in soluzione elettrolitica, di due materiali diversi quali il carbonio e l'acciaio, di diversa classificazione nella serie elettrochimica (Aylor 1993, Bellucci 1991, 1992). Una soluzione praticabile consiste nell'aggiunta di uno strato di tessuto in fibra di vetro, inserito fra metallo ed FRP all'atto dell'incollaggio (West 2001, Tavakkolizadeh & Saadatmanesh 2001) o, nel caso di laminati pultrusi, già presente nel rinforzo in corrispondenza della superficie di incollaggio (McKnight 1994, Karbhari & Shulley 1995). Nel caso di strutture esposte all'azione di sali disgelanti o acqua/atmosfera marina che risultino nella presenza di soluzioni alcaline ( $\text{pH} > 7$ ), appare altresì opportuno evitare l'uso di resine passibili di idrolisi con rilascio di ioni ossidrilici (Buyukozturk & Gunes 2000, Tucker & Brown 1989, Boyd et al. 1991, Tavakkolizadeh & Saadatmanesh 2001).

### 9.2.2 Rinforzo a flessione

Le sperimentazioni condotte su travi sollecitate a flessione hanno avuto la finalità di verificare la possibilità di rinforzare sezioni danneggiate di membrature metalliche o di incrementare la resistenza di elementi strutturali integri. I vari studi hanno preso in considerazione casi di materiale diverso (acciaio e ghisa grigia) e varie modalità di simulazione del danneggiamento. Come rinforzo sono stati utilizzati pultrusi e preimpregnati di carbonio, incollati con adesivi epossidici o resine bicomponenti (nel caso di travi di acciaio e di ghisa grigia), e tessuti multidirezionali di arammide impregnati *in situ* (nel caso di travi di ghisa grigia).

Un esempio di simulazione del danneggiamento è riportato in Sen et al. (2001): il danneggiamento è stato simulato precaricando, oltre il limite di snervamento, la flangia tesa di una trave di acciaio, così da conferire una deformazione permanente. Le prove sono state condotte utilizzando pultrusi di CFRP, di vario spessore, e acciai con limiti di snervamento diversi.

Travi lesionate in mezzzeria, per incisione della flangia tesa, sono state utilizzate nel lavoro sperimentale di Liu et al. (2001), che ha eseguito test a flessione su tre punti.

Prove a flessione sono state condotte anche su travi deteriorate ottenute dalla demolizione di un ponte esistente. I risultati sono riportati in Mertz & Gillespie (1996).

Il lavoro sperimentale di Photiou et al. (2004), presenta, invece, i risultati di un'indagine condotta su travi metalliche rinforzate a flessione con un sistema ibrido composto di *prepregs* di carbonio e

vetro, incollati al substrato di acciaio con uno strato di adesivo. In questo caso lo strato di vetro interposto tra carbonio e acciaio non ha solamente la funzione di isolamento nei confronti del fenomeno della corrosione, ma permette di conferire al giunto una migliore resistenza al collasso, grazie alla evidente gradualità nella variazione della tensione tangenziale dal substrato di acciaio allo strato del composito di carbonio. Il sistema è stato applicato ad una trave sollecitata a flessione mediante una prova su quattro punti; la sezione, di tipo scatolare, è stata danneggiata artificialmente con l'asportazione di metà dello spessore della flangia tesa.

Test a flessione di travi metalliche integre (non danneggiate), rinforzate con FRP, sono riportati nel lavoro di Moy (2002), Moy & Nikoukar (2002). Nello studio si analizza il comportamento di provini sollecitati durante il periodo di polimerizzazione della resina secondo ben definiti cicli di carico. I risultati dimostrano la sostanziale perdita di benefici nei casi in cui le sollecitazioni siano affidate alla membratura rinforzata prima che la resina abbia completato il processo di indurimento.

