

SISTEMI DI CONTINUITA' STRUTTURALE IN FRP NELLA CARPENTERIA IN LEGNO

Giovanni Cenci¹

ABSTRACT: I sistemi in FRP oggetto del presente studio sono il naturale sviluppo di realizzazioni del secolo scorso, che qui brevemente ricordiamo. Giovanni Cenci (nato a Roma il 02.01.1940, diplomato geometra nel 1960) nel 1980 predispose un manuale di uso pratico: G. Cenci – Strutture in legno [1]. Nel 1992 progetta e calcola la struttura di copertura del Palasport di Casalecchio di Reno per conto della Holzbau S.p.A. di Bressanone (Bz).

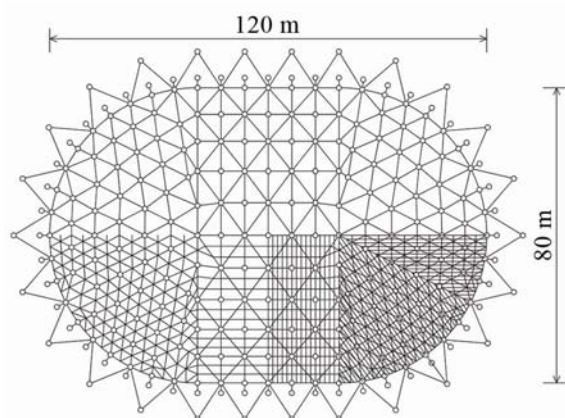


Figura 1: Pianta del palasport di Casalecchio di Reno 8.226 m² (1992-1993)

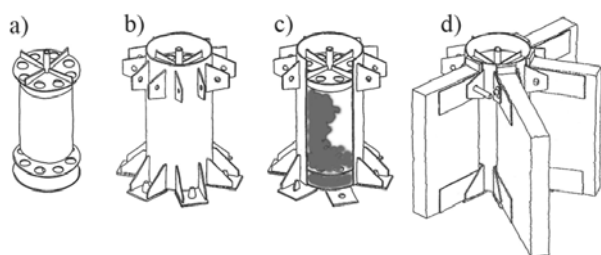


Figura 2: Il cilindro per la giunzione delle aste principali in legno lamellare del palasport di Casalecchio di Reno. I collegamenti dei nodi sono costituiti da un doppio cilindro in acciaio con interposto del calcestruzzo: a) cilindro interno; b) cilindro esterno; c) vista simultanea dei due cilindri; d) criterio di collegamento

Nell'anno 1994 sperimenta in due realizzazioni a Milano ed a Perugia dei giunti in lamiera striata, incollandoli con adesivi epossidici alle travi in legno lamellare. Seguono molte realizzazioni di giunti incollati con inserti in

lamiera o con barre in acciaio. Il controllo della resistenza è accertato con il collaudo statico dell'intera struttura.

Nel 1996 all'Università di Trento sono provati dei giunti a "mezzo legno" con barre in acciaio (figura 5), contestualmente alla costruzione di graticci grandi 500 m² per costruire l'*Aquilone di Chicco* (*European Glulam Awards, 1999*). Seguono tante applicazioni incollate in opera e nel 1998 il *legno armato* con barre in acciaio. La rassegna *Lignomec '99* di Bolzano è un'importante occasione per far conoscere le realizzazioni con i nuovi giunti. La pubblicazione [2] contenente gli atti del convegno dedica un ampio spazio (40 pagine) alla costruzione delle strutture fatte con i nuovi sistemi.

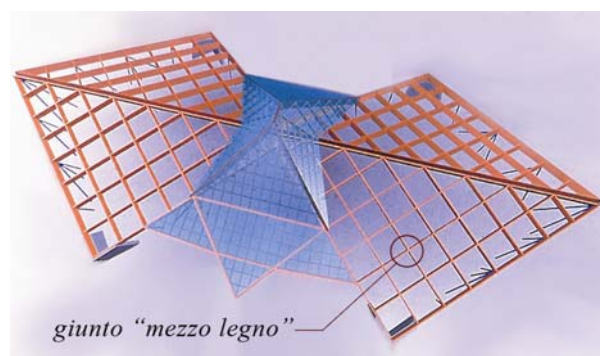


Figura 4: Rendering dell'Aquilone di Chicco a Grandate, voluto da Pietro Catelli, fondatore di Artsana S.p.A. (1996)

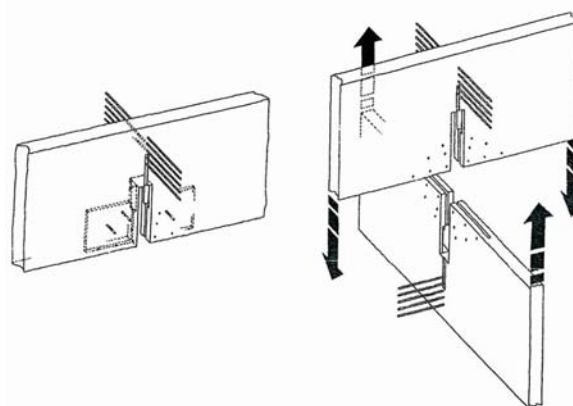


Figura 5: Giunto CNP a "mezzo legno" con barre in acciaio B.8 ed Xepox 35 per consolidare le aste principali dei graticci (grigliati) di copertura dell'Aquilone di Chicco

Questi giunti incollati con inserti in acciaio involuppati da adesivo epossidico vengono denominati sistemi CNP, acronimo dei cognomi dei signori Cenci, Nosedà e Piazza, che rispettivamente contribuiscono alla ideazione del sistema e alla messa a punto dei modelli, alla definizione delle verifiche ed alla sperimentazione in laboratorio. Da subito la Cenci Legno provvede a divulgare le prassi di calcolo e informare sulle modalità applicative e sulle realizzazioni eseguite. Il risultato è che da allora tante piccole aziende sono autonome nel gestire strutture in legno di grande gradimento e portata, perché rese capaci di conseguire la continuità di corti elementi in legno, facilmente trasportabili, all'occorrenza facendoli diventare come se fossero di un sol pezzo.

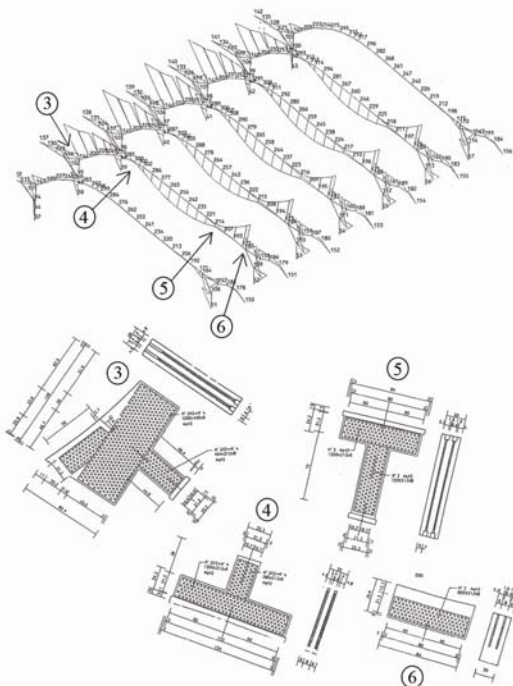


Figura 6: I giunti con inserti CNP a scomparsa in lamiera forata e adesivo Xepox 26 per la palestra sull'isola di Mazzorbo – città di Venezia (1996)

Nel 2007 Cenci e la Cenci Legno iniziano ad occuparsi di giunzioni con matrice polimerica rinforzata con fibre (FRP) per diverse riabilitazioni (capriate a Signa) ed alcuni rifacimenti, quali le pensiline del *Pontificio Oratorio di San Paolo Fuori le Mura* a Roma con le nuove mensole in legno lamellare fissate con CFRP formato in opera.

Le prime realizzazioni fanno pensare alla maggiore convenienza e facilità applicativa dei giunti in FRP rispetto a quelli in acciaio.

Verso la fine del 2008 la Cenci Legno propone i nuovi giunti di collegamento a scomparsa in GFRP, costituiti da stuoie in vetro bilanciato *Polyevery* e matrice polimerica *Xepox*, rinforzati con nastri unidirezionali in carbonio, molto utili come nel caso di giunti di travi a profilo concavo. I nuovi giunti in FRP, denominati *Giunti Italia*, possono essere piani, ma anche pluridirezionali.

È il 2009 quando il Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano inizia una campagna di prove sui *Giunti Italia*, raffrontandoli ad altri tipi incollati.

Scopo del presente saggio è quello di fornire maggiori precisazioni alla progettazione dei giunti CNP e di presentare un modello plausibile per il calcolo dei collegamenti *Giunto Italia* in FRP, facilmente adottabile dagli ingegneri del legno.

Omnia possibilia sunt credenti [3].

