

CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

COMMISSIONE DI STUDIO PER LA PREDISPOSIZIONE E L'ANALISI
DI NORME TECNICHE RELATIVE ALLE COSTRUZIONI

**Istruzioni
per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo
di Strutture realizzate con Profili Pultrusi di
Materiale Composito Fibrorinforzato (FRP)**



CNR-DT 205/2007

ROMA – CNR 9 Ottobre 2008

Proprietà letteraria riservata
del
Consiglio Nazionale delle Ricerche

CNR-DT 205/2007

ROMA – CNR 9 Ottobre 2008

INDICE

1	PREMESSA	1
1.1	PREMESSA ALLA VERSIONE DEFINITIVA DEL DOCUMENTO A CONCLUSIONE DELL'INCHIESTA PUBBLICA	2
1.2	CONTENUTO E SCOPO DELLE ISTRUZIONI	2
1.3	SIMBOLOGIA	2
2	CARATTERISTICHE DEI PROFILI PULTRUSI DI FRP.....	5
2.1	QUALIFICAZIONE DEI MATERIALI	5
2.2	ACCETTAZIONE	5
3	CONCETTI BASILARI DEL PROGETTO	6
3.1	REQUISITI FONDAMENTALI	6
3.2	VITA UTILE DELLA STRUTTURA	6
3.3	REQUISITI DI DURABILITÀ	6
3.4	PRINCIPI GENERALI DEL PROGETTO	7
3.4.1	Generalità	7
3.4.2	Azioni di calcolo	7
3.4.3	Proprietà dei materiali, degli elementi e dei prodotti	7
3.4.4	Capacità resistente di calcolo	8
3.5	COEFFICIENTI PARZIALI	8
3.5.1	Materiali	8
3.5.2	Collegamenti	9
3.5.3	Modelli di resistenza	10
3.6	PROBLEMI SPECIALI E RELATIVI FATTORI DI CONVERSIONE	10
3.6.1	Azioni ambientali e fattore di conversione ambientale η_a	10
3.6.2	Modalità di carico e fattore di conversione per effetti di lunga durata η_l	10
3.7	CRITERI DI ANALISI	11
3.8	CRITERI DI VERIFICA	11
3.9	VALUTAZIONE DELLE DEFORMAZIONI	11
3.10	COMPORAMENTO AL FUOCO	11
4	VERIFICA AGLI STATI LIMITE ULTIMI DEI PROFILI	13
4.1	SFORZO NORMALE CENTRATO	13
4.1.1	Elementi tesi	13
4.1.2	Elementi compressi	13
4.2	FLESSIONE SEMPLICE E COMPOSTA	16
4.2.1	Flessione retta	16
4.2.2	Tenso-flessione retta	20
4.2.3	Presso-flessione retta	20
4.3	TAGLIO	21
4.3.1	Resistenza di calcolo a taglio	21
4.4	TORSIONE	22
4.4.1	Resistenza di calcolo a torsione	22
4.5	FLESSIONE E TAGLIO	23
4.5.1	Resistenza di calcolo a flessione e taglio	23
5	VERIFICA AGLI STATI LIMITE ULTIMI DEI COLLEGAMENTI	24
5.1	SOLLECITAZIONI	24
5.2	RESISTENZA DEI COLLEGAMENTI	24

5.3	CRITERI DI PROGETTO	24
5.4	COLLEGAMENTI BULLONATI.....	24
5.4.1	Generalità.....	24
5.4.2	Criteri di progetto.....	26
5.4.3	Metodo di verifica per collegamenti con bulloni soggetti a taglio	26
5.4.3.1	Verifica a strappo del piatto	27
5.4.3.2	Verifica a taglio del piatto (rottura per strappo del bullone).....	28
5.4.3.3	Verifica a rifollamento del foro.....	28
5.4.3.4	Verifica a taglio del bullone di acciaio.....	29
5.4.4	Metodo di verifica per collegamenti con bulloni soggetti a trazione.....	29
5.4.4.1	Verifica a punzonamento del piatto	29
5.4.4.2	Verifica a trazione del bullone di acciaio.....	30
5.5	COLLEGAMENTI INCOLLATI	30
5.5.1	Generalità.....	30
5.5.2	Legame costitutivo di interfaccia.....	31
5.5.3	Rottura dell'interfaccia	33
5.5.3.1	Rottura per scorrimento del giunto.....	33
5.5.3.2	Rottura per scorrimento e apertura del giunto.....	34
5.5.4	Stato limite ultimo del giunto	34
5.5.5	Regole pratiche di progettazione.....	35
5.5.6	Controllo dell'incollaggio	35
5.5.6.1	Prove distruttive	35
5.5.6.2	Prove non distruttive	35
6	VERIFICA AGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO	36
6.1	VERIFICA DELLE TENSIONI	36
6.2	VERIFICA DI DEFORMABILITÀ	36
7	APPENDICE A.....	38
7.1	APPROFONDIMENTI SUL CARICO CRITICO DI INSTABILITÀ LOCALE DI PROFILI A DOPPIO T SEMPLICEMENTE COMPRESSI.....	38
8	APPENDICE B.....	41
8.1	TECNICHE DI PRODUZIONE DEI PROFILI PULTRUSI DI FRP	41
9	APPENDICE C.....	42
9.1	SCHEDA TECNICA TIPO PER I PROFILI PULTRUSI DI FRP	42
9.2	PROVE DI QUALIFICAZIONE DEI MATERIALI	44
10	APPENDICE D.....	45
10.1	SCelta E VERIFICA DEI PROFILI PULTRUSI DI FRP: COMPITI E RESPONSABILITÀ DEGLI OPERATORI	45

1 PREMESSA

Il documento integra la collana delle pubblicazioni edite a partire dal 2004 dal Consiglio Nazionale delle Ricerche sull'uso strutturale dei materiali compositi. I documenti finora pubblicati hanno avuto per oggetto, nell'ordine: il placcaggio mediante materiali compositi fibrorinforzati a fibre continue (FRP) di strutture di calcestruzzo armato ordinario o precompresso e di strutture murarie (CNR-DT 200/2004), il placcaggio di strutture lignee (CNR-DT 201/2005) e di strutture metalliche (CNR-DT 202/2005), l'uso di barre di FRP come armatura di getti di conglomerato cementizio (CNR-DT 203/2006) ed infine l'uso di calcestruzzo cementizio additivato con fibre corte di acciaio o di carbonio, da integrare eventualmente con usuali barre di armatura, lente o pretese (CNR-DT 204/2006).

Negli ultimi quindici anni, in Europa e non solo, alcune soluzioni pionieristiche hanno dimostrato con chiarezza l'utilità di impiegare per scopi strutturali i materiali compositi nelle nuove costruzioni. Tali soluzioni sono state spesso imposte da specifiche esigenze fra le quali, in particolare, la rapidità di montaggio e la resistenza ad ambienti aggressivi, caratteristica quest'ultima in grado di abbattere sensibilmente i costi di manutenzione. Inoltre, la leggerezza del composito, oltre a facilitare l'assemblaggio ed il varo, costituisce un evidente vantaggio per tutte quelle strutture che devono essere fondate su terreni cedevoli. La crescente richiesta di soluzioni strutturali con elementi di materiale composito pultruso ha portato, nel 2003, al recepimento in ambito nazionale delle normative europee EN 13706-1, EN 13706-2 e EN 13706-3, le quali definiscono i requisiti minimi necessari a classificare i profili pultrusi come "strutturali". Appare evidente come la redazione di un documento di Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture realizzate con profili pultrusi di FRP non fosse più procrastinabile. Il presente documento intende soddisfare tale esigenza limitatamente al caso delle fibre di vetro (GFRP), per il quale la bibliografia scientifica e tecnica è in grado di fornire risposte ormai consolidate ed ampiamente condivise.

L'approccio seguito è quello del metodo semiprobabilistico agli stati limite; l'impostazione ricalca quella degli Eurocodici che divide gli enunciati in "principi" (contrassegnati nel seguito con la lettera P) e "regole di applicazione".

Il documento comprende quattro Appendici sugli argomenti di seguito specificati.

Appendice A – Approfondimenti sul carico critico di instabilità locale di profili a doppio T semplicemente compressi;

Appendice B – Tecniche di produzione dei profili pultrusi di FRP;

Appendice C – Scheda tecnica tipo per i profili pultrusi di FRP; Prove di qualificazione dei materiali;

Appendice D – Scelta e verifica dei profili pultrusi di FRP: compiti e responsabilità degli operatori.

Elenco di rilevanti progetti di ricerca sui materiali compositi finanziati negli ultimi cinque anni

Sull'argomento trattato dalle Istruzioni contributi scientifici sono stati conseguiti nell'ambito di programmi di ricerca di interesse nazionale di seguito elencati:

-2003-2005: Ricerca PRIN dal titolo: "L'impiego di materiali con microstruttura per l'innovazione tecnologica delle strutture civili", Coordinatore Nazionale: Prof. Franco Maceri;

-2005-2007: Ricerca PRIN dal titolo: "Strutture in materiali con microstruttura. Una sfida per la moderna ingegneria civile", 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.

1.1 PREMESSA ALLA VERSIONE DEFINITIVA DEL DOCUMENTO A CONCLUSIONE DELL'INCHIESTA PUBBLICA

Il documento è stato sottoposto a inchiesta pubblica nel periodo novembre 2007 – febbraio 2008. A seguito di essa sono state introdotte modifiche e/o integrazioni al testo che hanno consentito di porre rimedio a refusi, integrare argomenti non trattati nella primitiva versione e sopprimerne altri ritenuti esuberanti e, quindi, superflui.

Il documento aggiornato è stato discusso ed approvato dagli autori nel corso delle riunioni tenutesi nell'ottobre 2008 presso la sede del CNR in Roma.

Si ringraziano quanti, dal mondo delle Professioni, delle Istituzioni, dell'Industria e dell'Università, hanno partecipato in modo attivo ad un processo che, legittimamente, deve competere all'intera comunità tecnica e scientifica di un Paese moderno ed avanzato.

1.2 CONTENUTO E SCOPO DELLE ISTRUZIONI

Scopo principale delle presenti Istruzioni è la divulgazione delle conoscenze necessarie per l'uso dei materiali compositi fibrorinforzati a fibre continue nel progetto di nuove costruzioni.

Ne sono oggetto le strutture costituite da elementi in profilo sottile di materiale composito fibrorinforzato realizzato con resine polimeriche a fibre continue, prodotti con la tecnica della pultrusione (*Fiber Reinforced Polymers - FRP*). Le fibre più comuni sono quelle di vetro, di carbonio e di arammide. Nell'ambito delle costruzioni civili, le applicazioni attuali riguardano generalmente le fibre di vetro, alle quali le presenti Istruzioni si riferiscono specificamente. Le fibre conferiscono al materiale composito un comportamento elastico lineare fino a rottura di tipo ortotropo, con netta prevalenza dei valori di rigidezza e resistenza nella direzione delle fibre. La proprietà di ortotropia influenza notevolmente i fenomeni di instabilità locale e di interazione tra instabilità locale e globale. I modelli di analisi di seguito proposti ipotizzano un siffatto comportamento costitutivo del materiale; quelli di verifica sono ricondotti, anche nel caso dell'instabilità, a modelli di resistenza. I criteri progettuali tengono conto di uno stato delle conoscenze sperimentali ancora in evoluzione; ciò giustifica perché, nel caso di sezioni doppiamente simmetriche, siano disponibili formule predittive in forma chiusa, mentre, negli altri casi, siano suggerite procedure numeriche.

Si segnala infine che le Istruzioni, per loro genesi e natura, non sono norme cogenti ma solo una guida per aiutare i tecnici a selezionare la letteratura tecnica, nazionale ed internazionale, lasciando agli stessi la libertà e la responsabilità finale delle scelte.

1.3 SIMBOLOGIA

Si riporta di seguito il significato dei principali simboli utilizzati nel documento.

Notazioni generali

(.) _b	valore della grandezza (.) riferita al bullone
(.) _d	valore di progetto (o di calcolo) della grandezza (.)
(.) _f	valore della grandezza (.) riferita all'ala del profilo
(.) _k	valore caratteristico della grandezza (.)
(.) _L	valore della grandezza (.) riferita alla direzione longitudinale
(.) _{loc}	valore della grandezza (.) che provoca instabilità locale
(.) _{max}	valore massimo della grandezza (.)
(.) _{min}	valore minimo della grandezza (.)
(.) _R	valore della grandezza (.) intesa come resistenza
(.) _S	valore della grandezza (.) intesa come sollecitazione
(.) _t	valore della grandezza (.) riferita a trazione
(.) _c	valore della grandezza (.) riferita a compressione
(.) _T	valore della grandezza (.) riferita alla direzione trasversale
(.) _w	valore della grandezza (.) riferita all'anima del profilo

Lettere romane maiuscole

A	area della sezione del profilo
A_b	area resistente della sezione del bullone
A_{net}	area della sezione del profilo al netto dei fori
A_V	area della sezione resistente a taglio
E_{eff}	modulo di elasticità efficace
E_{Lc}	modulo di elasticità longitudinale a compressione
E_{Lt}	modulo di elasticità longitudinale a trazione
E_{Tc}	modulo di elasticità trasversale a compressione
E_{Tt}	modulo di elasticità trasversale a trazione
$F_{Tt,Rd}$	valore di progetto della resistenza a trazione del bullone
G_{eff}	modulo di elasticità tangenziale efficace
G_I	energia di frattura per modo I
G_{II}	energia di frattura per modo II
G_{LT}	modulo di elasticità tangenziale
J_{min}	momento d'inerzia minimo della sezione
J_t	fattore di rigidezza torsionale della sezione
J_ω	costante di ingobbamento
L	lunghezza del profilo o distanza fra due ritegni flesso-torsionali consecutivi
L_0	lunghezza libera di inflessione
L^*	lunghezza di incollaggio
M_{eq}	valore equivalente del momento flettente
M_{FT}	valore del momento flettente che provoca instabilità flesso-torsionale
M_m	valore medio del momento flettente
M_{max}	valore massimo del momento flettente
$M_{loc,Rd}$	valore di progetto del momento flettente che provoca l'instabilità locale dell'elemento
M_{Rd1}	valore di progetto del momento flettente resistente
M_{Rd2}	valore di progetto del momento flettente che provoca l'instabilità dell'elemento
M_{Sd}	valore di progetto del momento flettente sollecitante
$N_{c,Rd1}$	valore di progetto dello sforzo normale di compressione resistente
$N_{c,Rd2}$	valore di progetto dello sforzo normale che provoca l'instabilità dell'elemento
$N_{c,Sd}$	valore di progetto dello sforzo normale di compressione sollecitante
N_{Eul}	valore del carico critico euleriano
$N_{loc,Rd}$	valore di progetto dello sforzo normale che provoca instabilità locale del profilo
$N_{t,Rd}$	valore di progetto dello sforzo normale di trazione resistente
$N_{t,Sd}$	valore di progetto dello sforzo normale di trazione sollecitante
T_{Sd}	valore di progetto del momento torcente sollecitante
T^{SV}	valore del momento torcente primario o alla De Saint Venant
T^ω	valore del momento torcente dovuto a torsione non uniforme
V_x	coefficiente di variazione
V_{Rd}	valore di progetto del taglio resistente
V_{Sd}	valore di progetto del taglio sollecitante
W	modulo di resistenza

Lettere romane minuscole

c	coefficiente di interazione tra instabilità locale e instabilità globale
d	diametro del foro
d_b	diametro del bullone
d_r	diametro della rondella
e	distanza del foro dal bordo della sezione nella direzione dello sforzo applicato

f_{Lc} o f_c	valore della resistenza longitudinale a compressione
f_{Lf}	valore della resistenza longitudinale a flessione
f_{Lr}	valore della resistenza longitudinale a rifollamento
f_{Lt} o f_t	valore della resistenza longitudinale a trazione
f_{Tr}	valore della resistenza trasversale a rifollamento
f_{Tc}	valore della resistenza trasversale a compressione
f_{Tf}	valore della resistenza trasversale a flessione
f_{Tt}	valore della resistenza trasversale a trazione
f_V	valore della resistenza a taglio
f_{Vb}	valore della resistenza a taglio del bullone
f_{Rk}	valore caratteristico della resistenza
f_{Vb}	valore della resistenza a taglio del bullone
$f_{V,loc,k}$	valore caratteristico della tensione che determina l'instabilità locale del pannello d'anima
$f_{Sd,z}$	valore di progetto della tensione di compressione agente in direzione trasversale
f_{loc}^{axial}	valore della tensione critica locale per elementi compressi
f_{loc}^{flex}	valore della tensione critica locale per elementi inflessi
n	numero di fori
s	distanza del foro dal bordo della sezione nella direzione ortogonale allo sforzo applicato
t	spessore del profilo
w	interasse dei fori