### **9.2.3 Rinforzo a fatica**

Studi sperimentali sono riportati in Gillespie et al. (1996), Miller et al. (2001), Bassetti et al. (2000), Nozaka (2002), Jones & Civjan (2003), and Matta et al. (2004) Gillespie et al. (1996). Miller verifica la resistenza a fatica dell'incollaggio confrontando il comportamento del composito incollato con quello di un normale dettaglio di acciaio sensibile alla fatica, che nella Normativa statunitense è classificato come dettaglio di categoria C'. I risultati ottenuti, dimostrano che, per il caso esaminato, il composito incollato presenta un comportamento migliore di quello esibito da un dettaglio di categoria C'. Se ne desume, quindi, che l'incollaggio CFRP-acciaio, in termini di durabilità a fatica, non costituisce il dettaglio più sensibile quando l'adesivo è soggetto a sole deformazioni elastiche.

### **9.2.4 Rinforzo di elementi compressi**

La possibilità di incrementare il carico critico di elementi compressi di acciaio a sezione circolare mediante la fasciatura di tessuti di carbonio è stata proposta da Carolin (2003).

Il tema è stato affrontato anche in uno studio di Liu et al. (2003) con riferimento a colonne di acciaio di un ponte riempite di calcestruzzo e rinforzate con FRP.

Un'analisi di stabilità di elementi in parete sottile rinforzati con pultrusi di FRP applicati lungo le ali di profili HEA è riportata in Cecchi & Zerbo (2004).

## 10 APPENDICE B: RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

### *Aspetti generali e Rinforzo di elementi inflessi*

- Al-Saidy, A.H, Klaiber, F.W. and Wipf, T.J. (2004), "Repair of Steel Composite Beams with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Plates," *ASCE Journal of Composites for Construction*, 8[2], pp. 163-172.
- Ammar, N. (1996), "Rehabilitation of Steel Bridge Girders with Graphite Pultrusion", M.S. Thesis, University of Delaware, Newark, DE.
- Angus, C.C., Cheng, J.J. and Yam, C.H. (2004), "Study of the Tensile Strength of CFRP/Steel Double Lap Joints," Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Calgary, Canada
- de Bruyne, N.A. (1944), "The Strength of Glued Joints", *Aircraft Engineering*, 16[182], 115-118, 140.
- Frauenberger, A., Liu, X., Meyyappan, L., Mata, J., Gupta, T., Silva, P.F., Dagli, C.H., Pottinger, H.J., Nanni, A. and Marianos, W.N. Jr. (2003), "FRP Repair and Health Monitoring of Railroad Steel Bridges", CIES Report 03-44, University of Missouri, Rolla.
- Gillespie, J. W., Mertz, D. R., Edberg, W. M., Ammar, N., Kasai, K., and Hodgson, I. C. 1996. Rehabilitation of Steel Bridge Girders through Applications of Composite Materials. In Proc., 28th International SAMPE Technical Conference, November 4-7.
- Hart-Smith, L.J. (2001), "Bolted and Bonded Joints", in *Composites*, Vol. 21, ASM Handbook, American Society for Materials (ASM) International, 271-289.
- Hollaway L.C., Cadei J. (2002). Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites. *Prog. Struct. Engng. Mater.*, 4, 131-148.
- Kennedy, G.D. (1998), "Repair of Cracked Steel Elements Using Composite Fibre Patching," M.S. Thesis, University of Alberta, Canada
- Lanier, B.K. (2005), "Study in the Improvement in Strength and Stiffness Capacity of Steel Multi-sided Monopole Towers Utilizing Carbon Fiber Reinforced Polymers as a Retrofitting Mechanism," M.S. Thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC
- Liu, X., Silva, P., Nanni, A. 2001. Rehabilitation of Steel Bridge Members with FRP Composite Material. In Proc., CCC 2001, Composite in Construction, Porto, Portugal, 10-12 October, edited by J. Figueras, L. Juvandes and R. Furia. Eds.
- Matta, F. (2003), "Bond between Steel and CFRP Laminates for Rehabilitation of Metallic Bridges", Thesis, University of Padova, Padova, Italy, 171 pp.
- Mertz, D.R., and Gillespie, J.W. Jr (1996), "Rehabilitation of Steel Bridge Girders through the Application of Advanced Composite Materials," IDEA Project Final Report, Contract NCHRP-93-ID011, Transportation Research Board, 30 pp.
- Mertz, D.R., Gillespie, J.W. Jr. and Edberg, W. (1996), "Rehabilitation of Steel Bridges with Composite Materials", *Recent Advances in Bridge Engineering, Evaluation, Management and Repair*, J.R. Casas, F.W. Klaiber and A.R. Mari, eds., CIMNE, Barcelona, Spain, 556-569.
- Mertz, D. M., Gillespie, J. W., and Edberg, W. 1996. Rehabilitation of Steel Bridges with Composite Materials. In Proc., *Recent Advances in Bridge Engineering*, Barcelona.