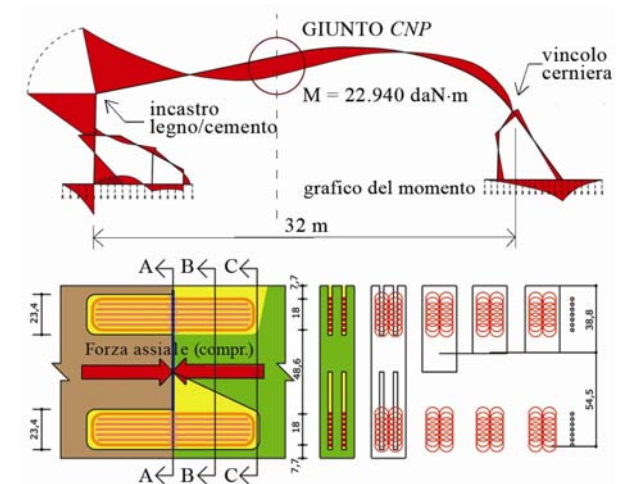


Figura 7: Il giunto bipolare a scomparsa con barre in acciaio B450C per il palazzetto di Gorla Maggiore (2000)



Figura 8: Sollevamento di una pensilina reticolare spaziale di 1.000 m² a Bregnano, costruita a terra in un sol pezzo, con aste collegate con giunti CNP (2002)

KEYWORDS: Cenci Legno, CNP, Giunto Italia, Polyevery, Xepox, CFRP, GFRP, CGFRP

¹ Giovanni Cenci, structural designer, Cenci Legno s.a.s., Piazza Volta 33, 22100 Como, Italy. Email: cenci@cenci.com

SISTEMI DI CONTINUITA' STRUTTURALE IN FRP NELLA CARPENTERIA IN LEGNO

Giovanni Cenci¹

KEYWORDS: Cenci Legno, CNP, Giunto Italia, Polyevery, Xepox, CFRP, GFRP, CGFRP

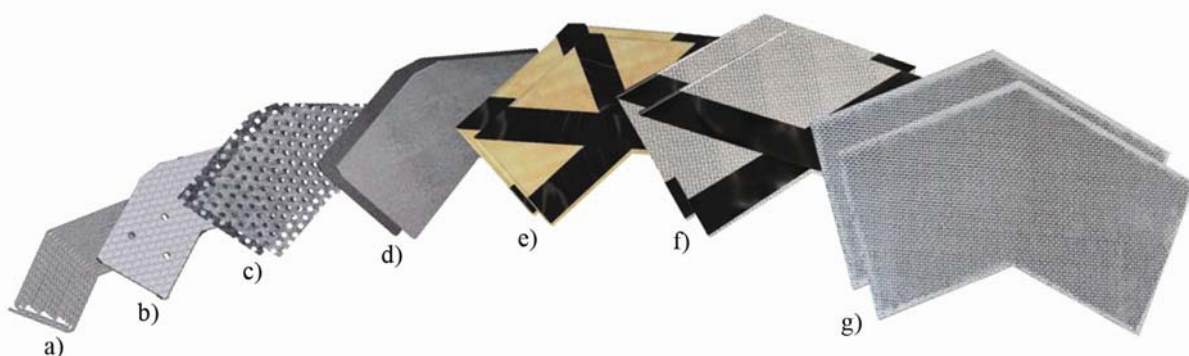


Figura 8: Lo stato dell'arte degli inserti a scomparsa per giunti incollati sino a tutto il 2008: a) tipo CNP con barre B450C; b) tipo con doppie lamiere striate; c) CNP con lamiera forata (quinconce); d) CNP con doppie piastre in acciaio sabbiate e protette con Xepox 14; e) in bamboo con le facce ricoperte da telo in vetro E incollato con Xepox14 e rinforzato con nastri con fili unidirezionali in carbonio; f) in lamine con matrice polimerica Xepox14 e strati incrociati di stuoie Polyevery G800 in vetro E; rinforzi della zona tesa con nastri in carbonio; g) in lamine formate dalla sovrapposizione di strati di stuoie bilanciate Polyevery G800 (vetro E) e Polyevery C400 (carbonio HTS con fili 800 tex, 12k) e matrice Xepox14.

1 INTRODUZIONE AL MODELLO PER IL DIMENSIONAMENTO E LA VERIFICA

Omnia possibilia sunt credenti [3].

Quale altro miglior pensiero introduttivo alle più recenti applicazioni strutturali, se non quello espresso dai professori Guagenti, Buccino, Garavaglia, Novati? Lo riportiamo: “*Qui brevemente diremo che, pur diverse tra loro, le posizioni filosofiche sono concordi nell'accordare gradi di utilità e non di verità alle teorie scientifiche, in particolare a quelle espresse in termini matematici. A rispecchiare questo fatto è oggi quasi più consueto parlare di modelli piuttosto che di teorie. Uno stesso fenomeno può utilmente venir formalizzato secondo diversi modelli matematici a seconda degli aspetti che se ne vogliono mettere in luce*” [4].

2 IL GIUNTO CNP® ANTESIGNANO DEL GIUNTO ITALIA®

Il *Giunto Italia* segna una svolta rispetto ai giunti CNP in lamiera sabbata e protetta. Certamente potenzia ulteriormente l'imprenditorialità delle carpenterie del legno e stimola la qualità progettuale dei loro ingegneri.

La prassi per il calcolo e la verifica dei giunti è sostanzialmente la stessa: a) verifica delle sezioni utili del legno; b) verifica della solidità della giunzione, nella posizione testa a testa degli elementi collegati; c) determinazione della dimensione dei bracci dell'inserto incollato; d) valutazione della resistenza torsionale delle superfici interfacciate. Tutte le quattro condizioni di calcolo saranno approfondite nella spiegazione del *Giunto Italia*. Per ora si ripropone quanto attiene la posizione testa a testa per i giunti CNP, con lo scopo di sottolineare quegli aspetti generali da cui non si può prescindere.

¹ Giovanni Cenci, structural designer, Cenci Legno s.a.s.,
 Piazza Volta 33, 22100 Como, Italy. Email: cenci@cenci.com

2.1 RICHIAMO DEL MECCANISMO DI CONNESSIONE RIGIDA TRA GLI ELEMENTI, OTTENUTA CON GIUNTI CNP

Nei giunti CNP l'incastro tra due o più travi in legno, nella posizione di contatto "testa-testa", si consegue con la resistenza degli inserti incollati e la partecipazione del legno. Per praticità, nel ragionamento generale, si fa riferimento ai giunti CNP in lamiera. L'attribuzione delle rispettive quote di partecipazione dei due elementi è definito dal rapporto di omogeneizzazione:

$$m = E_{Fe} / E_L \quad (1)$$

dove:

m coefficiente di omogeneizzazione;

E_{Fe} modulo di elasticità dell'acciaio;

E_L modulo di elasticità del legno.



Figura 9: Esempio di un giunto CNP con inserti in lamiera. Le superfici non possono essere lisce come in origine, ma portate al vivo con sabbatura di grado SA3 e subito protette con adesivo Xepox14, applicato a rullo o a pennello.

A maggior garanzia della funzionalità del sistema di contatto, sulle teste del legno viene praticato un leggero

ribasso come nelle figure 10 e 11. Lo spazio è occupato da un "cuscinetto" di adesivo Xepox, meglio se armato con tondini in acciaio B450C o strisce in composito. L'adesivo è percolato dall'alto, occupa tutti i vuoti anche se minuscoli e si insinua negli imbocchi dei lumi.

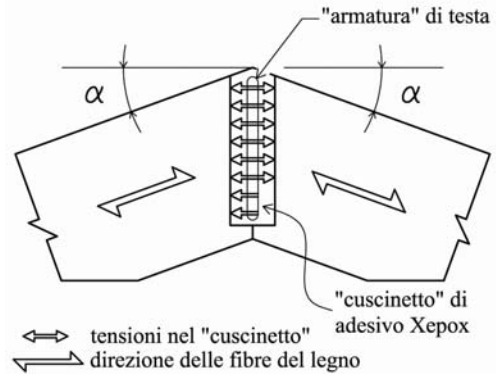


Figura 10: Schematizzazione angolo α adottato

Nella giunzione di aste che formano un angolo tra loro (figura 10), la tensione di compressione del legno è condizionata dalla formula di Hankinson:

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (2)$$

where:

$\sigma_{c,\alpha,d}$ tensione di calcolo a compressione inclinata dell'angolo α rispetto alla fibratura;

$f_{c,0,d}$ resistenza di calcolo a compressione parallela alle fibre;

$f_{c,90,d}$ resistenza di calcolo a compressione perpendicolare alle fibre;

α angolo forza-fibre che tiene conto della presenza di un "cuscinetto" di adesivo tra le teste del legno.

Nella sezione B-B viene fatta la verifica a flessione ed a taglio della continuità progettata tra le aste.

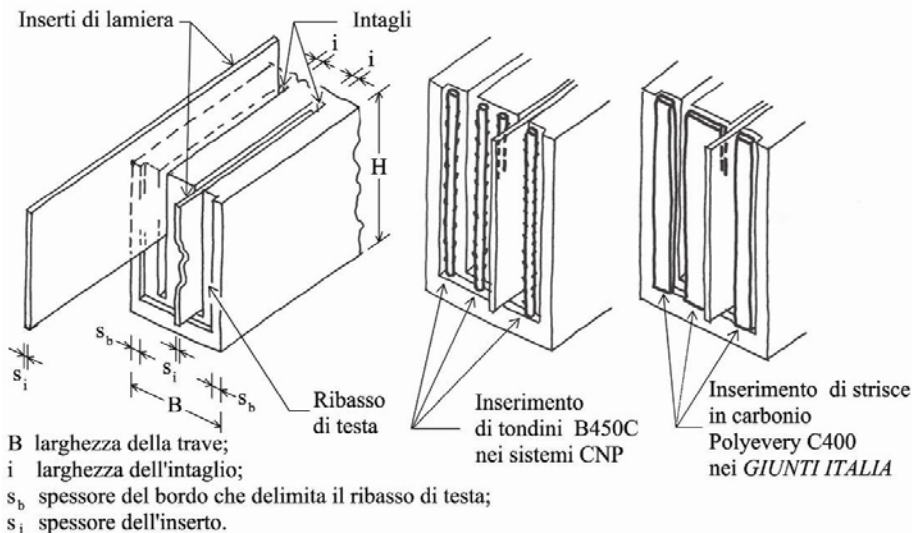


Figura 11: Larghezza utile e spessore del ribasso di testa degli elementi da giuntare

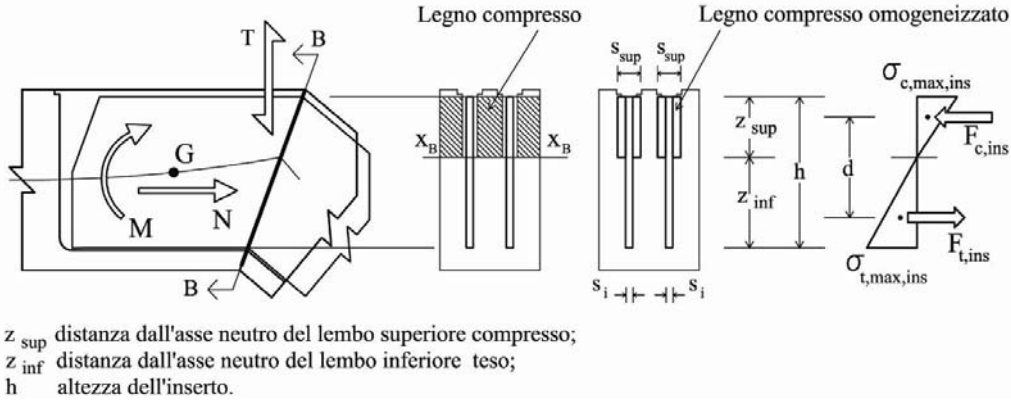


Figura 12: Giunto CNP. Sezione e grafico delle tensioni nella posizione testa contro testa (B-B)

Si definisce la partecipazione dei materiali (figura 12) nella sezione sostitutiva idealizzata, utilizzando le seguenti equazioni:

$$B_{id} = B - \sum (s_b + s_i) \quad (3)$$

$$p_1 = (B_{id} / m) / [(B_{id} / m) + \sum s_i] \quad (4)$$

$$p_2 = \sum s_i / [(B_{id} / m) + \sum s_i] \quad (5)$$

dove:

B_{id} larghezza ideale della trave;

p_1 partecipazione del legno alla compressione;

p_2 partecipazione dell'inserto alla compressione.