Lettere greche minuscole

χ	coefficiente riduttivo dello sforzo di compressione che provoca l'instabilità locale
χ_{FT}	coefficiente riduttivo del momento flettente che provoca l'instabilità locale
δ	freccia di inflessione
ϕ_E	coefficiente di viscosità per deformazioni longitudinali
ϕ_G	coefficienti di viscosità per deformazioni taglienti
γ_a	coefficiente parziale per l'adesivo
γ_f	coefficiente parziale per componenti di materiale composito fibrorinforzato
γ_m	coefficiente parziale per materiali o prodotti
γ_{Rd}	coefficiente parziale per i modelli di resistenza
η	fattore di conversione
η_a	fattore di conversione ambientale
η_l	fattore di conversione per effetti di lunga durata
λ	parametro di snellezza per profili soggetti a compressione
λ_{FT}	parametro di snellezza per profili soggetti a flessione
ν_{LT}	coefficiente di Poisson (longitudinale)
ν_{TL}	coefficiente di Poisson (trasversale)

2 CARATTERISTICHE DEI PROFILI PULTRUSI DI FRP

- (1) Gli elementi strutturali di materiale composito fibrorinforzato (FRP) presi in considerazione nelle presenti Istruzioni si presentano sotto forma di profili sottili prodotti con la tecnica della pultrusione (Appendice B) a partire da resine termoindurenti rinforzate con fibre continue di vetro.
- (2)P Le proprietà meccaniche dei materiali compositi FRP dipendono marcatamente dal tipo di matrice e di fibra, nonché dalle rispettive frazioni volumetriche.
- (3) L'assemblaggio dei profili può avvenire mediante giunti bullonati o incollati; i materiali utilizzati nei collegamenti devono essere compiutamente caratterizzati.
- (4)P La determinazione delle proprietà meccaniche richiede specifiche procedure, in quanto, a differenza dei tradizionali profili metallici, quelli pultrusi sono caratterizzati da un comportamento ortotropo, trasversalmente isotropo nel piano della sezione.
- (5) Le tolleranze dimensionali per i profili pultrusi sono generalmente indicate dal produttore. L'Appendice B della norma UNI EN 13706-2:2003 riporta alcuni valori di tolleranze dimensionali.

2.1 QUALIFICAZIONE DEI MATERIALI

- (1)P Il processo di qualificazione di un prodotto FRP con le appropriate prove sperimentali è sviluppato dal produttore con tre scopi specifici:
- garantire la qualità ed il rispetto dei valori minimi richiesti;
 - fornire risultati sperimentali relativi alle caratteristiche fisiche e meccaniche in un numero statisticamente significativo;
 - disporre di eventuali informazioni sul comportamento a lungo termine.
- (2) Le prove meccaniche e fisiche di qualificazione devono essere condotte da laboratori qualificati che dispongano di tutte le attrezzature e delle competenze necessarie e che abbiano una comprovata esperienza nella caratterizzazione dei materiali compositi.
- (3) Ciascun produttore deve fornire apposite schede tecniche relative ai profili pultrusi di FRP nelle quali devono essere indicati i valori delle proprietà meccaniche ricavati su base statistica e comprendenti i valori caratteristici, di cui devono essere definiti i corrispondenti frattili. Nell'Appendice C è suggerito un modello di scheda, con le prove di caratterizzazione più comuni.

2.2 ACCETTAZIONE

- (1) I profili pultrusi di FRP da utilizzarsi come elementi strutturali di nuove costruzioni devono essere assoggettati a controlli che garantiscano un livello adeguato delle proprietà meccaniche e fisiche.
- Nell'Appendice D sono riportate indicazioni essenziali sui processi di certificazione ed accettazione dei profili pultrusi, sottolineando le responsabilità e le azioni che competono ai diversi operatori.

3 CONCETTI BASILARI DEL PROGETTO

(1) Formano oggetto del presente capitolo le nuove strutture realizzate con profili sottili pultrusi di materiale composito fibrorinforzato. Le formulazioni, le procedure di calcolo e le regole applicative sono basate su teorie, modellazioni numeriche e risultati sperimentali validati per tali profili.

(2) Si presuppone che:

- siano garantiti un'adeguata supervisione ed un controllo di qualità del processo di produzione e del prodotto;
- la scelta dei componenti strutturali e dei collegamenti, nonché il progetto della struttura, siano affidati a tecnici qualificati ed esperti;
- la struttura sia realizzata da maestranze in possesso di un livello adeguato di capacità ed esperienza;
- i materiali ed i prodotti impiegati siano utilizzati come di seguito specificato.

(3)P Il progetto della struttura deve soddisfare requisiti di resistenza, di esercizio e di durabilità. In caso di incendio, la resistenza degli elementi strutturali e dei collegamenti deve essere adeguata al tempo di esposizione che si vuole garantire, eventualmente introducendo sistemi di protezione.

3.1 REQUISITI FONDAMENTALI

(1)P Il progetto della struttura deve considerare tutte le azioni che possono interessare la sua vita utile. I rischi ai quali essa può essere soggetta devono, inoltre, essere individuati e, se presenti, attenuati o eliminati.

(2)P I requisiti fondamentali possono ritenersi soddisfatti se si garantisce:

- un'opportuna scelta dei materiali;
- un'accorta cura dei particolari costruttivi;
- la definizione di opportune procedure di controllo della progettazione, della produzione, dell'esecuzione e dell'uso.

3.2 VITA UTILE DELLA STRUTTURA

(1)P La vita utile è un requisito di progetto e deve essere definita in base alla destinazione d'uso della struttura. Le azioni di calcolo devono essere quelle prescritte dalle normative vigenti. Nel caso di destinazioni d'uso particolari, come nelle strutture provvisorie, si può fare riferimento alla norma UNI EN 1990 per la selezione dei coefficienti parziali riferiti alla vita utile.

3.3 REQUISITI DI DURABILITÀ

(1)P Il progetto della struttura deve garantire la permanenza delle prestazioni nel tempo, considerando sia le condizioni ambientali, sia il livello programmato di manutenzione.

(2)P Le condizioni ambientali devono essere identificate in fase di progetto, così che si possa valutare la loro influenza sulla durabilità della struttura e si possano, eventualmente, prevedere adeguati accorgimenti per la protezione del materiale.

(3)P Per valutare le prestazioni in termini di durabilità è possibile riferirsi a modelli teorici, ad indagini sperimentali, all'esperienza documentata del comportamento di strutture simili realizzate.

(4) Per garantire la durabilità della struttura devono essere tenuti in conto:

- la destinazione d'uso;
- le condizioni ambientali;
- la composizione, le proprietà e le prestazioni dei materiali;
- la scelta del tipo di collegamenti;
- la qualità ed il livello di controllo dell'esecuzione;
- la manutenzione programmata durante la vita utile.

(5)P Questioni speciali (azioni ambientali, modalità di carico) devono essere identificate in fase di progetto, così che ne possa essere valutata l'influenza sulla durabilità dei profili.

3.4 PRINCIPI GENERALI DEL PROGETTO

3.4.1 Generalità

(1)P La verifica degli elementi e dei collegamenti deve essere condotta sia nei riguardi degli stati limite di esercizio (SLE) sia nei riguardi degli stati limite ultimi (SLU), definiti nella normativa vigente.

(2)P Si deve verificare, mediante il metodo dei coefficienti parziali, che in tutte le situazioni di progetto non sia violato alcuno stato limite, adottando i valori di calcolo delle azioni e delle resistenze. A tale fine è necessario soddisfare la seguente limitazione:

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

dove E_d e R_d sono, rispettivamente, i valori di progetto (o di calcolo) dell'azione e della corrispondente capacità di risposta (in termini di resistenza o di deformazione), nell'ambito di un generico stato limite.

(3) I valori di progetto si ricavano da quelli caratteristici con opportuni coefficienti parziali, i cui valori, per i vari stati limite, sono codificati nella normativa vigente ovvero sono indicati nelle presenti Istruzioni se relativi allo specifico ambito trattato.

3.4.2 Azioni di calcolo

(1) Le azioni di calcolo sono prescritte dalla normativa vigente, con riferimento alla vita utile della struttura.

3.4.3 Proprietà dei materiali, degli elementi e dei prodotti

(1)P I valori delle proprietà dei materiali, degli elementi strutturali e dei prodotti per i collegamenti devono essere determinati con prove di laboratorio normalizzate, quali, ad esempio, quelle riportate nell'Appendice C.

(2) La normativa UNI EN 13706:2003 definisce le classi di profili pultrusi di fibra di vetro per usi strutturali con la sigla "EXX", dove XX è il valore efficace del modulo di elasticità a flessione, in GPa. Alla suddetta norma si rinvia per il criterio di designazione dei profili pultrusi strutturali (UNI EN 13706-1) per metodi di prova (UNI EN 13706-2). Le proprietà meccaniche dei profili si determinano su campioni o sull'intero elemento. I requisiti minimi (UNI EN 13706-3) che i profili devono possedere, a temperatura ambiente, per poter essere classificati come strutturali, sono indicati nell'Appendice C.

- (3) Possibili modalità di esecuzione delle prove di caratterizzazione meccanica dei profili pultrusi sono richiamate nell'Appendice C.
- (4) Nelle verifiche di resistenza ed in quelle di stabilità si ammette che i valori caratteristici siano di frattile inferiore al 5%. Nelle verifiche di deformabilità si possono introdurre i valori medi dei moduli di elasticità determinati, ad esempio, secondo la UNI EN 13706-2.
- (5) Il valore di calcolo, X_d , della generica proprietà di resistenza o di deformazione di un materiale può essere espresso, in forma generale, mediante una relazione del tipo:

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

dove η è un fattore di conversione che tiene conto, in maniera moltiplicativa, della particolarità del problema (§ 3.6), X_k è il valore caratteristico della proprietà e γ_m è il coefficiente parziale del materiale.

- (6) Nella relazione (3.2) il fattore di conversione η è il prodotto del fattore di conversione ambientale, η_a , per quello relativo agli effetti di lunga durata, η_l . I valori da attribuire a tali fattori sono indicati, rispettivamente, nei §§ 3.6.1 e 3.6.2. In alternativa, si consiglia di assegnare ai suddetti coefficienti valori ottenuti da prove sperimentali su prototipi.

3.4.4 Capacità resistente di calcolo

- (1) La capacità resistente di calcolo, R_d , si esprime come segue:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot R\{X_{d,i}, a_{d,i}\}, \quad (3.3)$$

dove $R\{\}$ è una funzione riconducibile allo specifico modello meccanico considerato o ad un'apposita sperimentazione (ad esempio flessione, taglio, carico critico) e γ_{Rd} è un coefficiente parziale che tiene conto delle incertezze insite nel suddetto modello di resistenza o nella procedura sperimentale; se non diversamente indicato, tale coefficiente è da porsi eguale ad 1. Come argomenti della funzione $R\{\}$ figurano, in generale, classi di proprietà meccaniche e di grandezze geometriche, di cui $X_{d,i}$ e $a_{d,i}$, rappresentano, rispettivamente, il generico valore di progetto o quello nominale.

3.5 COEFFICIENTI PARZIALI

3.5.1 Materiali

- (1) Per gli stati limite ultimi, il coefficiente parziale del materiale, γ_f , può ottenersi dall'espressione:

$$\gamma_f = \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f2}. \quad (3.4)$$

Nella relazione (3.4) il fattore γ_{f1} tiene conto del livello di incertezza nella determinazione delle proprietà del materiale con un coefficiente di variazione V_x (Tabella 3-1); il fattore γ_{f2} tiene conto

invece dell'esigenza di cautelarsi nei confronti del comportamento fragile del composito e ad esso si suggerisce di attribuire il valore 1,30.

Tabella 3-1 – Valori di γ_{f1} al variare del coefficiente di variazione V_x .

	$V_x \leq 0,1$	$0,1 < V_x \leq 0,20$
γ_{f1}	1,10	1,15

Il valore del coefficiente di variazione, V_x , relativo al valore caratteristico della proprietà di resistenza o di deformazione del materiale deve essere determinato con un'adeguata serie di prove sperimentali.

(2) In ogni caso, è possibile valutare la sicurezza strutturale con prove sperimentali su singoli componenti o sul sistema.

(3) Per gli stati limite di esercizio viene suggerito per il coefficiente parziale del materiale, γ_f , il valore unitario.

3.5.2 Collegamenti

(1) Per i collegamenti incollati con adesivi strutturali, il coefficiente di sicurezza del materiale, γ_a , si esprime come segue:

$$\gamma_a = \gamma_{a1} \cdot \gamma_{a2} \cdot \gamma_{a3} \cdot \gamma_{a4} \quad (3.5)$$

dove i fattori γ_{a1} , γ_{a2} , γ_{a3} e γ_{a4} , indicati in Tabella 3-2, tengono conto, in maniera moltiplicativa, rispettivamente, delle proprietà meccaniche dell'adesivo, del metodo di applicazione dell'adesivo, delle condizioni di carico e delle condizioni ambientali.

In ogni caso per il coefficiente γ_a si consiglia di non introdurre valori inferiori a 2.

(2)P Per i collegamenti bullonati, il valore del coefficiente parziale dei componenti di FRP, γ_f , agli stati limite ultimi, deve essere determinato secondo la relazione (3.4).

(3) Per le verifiche di parti della connessione realizzate con materiali diversi, il coefficiente del materiale, γ_m , deve essere determinato in accordo con le normative vigenti o con eventuali altre Istruzioni di riconosciuta autorevolezza.

Tabella 3-2 – Valori dei coefficienti parziali di sicurezza γ_{a1} , γ_{a2} , γ_{a3} e γ_{a4} per gli adesivi.

Determinazione delle proprietà meccaniche dell'adesivo	γ_{a1}
Valori forniti dal produttore	2
Valori ottenuti da specifiche prove sperimentali	1,25
Metodo di applicazione dell'adesivo	γ_{a2}
Applicazione manuale con controllo a campione dello spessore	1,5
Applicazione manuale con controllo sistematico dello spessore	1,25
Applicazione identificata con parametri di controllo definiti e ripetibili	1
Combinazioni di carico	γ_{a3}
Combinazione quasi-permanente	1,5
Altre combinazioni	1
Condizioni ambientali	γ_{a4}
Proprietà dell'adesivo non valutate nelle condizioni di esercizio	2
Proprietà dell'adesivo determinate nelle condizioni di esercizio	1

3.5.3 Modelli di resistenza

(1) Per ogni modello di resistenza e per ogni tipo di collegamento (bullonato o incollato), anche se realizzato con materiali diversi, deve essere introdotto un coefficiente parziale, γ_{Rd} , per tenere conto dell'affidabilità del modello. Nel caso di progettazione assistita da prove sperimentali, tale coefficiente di modello può essere ricavato in accordo con le procedure indicate nella UNI EN 1990.

3.6 PROBLEMI SPECIALI E RELATIVI FATTORI DI CONVERSIONE

(1) Sono di seguito riportati alcuni valori di riferimento da attribuire al fattore di conversione η , introdotto nel § 3.4.3 per la determinazione delle proprietà di calcolo. Tali valori sono distinti in relazione agli aspetti che possono influenzare la durabilità o il comportamento di un materiale in condizioni particolari.

3.6.1 Azioni ambientali e fattore di conversione ambientale η_a

(1)P Le proprietà meccaniche (per esempio la resistenza a trazione, la deformazione ultima e i moduli di elasticità) di alcuni profili di FRP possono degradare in presenza di determinate condizioni ambientali: ambiente alcalino, umidità (acqua e soluzioni saline), temperature estreme, cicli termici, cicli di gelo e disgelo, radiazioni ultraviolette (UV).

(2) In ambienti aggressivi devono essere utilizzati rivestimenti protettivi le cui proprietà di mitigazione degli effetti dell'esposizione risultino sperimentalmente comprovate e si mantengano inalterate per tutta la vita utile della struttura. Per adeguati sistemi protettivi il valore del coefficiente η_a può essere assunto pari ad 1. Nei casi incerti, il valore del coefficiente η_a deve essere opportunamente ridotto, anche in relazione alla vita utile della struttura.