- Mosallam, A. S., Chakrabarti, P. R., and Spencer, E. 1998. Experimental Investigation on the Use of Advanced Composites & High-Strength Adhesives in Repair of Steel Structures. In 43rd International SAMPE Symposium May 31- June 4.
- Moy, S. S. J., Nikoukar, F. 2002. Flexural Behaviour of Steel Beams Reinforced with Carbon Fibre Reinforced Polymer Composite. In Proc., ACIC 2002, Southampton University, UK, 15-17 April, edited by R. A. Shenoi, S. S. J. Moy, L. C. Hollaway. Thomas Telford.
- Nozaka, K. (2002), Repair of Fatigued Steel Bridge Girders with Carbon Fiber Strips, Ph.D. Thesis, University of Minnesota, MN.
- Nozaka, K., Shield, C.K. and Hajjar, J.F. (2005), "Effective Bond Length of Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Strips Bonded to Fatigued Steel Bridge I-Girders," ASCE Journal of Composites for Construction, 10[2], pp. 195-205.
- Ono, K., Sugiura, K., Sasaki, A., Wakahara, N. and Komaki, H. (2001), "Bond Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Plastics to Structural Steels" Proc. Int. Conf. on High Performance Materials in Bridges, Kona, Hawaii, ASCE, Reston, VA, 34-43.
- Photiou, N., Hollaway, L.C., Chryssanthopoulos, M.K. (2004). Strengthening of an artificially degraded steel beam utilising a carbon/glass composite system. In L.C. Hollaway, M.K. Chryssanthopoulos and S.S.J. Moy (eds), Proc. Int. Conf., Advanced Polymer Composites for structural applications in construction ACIC 2004, 20-22 April 2004, Guilford UK. Cambridge, England:Woohead Publishing Limited.
- Schnerch D., Stanford K., Sumner E.A., Rizkalla S. (2004). Strengthening steel structures and bridges with high modulus carbon fiber reinforced polymers: resin selection and scaled mono-pole behaviour. TRB 2004 Annual Meeting, CD-ROM.
- Sebastian, W.M. (2003), "Nonlinear Influence of Contraflexure Migration on Near-curtailment Stresses in Hyperstatic FRP-Laminated Steel Members," Computers and Structures, 81[16], pp. 1619-1632.
- Sen, R. and Liby L. (1994), "Repair of Steel Composite Bridge Sections using CFRP Laminates", Final Report submitted to the Florida Department of Transportation (FDOT), University of South Florida, Tampa, FL.
- Sen, R., Liby, L., Mullins, G. 2001. Strengthening Steel Bridge Sections Using CFRP Laminates, Composites: Part B, 32: from 309-322.
- Tavakkolizadeh A., Saadatmanesh H. (2003a). Repair of damaged steel-concrete composite girders using carbon fiber-reinforced polymer sheets. Journal of Composites for Construction, 7(4), November 1, 311-322.
- Tavakkolizadeh, M., Saadatmanesh, H. 2001. Repair of Cracked Steel Girder Using CFRP Sheets. In Proc.,ISEC-01, Creative Systems in Structural and Construction Engineering, Hawaii, January 24-27.
- Tavakkolizadeh, M., Saadatmanesh, H. 2002. Repair of Steel Bridges with CFRP Plates. In Proc., ACIC 2002, Southampton University, UK, 15-17 April, edited by R. A. Shenoi, S. S. J. Moy, L. C. Hollaway. Thomas Telford.- Tavakkolizadeh, M. and Saadatmanesh, H. (2003), "Strengthening of Steel-Concrete Composite Girders Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Sheets," ASCE Journal of Structural Engineering, 129[1], pp. 30-40.
- Vatovec, M., Kelley, P.L., Brainerd, M.L. and Kivela, J.B. (2002), "Post Strengthening of Steel Members with CFRP", Proceedings of the 47th International SAMPE Symposium and Exhibition, Long Beach, CA, May 12-16, 2002, Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE), pp. 941-954.