La posizione dell'asse neutro nella sezione sostitutiva è definita dall'equazione d'equilibrio:

$$\begin{cases} z_{sup} + z_{inf} = h \\ z_{inf} = \frac{(B_{id} / m) \cdot z_{sup} \cdot (h - z_{sup} / 2) + \sum s_i \cdot h^2 / 2}{(B_{id} / m) \cdot z_{sup} + \sum s_i \cdot h} \end{cases} \quad (6)$$

Dalla prima equazione si ottiene

$$z_{inf} = h - z_{sup} \quad (7)$$

che va applicato nella seconda equazione (6).

Conseguentemente si ricava l'equazione di secondo grado:

$$(-B_{id} / m) \cdot z_{sup}^2 - 2 \cdot \sum s_i \cdot h \cdot z_{sup} + \sum s_i \cdot h^2 = 0 \quad (8)$$

Il discriminante Δ dell'equazione (8) è

$$\Delta = 4 \cdot \sum s_i \cdot h^2 [\sum s_i + (B_{id} / m)]; \text{ con } \Delta > 0;$$

Il valore z_{sup} è una delle radici reali dell'equazione (8):

$$z_{sup} = h \cdot \left[\sum s_i - \sqrt{\sum s_i^2 + [(B_{id} / m) \cdot \sum s_i]} \right] / (-B_{id} / m) \quad (9)$$

Applicando la formula (9) alla (7), si ricava la posizione dell'asse neutro.

Stante la nota formula

$$\sigma_M = M / W_X \quad (10)$$

dove:

σ_M tensione di compressione o di trazione;

M momento flettente effettivo massimo;

W_X modulo di resistenza; $W_X = J_X / z$.

Le sollecitazioni nella sezione B-B sono fornite dalle seguenti relazioni:

$$\sigma_{c,max,L} = M \cdot p_1 / W_{sup} \quad (11)$$

$$\sigma_{c,max,ins} = M \cdot p_2 / W_{sup} \quad (12)$$

$$\sigma_{t,max,ins} = M / W_{inf} \quad (13)$$

ove:

$\sigma_{c,L,max}$ tensione di compressione massima nel legno;

$\sigma_{c,ins,max}$ tensione di compressione massima nell'inserto;

$\sigma_{t,ins,max}$ tensione di trazione massima nell'inserto;

W_{sup} , W_{inf} moduli di resistenza della zona compressa e della zona tesa, calcolati con le seguenti relazioni:

$$W_{sup} = J_X / z_{sup}; \quad W_{inf} = J_X / z_{inf}.$$

La continuità tra le aste è garantita quando

$$\sigma_{c,max,L} \leq \sigma_{c,\alpha,d}$$

$$\sigma_{c,max,ins} \leq f_{y,d}$$

$$\sigma_{t,max,ins} \leq f_{y,d}$$

La verifica a taglio viene eseguita sull'area della sezione dei soli inserti. A favore di sicurezza neppure si considera la resistenza dell'adesivo Xepox che ha saturato i ribassi di testa del legno e si è insinuato all'imbocco dei lumi.

$$\tau_{max\perp} = \frac{T \cdot 1,5}{A_{Fe}} \quad (14)$$

$\tau_{\perp,max}$ tensione di taglio;

T azione di taglio;

A_{Fe} area dell'inserto in acciaio.

Deve risultare:

$$\tau_{\perp,max} \leq f_{y,d} / \sqrt{3}$$

in cui:

$f_{y,d}$ valore di resistenza di progetto a taglio dell'acciaio e si calcola riferendosi alla [5].

Anche per il Giunto Italia sono considerati ampi fattori di sicurezza e le verifiche sono impostate sulle resistenze dei materiali. L'asse neutro è sostituito da un asse

discriminante tra la zona compressa e quella tesa, che non tiene conto del rapporto tra i moduli elastici, ma solo delle resistenze.

E' come se la (6) fosse stata più semplicemente scritta:

$$\begin{cases} z_{sup} + z_{inf} = h \\ z_{sup} [(B_{id} / m) + \sum S_i] - z_{inf} \cdot \sum S_i = 0 \end{cases} \quad (15)$$

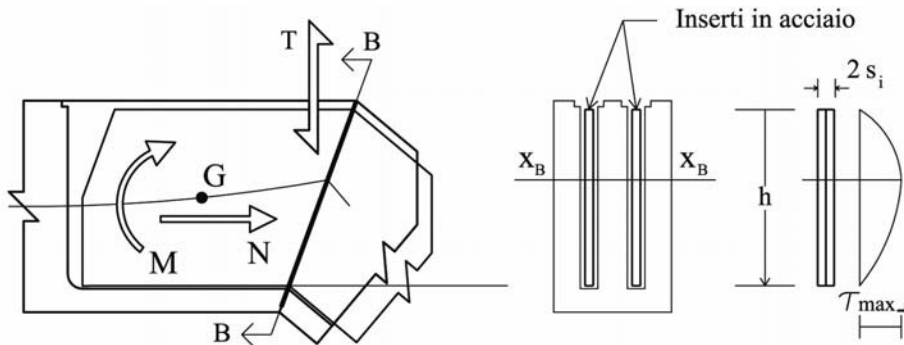


Figura 13: Grafico del taglio per l'inserto: la resistenza all'azione tagliante è affidata ai soli inserti

3 GIUNTO ITALIA® CONCETTO INTRODUTTIVO

In sintesi si può dire che il legno lamellare è l'aggregazione indissolubile tra loro di tavole di legno, depurate dai propri difetti. L'unione delle tavole si ottiene con l'incollaggio tra loro delle estremità di testa e delle superfici sovrapposte. Le giunzioni di testa delle tavole di uno strato devono essere distanti da quelle degli strati attigui. La tecnica consente di ottenere il completo ripristino della funzionalità prestazionale delle fibre in ogni elemento composto.



Figura 14: Esempio di un Giunto Italia con inserti in FRP.

Il Giunto Italia è un elemento costruttivo, ma anche un sistema, che si avvale di lamine in FRP (Fiber Reinforced Polymer) con lo scopo di formare degli inserti di natura fibrosa artificiale. Tra i motivi essenziali, quello di ottenere una più naturale continuità strutturale tra le aste in legno che confluiscono in una comune posizione di giunzione. I laminati dei Giunti Italia sono prodotti con stuoie bilanciate Polyevery® in filati di

vetro E o di carbonio. Le stuoie sono assemblate sovrapponendole alternatamente con orientamento 0°,90°; ±45°, 0°,90°, ecc. (figura 15). L'applicazione della matrice polimerica epossidica Xepox 14 è contestuale alla sovrapposizione delle stuoie. Il laminato Polyevery è un composto bilanciato assimilabile ad un materiale isotropo. Durante la produzione di un Giunto Italia, tra le stuoie sono inseriti dei nastri unidirezionali in carbonio. La finalità dei nastri è di rinforzare le posizioni del giunto maggiormente impegnate a trazione.

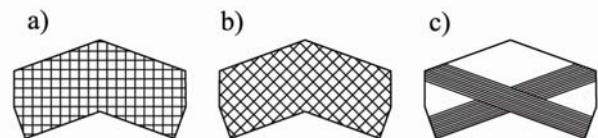


Figura 15: a) stuoia con orientamento dei fili 0,90°; b) stuoia con orientamento dei fili ±45°; c) nastri unidirezionali in carbonio.

Le osservazioni sulle prove e sulle realizzazioni effettuate rafforzano la convinzione che i materiali costituenti un Giunto Italia opportunamente dimensionato siano compartecipativi in tutte le direzioni e di perfetta aderenza al legno. Ne consegue il mantenimento piano delle sezioni e l'assenza di deformazioni significative delle superfici di interfacciamento sino alla rottura per cedimento del legno, quindi ben oltre il doppio della resistenza offerta dal legno al carico stimato allo SLU (Stato Limite Ultimo).

Per tali motivi il sistema Giunto Italia è progettabile con i criteri di resistenza dei materiali entro il proprio campo elastico. Il notevole coefficiente di sicurezza garantisce la sua affidabilità.

L'utilizzo delle stuoie Polyevery con fili di vetro E, oppure con fili 12k di carbonio HTS permette la formazione di:

- Giunti Italia GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer);
- Giunti Italia CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer);

- *Giunti Italia CGFRP* (Carbon-Glass Fiber Reinforced Polymer).

4 STUOIE POLYEVEVERY®

Le stuoie bilanciate impregnate utilizzano la stessa quantità di fili di uguale sezione in entrambe le direzioni principali dell'ordito e della trama (figura 16). Sono ottenute dalla tessitura di fili 2400 tex in vetro E, oppure di fili 800 tex in carbonio HTS. Il ciclo di produzione si conclude con l'impregnazione del tessuto con un preparato *Xepox Finish*, che penetra tra i filamenti.