3.6.2 Modalità di carico e fattore di conversione per effetti di lunga durata η_l

(1)P Le proprietà meccaniche (per esempio la resistenza a trazione, la deformazione ultima e i moduli di elasticità) dei profili pultrusi di FRP possono degradare per fenomeni reologici (viscosità, rilassamento, fatica).

(2) Nei profili di FRP i fenomeni reologici dipendono dalle proprietà della matrice e delle fibre. In particolare, la viscosità risulta più contenuta al crescere della percentuale di fibre, mentre la fatica statica può essere mitigata limitando il livello tensionale in esercizio.

(3) I valori del fattore di conversione, η_l , nei confronti della rottura di profili di GFRP sotto sollecitazioni prolungate nel tempo, o nel caso di carico ciclico (fatica), sono riportati nella Tabella 3-3.

In presenza di carichi sia durevoli che ciclici, il fattore di conversione complessivo si ottiene come prodotto dei relativi fattori di conversione.

Tabella 3-3 – Valori del fattore di conversione per fenomeni di lunga durata, η_l , nel caso di profili di GFRP, sia per Stati Limite Ultimi che per Stati Limite di Esercizio.

Modalità di carico	η_l (SLE)	η_l (SLU)
Quasi permanente	0,30	1,00
Carico Ciclico (fatica)	0,50	1,00

3.7 CRITERI DI ANALISI

- (1)P L'analisi della risposta strutturale deve essere condotta tenendo conto del comportamento elastico fino a rottura e, se necessario, dell'ortotropia del materiale. Le sollecitazioni nei componenti strutturali e nei collegamenti devono essere determinate con un'analisi globale della struttura che tenga conto, qualora rilevante, della deformabilità dei collegamenti.
- (2) Nell'analisi si deve tener conto degli effetti del secondo ordine, in quanto significativi.
- (3) Per profili di sezione sottile aperta soggetti a torsione, l'analisi deve essere condotta considerando sia la rigidezza torsionale primaria alla De Saint Venant che quella secondaria da ingobbamento.
- (4) Nel caso di collegamenti bullonati, gli sforzi agenti in ogni singolo bullone devono essere valutati tenendo conto delle proprietà elastiche dei componenti strutturali connessi. Le verifiche da effettuare devono corrispondere ai diversi modi di crisi del collegamento.

3.8 CRITERI DI VERIFICA

- (1)P Le verifiche di resistenza devono tener conto dell'eventuale copresenza di più caratteristiche della sollecitazione.
- (2)P Le verifiche di stabilità devono tenere conto dell'eventuale interazione tra fenomeni di instabilità globale e locale. Quando le condizioni di vincolo ostacolano il manifestarsi di modi globali di instabilità, si deve comunque effettuare una verifica locale delle parti compresse.
- (3) I valori dei moduli di elasticità, da utilizzare nelle verifiche di stabilità globale e locale nella combinazione di carico quasi-permanente, devono essere opportunamente ridotti per effetto delle deformazioni viscoso, come indicato nel § 6.2.
- (4) Nel caso di progettazione assistita da prove sperimentali, il valore di progetto della grandezza d'interesse (ad esempio la capacità resistente di progetto, R_d) può essere ricavato in accordo con le procedure indicate nella UNI EN 1990.
- (5) Nel caso di modellazione numerica, il valore di progetto della grandezza d'interesse (ad esempio la capacità resistente di progetto, R_d) deve essere ricavato con un'analisi incrementale che tenga conto delle imperfezioni, introducendo i valori di progetto delle proprietà meccaniche.

3.9 VALUTAZIONE DELLE DEFORMAZIONI

- (1) Per la valutazione delle deformazioni di profili pultrusi inflessi, si devono considerare sia la deformabilità flessionale che quella tagliante.

3.10 COMPORTAMENTO AL FUOCO

- (1)P I materiali compositi FRP sono molto sensibili all'esposizione ad alte temperature. Infatti, quando la temperatura del composito supera quella di transizione vetrosa della resina, T_g , la resistenza e la rigidezza dell'elemento strutturale diminuiscono drasticamente.
- (2) In condizioni di esposizione al fuoco, le proprietà meccaniche del composito possono essere salvaguardate proteggendo efficacemente l'elemento strutturale con un rivestimento di spessore adeguato, o ricorrendo ad elementi pultrusi prodotti con resine speciali, ovvero prevedendo sistemi di protezione attiva. Sono anche suggeriti rivestimenti o resine che riducono la propagazione

delle fiamme e la produzione di fumi.

(3) Nel caso in cui la struttura sia stata progettata per un prefissato tempo di esposizione al fuoco, si adotteranno le combinazioni di carico indicate come eccezionali nella normativa vigente.

4 VERIFICA AGLI STATI LIMITE ULTIMI DEI PROFILI

4.1 SFORZO NORMALE CENTRATO

4.1.1 Elementi tesi

(1) In ciascuna sezione retta di una membratura soggetta a trazione semplice il valore di progetto della forza di trazione, $N_{t,Sd}$, deve soddisfare la limitazione:

$$N_{t,Sd} \leq N_{t,Rd} \quad (4.1)$$

La resistenza di progetto, $N_{t,Rd}$, da introdurre nella (4.1) assume valori diversi a seconda che le sezioni rette siano forate o meno:

- (sezioni non forate)

$$N_{t,Rd} = A \cdot f_{t,d} \quad (4.2)$$

- (sezioni forate)

$$N_{t,Rd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot A_{net} \cdot f_{t,d} \quad (4.3)$$

essendo $f_{t,d}$ la resistenza a trazione di progetto del materiale, γ_{Rd} il coefficiente parziale di modello, assunto pari a 1,11, A l'area della sezione retta non forata e A_{net} l'area netta di quella forata. Quest'ultima può essere valutata come:

$$A_{net} = A - n \cdot t \cdot d \quad (4.4)$$

dove n e d sono, rispettivamente, il numero ed il diametro dei fori presenti e t è lo spessore del profilo.

4.1.2 Elementi compressi

(1) In ciascuna sezione retta di una membratura soggetta a compressione semplice, il valore di progetto della forza di compressione, $N_{c,Sd}$, deve soddisfare la limitazione:

$$N_{c,Sd} \leq N_{c,Rd} \quad (4.5)$$

Nella (4.5) la resistenza di progetto, $N_{c,Rd}$, può essere ricavata come appresso indicato:

$$N_{c,Rd} = \min \{ N_{c,Rd1}, N_{c,Rd2} \} \quad (4.6)$$

essendo $N_{c,Rd1}$ il valore di progetto della resistenza a compressione del profilo e $N_{c,Rd2}$ il valore di progetto della forza di compressione che provoca l'instabilità dell'elemento.

Il valore di $N_{c,Rd1}$ può essere determinato mediante la relazione:

$$N_{c,Rd1} = A \cdot f_{c,d} \quad (4.7)$$

essendo $f_{c,d}$ la resistenza a compressione di progetto del materiale.

Il valore di $N_{c,Rd2}$ può essere determinato mediante prove sperimentali (§ 3.8(4)) o modellazioni numerico-analitiche (§ 3.8(5)).

In quest'ultimo caso, l'analisi può essere condotta imponendo al profilo un'imperfezione iniziale. Tale imperfezione può essere costituita da un campo di spostamenti proporzionale al primo modo critico, di ampiezza massima pari alla corrispondente tolleranza dichiarata dal produttore e comunque non minore di quella indicata nell'Annesso B della UNI EN 13706-2. La forma del primo modo critico può essere determinata anche mediante procedimenti approssimati.

(2) Nel caso di profili con sezione trasversale a doppio T, il valore di $N_{c,Rd2}$ risulta pari a:

$$N_{c,Rd2} = \chi \cdot N_{loc,Rd}, \quad (4.8)$$

dove il valore di progetto della forza di compressione che determina l'instabilità locale del profilo, $N_{loc,Rd}$, può essere determinato attraverso prove sperimentali su travi tozze (§ 3.8(4)) o attraverso modellazioni numerico-analitiche (§ 3.8(5)). In alternativa, può essere dedotto dalla relazione:

$$N_{loc,Rd} = A \cdot f_{loc,d}^{axial}, \quad (4.9)$$

nella quale $f_{loc,d}^{axial}$ rappresenta il valore di progetto della tensione critica locale. Quest'ultimo può essere calcolato come:

$$f_{loc,d}^{axial} = \frac{1}{\gamma_f} \cdot \min \{ (f_{loc,k}^{axial})_f, (f_{loc,k}^{axial})_w \}, \quad (4.10)$$

dove $(f_{loc,k}^{axial})_f$ e $(f_{loc,k}^{axial})_w$ rappresentano, rispettivamente, la tensione critica di ali ed anima uniformemente compresse, determinabili attraverso le espressioni riportate nell'Appendice A del presente documento.

In via cautelativa, adottando la simbologia di Figura 4-1, il valore di $(f_{loc,k}^{axial})_f$ può essere assunto pari a:

$$(f_{loc,k}^{axial})_f = (f_{loc,k}^{axial})_f^{SS} = 4 \cdot G_{LT} \cdot \left(\frac{t_f}{b_f} \right)^2, \quad (4.11)$$

corrispondente a quello della tensione critica delle ali compresse supposte semplicemente appoggiate in corrispondenza dell'anima, $(f_{loc,k}^{axial})_f^{SS}$.

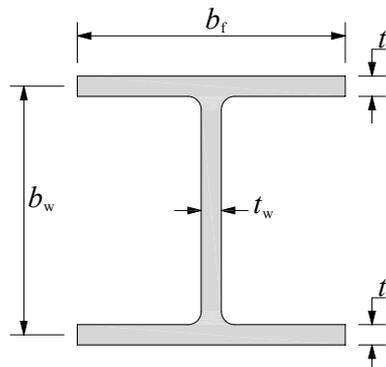


Figura 4-1 – Sezione a doppio T: simbologia adottata per le grandezze geometriche.

Analogamente, in via cautelativa, il valore della tensione critica dell'anima compressa, $(f_{loc,k}^{axial})_w$, può essere assunto pari a:

$$(f_{loc,k}^{axial})_w = (f_{loc,k}^{axial})_w^{SS} = k_c \cdot \frac{\pi^2 \cdot E_{Lc} \cdot t_w^2}{12 \cdot (1 - \nu_{LT} \cdot \nu_{TL}) \cdot b_w^2}, \quad (4.12)$$

corrispondente a quello della tensione critica dell'anima compressa supposta semplicemente appoggiata in corrispondenza delle ali, $(f_{loc,k}^{axial})_w^{SS}$.

Il coefficiente k_c presente nella (4.12) è fornito dalla relazione:

$$k_c = 2 \cdot \sqrt{\frac{E_{Tc}}{E_{Lc}}} + 4 \cdot \frac{G_{LT}}{E_{Lc}} \cdot \left(1 - \nu_{LT}^2 \cdot \frac{E_{Tc}}{E_{Lc}}\right) + 2 \cdot \nu_{LT} \cdot \frac{E_{Tc}}{E_{Lc}}. \quad (4.13)$$

Per i profili classificati dalla UNI EN 13706-3 (Appendice C) il rapporto E_{Tc}/E_{Lc} risulta pari a circa 0,30. Per i profili attualmente disponibili in commercio, risultano generalmente verificate le seguenti limitazioni: $0,12 \leq G_{LT}/E_{Lc} \leq 0,17$ e $0,23 \leq \nu_{LT} \leq 0,35$. Per tali intervalli di valori, la (4.13) fornisce il valore minimo $k_c = 1,70$.

Il coefficiente χ , riportato nella (4.8), rappresenta un fattore riduttivo che tiene conto dell'interazione tra instabilità locale e globale dell'elemento. Tale coefficiente assume valore unitario per snellezze che tendono a zero o per la presenza di vincoli che impediscono l'instabilità globale e può essere ricavato mediante l'espressione:

$$\chi = \frac{1}{c \cdot \lambda^2} \cdot \left(\Phi - \sqrt{\Phi^2 - c \cdot \lambda^2}\right). \quad (4.14)$$

I simboli introdotti nella (4.14) hanno il seguente significato:

- il simbolo c denota un coefficiente numerico che, in assenza di più accurate determinazioni sperimentali, può essere assunto pari a 0,65;

- $\Phi = \frac{1 + \lambda^2}{2}$.

Nella relazione di definizione del parametro Φ sopra introdotto, la snellezza λ vale:

$$\lambda = \sqrt{\frac{N_{loc,Rd}}{N_{Eul}}}, \quad (4.15)$$

essendo $N_{Eul} = \frac{1}{\gamma_f} \cdot \frac{\pi^2 \cdot E_{eff} \cdot J_{min}}{L_0^2}$ ed L_0 la lunghezza libera di inflessione.

In Figura 4-2 è riportato l'andamento di χ al variare di λ .

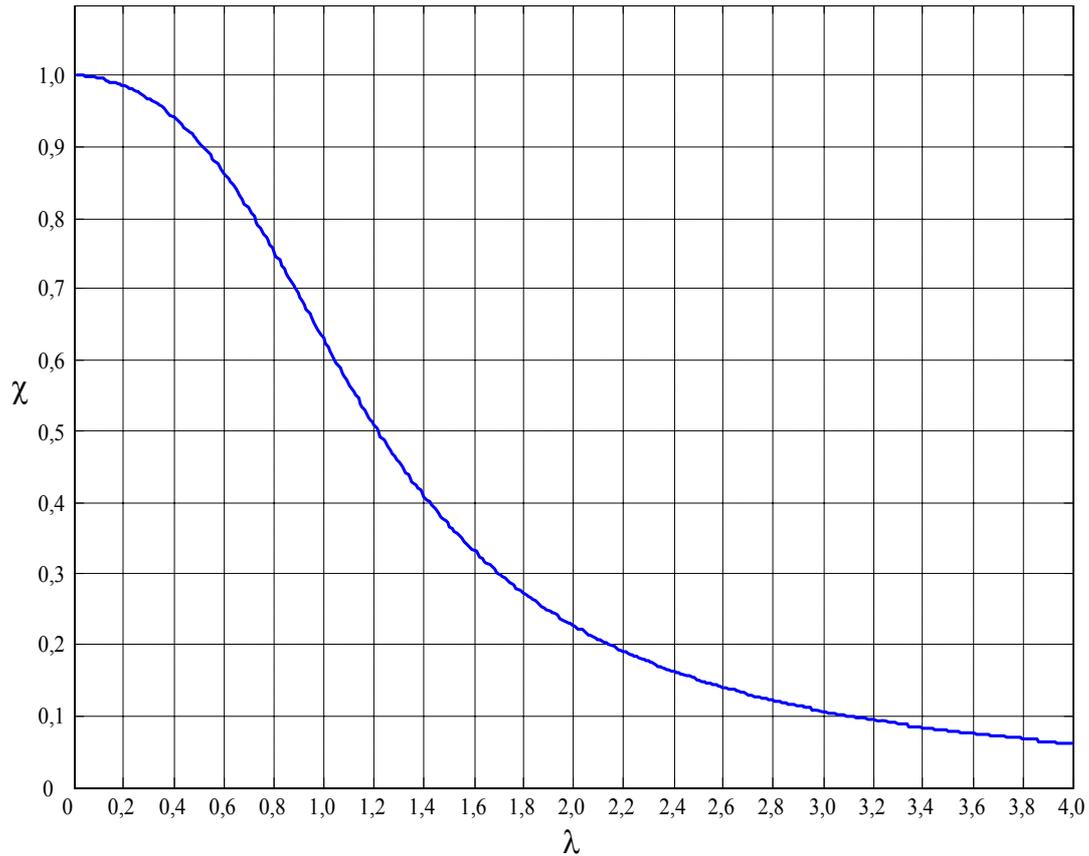


Figura 4-2 – Curva di interazione tra modi locali e modi globali di instabilità per compressione semplice.

4.2 FLESSIONE SEMPLICE E COMPOSTA

4.2.1 Flessione retta

(1) Le membrature soggette a flessione retta devono soddisfare verifiche sia di resistenza che di stabilità. Nel primo caso, in corrispondenza di ciascuna sezione retta, il valore di progetto del momento flettente, M_{Sd} , deve soddisfare la limitazione:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd1} \quad (4.16)$$

Nella (4.16) il valore di progetto della resistenza a flessione semplice del profilo, M_{Rd1} , è calcolato nel modo seguente:

$$M_{Rd1} = \min \{ W \cdot f_{t,d}, W \cdot f_{c,d} \}, \quad (4.17)$$

avendo attribuito a W il significato di modulo di resistenza della sezione.