*Resistenza a fatica*

- Albrecht, P. (1987), "Fatigue Strength of Adhesively Bonded Cover Plates," ASCE Journal of Structural Engineering, 113[6], pp. 1236-1250.
- Bassetti, A., Nussbaumer, A., Hirt, M. 2000. Crack Repair and Fatigue Life Extension of Riveted Bridge Members using Composite Materials. In Proc., Bridge Engineering Conference, ESE-IABSE-FIB, 26-30 March 2000, Sharm El Sheik (Egypt).
- Bassetti, A. 2001. Lamelles Précontraintes en Fibres de Carbone pour le Renforcement de Ponts Rievétés Endammaées Endommagés par Fatigue. Ph.D. Thesis no. 2440, Swiss Federal Institute of Technology, (EPFL), Lausanne, Switzerland.
- Jones, S.C. and Civjan, S.A. (2003), "Application of Fiber Reinforced Polymer Overlays to Extend to Steel Fatigue Life," ASCE Journal of Composites for Construction, 7[4], pp. 331-338.
- Matta, F., Karbhari, V.M., Tinazzi, D., Vitaliani, R. Static and fatigue behaviour of steel/CFRP adhesive bonds for the rehabilitation of metallic bridges. In Di Tommaso A, editor. Mechanics of masonry structures strengthened with FRP – materials modelling, testing, design, control, Padova (I): Libreria Cortina; 2004, p. 411-420.
- Miller, T.C. (2000), "The Rehabilitation of Steel Bridge Girders Using Advanced Composite Materials", M.S. Thesis, University of Delaware, Newark, DE, 58-79.
- Nussbaumer, A., Bassetti, A., Colombi, P. Elements en acier sous charges de fatigue renforcés par des lamelles precontraintes en materiau composite. Construction Metallique 2004; 3:3-13.
- Tavakkolizadeh, M., and Saadatmanesh, H. 2003. Fatigue Strength of Steel Girders Strengthened With Carbon Fiber Reinforced Polymer Patch, Journal of Structural Engineering, ASCE, 2(129): from 186-196.

*Delaminazione*

- Buyukozturk, O., Gunes, O. and Karaca, E. (2004), "Progress on Understanding Debonding Problems in Reinforced Concrete and Steel Members Strengthened Using FRP Composites", Construction and Building Materials, Vol. 18[1], 9-19.
- Buyukozturk, O., Gunes, O., Karaca, E. (2003). Progress on Understanding Debonding Problems in reinforced Concrete and Steel Members Strengthened using FRP Composite. In Proc., 10th International Conference and Exhibition London, UK, 1-3 July.
- Colombi, P., Panzeri, N., Poggi, C. Experimental characterization of steel elements reinforced by adhesively bonded CFRP plates. In: Chryssanthopoulos M, Hollaway LC, editors. Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction, Abington (UK): Woodhead Publishing Limited; 2004, p. 245-257.
- Colombi, P., Bassetti, A. and Nussbaumer, A. (2003), "Analysis of Cracked Steel Members Reinforced by Pre-Stress Composite Patch", Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 26(1), 59-66.
- Colombi, P., Bassetti, A., Nussbaumer, A. (2003). Delamination Effects on Cracked Steel Members Reinforced by Prestressed Composite Patch, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Elsevier, 39: from 61-71.
- Deng J., Lee M.M.K., Moy S.S.J. (2004). Stress analysis of steel beams reinforced with a bonded CFRP plate. Composite Structures, Vol. 65, 205-215.