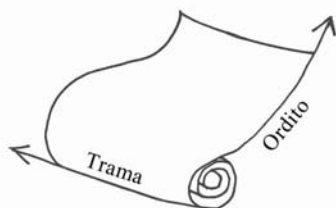


Figura 16: Direzione ordito (fili longitudinali) e trama (fili trasversali)

4.1 STUOIE POLYEVEVERY G800 IN VETRO E

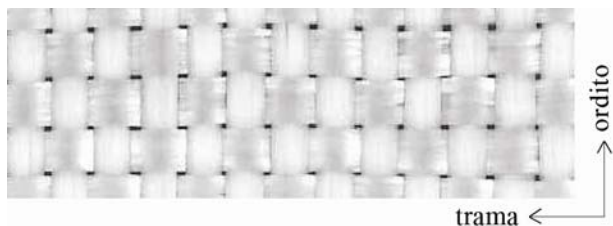


Figura 17: Stuoia bilanciata Polyeverly G800 in vetro E

Le stuoie Polyeverly G800 in vetro E sono prodotte in teli della larghezza di 2,50 metri. Comunemente sono commercializzate nella larghezza di 1,25 metri. Pesano a secco circa 800 g/m² ed hanno 1,7 fili/cm nella direzione dell'ordito e 1,6 fili/cm nella direzione della trama. La media considerata è di 1,65 fili 2400 tex per centimetro in ogni direzione. Lo spessore della stuoia è di 0,8 mm.

4.2 STUOIE POLYEVEVERY C400 IN CARBONIO HTS 12k

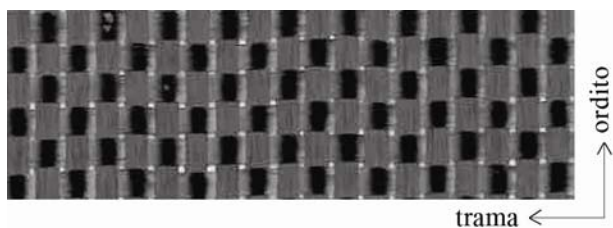


Figura 18: Stuoia bilanciata Polyeverly C400 con fili 12k, 800 tex, in carbonio HTS

Le stuoie Polyeverly C400 in carbonio HTS 12k sono prodotte in teli della larghezza di 1,00 metri, pesano a

secco circa 400 g/m² ed hanno 2,5 fili 800 tex per centimetro in entrambe le direzioni (ordito e trama). Lo spessore della stuoia è di 0,8 mm.

4.3 NASTRI DI RINFORZO IN CARBONIO HTS

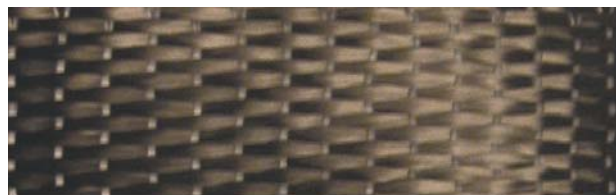


Figura 19: Nastro in carbonio HTS 12k

I nastri per il rinforzo sono formati da fili unidirezionali 800 tex di carbonio HTS in ragione di 520 fili 12k per metro trasversale. Il peso nominale è di 416 g/m². I nastri sono disponibili in qualsiasi larghezza desiderata, la più usuale è 10 cm.

5 VALORI DI PROGETTO DEL COMPOSITO

Le istruzioni italiane CNR-DT 200/2004 [6] indicano come determinare i valori di progetto delle caratteristiche meccaniche dei rinforzi in FRP realizzati *in situ*. Trattasi di indicazioni che attengono ad interventi di consolidamento statico, che adottiamo anche per i *Giunti Italia* preposti a realizzare la continuità statica delle travi.

Le relazioni che seguono si applicano rispettivamente agli SLE (Stati Limite di Esercizio) ed agli SLU (Stati Limite Ultimi):

$$A_f \cdot E_f = \alpha_{fE} \cdot A_{fib} \cdot E_{fib} \quad (16)$$

$$A_f \cdot f_f = \alpha_{ff} \cdot A_{fib} \cdot f_{fib} \quad (17)$$

Nell'ordine, i simboli rappresentano:

- A_f area del composito FRP;
- E_f modulo di elasticità del composito FRP;
- f_f resistenza a trazione del composito FRP;
- A_{fib} area delle fibre;
- E_{fib} modulo di elasticità normale delle fibre nude;
- f_{fib} resistenza a trazione delle fibre;
- α_{fE} coeff. di penalizzazione della rigidità del tessuto;
- α_{ff} coeff. di penalizzazione della resistenza del tessuto.

A vantaggio della sicurezza, l'area del composito è assimilata a quella del solo tessuto "secco" [7]. Inoltre si applicano i coefficienti riduttivi α_{fE} ed α_{ff} proposti dai maggiori produttori.

Tabella 1: Coefficienti riduttivi proposti dai produttori

α_{fE} (SLE) coefficiente riduttivo della rigidità	0,90
α_{ff} (SLU) coefficiente riduttivo della resistenza	0,70

Pertanto:

$$E_f = \alpha_{fE} \cdot E_{fib}; \quad E_f = 0,9 \cdot E_{fib} \quad (18)$$

$$f_f = \alpha_{ff} \cdot f_{fib}; \quad f_f = 0,70 \cdot f_{fib} \quad (19)$$

Nella pratica, per le verifiche agli SLU, si definisce la resistenza di progetto dei materiali FRP applicando un globale coefficiente $K_{globale}$ che è il prodotto dei valori identificativi della sicurezza. Il coefficiente $K_{globale}$ include il coefficiente riduttivo α_{ff} (tabella 1), il fattore di conversione η_a (tabella 2) ed i coefficienti parziali γ_m e γ_{Rd} (tabelle 4 e 5). Tali valori identificativi sono quelli indicati nel DT 200/2004 e riportati nelle tabelle che seguono. Il fattore di conversione η_l attiene alle verifiche agli SLE.

$$K_{SLU, globale} = \frac{\alpha_{ff} \cdot \eta_a}{\gamma_m \cdot \gamma_{Rd}} \quad (20)$$

Tabella 2: Fattori di conversione ambientale per varie condizioni di esposizione e vari sistemi di FRP

Condizione di esposizione	Tipo di fibra/resina	η_a
Interna	Vetro / Epossidica	0,75
	Arammidica/Epossidica	0,85
	Carbonio / Epossidica	0,95
Esterna	Vetro / Epossidica	0,65
	Arammidica/Epossidica	0,75
	Carbonio / Epossidica	0,85
Ambiente aggressivo	Vetro / Epossidica	0,50
	Arammidica/Epossidica	0,70
	Carbonio / Epossidica	0,85

Tabella 3: Fattori di conversione per effetti di lunga durata per vari sistemi FRP (SLE)

Modalità di carico	Tipo di fibra/resina	η_l
Persistente	Vetro / Epossidica	0,30
	Arammidica/Epossidica	0,50
	Carbonio / Epossidica	0,80
Ciclico	tutte	0,50

Tabella 4: Coefficienti parziali per i materiali ed i prodotti

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

Tabella 5: Coefficienti parziali per la resistenza

Modello di resistenza	γ_{Rd}
Flessione/Pressoflessione	1,00
Taglio/Torsione	1,20
Confinamento	1,10

Di seguito, si formulano i criteri generali di valutazione dei laminati costituiti da stuoie Polyevery e nastri in carbonio.

5.1 LAMINATO POLYEVEVERY G800 (VETRO E)

Esempio della valutazione agli SLU di un *Giunto Italia* con stuoie Polyevery G800 (spessore, $s = 0,8$ mm), predisposto *in situ* (tipo B) per essere applicato internamente. Deve soddisfare le resistenze a rottura ed a taglio.

Tabella 6: Valori identificativi della sicurezza della stuoia PolyeveryG800

$p_G = 38\%$	$p_m = 62\%$	$p_{fibG} = 19\%$
$f_{fibG} = 3.500$ MPa	$E_{fibG} = 74.000$ MPa	
$\alpha_{ff} = 0,70$	$\eta_a = 0,75$	
$\gamma_m = \gamma_f = 1,25$	$\gamma_{Rd} = 1,20$	

dove:

- p_G percentuale complessiva ordito e trama;
- p_m percentuale della matrice polimerica Xepox;
- p_{fibG} percentuale della fibra considerata;
- f_{fibG} resistenza a trazione del filato di vetro E;
- E_{fibG} modulo di elasticità del filato di vetro E.

Applicando la formula (20)

$$K_{SLU(G800)} = \frac{0,7 \cdot 0,75}{1,25 \cdot 1,20} = 0,35$$

ed essendo:

$$f_{G800,d} = K_{SLU(G800)} \cdot (s \cdot p_{fibG}) \cdot f_{fibG} \quad (21)$$

per ciascuna stuoia Polyevery G800 applicata, risulta per ogni centimetro trasversale:

$$f_{G800,d} = 0,35 \cdot (0,8 \cdot 0,19) \cdot 3.500 = 186,2 \text{ N/mm} = 1,8 \text{ kN/cm}$$

in cui:

$f_{G800,d}$ resistenza unitaria di progetto assegnata ad una stuoia Polyevery G800, perché facente parte del laminato considerato isotropo.

Per lo stesso progetto, la verifica agli SLE comporta l'applicazione della seguente formula:

$$E_{fG} = \alpha_{fE} \cdot E_{fibG} \cdot p_{fibG} \quad (22)$$

$$E_{fG} = 0,9 \cdot 74.000 \cdot 0,19 = 12.600 \text{ MPa}$$

5.2 LAMINATO POLYEVEERY C400 (FILII DI CARBONIO HTS 12k, 800 tex)

Esempio della valutazione agli SLU di un *Giunto Italia* con stuoie Polyevery C400 (spessore, $s = 0,8$ mm) con le stesse condizioni di progetto richieste al punto 5.1.