(2) Nel caso di travi inflesse in un piano di simmetria e soggette a momento flettente costante, la verifica di stabilità richiede il soddisfacimento della seguente limitazione:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd2}, \quad (4.18)$$

dove il valore di progetto del momento flettente che provoca l'instabilità dell'elemento, M_{Rd2} , può

essere determinato sia mediante prove sperimentali (§ 3.8(4)) sia attraverso modellazioni numerico-analitiche (§ 3.8(5)). In quest'ultimo caso, l'analisi può essere condotta imponendo al profilo un'imperfezione iniziale. Tale imperfezione può essere costituita da un campo di spostamenti proporzionale al primo modo critico, di ampiezza massima pari alla corrispondente tolleranza dichiarata dal produttore e comunque non minore di quella indicata nell'Annesso B della UNI EN 13706-2.

(3) Nel caso di travi soggette a momento flettente variabile lungo l'asse, salvo valutazioni più rigorose, la verifica di stabilità può essere condotta riferendosi, in luogo del momento sollecitante, M_{Sd} , al momento equivalente, definito come:

$$M_{eq} = 1,3 M_m, \quad \text{con} \quad 0,75 M_{max} \leq M_{eq} \leq 1,0 M_{max}, \quad (4.19)$$

dove M_m è il valore medio di M_{Sd} lungo l'asse ed M_{max} ne rappresenta il valore massimo. Nel caso particolare di trave vincolata ad entrambi gli estremi e soggetta a momento flettente variabile linearmente tra i valori di estremità M_a e M_b , si può assumere per M_{eq} il valore:

$$M_{eq} = 0,6 \cdot M_a - 0,4 \cdot M_b, \quad \text{con} \quad |M_a| \geq |M_b|, \quad (4.20)$$

purché risulti $M_{eq} > 0,4 \cdot M_a$.

(4) Per profili con sezione trasversale a doppio T semplicemente appoggiati mediante ritegni flesso-torsionali e soggetti ad un momento flettente costante agente nel piano di inerzia massima della sezione, il valore di M_{Rd2} può essere ricavato dalla relazione:

$$M_{Rd2} = \chi_{FT} \cdot M_{loc,Rd}, \quad (4.21)$$

essendo $M_{loc,Rd}$ il valore di progetto del momento flettente che determina l'instabilità locale del profilo, valutabile mediante prove sperimentali (§ 3.8(4)) su travi tozze o modellazioni numerico-analitiche (§ 3.8(5)). In alternativa, tale valore può essere ottenuto come:

$$M_{loc,Rd} = W \cdot f_{loc,d}^{flex}. \quad (4.22)$$

Nella (4.22), il valore di progetto della tensione critica per flessione, $f_{loc,d}^{flex}$, deve essere assunto pari a:

$$f_{loc,d}^{flex} = \frac{1}{\gamma_f} \cdot \min \{ (f_{loc,k}^{axial})_f, (f_{loc,k}^{flex})_w \}. \quad (4.23)$$

Il valore della tensione critica dell'ala compressa, $(f_{loc,k}^{axial})_f$, può essere determinato attraverso le espressioni riportate nell'Appendice A del presente documento. In via cautelativa, si può assumere per $(f_{loc,k}^{axial})_f$ il valore fornito dalla (4.11), corrispondente alla tensione critica dell'ala supposta soggetta a compressione costante e a vincoli di semplice appoggio in corrispondenza dell'anima.

Il valore della tensione critica dell'anima, $(f_{loc,k}^{flex})_w$, può essere determinato, in via cautelativa, attraverso la relazione:

$$(f_{loc,k}^{flex})_w = (f_{loc,k}^{flex})_w^{SS} = k_f \cdot \frac{\pi^2 \cdot E_{Lc} \cdot t_w^2}{12 \cdot (1 - \nu_{LT} \cdot \nu_{TL}) \cdot b_w^2}, \quad (4.24)$$

dove $(f_{loc,k}^{axial})_{w}^{SS}$ corrisponde alla tensione critica dell'anima soggetta ad un carico lineare a farfalla, con vincoli di semplice appoggio in corrispondenza delle ali.

Nella (4.24) il coefficiente k_f è valutabile come:

$$k_f = 13,9 \cdot \sqrt{\frac{E_{Tc}}{E_{Lc}}} + 22,2 \cdot \frac{G_{LT}}{E_{Lc}} \cdot \left(1 - \nu_{LT}^2 \cdot \frac{E_{Tc}}{E_{Lc}} \right) + 11,1 \cdot \nu_{LT} \cdot \frac{E_{Tc}}{E_{Lc}}. \quad (4.25)$$

Per i profili classificati dalla UNI EN 13706-3 (Appendice C) il rapporto E_{Tc}/E_{Lc} risulta circa pari a 0,30; inoltre, per i profili attualmente disponibili in commercio risulta $0,12 \leq G_{LT}/E_{Lc} \leq 0,17$ e $0,23 \leq \nu_{LT} \leq 0,35$. Per tali intervalli di valori, la (4.25) fornisce il valore minimo $k_f = 11,00$.

Nella (4.21) χ_{FT} denota un coefficiente numerico riduttivo che tiene conto dell'interazione tra instabilità locale e globale dell'elemento inflesso. Esso assume valore unitario per snellezze che tendono a zero o in presenza di vincoli che impediscono l'instabilità globale e può essere ricavato dalla relazione:

$$\chi_{FT} = \frac{1}{c \cdot \lambda_{FT}^2} \cdot \left(\Phi_{FT} - \sqrt{\Phi_{FT}^2 - c \cdot \lambda_{FT}^2} \right). \quad (4.26)$$

I simboli introdotti nella (4.26) hanno il seguente significato:

- c denota un coefficiente numerico che, in assenza di più accurate determinazioni sperimentali, può essere assunto pari a 0,70;

$$- \Phi_{FT} = \frac{1 + \lambda_{FT}^2}{2};$$

$$- \lambda_{FT} = \sqrt{\frac{M_{loc,Rd}}{M_{FT}}}.$$

Nella relazione di definizione del parametro di snellezza, λ_{FT} , sopra riportata, il momento critico per l'instabilità flesso-torsionale, M_{FT} , vale:

$$M_{FT} = \frac{1}{\gamma_f} \cdot \frac{\pi^2}{L^2} \cdot E_{eff} \cdot J_{min} \cdot \sqrt{\frac{J_{\omega}}{J_{min}} \cdot \left(1 + \frac{G_{eff} \cdot J_t}{E_{eff} \cdot J_{\omega}} \cdot \frac{L^2}{\pi^2} \right)}, \quad (4.27)$$

dove L è la distanza tra gli appoggi, J_{min} il momento d'inerzia minimo, J_t il fattore di rigidità torsionale e J_{ω} è la costante di ingobbamento.

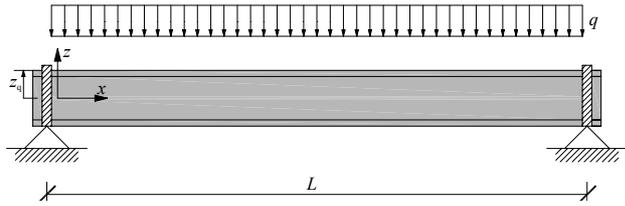
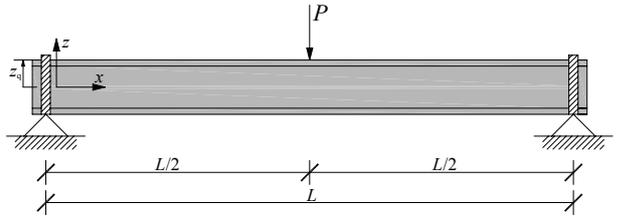
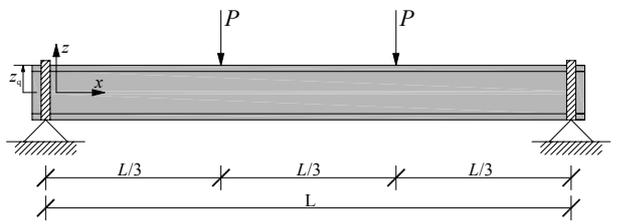
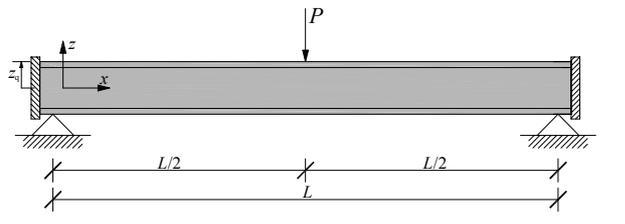
I moduli di elasticità E_{eff} e G_{eff} possono essere determinati mediante prove di carico su tre punti adottando campioni di geometria conformi a quanto indicato, rispettivamente, nell'Annesso D e nell'Annesso G della UNI EN13706-2.

(5) Nel caso di profili con sezione trasversale a doppio T inflessi nel piano di inerzia massima e soggetti a momento flettente variabile, è ancora possibile effettuare la verifica di stabilità utilizzando l'espressione di M_{Rd2} riportata nella (4.21), a condizione che il fattore λ_{FT} , che compare nell'espressione di χ_{FT} (4.26), venga valutato assumendo come momento critico di instabilità flesso-torsionale, M_{FT} , il seguente:

$$M_{FT} = \frac{1}{\gamma_f} \cdot \frac{C_1}{k} \cdot \frac{\pi^2}{L^2} \cdot E_{eff} \cdot J_{min} \cdot \left[-C_2 \cdot z_q + \sqrt{\left(\frac{C_2 \cdot z_q}{k} \right)^2 + \frac{J_{\omega}}{J_{min}} \cdot \left(\frac{1}{k^2} + \frac{G_{eff} \cdot J_t}{E_{eff} \cdot J_{\omega}} \cdot \frac{L^2}{\pi^2} \right)} \right], \quad (4.28)$$

dove L è la distanza tra due ritegni flessione-torsionali consecutivi e z_q è la coordinata del punto di applicazione del carico rispetto al baricentro del profilo. I valori dei coefficienti C_1 , C_2 e k sono riportati nella Tabella 4-1 per alcuni casi particolari di carico e di vincolo.

Tabella 4-1 – Coefficienti C_1 , C_2 e k per alcune condizioni di vincolo e di carico
(φ_x , φ_z rotazioni attorno agli assi x e z ; ψ ingobbamento della sezione).

Condizioni di vincolo agli estremi e di carico (nel piano)	φ_x	φ_z	ψ	C_1	C_2	k
	$L^{(*)}$	L	L	1,13	0,45	1,00
	L	L	L	1,35	0,55	1,00
	L	L	L	1,12	0,51	1,00
	L	$I^{(**)}$	I	1,07	0,42	0,50

(*) L = libero, (***) I = impedito

(6) Ai fini della verifica di instabilità locale delle ali di profili a doppio T semplicemente appoggiati e inflessi nel piano di inerzia minima, il valore di progetto del momento critico può essere valutato mediante prove sperimentali (§ 3.8(4)) o modellazioni numerico-analitiche (§ 3.8(5)).

In particolare, nel caso di momento flettente costante, ci si potrà ricondurre ad un modello 2-D della sola ala soggetta alle due estremità ad una distribuzione lineare a farfalla di tensioni normali e vincolata in corrispondenza dell'unione con l'anima. Tale vincolo potrà essere modellato come un

vincolo rotazionale di rigidezza $\tilde{k} = \frac{E_{Tc} \cdot t_w^3}{b_w \cdot 12(1 - \nu_{LT} \cdot \nu_{TL})}$, pari alla rigidezza flessionale (trasversale) della stessa anima. Una delimitazione inferiore del carico critico potrà essere ottenuta assumendo che l'anima rappresenti per l'ala un vincolo di semplice appoggio ($\tilde{k} = 0$).

4.2.2 Tenso-flessione retta

(1) Nel caso di travi prismatiche soggette a sforzo assiale di trazione, $N_{Lt,Sd}$, ed a momento flettente costante, M_{Sd} , agente in uno dei piani principali, in ogni sezione retta deve essere soddisfatta, allo SLU, la limitazione:

$$\frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{Sd}}{M_{Rd1}} \leq 1, \quad (4.29)$$

dove $N_{t,Rd}$ è la resistenza di progetto a trazione definita al § 4.1.1 e M_{Rd1} è il momento resistente di progetto relativo al suddetto piano di sollecitazione, da calcolarsi mediante l'espressione (4.17).

(2) Oltre alla verifica di resistenza di cui al punto precedente, deve essere effettuata la verifica di stabilità. In assenza di una valutazione rigorosa del carico critico, è possibile trascurare lo sforzo di trazione ed operare con le modalità indicate per il caso della flessione retta.

4.2.3 Presso-flessione retta

(1) Nel caso di travi prismatiche doppiamente simmetriche soggette ad un carico assiale di compressione, $N_{c,Sd}$, e ad un momento flettente costante, M_{Sd} , agente nel piano di massima inerzia, in ogni sezione retta deve essere soddisfatta, allo SLU, la verifica di resistenza:

$$\frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd1}} + \frac{M_{Sd}}{M_{Rd1}} \leq 1, \quad (4.30)$$

dove $N_{c,Rd1}$ è la resistenza di progetto a compressione definita dalla (4.7) e M_{Rd1} è il momento resistente di progetto, da calcolarsi con l'espressione (4.17).

(2) Oltre alla verifica di resistenza di cui al punto precedente, deve essere effettuata la verifica di stabilità. In assenza di una valutazione rigorosa del carico critico, quest'ultima verifica può essere surrogata da quella nei confronti della seguente limitazione:

$$\frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd2}} + \frac{M_{Sd}}{M_{Rd2} \cdot \left(1 - \frac{N_{c,Sd}}{N_{Eul}}\right)} \leq 1. \quad (4.31)$$

I simboli introdotti nella (4.31) hanno il significato appresso specificato:

- $N_{c,Rd2}$ rappresenta il valore di progetto dello sforzo di compressione che provoca l'instabilità dell'elemento che, nel caso di sezioni a doppio T, può essere fornito dalla (4.8);
- M_{Rd2} rappresenta il valore di progetto del momento flettente che provoca l'instabilità per flessione che, nel caso di profili a doppio T, può essere valutato conformemente alla (4.21);

- N_{Eul} rappresenta il valore del carico critico euleriano.

Il valore del carico critico euleriano, N_{Eul} , introdotto nella (4.31), è fornito dalla seguente espressione:

$$N_{Eul} = \frac{1}{\gamma_f} \cdot \frac{\pi^2 \cdot E_{eff} \cdot J}{L_0^2}, \quad (4.32)$$

essendo L_0 e J , rispettivamente, la lunghezza libera di inflessione ed il momento d'inerzia nel piano di flessione.

(3) In presenza di un momento flettente variabile, in luogo del momento sollecitante, M_{Sd} , può essere assunto il momento equivalente, M_{eq} , valutabile come descritto al punto (3) del § 4.2.1.

(4) Per profili con sezione a doppio T soggetti ad un momento flettente variabile, il valore del momento flettente che provoca l'instabilità flesso-torsionale, M_{FT} , può essere calcolato mediante l'espressione (4.28).

4.3 TAGLIO

4.3.1 Resistenza di calcolo a taglio

(1) In corrispondenza di ciascuna sezione retta, il valore di progetto dello sforzo di taglio, V_{Sd} , deve soddisfare la limitazione:

$$V_{Sd} \leq V_{Rd}. \quad (4.33)$$

Nella (4.33) il valore della resistenza di progetto, V_{Rd} , è ottenibile nel modo seguente:

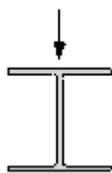
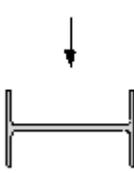
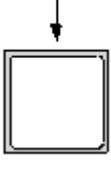
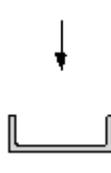
$$V_{Rd} = \min \{ V_{Rd1}, V_{Rd2} \}. \quad (4.34)$$

Il calcolo di V_{Rd1} può essere eseguito utilizzando la relazione:

$$V_{Rd1} = A_V \cdot f_{V,Rd}, \quad (4.35)$$

essendo $f_{V,Rd}$ la resistenza a taglio di progetto del materiale e A_V l'area della sezione resistente a taglio, ricavabile dalla Tabella 4-2 per i profili di più comune impiego.