- Lenwari, A., Thepchatri, T. and Watanabe, E. (2002), "Prediction of Premature Separation of Bonded CFRP Plates from Strengthened Steel Beams Using a Fracture Criterion", *Structural Engineering and Mechanics*, 14(5), pp. 565-574.
- McKnight, S. H., Bourban, P. E., Karbhari, V. M., and Gillespie, J. W. 1994. Surface Preparation of Steel for Adhesive Bonding in Rehabilitation Applications. In Proc. Of the Third Materials Engineering Conference, Infrastructure: New Materials and Methods of Repair, edited by Basham KD. San Diego, CA: ASCE.
- Photiou, N., Hollaway, L.C., Chryssanthopoulos, M.K. (2003). Characterization of adhesively bonded plates for upgrading structural steelwork. In M.C. Forde (ed.), Proc. Int. Conf., Structural Faults and Repair, London. Edinburgh: Engineering Technics Press.

#### *Rinforzo di elementi compressi*

- Carolin, A. 2003. Carbon Fiber Reinforced Polymers for Strengthening of Structural Elements. Doctoral Thesis no. 2003:18, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
- Cecchi A., Zerbo V. 2004. Analisi di stabilità di travi metalliche rinforzate con FRP-materials. In 2nd Nat. Symp. Mechanics of Masonry Structures strengthened with FRP-materials: modeling, testing, design, control, Venezia, 6-8 Dicembre, edited by Ceriolo L., Zerbo V. Libreria internazionale Cortina:Padova.
- Hill P. S. 2000. Use of High Modulus Carbon Fibers for Reinforcement of Cast Iron Compression Struts within London Underground – Project Details.
- Liu, X., Nanni, A., Silva, P. 2003. Rehabilitation of Steel Bridge Columns with Composite Materials. In Proc., 10th International Conference and Exhibition London, UK, 1-3 July 2003.
- Shaat, A. and Fam, A. (2004), "Strengthening of Short HSS Steel Columns Using FRP Sheets," Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Calgary, Canada.
- Teng J.G., Hu Y.M. 2004. Suppression of local buckling in steel tubes by FRP jacketing in FRP Composites in civil Engineering, CICE 2004, Seracino ed., Taylor & Francis Group, London 2005.

#### *Durabilità e Problemi speciali*

- Aylor, D.M. (1993), "The Effect of a Seawater Environment on the Galvanic Corrosion Behaviour of Graphite/Epoxy Composites Coupled to Metals", High Temperature and Environmental Effects on Polymeric Composites, ASTM STP 1174, C.E. Harris and T.S. Gates, eds., American Society for Testing and Materials (ASTM), pp. 81-94.
- Bellucci, F. (1991), "Galvanic Corrosion between Nonmetallic Composites and Metals: I. Effect of Metal and of Temperature", *Corrosion*, National Association of Corrosion Engineers (NACE), 47(10), pp. 808-819.
- Bellucci, F. (1992), "Galvanic Corrosion between Nonmetallic Composites and Metals: II. Effect of Area Ratio and Environmental Degradation", *Corrosion*, National Association of Corrosion Engineers (NACE), 48(4), pp. 281-291.
- Bonk, R.B., Ostendorf, J.F., Ambrosio, A.M., Pettenger, B.L. and Froelich, K.A. (1996), "Evaluation of Adhesives for Adhering Carbon/Epoxy Composites to Various Metallic Substrates", Proceedings of the 41st International SAMPE Symposium and Exhibition, Anaheim, CA,