Tabella 7: Valori identificativi della sicurezza della stuoia PolyeveryC400

$p_C = 28\%$	$p_m = 72\%$	$p_{fib C} = 14\%$
$f_{fib C} = 4.300$ MPa	$E_{fib C} = 240.000$ MPa	
$\alpha_{ff} = 0,70$	$\eta_a = 0,95$	
$\gamma_m = \gamma_f = 1,25$	$\gamma_{Rd} = 1,20$	

dove:

- p_C percentuale complessiva ordito e trama;
- p_m percentuale della matrice polimerica Xepox;
- $p_{fib C}$ percentuale della fibra considerata;
- $f_{fib C}$ resistenza a trazione del filato di carbonio;
- $E_{fib C}$ modulo di elasticità del filato di carbonio.

Applicando la formula (20)

$$K_{SLU(C400)} = \frac{0,7 \cdot 0,95}{1,25 \cdot 1,20} = 0,44$$

ed essendo:

$$f_{C400,d} = K_{SLU(C400)} \cdot (s \cdot p_{fib C}) \cdot f_{fib C} \quad (23)$$

per ciascuna stuoia Polyevery C400 applicata, risulta per ogni centimetro trasversale:

$$\begin{aligned} f_{C400,d} &= 0,44 \cdot (0,8 \cdot 0,14) \cdot 4.300 = \\ &= 213,2 \text{ N/mm} = 2,1 \text{ kN/cm} \end{aligned}$$

in cui:

$f_{C400,d}$ resistenza unitaria di progetto assegnata ad una stuoia Polyevery C400, perché facente parte del laminato considerato isotropo.

Per lo stesso progetto, la verifica agli SLE comporta l'applicazione della seguente formula:

$$E_{fC} = \alpha_{fE} \cdot E_{fib C} \cdot p_{fib C} \quad (24)$$

$$E_{fC} = 0,9 \cdot 240.000 \cdot 0,14 = 30.200 \text{ MPa}$$

5.3 NASTRI DI CARBONIO HTS 12k, 800 tex, 5,2 FILI/cm

Esempio di come considerare il nastro di rinforzo di carbonio della larghezza di 10 cm, inserito tra le stuoie, nella progettazione di un *Giunto Italia* agli SLU. La condizione generale è quella dei due esempi che precedono.

Tabella 8: Caratteristiche del nastro di carbonio HTS (10 cm)

$n_{fil} = 12k$	$\varnothing = 7 \mu\text{m}$	$D_{lin} = 800 \text{ tex}$
$D_{fil} = 1,77 \text{ g/cm}^3$	$n_{yarn} = 52$	$A_{nastro} = 240 \text{ mm}^2$

Tabella 9: Valori identificativi della sicurezza del nastro di carbonio HTS

$f_{fibHTS} = 4.300$ MPa	$E_{fibHTS} = 240.000$ MPa
$\alpha_{ff} = 0,70$	$\eta_a = 0,95$
$\gamma_m = \gamma_f = 1,25$	$\gamma_{Rd} = 1,20$

dove:

- 12k equivale a 12.000 filamenti per ciascun filo;
- 800 tex equivale a 800 grammi a chilometro;
- n_{fil} numero dei filamenti;
- D_{fil} densità dei filamenti;
- \varnothing diametro dei filamenti;
- D_{lin} densità lineare del filo 12k;
- n_{yarn} numero dei fili per 10 centimetri trasversali;
- A_{nastro} area dei fili nel nastro;
- f_{fibHTS} resistenza a trazione del filato di carbonio;
- E_{fibHTS} modulo di elasticità del filato di carbonio.

Si determina l'area dei fili del nastro:

$$A_{nastro} = n_{yarn} \cdot n_{fil} \cdot \left[(0,5 \cdot \varnothing)^2 \cdot \pi \right] \quad (25)$$

Il nastro di carbonio della larghezza di 10 cm ha la seguente area:

$$A_{nastro} = 52 \cdot 12.000 \cdot \left[(0,5 \cdot 7 \mu\text{m})^2 \cdot \pi \right] = 24 \text{ mm}^2$$

Applicando la formula (20)

$$K_{SLU(HTS)} = \frac{0,7 \cdot 0,95}{1,25 \cdot 1,20} = 0,44$$

ed essendo:

$$f_{HTS,d} = K_{SLU(HTS)} \cdot A_{nastro} \cdot f_{fibHTS} \quad (26)$$

per ogni centimetro di larghezza del nastro di carbonio (5,2 fili 12k per centimetro), risulta:

$$\begin{aligned} f_{HTS,d} &= 0,44 \cdot 2,4 \cdot 4.300 = \\ &= 4.541 \text{ N/mm} = 4,5 \text{ kN/cm} \end{aligned}$$

in cui $f_{HTS,d}$ è la resistenza unitaria di progetto assegnata al nastro di carbonio inserito tra le stuoie, nell'unica direzione compatibile.

Per lo stesso progetto, la verifica agli SLE ipotizza che il volume della matrice sia equivalente a quella della fibra. Esemplicativamente si applica la seguente formula:

$$E_{fHTS} = 0,5 \cdot \alpha_{fE} \cdot E_{fibHTS} \quad (27)$$

$$E_{fHTS} = 0,5 \cdot 0,9 \cdot 240.000 = 108.000 \text{ MPa}$$

L'applicazione dei nastri di rinforzo in carbonio è influenzata dalla forma del giunto (figura 20). Il criterio di valutazione è sempre a favore di sicurezza.

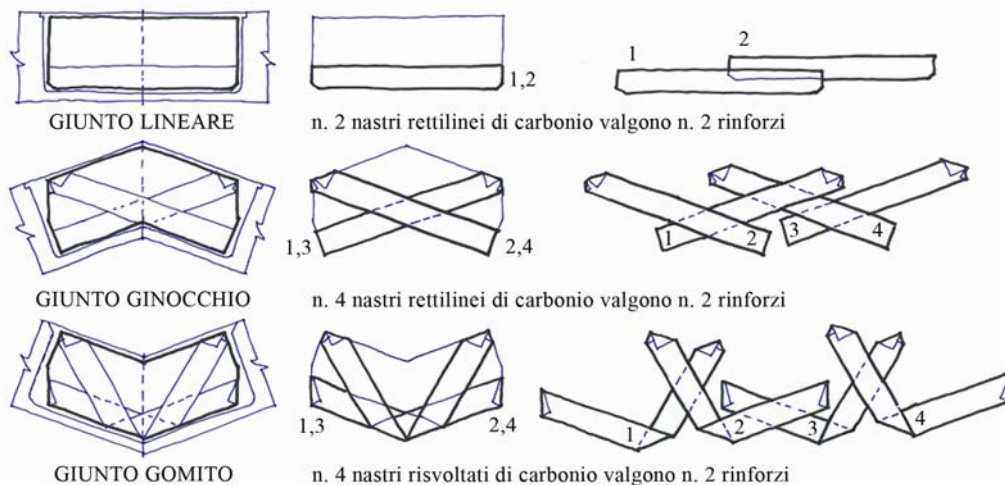


Figura 20: Esempi applicativi dei nastri in carbonio HTS12k

6 GIUNTO ITALIA® CON STUOIE G800: ESEMPIO DI VERIFICA

Analogamente ai giunti *CNP* con le lamiere sabbiato, i *Giunti Italia* possono essere costituiti da un unico inserto o da più inserti e, con riferimento alla figura 21, sono applicabili a travi rettilinee (a), travi a gomito (b), travi a ginocchio (c) ed anche a sistemi spaziali a tre vie (d) o plurivie (e).

La trave in figura 22 è composta da due elementi in legno, tra loro rigidamente connessi per farli diventare di un sol pezzo. Il carico esterno attiva le azioni interne nella trave, sollecitandola a flessione ed a taglio.

Il sistema costitutivo del giunto è formato dagli intagli

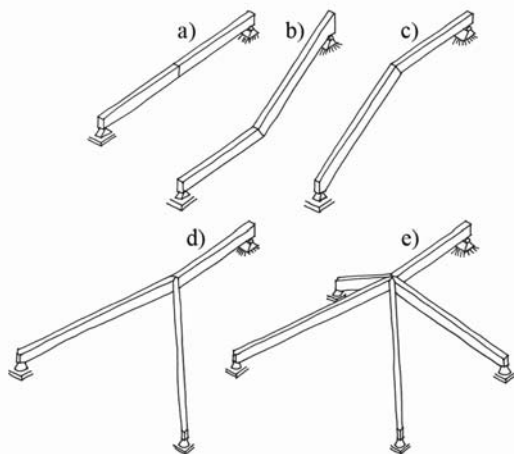


Figura 21: Tipologia di travi con giunto rigido

nel legno nella direzione delle fibre, dagli inserti e dall'adesivo che si interpone tra le superfici. Compito dell'inserto è di rendere continua la resistenza tra le parti di travi che precedentemente erano separate. La continuità della resistenza è conseguita con l'indissolubile innesto dei bracci dell'inserto negli elementi in legno. L'efficacia della resistenza della connessione deve essere contestuale e vicendevole. Con l'incollaggio diffuso delle superfici dell'inserto nel legno si ottiene la resistenza richiesta.

Le particelle incollate resistono in proporzione ai quadrati delle loro distanze dall'intersezione degli assi principali che competono all'intera superficie interfacciata. Conseguentemente la verifica a flessione e taglio deve essere estesa anche alla resistenza torsionale delle superfici incollate.