Tabella 4-2 – Area resistente a taglio A_V per alcuni profili sottili.

(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
				
$b_w \cdot t_w$	$(2b_f \cdot t_f)/1,2$	$2b_w \cdot t_w$	$b_w \cdot t_w$	$(2b_f \cdot t_f)/1,2$

Il valore di progetto del taglio che provoca l'instabilità locale dell'elemento, V_{Rd2} , può essere de-

terminato mediante prove sperimentali (§ 3.8(4)) o modellazioni numerico-analitiche (§ 3.8(5)). Nel caso di profili con sezione retta del tipo riportato in Tabella 4-2 (a, c, d), il valore di V_{Rd2} può essere determinato mediante la seguente formula:

$$V_{Rd2} = V_{loc,Rd} = \frac{1}{\gamma_f} \cdot A_V \cdot f_{V,loc,k} \quad (4.36)$$

Nella (4.36), $f_{V,loc,k}$ è il valore caratteristico della tensione tangenziale che determina l'instabilità locale del pannello d'anima, assunto semplicemente appoggiato in corrispondenza delle ali. Tale valore può essere ricavato attraverso le successive relazioni:

$$f_{V,loc,k} = \frac{4}{t_w \cdot b_w^2} \cdot (8,125 + 5,045 \cdot K) \cdot \sqrt[4]{(D_{11})_w \cdot (D_{22})_w^3}, \quad \text{per } K \leq 1, \quad (4.37)$$

$$f_{V,loc,k} = \frac{4}{t_w \cdot b_w^2} \cdot \left(11,71 + \frac{1,46}{K^2} \right) \cdot \sqrt{(D_{22})_w \cdot [(D_{12})_w + 2 \cdot (D_{66})_w]}, \quad \text{per } K > 1. \quad (4.38)$$

Nella (4.37) e (4.38) K assume la forma:

$$K = \frac{\frac{G_{LT}}{6} + \nu_{LT} \cdot \frac{E_{Tc}}{12 \cdot (1 - \nu_{LT} \cdot \nu_{TL})}}{\sqrt{\frac{E_{Lc} \cdot E_{Tc}}{[12 \cdot (1 - \nu_{LT} \cdot \nu_{TL})]^2}}}. \quad (4.39)$$

(2) Nelle sezioni dove sono applicati carichi concentrati devono essere eseguite verifiche locali. In particolare, si deve controllare che:

$$f_{Sd,z} \leq f_{Tc,Rd} \quad (4.40)$$

essendo $f_{Sd,z}$ il valore di progetto della tensione di compressione agente in direzione trasversale. Allo scopo di evitare fenomeni di instabilità locale possono essere inseriti opportuni sistemi di irrigidimento della sezione retta.

4.4 TORSIONE

4.4.1 Resistenza di calcolo a torsione

(1) L'analisi di profili con sezione trasversale a doppio T soggetti a torsione deve essere eseguita facendo ricorso ad un appropriato modello in grado di fornire sia il contributo torcente primario alla De Saint Venant, T_{Sd}^{SV} , che quello secondario da ingobbamento, T_{Sd}^{ω} .

La verifica della sezione è soddisfatta se risulta rispettata la limitazione:

$$t_f \cdot \frac{T_{Sd}^{SV}}{J_t} + 1,5 \cdot \frac{T_{Sd}^{\omega}}{t_f \cdot b_f \cdot b_w} \leq f_{V,Rd} \quad (4.41)$$

(2) Nella verifica di profili con sezione trasversale a L o a T, deve essere soddisfatta la limitazione:

$$t_{\max} \cdot \frac{T_{\text{Sd}}^{\text{SV}}}{J_t} \leq f_{V,\text{Rd}} \cdot \quad (4.42)$$

(3) Nella verifica di profili scatolari, è possibile trascurare il contributo torcente di ingobbamento, T_{Sd}^{ω} .

4.5 FLESSIONE E TAGLIO

4.5.1 Resistenza di calcolo a flessione e taglio

(1) La verifica di pannelli d'anima di profili soggetti a sollecitazioni di flessione retta, M_{Sd} , e taglio, V_{Sd} , risulta soddisfatta se è rispettata la seguente limitazione:

$$\left(\frac{M_{\text{Sd}}}{M_{\text{Rd}}} \right)^2 + \left(\frac{V_{\text{Sd}}}{V_{\text{Rd}}} \right)^2 \leq 1, \quad (4.43)$$

dove V_{Rd} è definita dalla (4.34) e M_{Rd} corrispondente al minimo tra M_{Rd1} e M_{Rd2} .

5 VERIFICA AGLI STATI LIMITE ULTIMI DEI COLLEGAMENTI

Le connessioni tra componenti strutturali possono essere realizzate mediante collegamenti bullonati o rivettati, collegamenti incollati, o mediante una combinazione di essi.

5.1 SOLLECITAZIONI

(1) Le sollecitazioni agenti sui collegamenti devono essere determinate attraverso un'analisi elastica della struttura o di opportune sottostrutture.

5.2 RESISTENZA DEI COLLEGAMENTI

(1) Tutti i collegamenti devono avere una resistenza di progetto adeguata alle azioni che possono interessare la struttura nel corso della sua vita utile.

(2) La resistenza del collegamento deve essere valutata tenendo conto di quella dei singoli dispositivi di giunzione o di incollaggio che lo compongono.

(3) Le verifiche di resistenza dei collegamenti devono essere eseguite considerando tutte le possibili modalità di crisi delle parti connesse.

(4) Nelle verifiche di resistenza occorre tenere conto dell'orientazione degli sforzi sollecitanti ai fini della determinazione degli sforzi resistenti.

5.3 CRITERI DI PROGETTO

(1) I collegamenti devono essere progettati nel rispetto delle seguenti condizioni:

- le forze ed i momenti interni devono essere in equilibrio con le forze ed i momenti applicati;
- ciascun elemento del collegamento deve essere in grado di resistere alle sollecitazioni considerate.

(2) Nel caso di collegamenti bullonati gli sforzi agenti in ogni singolo bullone non possono essere valutati con semplici criteri di equilibrio, come è usuale nel caso di materiali duttili.

(3) I collegamenti bullonati devono, in genere, essere progettati in modo che gli assi baricentrici degli elementi strutturali convergano in uno stesso punto.

(4) Nel caso in cui le connessioni non siano assimilabili a nodi cerniera, le eccentricità degli sforzi devono essere debitamente tenute in conto nella valutazione delle sollecitazioni.

5.4 COLLEGAMENTI BULLONATI

5.4.1 Generalità

(1) I collegamenti bullonati presi in esame sono realizzati mediante bulloni di acciaio inossidabile. Particolari cautele devono essere adottate nell'utilizzo di bulloni di materiale composito, soprattutto con riferimento alla loro deformabilità.

(2) Nel caso di collegamenti bullonati soggetti ad azione tagliente, i bulloni devono avere tutti lo stesso diametro ed almeno due di essi devono essere disposti nella direzione del carico.

- (3) In generale, il diametro dei bulloni non deve essere minore dello spessore del più sottile degli elementi collegati e non maggiore di una volta e mezzo lo stesso (Tabella 5-1).
- (4) Particolari cautele devono essere adottate nella realizzazione del foro, che deve avere un diametro tale da consentire l'ingresso non forzato del bullone. In ogni caso la differenza tra il diametro del foro, d , e quello del bullone, d_b , non deve superare 1 mm (Tabella 5-1).
- (5) Rondelle rigide devono essere disposte sotto la testa del bullone e del dado. Esse devono avere un diametro esterno pari ad almeno due volte quello della testa del bullone ed uno spessore tale da garantire una pressione uniforme sulla superficie dell'elemento di composito (Tabella 5-1).
- (6) I collegamenti devono essere progettati prevedendo, per ciascun bullone, una coppia di serraggio in grado di assicurare un'adeguata diffusione degli sforzi attorno al foro. Nella verifica dei collegamenti, l'effetto di tale diffusione degli sforzi deve essere trascurata.
- (7) Particolare cautela deve essere riposta nelle operazioni di serraggio del bullone, tenendo conto della resistenza a compressione del profilo in direzione ortogonale alle fibre.
- (8) Le distanze tra i baricentri dei fori, w_x e w_y , non devono essere inferiori a quattro volte il diametro dei bulloni (Figura 5-1).

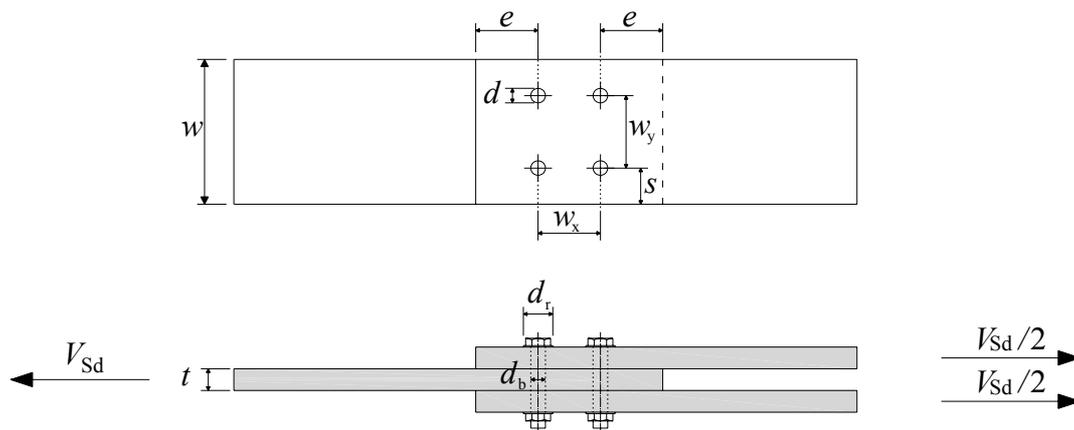


Figura 5-1 – Collegamento bullonato.

- (9) Nelle verifiche a taglio, deve essere sempre evitato il modo di rottura del piatto per strappo del bullone nella direzione delle fibre. A tal fine è necessario prevedere un adeguato rapporto e/d_b fra la distanza del bullone dal bordo del piatto nella direzione dello sforzo, e , ed il diametro del bullone, d_b (Figura 5-1).
- (10) Il rapporto tra la distanza del bullone dal bordo nella direzione ortogonale allo sforzo, s , ed il diametro del bullone, d_b , deve essere non minore della metà del rapporto tra la distanza trasversale tra due fori consecutivi, w_y , ed il diametro del bullone (Tabella 5-1).

Tabella 5-1 – Limiti geometrici relativi ad un collegamento bullonato.

Diametro dei bulloni (consigliato)	$t_{\min} \leq d_b \leq 1,5 \cdot t_{\min}$ $d_b \geq t_{\min}$
Diametro dei fori	$d \leq d_b + 1 \text{ mm}$
Diametro della rondella	$d_r \geq 2 \cdot d_b$
Interassi tra i fori	$w_x \geq 4 \cdot d_b$ $w_y \geq 4 \cdot d_b$
Distanza dai bordi	$e/d_b \geq 4$ $s/d_b \geq 1/2 \cdot (w_y/d_b)$

5.4.2 Criteri di progetto

- (1) Le condizioni di equilibrio devono essere sempre soddisfatte nella determinazione della:
- ripartizione degli sforzi tra i bulloni;
 - distribuzione delle tensioni in prossimità dei fori;
 - distribuzione delle tensioni a distanza dai fori.
- (2) Le verifiche di resistenza dei collegamenti devono essere condotte tenendo conto dell'eventuale presenza simultanea di più caratteristiche della sollecitazione.
- (3) Nella verifica di collegamenti con bulloni soggetti ad azioni taglianti devono essere considerati i seguenti modi di crisi:
- rottura per strappo della sezione netta del piatto;
 - rottura a taglio del piatto (per strappo del bullone);
 - rifollamento del foro;
 - rottura del bullone per taglio.
- (4) Qualora i bulloni del collegamento siano soggetti a sforzi di trazione, nella verifica devono essere considerati i seguenti modi di crisi:
- punzonamento del piatto di FRP;
 - rottura del bullone per trazione.
- (5) La verifica dei collegamenti con bulloni soggetti a taglio e trazione deve essere eseguita assumendo, cautelativamente, un criterio di rottura lineare. Differenti criteri di rottura possono essere adottati nel caso di progettazione supportata da prove sperimentali (§ 3.8(4)) o da modellazioni numerico-analitiche (§ 3.8(5)).

5.4.3 Metodo di verifica per collegamenti con bulloni soggetti a taglio

- (1) Nel caso in cui la risultante delle forze esterne applicate passi per il baricentro G della bullonatura (Figura 5-2), è possibile assegnare ai bulloni degli sforzi proporzionali ai coefficienti riportati in Tabella 5-2.
- Per collegamenti tra componenti di FRP e componenti metallici, la prima fila di bulloni è quella più

vicina all'estremità dell'elemento di FRP.

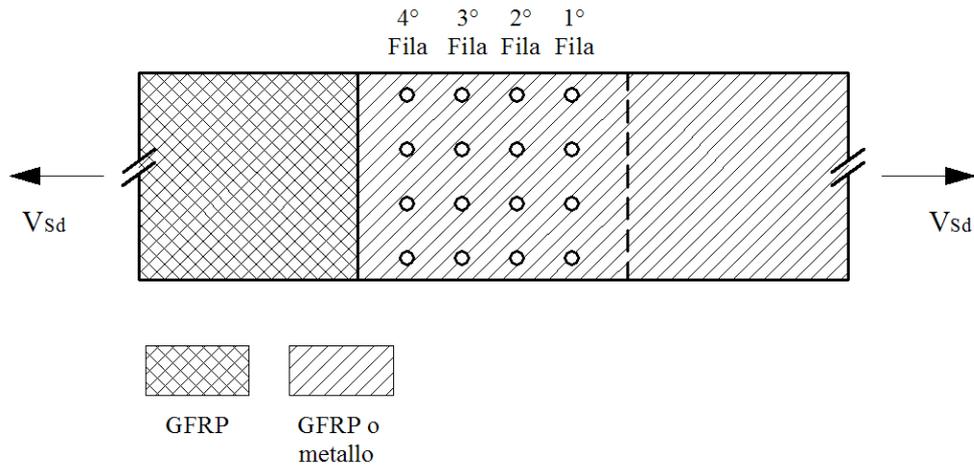


Figura 5-2 – Disposizione delle file dei fori di un collegamento bullonato fra due piatti di FRP o fra un piatto di FRP ed uno in metallo. La risultante delle forze esterne, V_{sd} , è passante per il baricentro della bullonatura.

Tabella 5-2 – Verifica di collegamenti bullonati: coefficienti di attribuzione degli sforzi di taglio per ciascuna fila di bulloni.

Numero di file		fila 1	fila 2	fila 3	fila 4
1	FRP/FRP	120 %			
	FRP/metallo	120 %			
2	FRP/FRP	60 %	60 %		
	FRP/metallo	70 %	50 %		
3	FRP/FRP	60 %	25 %	60 %	
	FRP/metallo	60 %	30 %	30 %	
4	FRP/FRP	40 %	30 %	30 %	40 %
	FRP/metallo	50 %	35 %	25 %	15 %
> 4		Non raccomandato			

5.4.3.1 Verifica a strappo del piatto

(1) La verifica, nei confronti delle tensioni normali, della sezione resistente del piatto indebolita dalla presenza dei fori si intende soddisfatta se risultano rispettate le seguenti limitazioni:

- sforzo di trazione parallelo alla direzione delle fibre (Figura 5-3a):

$$V_{Sd} \leq \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot f_{Lt,Rd} \cdot (w - n \cdot d) \cdot t, \quad (5.1)$$

- sforzo di trazione ortogonale alla direzione delle fibre (Figura 5-3b):

$$V_{Sd} \leq \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot f_{Tt,Rd} \cdot (w - n \cdot d) \cdot t, \quad (5.2)$$

essendo γ_{Rd} il coefficiente parziale di modello, assunto pari a 1,11 per sezioni forate (§ 4.1.1), V_{Sd} lo sforzo trasmesso dai bulloni al piatto, $f_{L,Rd}$ e $f_{T,Rd}$, rispettivamente, la resistenza di progetto a trazione del materiale nella direzione delle fibre e nella direzione ortogonale ad esse, t lo spessore dell'elemento di composito ed n il numero dei fori.