- March 24-28, 1996, Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE), pp. 1472-1485.
- Boyd, J., Chang, G., Webb, W., Speak, S., Gerth, D. and Reck, B. (1991), "Galvanic Corrosion Effects on Carbon Fiber Composites", Proceedings of the 36th International SAMPE Symposium and Exhibition, San Diego, CA, April 15-18, 1991, Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE), pp. 1217-1231.
- Bourban, P.E., McKnight, S.H., Shulley, S.B., Karbhari, V.M. and Gillespie, J.W. Jr., (1994), "Durability of Steel/Composite Bonds for Rehabilitation of Structural Components," Proceedings of the 1994 ASCE Materials Engineering Conference, San Diego, CA, pp. 295-302.
- Ceriolo, L., Di Tommaso, A. (2001). Cast Iron Bridge Failure Due to Impact: reduced Vulnerability through FRP Composite Materials Strengthening. In National Conf. on Structure failures and reliability of civil constructions, Istituto Universitario di Architettura di Venezia, 6 – 7 December.
- Colombi P, Fanesi E, Fava G, Poggi C. Steel elements strengthened by FRP materials: durability under mechanical and environmental loads. In Di Tommaso A, editor. Mechanics of masonry structures strengthened with FRP – materials modelling, testing, design, control, Padova (I): Libreria Cortina; 2004, p. 387-398.
- Gettings, M. and Kinloch, A.J. (1977), "Surface Analysis of Polysiloxane/Metal Oxide Interfaces", Journal of Materials Science, 12(12), pp. 2511-2518.
- Karbhari, V. M., and Shulley, S. B. 1995. Use of Composites for Rehabilitation of Steel Structures – Determination of Bond Durability, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 4(7): from 239-245.
- Moy, S. S. J. 2002. Early Age Curing under Cyclic Loading – an Investigation into Stiffness Development in Carbon Fibre Reinforced Steel Beams. In Proc., ACIC 2002, Southampton University, UK, 15-17April, edited by R. A. Sheno, S. S. J. Moy, L. C. Hollaway. Thomas Telford.
- Rajagopalan, G., Immordino, K.I. and Gillespie, J.W. Jr. (1996), "Adhesive Selection Methodology for Rehabilitation of Steel Bridges with Composite Materials", Proceedings of the American Society for Composites 11th Technical Conference, Atlanta, GA, October 7-9, 1996, Technomic, pp. 222-230.
- Shulley, S.B., Huang, X., Karbhari, V.M. and Gillespie, J.W. Jr., (1994) "Fundamental Considerations of Design and Durability in Composite Rehabilitation Schemes for Steel Girders With Web Distress," Proceedings of the 1994 ASCE Materials Engineering Conference, San Diego, CA, pp. 1187-1194.
- Tavakkolizadeh, M., and Saadatmanesh, H. 2001. Galvanic Corrosion of Carbon and Steel in Aggressive Environment, Journal of Composites for construction, ASCE, 3(5): from 200-210.
- Tucker, W. C., and Brown, R. 1989. Blister Formation on Graphite/Polymer Composites Galvanically Coupled with Steel in Seawater, Journal of composite Materials, ASCE Technomic, 4(23): from 227-238
- Tucker, W.C., Brown, R. and Russell, L. (1990), "Corrosion between a Graphite/Polymer Composite and Metal", Journal of Composite Materials, Technomic, 24(1), pp. 92-102.
- Wetzel, E. (1995), "Assessment of Heating Techniques for Metal to Composite Bonding in Infrastructure Rehabilitation", B.S. Thesis, University of Delaware, Newark, DE.
- West, T.D. (2001), "Enhancements to the Bond between Advanced Composite Materials and Steel for Bridge Rehabilitation," M.S. Thesis, University of Delaware (U.S.A.), pp. 16-85.