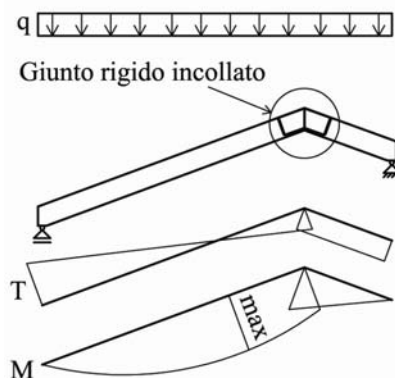


Figura 22: Schema statico e generico delle forze (T, M) in una trave a ginocchio

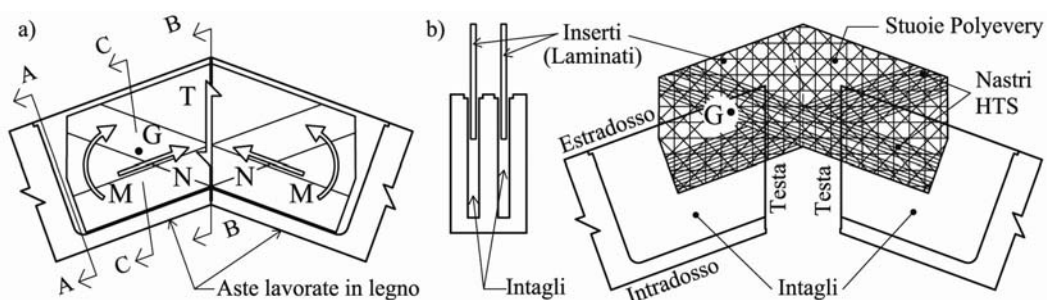


Figura 23: a) posizioni A-A, B-B, C-C di verifica; b) parti componenti del Giunto Italia in una trave a ginocchio

Nell'esempio che segue si affronta il caso di una trave a ginocchio con un giunto a doppio inserto.

Fatto riferimento alla figura 23, le verifiche essenziali per soddisfare la sicurezza della connessione sono:

- pos. A-A sezione della trave al netto degli intagli;
- pos. B-B sezione in corrispondenza del contatto "testa-testa" degli elementi;
- pos. C-C interfacciamento dei bracci dell'inserto.

6.1 SEZIONE DEL LEGNO AL NETTO DEGLI INTAGLI (A-A)

Si considera la sezione utile del legno al netto degli intagli, immediatamente prima della partecipazione degli inserti.

Valgono le classiche verifiche:

$$\pm F_{c,t} = M / d ; \quad \sigma_{c,t} = M / W_x \quad (28 \text{ a,b})$$

$$\sigma_{c,t} = 2 \cdot F_{c,t} / (B_{utile} \cdot 0,5H) \quad (29)$$

dove:

- $F_{c,t}$ forza compressione o trazione;
- M momento flettente massimo;
- d distanza di equilibrio delle tensioni interne;
- H altezza della trave;
- B_{utile} larghezza utile;
- W_x modulo di resistenza;
- $\sigma_{c,t}$ tensione unitaria di progetto a compressione o a trazione;

$$B_{utile} = B - \sum i \quad (30)$$

$$W_x = (B_{utile} \cdot H^2) / 6 \quad (31)$$

e in cui:

i spessore dell'intaglio.

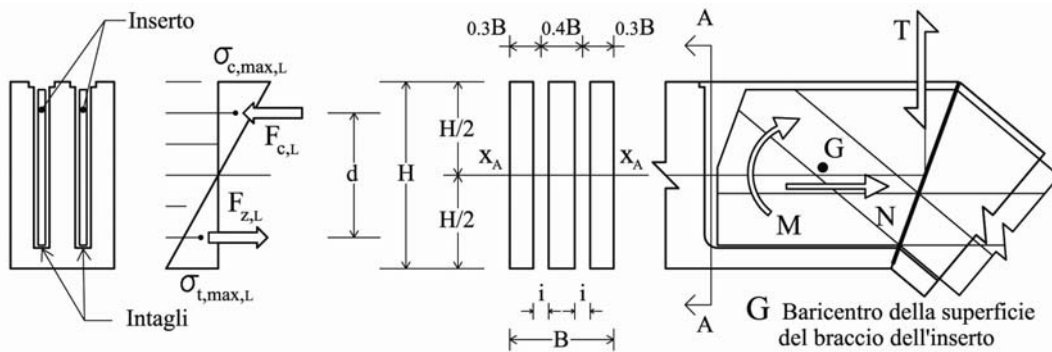


Figura 24: Sezione e schematizzazione delle tensioni nella trave intagliata (pos. A-A)

Nel caso di contestualità di una forza assiale N (figura 25), sarà:

$$\sigma_{c,eff} = \frac{N_c \cdot \omega}{A_{utile}} \pm \frac{M}{W_x} \cdot \frac{f_{c,0,d}}{f_{m,d}} < f_{c,0,d} \quad (32)$$

$$\sigma_{t,eff} = \frac{N_t}{A_{utile}} \pm \frac{M}{W_x} \cdot \frac{f_{t,0,d}}{f_{m,d}} < f_{t,0,d} \quad (33)$$

- A_{utile} area della sezione utile;
- M momento flettente massimo;
- W_x modulo di resistenza
- $f_{c,0,d}$ resistenza di calcolo a compressione parallela alle fibre;
- $f_{t,0,d}$ resistenza di calcolo a trazione parallela alle fibre;
- $f_{m,d}$ resistenza di calcolo a flessione;

$$A_{utile} = B_{utile} \cdot H \quad (34)$$

in cui:

- $\sigma_{c,eff}$ tensione effettiva a compressione;
- $\sigma_{t,eff}$ tensione effettiva a trazione;
- $N_{c,t}$ forza assiale;
- ω coefficiente di amplificazione del carico;

Nella sezione al netto degli intagli deve risultare:

$$\sigma_{c,max,L} \leq \sigma_{c,\alpha,L}$$

$$\sigma_{t,max,L} \leq f_{t,0,d}$$

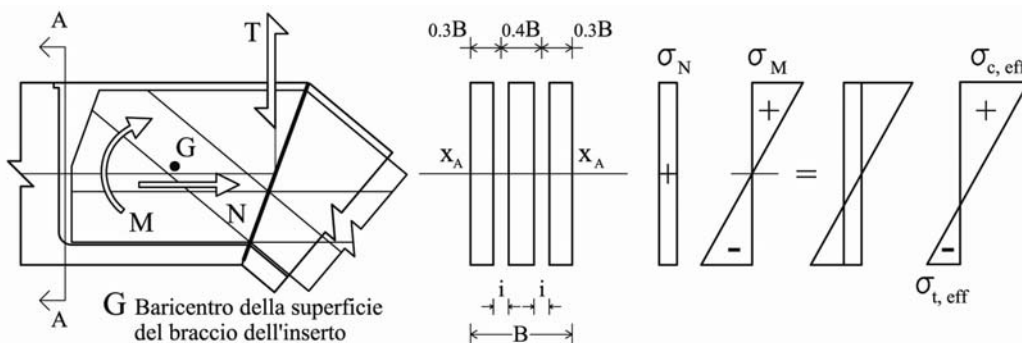


Figura 25: Disegno e diagramma delle tensioni di pressoflessione nella trave (pos. A-A)

6.2 GIUNZIONE IN TESTA AGLI ELEMENTI CONNESSI (B-B)

L'incastro nella posizione "testa-testa" tra gli elementi in legno si consegue con la resistenza offerta dall'inserto. Alla resistenza partecipa il contatto legno-legno in zona compressa.

Si utilizzano i valori di resistenza unitaria definiti per i materiali fibrosi indicati al paragrafo 5. Nel caso di aste diversamente orientate tra loro, il contributo del legno viene ridotto in ragione dell'angolo tra la forza e le fibre (figura 10), applicando la nota formula di Hankinson (2). La partecipazione dei materiali è correlata alla loro resistenza sin tanto che restino in equilibrio, vale a dire sino al cedimento del sistema. Il *Giunto Italia* deve essere sempre progettato per una resistenza non inferiore a quella offerta dalla sezione utile del legno. L'adesivo presente nell'intaglio tra l'inserto ed il legno, è equiparato a legno.

Per la zona compressa, in analogia al giunto *CNP*, richiamata la figura 26, la larghezza della trave si definisce con la formula (3), dove lo spessore s_i dell'inserto è:

$$s_i = n_{stuoie} \cdot \theta, 8mm \quad (35)$$

La resistenza di progetto idealizzata vale:

$$\Sigma f_{c,sup} = (B_{id} \cdot \sigma_{c,\alpha,d}) + (n_{stuoie} \cdot f_{G800,d}) \quad (36)$$

Le partecipazioni del legno e degli inserti sono fornite dalle relazioni:

$$p_1 = (B_{id} \cdot \sigma_{c,\alpha,d}) / \Sigma f_{c,sup} \quad (37)$$

$$p_2 = (n_{stuoie} \cdot f_{G800,d}) / \Sigma f_{c,sup} \quad (38)$$

dove:

B_{id} larghezza ideale della trave;

s_b spessore del bordo che delimita il ribasso di testa;

s_i spessore dell'inserto;

$\Sigma f_{c,sup}$ resistenza di progetto idealizzata della zona compressa sostitutiva dei materiali (legno, inserto);

p_1 partecipazione del legno alla compressione;

p_2 partecipazione dell'inserto alla compressione;

$\sigma_{c,\alpha,d}$ tensione di compressione nel legno;

$f_{G800,d}$ resistenza unitaria di progetto assegnata ad una stuoia Polyevery G800;

$f_{G800,d} = 1,8 \text{ kN/cm}$;

n_{stuoie} numero delle stuoie;

In zona tesa, per le stuoie Polyevery G800 e per i nastri di rinforzo in carbonio larghi 10 cm (fili 800 tex; n. 5,2 fili a centimetro) la resistenza è:

$$\Sigma f_{t,inf} = (n_{stuoie} \cdot f_{G800,d}) + (n_{nastri} \cdot f_{HTS,d}) \quad (39)$$

Le partecipazioni sono:

$$p_3 = (n_{stuoie} \cdot f_{G800,d}) / \Sigma f_{t,inf} \quad (40)$$

$$p_4 = (n_{nastri} \cdot f_{HTS,d}) / \Sigma f_{t,inf} \quad (41)$$

dove:

$\Sigma f_{t,inf}$ resistenza di progetto idealizzata della zona tesa;

p_3 partecipazione delle stuoie alla trazione;

p_4 partecipazione dei nastri alla trazione;

n_{nastri} numero dei nastri tra le stuoie;

$f_{HTS,d}$ contributo di ciascun nastro in carbonio.