Nel caso di rinforzo monoassiale, se lo sforzo V_{Sd} è inclinato di un generico angolo α rispetto alla direzione del rinforzo, si assume $f_{at,Rd} = f_{T,Rd}$ per $\alpha > 6^\circ$.

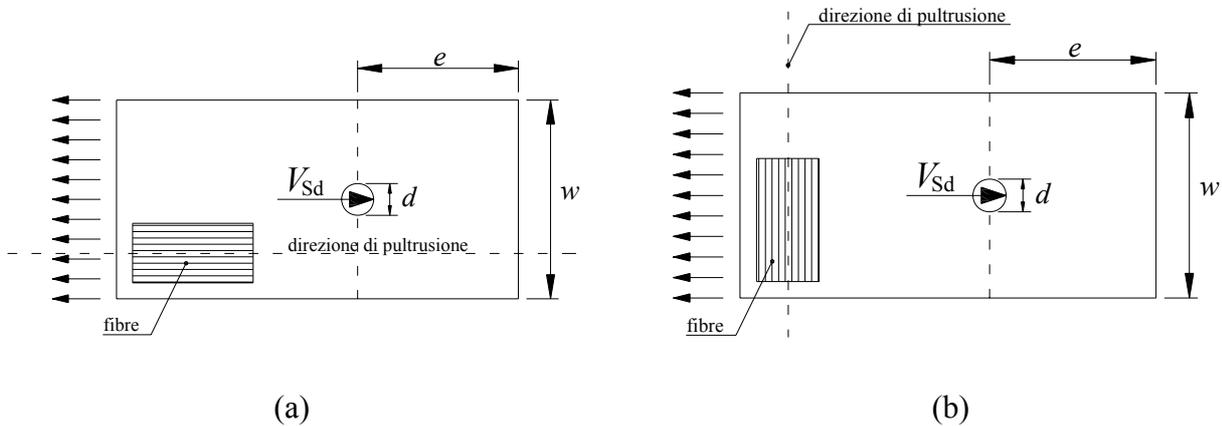


Figura 5-3 – Meccanismo di strappo del piatto.

5.4.3.2 Verifica a taglio del piatto (rottura per strappo del bullone)

(1) La verifica rispetto al modo di rottura del piatto per strappo del bullone (Figura 5-4) risulta soddisfatta se è rispettata la seguente limitazione:

$$V_{Sd} \leq f_{V,Rd} \cdot (2e - d) \cdot t, \quad (5.3)$$

essendo $f_{V,Rd}$ la resistenza a taglio di progetto dell'elemento di FRP.

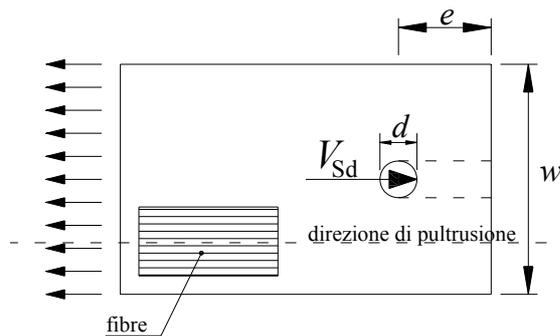


Figura 5-4 – Meccanismo di rottura per strappo del bullone.

5.4.3.3 Verifica a rifollamento del foro

(1) Nella verifica a rifollamento del foro, il valore medio della pressione esercitata dal gambo del bullone sulle pareti del foro deve soddisfare le seguenti limitazioni:

- sforzo parallelo alla direzione delle fibre (Figura 5-5a):

$$V_{Sd} \leq f_{L,Rd} \cdot d_b \cdot t, \quad (5.4)$$

- sforzo ortogonale alla direzione delle fibre (Figura 5-5b):

$$V_{Sd} \leq f_{Tr,Rd} \cdot d_b \cdot t, \quad (5.5)$$

essendo $f_{Lr,Rd}$ e $f_{Tr,Rd}$, rispettivamente, la resistenza di progetto a rifollamento del materiale nella direzione delle fibre e quella nella direzione ortogonale ad esse.

(2) Al fine di conferire un comportamento pseudo-duttile al meccanismo di crisi deve essere garantita un'azione di confinamento del materiale esercitato dalla rondella e dalla coppia di serraggio del bullone.

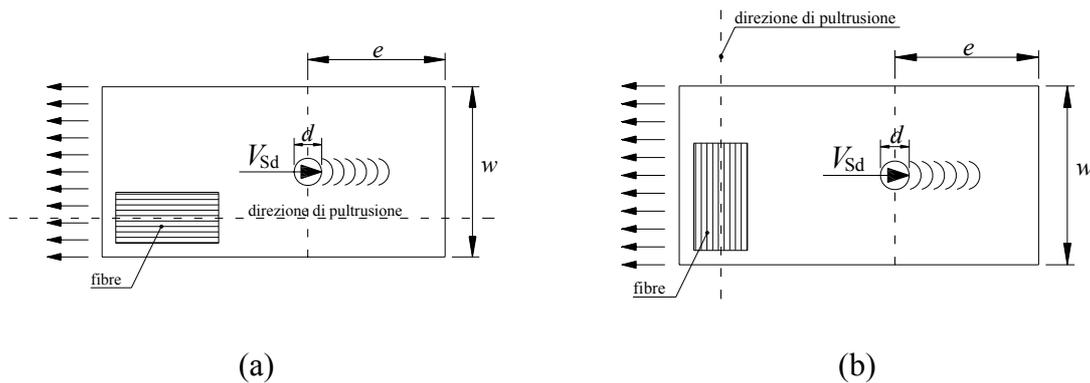


Figura 5-5 – Rifollamento del foro del bullone.

5.4.3.4 Verifica a taglio del bullone di acciaio

(1) La verifica a taglio del bullone di acciaio risulta soddisfatta se è rispettata la limitazione:

$$V_{Sd} \leq f_{Vb,Rd} \cdot A_b, \quad (5.6)$$

dove $f_{Vb,Rd}$ rappresenta la resistenza di progetto a taglio del bullone, come definita nella normativa vigente, ed A_b l'area resistente della sezione del bullone.

5.4.4 Metodo di verifica per collegamenti con bulloni soggetti a trazione

5.4.4.1 Verifica a punzonamento del piatto

(1) La rottura per punzonamento del piatto avviene per perforazione della piastra di FRP. Con riferimento alla Figura 5-6, deve essere verificato che risulti:

$$N_{Sd} \leq f_{V,Rd} \cdot \pi \cdot d_r \cdot t, \quad (5.7)$$

essendo d_r il diametro della rondella.

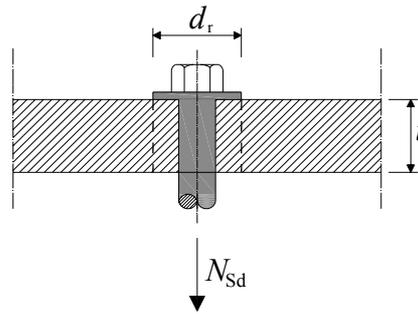


Figura 5-6 – Meccanismo di rottura del piatto per punzonamento.

5.4.4.2 Verifica a trazione del bullone di acciaio

(1) La verifica a trazione del bullone di acciaio è soddisfatta se è rispettata la seguente limitazione:

$$N_{Sd} \leq F_{tb,Rd} \quad (5.8)$$

essendo $F_{tb,Rd}$ la resistenza di progetto a trazione del bullone, come definita nella normativa vigente.

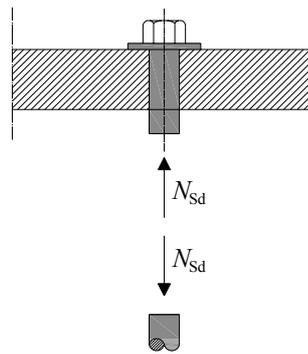


Figura 5-7 – Rottura del bullone per trazione.

5.5 COLLEGAMENTI INCOLLATI

5.5.1 Generalità

(1) Le giunzioni incollate prese in considerazione nelle presenti Istruzioni riguardano elementi (aderendi) di FRP sollecitati prevalentemente a sforzo normale centrato. I tipi più comuni di tali giunzioni sono illustrati in Figura 5-8.

(2) Il comportamento meccanico dei giunti di tipo c) e d) è riconducibile, rispettivamente, a quello dei giunti di tipo a) e b).

Per l'ampia sperimentazione disponibile in letteratura tecnica, nel caso a) è consigliata l'adozione dello stesso spessore per entrambi gli aderendi (giunto a semplice sovrapposizione simmetrico).

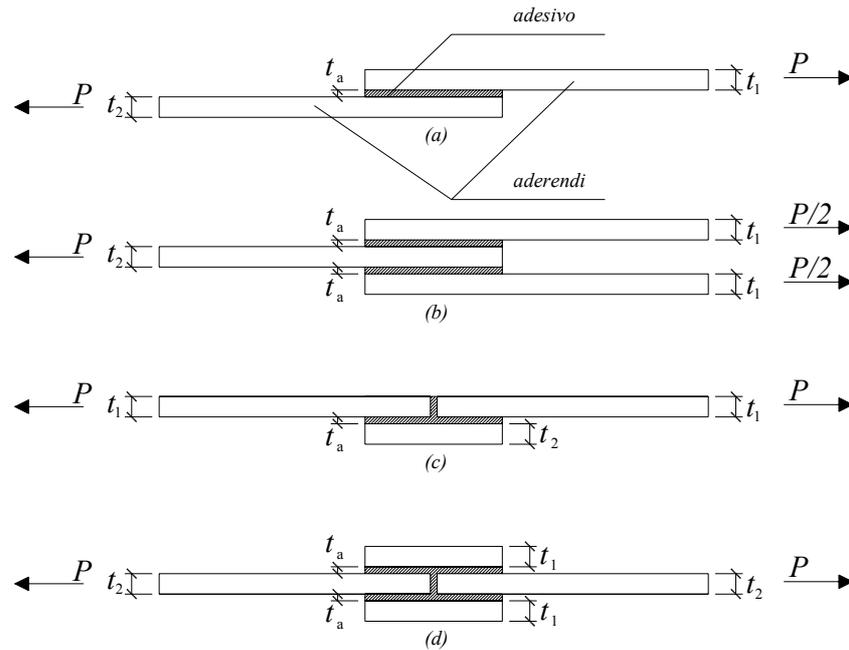


Figura 5-8 – Tipi di giunzioni incollate: a) a semplice sovrapposizione; b) a doppia sovrapposizione, bilanciata; c) a semplice coprigiunto; d) a doppio coprigiunto.

5.5.2 Legame costitutivo di interfaccia

(1)P Lo strato di adesivo contrasta gli spostamenti relativi tra gli elementi collegati (Figura 5-9): gli spostamenti in direzione trasversale, δ , che comportano un allontanamento tra gli aderendi, e quelli in direzione longitudinale, s , che comportano uno scorrimento.

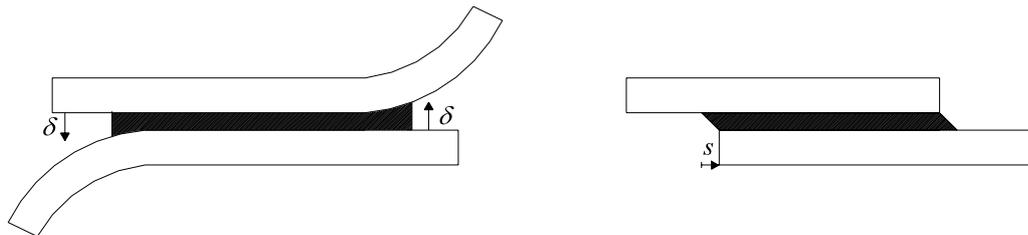


Figura 5-9 – Spostamenti relativi tra gli aderendi.

(2)P Indicando, rispettivamente, con σ e τ la tensione normale interattiva (ortogonale al piano del giunto) e quella tangenziale (parallela al piano del giunto, nella direzione dell'asse di quest'ultimo), si possono definire legami costitutivi di interfaccia disaccoppiati, $\sigma(\delta)$ e $\tau(s)$, del tipo rappresentato in Figura 5-10, dove essi sono espressi in termini di valori di progetto.

Lo spostamento attinto alla fine del tratto lineare in entrambi i diagrammi è generalmente molto piccolo rispetto a quello attinto alla fine del tratto di tipo "softening".

Le aree sottese dai due diagrammi sono pari, rispettivamente, all'energia di frattura per modo I (diagramma $\sigma(\delta)$) e all'energia di frattura per modo II (diagramma $\tau(s)$).

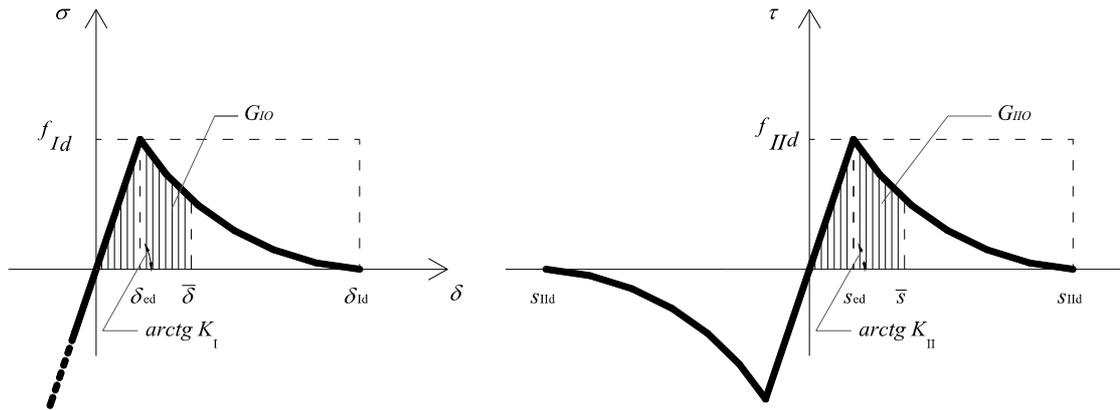


Figura 5-10 – Legami di interfaccia.

(3) Salvo valutazioni più rigorose, è generalmente possibile semplificare i legami costitutivi di interfaccia assimilando il comportamento meccanico dell'adesivo a quello di due distribuzioni continue di molle indipendenti (Figura 5-11), in grado di contrastare, le une, gli spostamenti relativi δ , e, le altre, gli spostamenti relativi s ed adottando per esse i legami costitutivi rappresentati dai diagrammi di Figura 5-12 in termini di valori di progetto. Tali diagrammi sottendono aree uguali a quelle dei diagrammi di Figura 5-10.

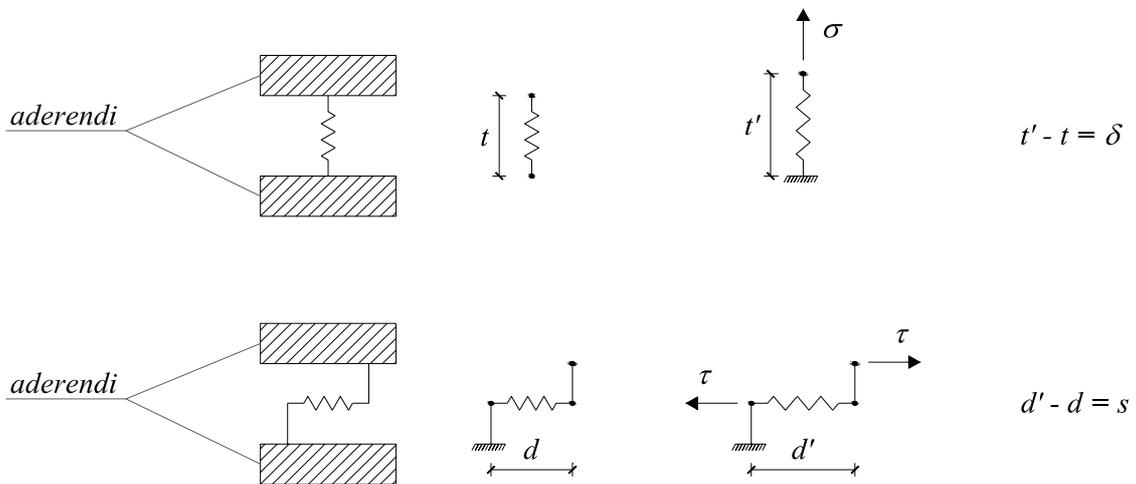


Figura 5-11 – Molle trasversali e longitudinali.