*Applicazioni e casi studio*

- Bastianini, F., Ceriolo, L., Di Tommaso, A., Zaffaroni, G. (2004). Mechanical and non-Destructive Testing to Verify the Effectiveness of Composite Strengthening on historical Cast Iron Bridge in Venice, Italy, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16[5], 407-413.
- Bastianini, F., Ceriolo, L., Di Tommaso, A., Zaffaroni, G. (2002). Mechanical and non-Destructive Testing to Verify the Effectiveness of Composite Strengthening on an historical Cast Iron Bridge in Venice (Italy). In *MCM2002, XII International Conference on Mechanics of Composite Materials*, June 9-13, Riga, Latvia.
- Bonollo, F. & Tiziani, A., Modena, C., & Valluzzi, M.R. 1988. Set up of Restoration Methodologies for Cast Bridges in Venice. In *Arch bridges*, edited by A. Sinopoli. Rotterdam: Balkema.
- Ceriolo, L., Di Tommaso, A. 2000. Problems of Restoration of Old Cast Iron Bridges Using Aramid Fiber Reinforced Polymers. In *5th International Congress on Restoration of Architectural Heritage, CICOP*, International Center for the Architectural Heritage Conservation, Firenze, September 18-23.
- Chacon, A., Chajes, M., Richardson, D. and Wenczel, G. (2004), "Applications of Advanced Composites to Steel Bridges: a Case Study on the Ashland Bridge (Delaware-USA)," *Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, Calgary, Canada, pp. 8.
- Chajes, M., Swinehart, M., Richardson, D. & Wenczel G. 2003. Bridge Rehabilitation Using Advanced Composites: Ashland Bridge SR-82 over Red Clay Creek. In *Proc., 10th International Conference and Exhibition London, UK, 1-3 July 2003*.
- De Lorenzis, L., Micelli, F. and La Tegola, A. (2003), "Strengthening of Steel Silos with Post-Tensioned CFRP Laminates," *Proceedings of the 6th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-6)*, Vol. 2, 1351-1360.
- Farmer, N., Smith I. (2001), "King Street Railway Bridge – Strengthening of Cast Iron Girders with FRP Composites", *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Structural Faults and Repairs*.
- Kaariainen, J., Pulkkinen, P. 2002. Rehabilitation of Tornionjoki Steel Truss Bridge Finland, *Structural Engineering International IABSE*, 4(12): from 273-275.
- Lane, I.R., Waed, J.A. (2000), *Restoring Britains Bridge Heritage*, Institution of Civil Engineering (South Wales Association) Transport Engineering Group Award.
- Leonard, A. R. 2002. The Design of Carbon Fibre Composite (cfc) Strengthening for Cast Iron Struts at Shadwell Station vent shaft. In *Proc., ACIC 2002*, Southampton University, UK, 15-17 April, edited by R. A. Sheno, S. S. J. Moy, L. C. Hollaway. Thomas Telford.
- Luke, S. (2001), "The Use of Carbon Fibre Plates for the Strengthening of Two Metallic Bridges of a Historic Nature", *Proceedings of the UK. FRP Composites in Civil Engineering*, Vol. II, edited by J. G. Teng, pp. 975-983.
- Miller, T. C., Chajes, M. J., Mertz, D. R. and Hastyings, J. 2001. Strengthening of a Steel Bridge Girder Using CFRP Plates, *Journal of bridge engineering*, ASCE, 6(6): from 514-522.
- Moy, S.S.J., Barnes, F., Moriarty, J., Dier, A.F., Kenchington, A. and Iverson, B. (2000), "Structural Upgrade and Life Extension of Cast Iron Struts Using Carbon Fibre Reinforced Composites", *Proceedings of the 8th International Conference on Fibre Reinforced Composites*, Newcastle upon Tyne, UK, September 13-15, 2000, pp 3-10.

- Phares, B. M., Wipf T.J., Klaiber F.W., Abu-Hawash A., Lee Y-S. (2003). Strengthening of steel girder bridges using FRP. Proceedings of the 2003 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, August.
- Zaffaroni, G., Ceriolo, L., Bastianini, F., Di Tommaso, A. 2002. Issues Related with the Use of Reinforced Polymers in the Repair/Restoration of an Historical Cast Iron Bridge. In Proc., 23rd International Conference, Sampe Europe, Society for the Advancement of Material & Process Engineering, Paris, 9-11 April.
- Zerbo, V. 2001. Materiali compositi (AFRP) per la riabilitazione di strutture storiche in ghisa: il caso del ponte de la Corona a Venezia. Thesis, Istituto Universitario di Architettura Venezia, a.a 1999/2000.
- Zerbo, V., Ceriolo L. , Di Tommaso A. 2004. Cast iron arch bridges: from construction to restoration. In Innovative Materials and Technologies for Construction and Restoration. Napoli:Liguori editore.