Trattandosi di un modello utilizzabile senza soverchie difficoltà, sono state introdotte delle semplificazioni, tutte a favore di sicurezza. Operando nel campo delle resistenze dei materiali e per evitare fraintendimenti, introduciamo l'asse discriminante (boundary line) D-D tra la zona compressa e quella tesa, che ha la stessa funzionalità dell'asse neutro X-X nei sistemi *CNP* (legno-acciaio), però nei *Giunti Italia* con il metodo basato sulle resistenze. I risultati finali restano entro valori di assoluta compatibilità con i sistemi di verifica più sofisticati.

La posizione dell'asse discriminante è definita dall'equazione di equilibrio:

$$\begin{cases} z_{sup} + z_{inf} = h \\ z_{sup} \cdot \Sigma f_{c,sup} = (z_{inf} \cdot \Sigma f_{t,inf}) - (z_{inf} - 10) \cdot f_{HTS,d} \end{cases} \quad (42)$$

Dalla prima equazione si ottiene:

$$z_{sup} = h - z_{inf},$$

che va applicato nella seconda equazione (42).

Conseguentemente:

$$z_{inf} = \frac{10 \cdot f_{HTS,d} - \Sigma f_{c,sup} \cdot h}{(f_{HTS,d} - \Sigma f_{t,inf} - \Sigma f_{c,sup})} \quad (43)$$

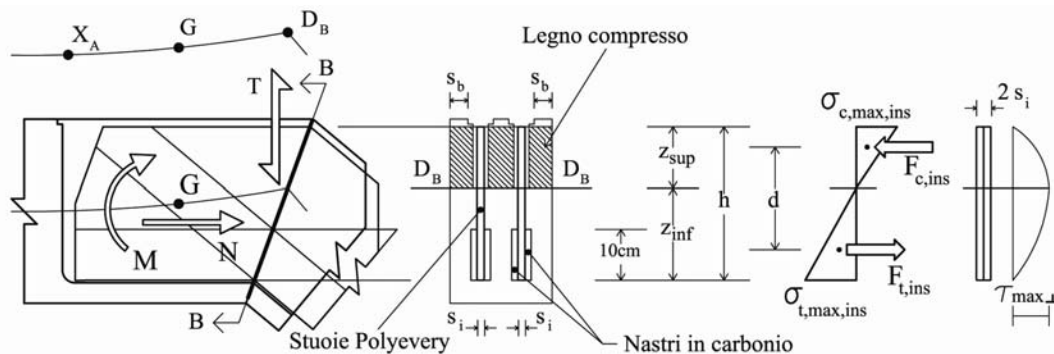


Figura 26: Sezione e grafico delle tensioni nella posizione B-B

Stante la nota formula:

$$\pm F_{c,t} = M / d \quad (44)$$

in cui:

$F_{c,t}$ forza compressione o trazione;

M momento flettente effettivo massimo;

d distanza di equilibrio delle tensioni interne,

la sollecitazione nel legno compresso risulterà:

$$\sigma_{c,L_{eff}} = (2 \cdot F_{c,t} \cdot p_1) / (z_{sup} \cdot B_{id}) \quad (45)$$

dove:

$\sigma_{c,L_{eff}}$ tensione di compressione effettiva nel legno.

Per gli strati dei materiali fibrosi impiegati sono pure definibili le resistenze impegnate, valutandole in proporzione alle rispettive potenzialità:

$$f_{c,G800_{eff}} = (2 \cdot F_{c,ins} \cdot p_2) / (z_{sup} \cdot n_{stuoie}) \quad (46)$$

$$f_{t,G800_{eff}} = (2 \cdot F_{t,ins} \cdot p_3) / (z_{inf} \cdot n_{stuoie}) \quad (47)$$

$$f_{t,HTS_{eff}} = (2 \cdot F_{t,ins} \cdot p_4) / (z_{inf} \cdot n_{nastri}) \quad (48)$$

where:

$f_{c,G800_{eff}}$ resistenza a compressione di competenza della stuoia;

$f_{t,G800_{eff}}$ resistenza a trazione di competenza della stuoia;

$f_{t,HTS_{eff}}$ resistenza a trazione di competenza del nastro;

n_{stuoie} numero delle stuoie Polyevery;

n_{nastri} numero dei nastri di carbonio HTS.

La continuità tra le aste è garantita quando:

$$\sigma_{c,L_{eff}} \leq \sigma_{c,\alpha,d}$$

$$f_{c,G800_{eff}} \leq f_{G800,d}$$

$$f_{t,G800_{eff}} \leq f_{G800,d}$$

$$f_{t,HTS_{eff}} \leq f_{HTS,d}$$

in cui:

$\sigma_{c,\alpha,d}$ tensione di calcolo a compressione inclinata dell'angolo α rispetto alla fibratura;

$f_{G800,d}$ resistenza unitaria di progetto assegnata ad una stuoia Polyevery G800;

$f_{G800,d} = 1,8 \text{ kN/cm}$;

$f_{HTS,d}$ resistenza unitaria di progetto assegnata al nastro di carbonio HTS;

$f_{HTS,d} = 4,5 \text{ kN/cm}$.

In caso di asimmetria geometrica o del carico, il giunto è soggetto a taglio trasversale. Anche se non fosse, a favore di sicurezza è ragionevole mettere in conto una plausibile forza tagliante. Alla forza di taglio si oppone la sezione degli inserti ed anche la resina fatta penetrare tra le facce di testa contrapposte, che imbocca i lumi (figura 27). Per la sicurezza si considera la sola sezione dell'inserto:

$$A_{ins} = \sum s_i \cdot h \quad (49)$$

dove:

A_{ins} area dell'inserto in FRP.

Siccome il composito di stuoie Polyevery è assimilato ad un materiale isotropo, si consiglia l'applicazione della formula:

$$\tau_{G800_{eff}} = \frac{T \cdot 1,5}{A_{ins}} \quad (50)$$

dove:

$\tau_{G800_{eff}}$ tensione tangenziale nell'inserto;

T forza di taglio.

La resistenza di progetto a taglio è fornita dalla relazione:

$$f_{v,G800,d} = \left(\frac{n_{stuoie} \cdot f_{G800,d}}{\sqrt{3}} \right) \quad (51)$$

in cui:

$f_{v,G800,d}$ resistenza di progetto a taglio della stuoia.

Deve quindi risultare:

$$\tau_{G800_{eff}} \leq f_{v,G800,d}$$

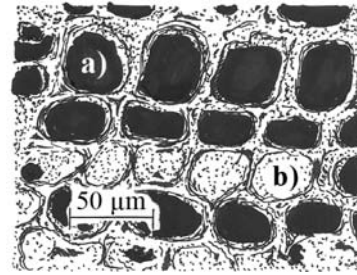


Figura 27: Test sulla resistenza a trazione dell'adesivo che si attesta all'imbocco dei lumi [8]: a) adesivo strappato fuori dalle tracheidi; b) l'adesivo è fissato alle tracheidi.

6.3 DIMENSIONAMENTO DELLA SUPERFICIE DEI BRACCI

E' preferibile che per conseguire la piena continuità tra gli elementi da collegare, i *Giunti Italia* siano realizzati con due lame in ciascun attacco.

La disponibilità di un doppio inserto, riduce le tensioni trasversali nel legno. Inoltre offre una maggior resistenza nella direzione trasversale. La dimensione degli intagli nel legno è condizionata dalle tecniche di lavorazione e dalla porzione di materiale che si vuole mantenere intatto, ad esempio lo spessore di legno mantenuto integro per la protezione al fuoco. E' preferibile utilizzare l'altezza massima consentita, che poi influenza le altre dimensioni dell'inserto: lunghezza, superficie interfacciata al legno e conseguentemente l'inerzia polare delle interfacce ($J_p = J_x + J_y$).

Il modello assunto considera che l'interfacciamento degli inserti incollati con le superfici degli intagli nel legno determini lo scambio vicendevole delle tensioni provocate dal momento flettente. La lunghezza del giunto è definita dall'azione tagliante nelle interfacce. Si assume che le tensioni massime di aderenza coincidano con le tensioni massime dovute a momento e si manifestino in corrispondenza dei bordi dell'inserto più distanti dall'asse neutro convenzionale (asse discriminante D-D) coincidente con G (figura 28).

La resistenza a taglio dell'inserto e dell'adesivo epossidico sono entrambe notevolmente superiori a quella del legno. Conseguentemente la lunghezza l_{min} del braccio dell'inserto è fornita dalla relazione:

$$l_{min} = \frac{2 \cdot F_{t,ins}}{n \cdot interfacce \cdot 0,5h \cdot f_{v,d}} \quad (52)$$

$f_{v,d}$ resistenza di calcolo a taglio del legno (aderenza o interfacciamento).

Si consiglia di eseguire la verifica (52) anche con z_{inf} al posto di $0,5h$.

6.4 CALCOLO DELLA RESISTENZA A TORSIONE

Il *Giunto Italia* (parimenti al giunto *CNP*), trae ulteriore affidabilità dalla resistenza torsionale delle superfici interfacciate. Essendo costituiti da stuoie bilanciate con fibre pluridirezionali, i laminati Polyeverby ben aggrappano le fibre del legno. Peraltro, l'effetto si estende in profondità nel legno. La verifica della resistenza torsionale garantisce la sicurezza del giunto.

Il meccanismo di resistenza torsionale nel piano dell'inserto è facilmente percepibile riferendosi al modello di lamiera imbullonate soggette a flessione. Il modello di calcolo della resistenza a torsione nel piano dell'inserto (piano dell'unione) è lo stesso adottato per la verifica dei collegamenti in lamiera imbullonati (figura 29,a).

Nel modello di riferimento i bulloni più sollecitati sono

quelli più lontani dal baricentro G_{Fe} del sistema. Nei bracci del *Giunto Italia* le particelle interfacciate maggiormente sollecitate a taglio sono quelle più distanti dal baricentro G delle superfici incollate (figura 29,b). Nell'esempio, per praticità, è stato modificato il perimetro interfacciato, togliendo una modesta porzione in zona compressa a favore di sicurezza.