I legami di interfaccia semplificati, in termini di valori di progetto, sono illustrati in Figura 5-12.

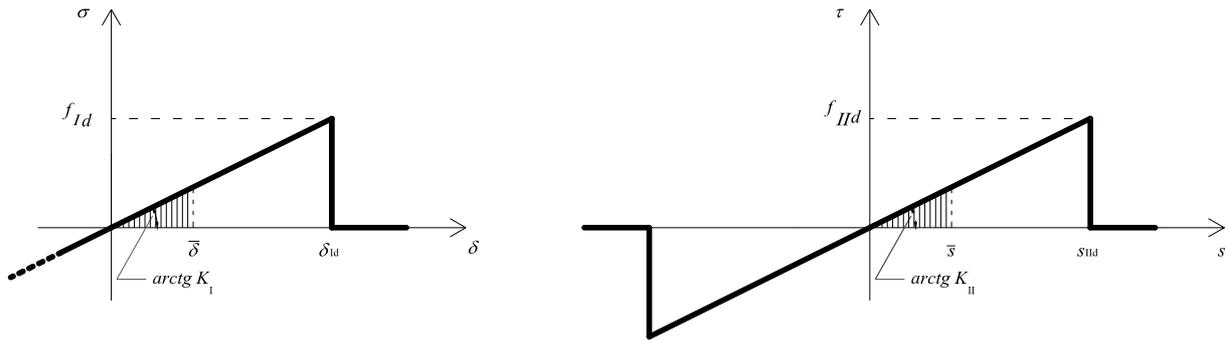


Figura 5-12 – Legami di interfaccia semplificati.

Le molle del primo tipo esplicano all'interfaccia un'azione normale a quest'ultima, che, riferita all'unità di superficie, vale:

$$\sigma = k_I \cdot \delta \quad \text{se } \delta \leq \delta_{I,d}, \quad (5.9a)$$

$$\sigma = 0 \quad \text{se } \delta > \delta_{I,d}, \quad (5.9b)$$

in cui:

$$k_I = \frac{f_{I,d}}{\delta_{I,d}}. \quad (5.9c)$$

Analogamente, le molle del secondo tipo esplicano all'interfaccia un'azione ad essa complanare, diretta lungo l'asse del giunto, che, riferita all'unità di superficie, vale:

$$\tau = k_{II} \cdot s \quad \text{se } |s| \leq s_{II,d}, \quad (5.10a)$$

$$\tau = 0 \quad \text{se } |s| > s_{II,d}, \quad (5.10b)$$

in cui:

$$k_{II} = \frac{f_{II,d}}{s_{II,d}}. \quad (5.10c)$$

5.5.3 Rottura dell'interfaccia

5.5.3.1 Rottura per scorrimento del giunto

(1)P Se gli aderendi sono sollecitati a sforzo normale centrato ed è possibile trascurare gli effetti flessionali conseguenti all'eccentricità delle tensioni tangenziali di interfaccia rispetto agli assi degli aderendi, come accade per le geometrie usuali dei giunti simmetrici a semplice sovrapposizione e dei giunti bilanciati a doppia sovrapposizione, la rottura del giunto sopravviene per modo II di frattura (frattura per scorrimento). In tal caso è possibile schematizzare l'interfaccia unicamente con molle contrastanti gli spostamenti relativi assiali, cioè del secondo tipo sopra considerato (5.10). Allo stato limite ultimo, lo sforzo normale resistente, $N_{R,d}$, del giunto è quello che mobilita nella molla più sollecitata lo spostamento $s_{II,d}$.

5.5.3.2 Rottura per scorrimento e apertura del giunto

(1)P Se il giunto è anche sollecitato da sforzi taglianti e flessionali, la rottura sopravviene per modo misto I/II e la capacità di trasferire sforzi normali risulta penalizzata.

(2)P In linea di principio, si deve tener conto degli effetti mutui tra tensioni normali e tangenziali generate all'interfaccia.

(3) Nei casi di giunti simmetrici a semplice sovrapposizione e bilanciati a doppia sovrapposizione, i suddetti effetti possono essere, tuttavia, trascurati. Conseguentemente, nei problemi di taglio e flessione è possibile modellare l'adesivo, unicamente, mediante molle in grado di contrastare gli spostamenti relativi trasversali tra gli aderenti; nel problema estensionale, invece, unicamente mediante molle in grado di contrastare gli spostamenti relativi assiali tra questi ultimi.

(4) Il valore dello sforzo normale resistente penalizzato, N_{Rd}^* , può essere calcolato avvalendosi di un idoneo criterio di frattura per modo misto I/II, tra quelli disponibili in letteratura. Tra essi, di agevole applicazione per il suo carattere additivo, è il seguente:

$$\frac{G_I}{G_{I0}} + \frac{G_{II}}{G_{II0}} = 1. \quad (5.11)$$

Nella (5.11) le quantità G_I e G_{II} sono, rispettivamente, le aree sottese delle restrizioni delle curve di Figura 5-10 o 5-12 agli intervalli $[0, \bar{\delta}]$ e $[0, \bar{s}]$, dove $\bar{\delta}$ e \bar{s} sono, nell'ordine, gli spostamenti relativi, trasversale ed assiale, che competono ai valori di progetto delle caratteristiche taglianti e flessionali a carico degli aderenti ed allo sforzo normale N_{Rd}^* ; G_{I0} e G_{II0} sono, rispettivamente, le energie di frattura per solo modo I: $G_{I0} = G_I(\bar{\delta} = \delta_{id})$, e per solo modo II: $G_{II0} = G_{II}(\bar{s} = s_{iid})$.

5.5.4 Stato limite ultimo del giunto

(1) La verifica allo SLU di una giunzione incollata richiede che siano soddisfatte le seguenti limitazioni:

- Nell'*aderendo*: le tensioni principali associate alle tensioni σ e τ mobilitate all'interfaccia devono risultare inferiori, rispettivamente, alle resistenze di progetto a trazione e a compressione della matrice del composito.

- Nell'*adesivo*:

$$N_{sd} \leq N_{Rd}, \quad (5.12)$$

essendo N_{sd} lo sforzo normale di progetto che il giunto deve trasmettere ed N_{Rd} lo sforzo normale resistente di progetto, eventualmente penalizzato per tenere conto della presenza di sollecitazioni taglianti e flessionali.

(2) Nel caso di giunzioni tra aderenti di materiale composito fibrorinforzato eseguite a regola d'arte, la crisi si verifica generalmente per rottura del materiale base.

(3) In alternativa a quanto sopra riportato, la resistenza di un giunto incollato può essere verificata attraverso idonee prove sperimentali (*design by testing*). Queste ultime possono rappresentare un valido strumento nel caso di giunti con geometria particolarmente complessa. La resistenza di progetto può essere determinata in accordo con la procedura indicata nelle UNI EN 1990.

5.5.5 Regole pratiche di progettazione

- (1) Lo spessore dello strato di adesivo, t_a , non deve essere inferiore a 0,1 mm.
- (2) Di norma, la lunghezza di incollaggio deve essere non inferiore a:

$$L^* = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot t_{\max} \cdot E_{f \max}}{k_{II}}}, \quad (5.13)$$

dove t_{\max} e $E_{f \max}$ sono, rispettivamente, i più grandi tra gli spessori degli aderenti a contatto ed i relativi moduli di elasticità longitudinale.

Nel caso di lunghezze di sovrapposizione inferiori, è suggerito di procedere a valutazioni più accurate della resistenza dell'interfaccia, basate su legami costitutivi del tipo di Figura 5-10.

5.5.6 Controllo dell'incollaggio

- (1) Il controllo dell'incollaggio deve essere eseguito attraverso prove distruttive e/o non distruttive.

5.5.6.1 Prove distruttive

- (1) Nel caso di giunzioni realizzate in stabilimento o *in situ* è necessario predisporre campioni da sottoporre a prove di laboratorio. Per ciascun tipo di giunto devono essere sottoposti a prove di laboratorio almeno 3 campioni.

5.5.6.2 Prove non distruttive

- (1) Le prove non distruttive possono essere utilizzate per caratterizzare l'omogeneità della qualità dell'incollaggio, allo scopo di evidenziare difetti quali delaminazioni, distacchi oppure presenza di vuoti. I principali tipi di prove utilizzabili a tal fine sono quelle soniche e/o ultrasoniche, quelle in emissione acustica e quelle termografiche.

6 VERIFICA AGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO

6.1 VERIFICA DELLE TENSIONI

(1) Si deve verificare che le tensioni di calcolo, f_{sd} , non superino il valore limite, f_{Rd} , definito come segue:

$$f_{Rd} = \eta \cdot \frac{f_{Rk}}{\gamma_f}, \quad (6.1)$$

essendo η il fattore di conversione (Tabella 3-3), f_{Rk} il valore caratteristico della corrispondente componente di tensione, γ_f il coefficiente di sicurezza del materiale.

6.2 VERIFICA DI DEFORMABILITÀ

(1)P Per un elemento inflesso il valore della freccia deve essere determinato tenendo conto del contributo della deformabilità sia flessionale che tagliante.

(2) Valori limite della freccia sono suggeriti nella Tabella 6-1. Al fine di tener conto del comportamento viscoso, la valutazione degli spostamenti per la condizione di carico quasi-permanente deve essere eseguita assumendo valori ridotti dei moduli di elasticità, corrispondenti ad un tempo t pari alla vita utile della struttura (vedere il successivo Punto 4).

(3) Valori diversi da quelli suggeriti possono essere prescritti in sede di capitolato per la salvaguardia di specifici elementi non strutturali.

Tabella 6-1 – Valori raccomandati della freccia.

Condizioni di carico quasi permanenti	δ_{max}
Piani di calpestio in presenza di intonaci, tramezzi non flessibili o altro materiale di finitura fragile	L/500
Piani di calpestio senza le limitazioni precedenti	L/250
Condizioni di carico rare	δ_{max}
Passerelle pedonali ovvero strutture con un elevato rapporto fra carichi accidentali e permanenti portati	L/100

(4) In assenza di dati sperimentali specifici, i valori dei moduli di elasticità longitudinale e tangenziale al tempo t , a seguito di un carico applicato al tempo $t=0$, possono essere assunti, rispettivamente, pari a:

$$E_L(t) = \frac{E_L}{1 + \phi_E(t)}, \quad (6.2)$$

$$G_{LT}(t) = \frac{G_{LT}}{1 + \phi_G(t)}, \quad (6.3)$$

dove i valori del coefficiente di viscosità per deformazioni longitudinali, $\phi_E(t)$, e per deformazioni taglianti, $\phi_G(t)$, possono essere forniti dal produttore del materiale composito. In alternativa, per tali coefficienti possono essere utilizzati i valori riportati nella Tabella 6-2.

Tabella 6-2 – Coefficienti di viscosità per deformazioni longitudinali e taglianti, a differenti tempi dall'inizio del caricamento.

t (tempo da inizio caricamento)	$\phi_E(t)$	$\phi_G(t)$
1 anno	0,26	0,57
5 anni	0,42	0,98
10 anni	0,50	1,23
30 anni	0,60	1,76
50 anni	0,66	2,09

(5) Le deformazioni viscosi dipendono marcatamente dalla temperatura ambientale. Valori opportuni dei moduli di elasticità devono essere assunti con riferimento a condizioni ambientali nelle quali possano essere raggiunte temperature superiori ai 50°C.

7 APPENDICE A

7.1 APPROFONDIMENTI SUL CARICO CRITICO DI INSTABILITÀ LOCALE DI PROFILI A DOPPIO T SEMPLICEMENTE COMPRESSE

(1) Come riportato al § 4.1.2 (2), nel caso di profili con sezione trasversale a doppio T soggetti a compressione semplice (Figura 7-1), il valore di progetto della forza di compressione che determina l'instabilità locale del profilo, $N_{loc,Rd}$, può essere determinato attraverso la seguente relazione:

$$N_{loc,Rd} = A \cdot f_{loc,d}^{axial} \quad (7.1)$$

dove il valore della $f_{loc,d}^{axial}$ può essere calcolato come:

$$f_{loc,d}^{axial} = \frac{1}{\gamma_f} \cdot \min \{ (f_{loc,k}^{axial})_f, (f_{loc,k}^{axial})_w \} \quad (7.2)$$

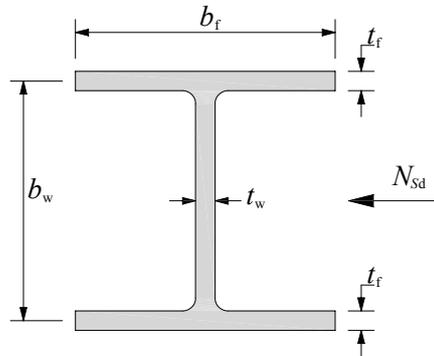


Figura 7-1 – Profilo a doppio T soggetto a compressione semplice.

Ai fini della valutazione della tensione critica $(f_{loc,k}^{axial})_f$ vengono riportate di seguito le espressioni (7.3) e (7.4) che tengono conto della rigidità del vincolo rotazionale esercitato dall'anima nei confronti delle ali stesse (Figura 7-2).

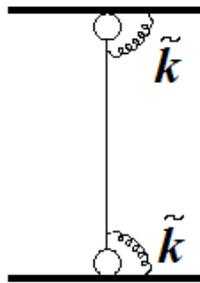


Figura 7-2 – Vincolo offerto dall'anima nei confronti delle ali, che può essere rappresentato tramite molle rotazionali di rigidità \tilde{k} .

$$(f_{loc,k}^{axial})_f = \frac{\sqrt{(D_{11})_f \cdot (D_{22})_f}}{t_f \left(\frac{b_f}{2} \right)^2} \left\{ K \cdot [15,1 \cdot \eta \cdot \sqrt{1-\rho} + 6 \cdot (1-\rho) \cdot (1-\eta)] + \frac{7 \cdot (1-K)}{\sqrt{1+4,12 \cdot \zeta}} \right\}, \text{ per } K \leq 1 \quad (7.3)$$

$$(f_{loc,k}^{axial})_f = \frac{\sqrt{(D_{11})_f \cdot (D_{22})_f}}{t_f \cdot \left(\frac{b_f}{2}\right)^2} \cdot [15,1 \cdot \eta \cdot \sqrt{1-\rho} + 6 \cdot (1-\rho) \cdot (K-\eta)], \text{ per } K > 1 \quad (7.4)$$

Le grandezze ζ , ρ , η , e K introdotte nelle (7.3) e (7.4) hanno le seguenti espressioni:

$$- \zeta = \frac{(D_{22})_f}{\tilde{k} \cdot \frac{b_f}{2}};$$

$$- \rho = \frac{(D_{12})_f}{2 \cdot (D_{66})_f + (D_{12})_f};$$

$$- \eta = \frac{1}{\sqrt{1 + (7,22 - 3,55 \cdot \rho) \cdot \zeta}};$$

$$- K = \frac{2 \cdot (D_{66})_f + (D_{12})_f}{\sqrt{(D_{11})_f \cdot (D_{22})_f}}.$$

La rigidezza rotazionale offerta dall'anima, \tilde{k} , (assumendo valori caratteristici dei moduli di elasticità) può essere valutata attraverso la relazione:

$$\tilde{k} = \frac{(D_{22})_w}{b_w} \cdot \left[1 - \frac{t_f \cdot (f_{loc,k}^{axial})_f^{SS} \cdot \frac{1}{(E_{Lc})_f \cdot t_f}}{t_w \cdot (f_{loc,k}^{axial})_w^{SS} \cdot \frac{1}{(E_{Lc})_w \cdot t_w}} \right]. \quad (7.5)$$