*Libri e Documenti Normativi*

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (1998), "Load and Resistance Factor Design (LRFD) Bridge Design Specifications," 2nd edition.
- Cadei, J.M.C., Stratford T.J., Hollaway L.C., Duckett W.G. 2004. Strengthening metallic structures using externally bonded fibre-reinforced polymers, Report CIRIA C595. London: CIRIA.
- CEN 2003. ENV 1993-1-1. Eurocode 3: Design of steel structures - Parte 1-1: General rules and rules for buildings.
- Dawood, M., Rizkalla, S. e Schnerch, D., (2005). Design guidelines for the use of HM strips - strengthening of steel-concrete composite bridges with high modulus carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strips.
- Moy, S. S. J. 2001. FRP Composite: Life Extension and Strengthening of Metallic Structures: ICE Design and practice guide. Thomas Telford.
- Shenoi, R. A., Moy, S. S. J., Hollaway, L. C. (2002). Advanced polymer composites for structural application. Thomas Telford.

Il presente Documento è stato predisposto da un Gruppo di studio così composto:

|                            |                                       |
|----------------------------|---------------------------------------|
| ASCIONE Prof. Luigi        | - Università di Salerno               |
| CERSOSIMO Ing. Giuseppe    | - Interbau S.r.l. - Milano            |
| COLOMBI Prof. Pierluigi    | - Politecnico di Milano               |
| CREDALI Dott. Lino         | - Ardea S.r.l. - Casalecchio (BO)     |
| DELLA CORTE Ing. Gaetano   | - Università "Federico II" - Napoli   |
| DI TOMMASO Prof. Angelo    | - IUAV - Venezia                      |
| FEO Prof. Luciano          | - Università di Salerno               |
| GIACOMIN Ing. Giorgio      | - Maxfor - Quarto d'Altino (VE)       |
| GIORDANO Ing. Antonella    | - Università di Salerno               |
| GRANDI Ing. Alberto        | - Sika Italia S.p.a. - Milano         |
| MACERI Prof. Franco        | - Università "Tor Vergata" - Roma     |
| MANFREDI Prof. Gaetano     | - Università "Federico II" - Napoli   |
| MANTEGAZZA Dott. Giovanni  | - Ruredil S.p.a. - Milano             |
| MONTI Prof. Giorgio        | - Università "La Sapienza" - Roma     |
| MORANDINI Ing. Giulio      | - Mapei S.p.a. - Milano               |
| NANNI Prof. Antonio        | - Università "Federico II" - Napoli   |
| OLIVITO Prof. Renato Sante | - Università della Calabria - Cosenza |
| PASCALE Prof. Giovanni     | - Università di Bologna               |
| POGGI Prof. Carlo          | - Politecnico di Milano               |
| PROTA Ing. Andrea          | - Università "Federico II" - Napoli   |
| ZERBO Arch. Valeria        | - Università IUAV - Venezia           |

Coordinatori:

COLOMBI Prof. Pierluigi, DI TOMMASO Prof. Angelo.

Coordinatore generale della collana di documenti sul rinforzo strutturale mediante FRP:

ASCIONE Prof. Luigi.

Segreteria:

FEO Prof. Luciano, ROSATI Prof. Luciano.

Il presente Documento Tecnico è stato approvato in data 20 ottobre 2005 dalla “Commissione incaricata di formulare pareri in materia di normativa tecnica relativa alle costruzioni”, così composta:

|                                  |                                    |
|----------------------------------|------------------------------------|
| ANGOTTI Prof. Franco             | - Università di Firenze            |
| ASCIONE Prof. Luigi              | - Università di Salerno            |
| BARATTA Prof. Alessandro         | - Università “Federico II”- Napoli |
| CECCOLI Prof. Claudio            | - Università di 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            |
| SOLARI Prof. Giovanni            | - Università di Genova             |
| URBANO Prof. Carlo               | - Politecnico di Milano            |
| ZANON Prof. Paolo                | - Università di Trento             |