Può essere il caso che il nodo sia soggetto anche a forza assiale, oppure a taglio, oppure ad entrambe le azioni. In tal caso, fatto riferimento alla figura 29,b, sarà applicata la formula che segue, qui scritta nella massima estensione:

$$\tau_{max} \approx \frac{M_{torcente} \cdot a}{n \cdot facce \cdot J_p} + \frac{R}{n \cdot facce \cdot A} \quad (53)$$

L'origine della formula (52) è nelle seguenti:

$$M_{torcente} = (M_{flettente} + M_{trasporto}) \quad (54)$$

$$M_{trasporto} = T \cdot e \quad (55)$$

$$J_p = J_x + J_y \quad (56)$$

$$R = \sqrt{N^2 + T^2} \quad (57)$$

dove:

$M_{torcente}$ momento torcente;

$M_{flettente}$ momento flettente;

$M_{trasporto}$ momento di trasporto;

e eccentricità, ossia la distanza tra la posizione *B-B* di applicazione del taglio (T) ed il baricentro G ;

a distanza del punto interfacciato più lontano dal baricentro G ;

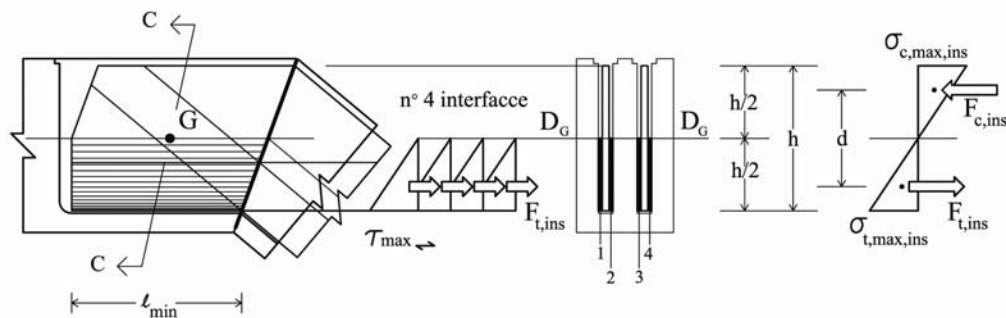


Figura 28: Sezione e grafico delle tensioni sulle superfici interfacciate

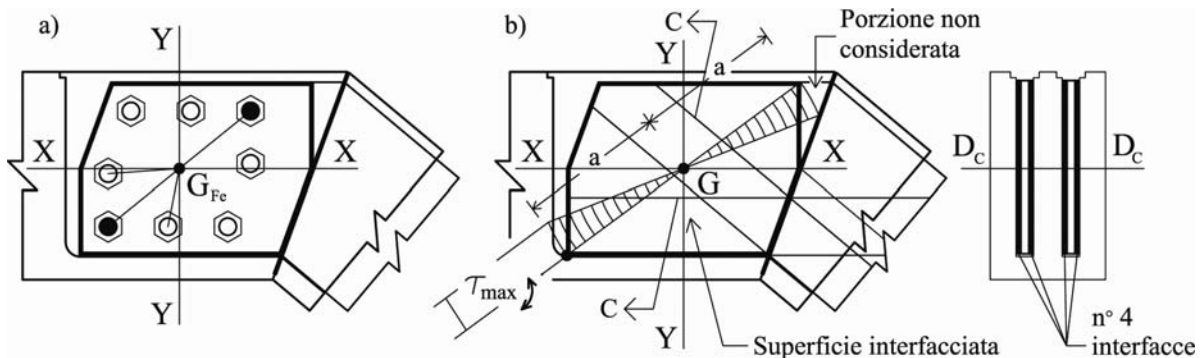


Figura 29: Modelli dei giunti: a) modello con lamiera imbullonate soggette a flessione nel proprio piano; b) modello con inserti incollati, le cui interfacce sono soggette a flessione.

J_p momento d'inerzia polare nel piano dell'inserto;
 J_x momento d'inerzia rispetto all'asse x-x;
 J_y momento d'inerzia rispetto all'asse y-y;
 R risultante delle forze N e T ;
 A superficie interfacciata;
 N forza assiale;
 T azione di taglio.

In assenza di taglio e forza assiale, la formula assume la seguente espressione:

$$\tau_{max} \approx \frac{M_{torcente} \cdot a}{n \cdot facce \cdot J_p} \quad (58)$$

La verifica è soddisfatta quando:

$$\tau_{max} \approx \leq f_{v,d}$$

La funzionalità statica del giunto è comprovata dalle quattro verifiche descritte. Sia consentita la seguente riflessione: il modello assunto è quello delle tensioni lineari, che è senz'altro valido nell'ambito dei carichi di routine. Il modello delle tensioni lineari viene assunto a favore di sicurezza anche per i carichi agli SLU. Con l'avvicinarsi agli SLU ed anche superandoli, si ipotizza la graduale trasformazione sino a conformarsi al modello parabola-rettangolo, fermo restando la planarità delle sezioni.

7 CONCLUSIONI

Rispetto ai precedenti sistemi, l'introduzione delle stuoie in vetro ed in carbonio offre nuove possibilità alle giunzioni di continuità delle travi in legno. I lavori eseguiti invogliano a proporre un modello applicativo semplice ed affidabile. L'obiettivo è di conseguire il ripristino della continuità strutturale nei giunti, avvalendosi delle fibre artificiali pluridirezionali: le stuoie rinforzate con nastri in carbonio. Il tutto è pienamente compatibile con la struttura fibrosa naturale del legno e certamente con l'esigenza di protezione sismica degli edifici.



Figura 30: Esempio di Giunto Italia® a doppio inserto in GFRP

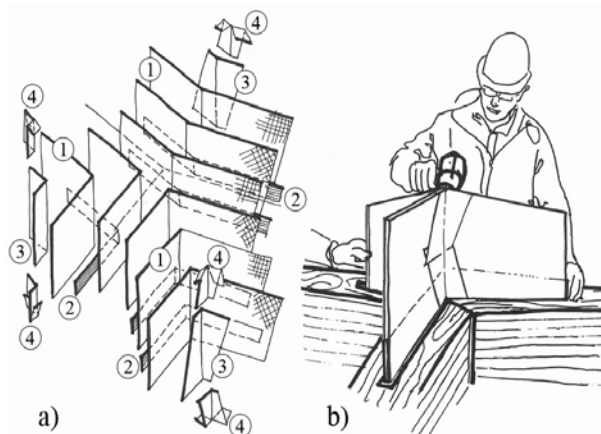


Figura 31: a) composizione di un Giunto Italia tre vie: 1) stuoie in vetro o carbonio; 2) nastri di rinforzo in carbonio; 3) rinforzi degli angoli con stuoie Polyevery C400; 4) "chiavette" (legamenti) in stuoie Polyevery C400; b) gli inserti sono costruiti dalla ditta di carpenteria del legno su progetto e controllo del loro ingegnere. Gli inserti sono trasportati piani. I bracci sono angolati al momento della loro applicazione in opera. Dopo il posizionamento dell'inserto nelle travi, il giunto viene completato con la percolazione dell'adesivo Xepox 40.



Figura 32: Applicazione di un Giunto Italia® a doppio inserto in GFRP con nastri di rinforzo in carbonio

RICONOSCIMENTI

Alla memoria di Pietro Catelli, fondatore della società Artsana S.p.A. (Chicco);
 Geom. Alfred Rubner, Holzbau S.p.A., per il sostegno all'innovazione nelle grandi strutture pluridirezionali e nei sistemi CNP dal 1980 al 2000;
 Ing. Giovanni Nosedà Pedraglio per la collaborazione ai sistemi CNP;
 Prof. ing. Maurizio Piazza, prof. ing. Marco Ballerini e ing. Massimo Del Senno, per la ricerca ed il contributo ai sistemi CNP dagli anni 1996 al 2000;

Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Laboratorio Prove Materiali; Prof. ing. Carlo Poggi e prof. ing. Maria Adelaide Parisi, (responsabili del contratto di ricerca con la Cenci Legno); loro collaboratori ing. Giulia Fava e arch. Chiara Tardini;

Alle decine e decine di committenti che hanno incoraggiato l'intraprendenza e sostenuto gli sforzi;

Alle centinaia di aziende, loro tecnici e maestranze, che con la loro intelligenza, vitalità e lealtà hanno consentito il buon fine di tanto sperimentare in corso di progettazione ed in corso d'opera;

Infine, all'ultimo posto nell'elenco, ma prime per l'icommensurabile contributo allo studio di sistemi e modelli: geom. **Sabrina Cenci** e ing. **Magdalena Siwak**.

RIFERIMENTI

- [1] G. Cenci: Strutture in legno – calcolo e costruzione con riferimento alla DIN 1052, Edizioni Meta, Milano, 1980.
- [2] E. Rachello, O. Delmarco, M. Piazza: Tecnologie avanzate nell'impiego strutturale del legno, CNR-I.T.L. Istituto per la Tecnologia del Legno, San Michele all'Adige, 1999.

- [3] “Tutto è possibile a chi crede”. San Bernardo, abate di Clairvaux, che esorta i suoi monaci a non demordere.
- [4] E. Guagenti, F. Buccino, E. Garavaglia, G. Novati: Fondamenti di meccanica strutturale, McGraw-Hill, Milano, 2005.
- [5] NTC 2008 - Norme Tecniche per le Costruzioni, D.M. 14 gennaio 2008 (G.U. 04/02/2008 n. 29 - Suppl. Ord. n. 30) and Technical References advisable to the chapter 12).
- [6] CNR-DT 200/2004 – Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati – Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie, Roma, 13 luglio 2004.
- [7] L. Ascione, A. Giordano: Riabilitazione strutturale con materiali compositi fibrirrinforzati - Interventi su edifici di conglomerato cementizio armato, Polipress, Milano, 2009.
- [8] J. Follrich, A. Teischinger, W. Gindl, U. Müller: Adhesive bond strength of end grain joints in softwood with varying density. *Holzforschung*, Vol. 62, pages 237-242. Walter de Gruyter, Berlin-New York, 2008.



Figura 33: Rassegna TechnoDomus, RiminiFiera, marzo 2009. Ipotesi di una membrana spaziale in legno lamellare e stuoie PolyeveryG800; per i collegamenti multidirezionali è stato progettato un Giunto Italia® plurivie in GFRP