Nell'espressione (7.5), $(f_{loc,k}^{axial})_f^{SS}$ e $(f_{loc,k}^{axial})_w^{SS}$ rappresentano le tensioni critiche, relative rispettivamente alle ali e all'anima del profilo, corrispondenti a $\tilde{k} = 0$; esse possono essere determinate come in (4.11) e (4.12) o, in maniera equivalente, attraverso le seguenti espressioni:

$$(f_{loc,k}^{axial})_f^{SS} = \frac{12 \cdot (D_{66})_f}{t_f \cdot \left(\frac{b_f}{2}\right)^2}. \quad (7.6)$$

$$(f_{loc,k}^{axial})_w^{SS} = \frac{\pi^2}{t_w \cdot b_w^2} \cdot \left\{ 2 \cdot \sqrt{(D_{11})_w \cdot (D_{22})_w} + 2 \cdot [(D_{12})_w + 2 \cdot (D_{66})_w] \right\} \quad (7.7)$$

dove i valori delle rigidezze flessionali relative alle ali sono forniti dalle seguenti relazioni (assumendo i valori caratteristici dei moduli di elasticità):

$$D_{11} = \frac{E_{Lc} \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu_{LT} \cdot \nu_{TL})}, \quad (7.8)$$

$$D_{12} = \nu_{LT} \cdot D_{22}, \quad (7.9)$$

$$D_{22} = \frac{E_{Tc} \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu_{LT} \cdot \nu_{TL})}, \quad (7.10)$$

$$D_{66} = \frac{G_{LT} \cdot t^3}{12}. \quad (7.11)$$

Ai fini della valutazione della tensione critica $(f_{loc,k}^{axial})_w$, viene riportata di seguito l'espressione (7.12) che tiene conto della rigidezza torsionale (GI_t) del vincolo esercitato dalle ali nei confronti dell'anima del profilo.

$$(f_{loc,k}^{axial})_w = \frac{\pi^2}{t_w \cdot b_w^2} \cdot \left\{ 2 \cdot \sqrt{1 + 4,139 \xi'} \cdot \sqrt{(D_{11})_w \cdot (D_{22})_w} + (2 + 0,62 \cdot \xi'^2) \cdot [(D_{12})_w + 2 \cdot (D_{66})_w] \right\} \quad (7.12)$$

dove:

$$- \xi' = \frac{1}{1 + 10 \cdot \zeta'};$$

$$- \zeta = \frac{(D_{22})_w}{(GI_t) \cdot \frac{b_w}{2}};$$

$$- (GI_t) = 4 \cdot (D_{66})_f \cdot b_f \cdot \left[\frac{1 - (f_{loc,k}^{axial})_w^{SS} \cdot \left(\frac{1}{E_{Lc} \cdot t_w} \right)}{(f_{loc,k}^{axial})_f^{SS} \cdot \left(\frac{1}{E_{Lc} \cdot t_f} \right)} \right].$$

8 APPENDICE B

8.1 TECNICHE DI PRODUZIONE DEI PROFILI PULTRUSI DI FRP

(1) Il principale processo di produzione dei componenti strutturali di FRP è quello di pultrusione (di cui anche al documento CNR-DT 200/2004). La parola pultrusione deriva dal termine inglese *pull* (tirare) e dalla parola estrusione. Il processo di produzione è totalmente automatico e facilmente controllabile nelle sue fasi. Durante il processo è importante controllare la posizione del rinforzo nella sezione; per tale ragione fibre e tessuto, prelevati dai rispettivi rocchetti, scorrono entro apposite guide prima di essere inseriti nello stampo riscaldato dove, successivamente, viene aggiunta per iniezione la resina.

Il nucleo centrale della sezione è costituito principalmente da fibre disposte parallelamente all'asse longitudinale (*roving*), mentre l'assemblaggio della sezione è affidato alle stuoie (*mat*), con fibre multidirezionali (orientate a 0° , 90° e $\pm 45^\circ$) che avvolgono completamente il profilo. Infine, alle fibre viene impedito di affiorare attraverso un velo protettivo esterno (*surface veil*), anch'esso realizzato con fibre multidirezionali, che ha la funzione di proteggere il profilo da lesioni superficiali e di aumentare la resistenza all'attacco chimico, ai raggi UV e all'umidità.

Si comprende quindi che un profilo pultruso può presentare proprietà prossime all'isotropia solo nel piano della sezione retta (isotropia trasversale) mentre, nel suo insieme, risulta fortemente ortotropo poiché rigidità e resistenza sono affidate principalmente alle fibre lunghe, disposte nella direzione assiale.

I profili per impiego strutturale, a somiglianza di quelli metallici, sono costituiti da profilati piatti, con sezione ad L, ad U, a T, ad I, ad I con ali larghe (*wide flange*), tubolare, ecc.

9 APPENDICE C

9.1 SCHEDA TECNICA TIPO PER I PROFILI PULTRUSI DI FRP

(1) Di seguito viene proposta una scheda tecnica tipo che elenca le principali proprietà meccaniche dei profili pultrusi di FRP. Le schede tecniche dei profili attualmente disponibili in commercio possono includere anche altre informazioni o riportare solo parte di quelle appresso indicate.

La UNI EN 13706:2003 definisce due classi di profili strutturali, denominate E17 e E23, che presentano, rispettivamente, moduli flessionali efficaci pari a 17 GPa e 23 GPa.

SCHEDA TECNICA TIPO: profili pultrusi ad uso strutturale

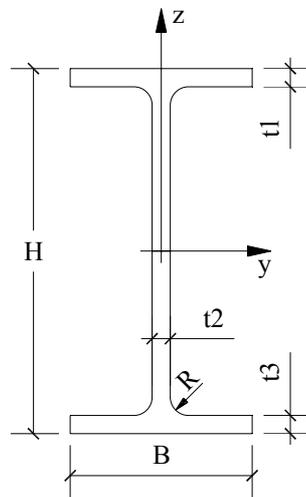
Il produttore deve riportare i dati necessari per la valutazione statistica delle proprietà meccaniche (ad esempio: media, scarto quadratico medio, numerosità dei campioni, frattile considerato, intervallo di confidenza).

Descrizione

Nome commerciale, eventuale classe EXX (§ 3.4.3(2)), tipo di fibra, tipo di resina, tecnologia di produzione, marchiatura ed ogni altra informazione generale ritenuta utile.

Esempio di caratterizzazione geometrica e fisica (Tabelle 9.1-9.4)

Tabella 9-1 - Caratteristiche geometriche.



Lunghezze dei lati (L_i)	Spessori dei lati (t_i)	Raggi di curvatura dei raccordi (R_i)	Area della sezione (A)	Aree a taglio ($A_{V,y}, A_{V,z}$)	Momenti d'inerzia (J_y, J_z)	Raggi d'inerzia (r_y, r_z)	Moduli di resistenza (W_y, W_z)	Fattore di rigidezza torsionale (J_t)	Costante di ingobbamento (J_w)	Peso per unità di lunghezza (P)
------------------------------	-----------------------------	---	----------------------------	--------------------------------------	----------------------------------	--------------------------------	-------------------------------------	---	------------------------------------	-------------------------------------

In ogni scheda devono essere indicate le tolleranze dimensionali ovvero la dichiarazione di conformità all'Annesso B della norma UNI EN 13706-2.

Per le sezioni non doppiamente simmetriche alle voci sopra tabulate possono essere utilmente aggiunte informazioni relative a: posizione del baricentro, momenti e raggi d'inerzia relativi agli assi principali, posizione del centro di taglio.

Tabella 9-2 - Caratteristiche fisiche.

Proprietà		Unità di misura	Metodo di prova Normativa di riferimento	Note
densità		g/cm ³	ISO 1183-1:2004(E) ASTM D792	
contenuto di fibra	in peso	%	ISO 11667:1997(E)	
	in volume	%		
temperatura di transizione vetrosa della resina (T _g)		°C	ISO 11357-2:1999(E) (DSC) ISO 11359-2:1999(E) (TMA) ASTM E1640 (DMA)	
conducibilità elettrica		S/m	ASTM D149	
conducibilità termica		W/(m·K)	ISO 8302 ASTM C177	

Tabella 9-3 - Proprietà meccaniche da determinarsi mediante prove sull'intero profilo.

Proprietà	Simbolo	Unità di misura	Metodo di prova Normativa di riferimento	Note
modulo di elasticità efficace a flessione	E_{eff}	GPa	UNI EN 13706-2	(1)
modulo di elasticità tangenziale efficace	G_{eff}	GPa	UNI EN 13706-2	

(1) Determinazione necessaria alla classificazione dei profili strutturali secondo la UNI EN 13706-3.

Tabella 9-4 - Proprietà meccaniche determinabili mediante prove su campioni del materiale.

Proprietà	Simbolo	Unità di misura	Metodo di prova Normativa di riferimento	Note
resistenza longitudinale a trazione	f_{Lt}	MPa	UNI EN ISO 527-4; ASTM D638	(1)
resistenza trasversale a trazione	f_{Tt}	MPa	UNI EN ISO 527-4; ASTM D638	(1)
resistenza longitudinale a compressione	f_{Lc}	MPa	UNI EN ISO 14126; ASTM D695	
resistenza trasversale a compressione	f_{Tc}	MPa	UNI EN ISO 14126; ASTM D695	
resistenza longitudinale a flessione	f_{Lf}	MPa	UNI EN ISO 14125; ASTM D790	(1)
resistenza trasversale a flessione	f_{Tf}	MPa	UNI EN ISO 14125; ASTM D790	(1)
resistenza a taglio	f_V	MPa	UNI EN ISO 14130; ASTM D2344	(1)
resistenza longitudinale al rifollamento	f_{Lr}	MPa	UNI EN 13706-2; ASTM D953	(1)
resistenza trasversale al rifollamento	f_{Tr}	MPa	UNI EN 13706-2; ASTM D953	(1)
modulo di elasticità longitudinale a trazione	E_{Lt}	GPa	UNI EN ISO 527-4; ASTM D638	(1)
modulo di elasticità trasversale a trazione	E_{Tt}	GPa	UNI EN ISO 527-4; ASTM D638	(1)
modulo di elasticità longitudinale a compressione	E_{Lc}	GPa	UNI EN ISO 14126; ASTM D695	
modulo di elasticità trasversale a compressione	E_{Tc}	GPa	UNI EN ISO 14126; ASTM D695	
modulo di elasticità tangenziale	G_{LT}	GPa	ISO 15310	
coefficiente di Poisson	ν_{LT}		UNI EN ISO 527-4; ASTM D638	
coefficiente di Poisson	ν_{TL}		UNI EN ISO 527-4; ASTM D638	

(1) Determinazione necessaria alla classificazione dei profili strutturali secondo la UNI EN 13706-3.

Condizioni di stoccaggio

Descrizione delle condizioni di stoccaggio.

Precauzioni d'uso e sicurezza

Descrizione delle precauzioni d'uso e di sicurezza.

9.2 PROVE DI QUALIFICAZIONE DEI MATERIALI

- (1) I valori delle proprietà meccaniche riportate nella Tabella 9-3 e nella Tabella 9-4 sono, in genere, determinati mediante prove di qualificazione effettuate a breve termine.
- (2)P Possono essere effettuate prove a lungo termine per analizzare l'evoluzione nel tempo delle proprietà fisiche e meccaniche.
- (3) Si possono distinguere tre tipi di comportamento nel tempo in relazione:
 - ai fenomeni di degrado chimico;
 - ai fattori ambientali (ad esempio cicli di gelo-disgelo);
 - alla modalità di applicazione del carico: costante o variabile.

L'analisi del comportamento a lungo termine del materiale sottoposto a carico costante richiede l'esecuzione di prove di *creep*. La normativa di riferimento per le prove di lungo termine sui materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica è la ISO 899-1:2003; in alternativa ci si può riferire alla ASTM D2990-01. Per il comportamento a fatica, la normativa di riferimento è la ISO 13003-2003 o la ASTM D 3479-02.

Si rimanda all'Annesso F della UNI EN 13706-2:2003 per le indicazioni sulle modalità di esecuzione delle prove per l'analisi del comportamento del materiale soggetto a fenomeni di degrado chimico o a fattori ambientali.

10 APPENDICE D

10.1 SCELTA E VERIFICA DEI PROFILI PULTRUSI DI FRP: COMPITI E RESPONSABILITÀ DEGLI OPERATORI

(1) I produttori e/o i fornitori devono dotarsi di adeguate procedure di controllo di qualità. Queste ultime devono coprire oltre che la tecnica di produzione del profilo (es. pultrusione) anche quella di tutti i suoi componenti elementari. Tutte le procedure e le disposizioni adottate dal fabbricante devono essere documentate sistematicamente ed essere a disposizione di qualsiasi soggetto od ente di controllo.

(2) I prodotti devono essere identificati mediante la descrizione, a cura del fabbricante, del materiale stesso e dei suoi componenti elementari, secondo criteri di rintracciabilità.

(3) I prodotti devono essere qualificati mediante la documentazione di attestazione che preveda prove sperimentali per misurarne le caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche, effettuate da un ente terzo indipendente, dotato di adeguata attrezzatura e di comprovata esperienza nel campo dei prodotti fibrorinforzati (vedere scheda tecnica tipo riportata in Appendice C).

(4) Il progettista:

- indica nel progetto le proprietà meccaniche del profilo di FRP;
- indica le prove, con relativa specifica tecnica, necessarie per verificare alcune delle proprietà contenute nelle schede tecniche.

(5) Le imprese appaltatrici e gli applicatori devono procurarsi i profili di FRP con le caratteristiche indicate dal progettista, dai produttori e/o fornitori che assicurino la qualità dei prodotti.

(6) Il direttore dei lavori:

- può richiedere l'esecuzione di prove sperimentali per l'accettazione delle forniture al fine di verificare, tenendo conto del numero delle prove, la rispondenza alla classe dichiarata dal produttore ovvero per integrare le indicazioni contenute nella scheda tecnica;
- può richiedere integrazioni alle prove e alla specifica tecnica prevista dal progettista.

(7) Tutte le prove che servono a definire le caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche dei materiali strutturali devono essere eseguite e certificate da laboratori ufficiali, sia per ciò che riguarda le prove di qualificazione, sia per quelle di accettazione. I laboratori ufficiali sono quelli regolati dalla Normativa vigente.

(8) Il collaudatore deve:

- verificare la qualità dei materiali impiegati sulla base della documentazione di accompagnamento delle forniture;
- verificare l'accettazione dei materiali da parte del direttore dei lavori;
- verificare i risultati delle eventuali prove sperimentali di accettazione richieste dal direttore dei lavori;
- eseguire tutti i compiti previsti dalla Normativa vigente.

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

ASCIONE Prof. Luigi	- Università di Salerno
ASCIONE Ing. Francesco	- Università "Tor Vergata" - Roma
DICUONZO Ing. Adriano	- Università di Ferrara
FEO Prof. Luciano	- Università di Salerno
GRIMALDI Prof. Antonio	- Università "Tor Vergata" - Roma
LAUDIERO Prof. Ferdinando	- Università di Ferrara
MINGHINI Ing. Fabio	- Università di Ferrara
PECCE Prof. Marisa	- Università del Sannio – Benevento
RUSSO Prof. Salvatore	- Università IUAV - Venezia
SAVOIA Prof. Marco	- Università di Bologna
TULLINI Prof. Nerio	- Università di Ferrara

Coordinatore:

GRIMALDI Prof. Antonio.

Coordinatore generale della collana di documenti sull'impiego strutturale dei materiali compositi:

ASCIONE Prof. Luigi.

Segreteria:

FEO Prof. Luciano.

Il presente Documento Tecnico è stato approvato in versione preliminare il 24/09/2007 dalla “Commissione di studio per la predisposizione e l’analisi di norme tecniche relative alle costruzioni” così composta:

ANGOTTI Prof. Franco	- Università di Firenze
ASCIONE Prof. Luigi	- Università di Salerno
BARATTA Prof. Alessandro	- Università “Federico II”- Napoli
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
VINCI Arch. Roberto	- CNR- Roma
ZANON Prof. Paolo	- Università di Trento

In data 9/10/2008, il Documento è stato approvato in versione definitiva, con le modificazioni che sono derivate dall’inchiesta pubblica, dalla “Commissione di studio per la predisposizione e l’analisi di norme tecniche relative alle costruzioni” così composta:

ANGOTTI Prof. Franco	- Università di Firenze
ASCIONE Prof. Luigi	- Università di Salerno
BARATTA Prof. Alessandro	- Università “Federico II”- Napoli
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
SOLARI Prof. Giovanni	- Università di Genova
URBANO Prof. Carlo	- Politecnico di Milano
VINCI Arch. Roberto	- CNR- Roma
ZANON Prof. Paolo	- Università di Trento