



## I PROFILI STRUTTURALI IN GFRP: TEORIA E APPLICAZIONI

Salvatore Russo  
Università Iuav di Venezia – russo@iuav.it

**Sommario.** *Le caratteristiche fisico-meccaniche del materiale composito e quindi degli elementi strutturali FRP definiscono dei specifici campi di applicazione sia per la realizzazione di sistemi strutturali interamente in FRP sia per l'utilizzo di soli elementi - monodimensionali (travi) e bidimensionali (pannelli per impalcati o copertura) - in combinazione con altri materiali.*

*La tipologia strutturale che ad oggi presenta il maggiore utilizzo degli elementi pultrusi è il ponte, pedonale o carrabile, sia per le nuove costruzioni che per il rinforzo delle esistenti; la durabilità e la leggerezza in combinazione con buone risposte resistenziali del materiale composito costituiscono le eccellenze di questa nuova tecnologia e motivano l'ampio utilizzo per la realizzazione di ponti. Altresì si evidenziano comunque delle soluzioni di interesse funzionale ed estetico che riguardano edifici a più piani, sopraelevazioni, coperture e strutture temporanee.*

## LOS PERFILES ESTRUCTURALES DE GFRP: TEORÍA Y APLICACIONES

Salvatore Russo

Universidad IUAV de Venecia – russo@iuav.it

**Sumario.** *Las características físico-mecánicas del material compuesto y, por lo tanto, de los elementos estructurales de FRP, definen unos específicos campos de aplicación tanto para la realización de sistemas estructurales totalmente de FRP, como para la utilización de tan sólo elementos – monodimensionales (vigas) y bidimensionales (paneles para tableros o coberturas) – en combinación con otros materiales. La tipología estructural que actualmente presenta la mayor utilización de perfiles pultrusionados es el puente, peatonal o transitable, tanto para las nuevas construcciones, como para el refuerzo de las existentes; la durabilidad y la ligereza, en combinación con nuevas respuestas resistenciales del material compuesto, constituyen las excelencias de esta nueva tecnología y motivan su amplia utilización para la realización de puentes. Además, se ponen de relieve soluciones de interés funcional y estético que atañen a edificios de varias plantas, sobreelevaciones, coberturas y estructuras temporales.*

## 1. INTRODUZIONE

Allo stato attuale l'impiego degli FRP (Fiber Reinforced Polymers) per il rinforzo è ormai ampiamente diffuso in campo internazionale, mentre le applicazioni a mezzo di profili strutturali in FRP sono più ridotte per quanto appaiano particolarmente promettenti.

Per quanto concerne più in generale il tipo di applicazione possibile, i profili strutturali FRP, si caratterizzano in modo fondamentale per la loro leggerezza, resistenza e durabilità, e in tal senso tra le tipiche applicazioni nel campo del nuovo si segnalano le passerelle pedonali, i ponti di luce contenuta, anche carrabili, le strutture leggere permanenti e removibili e le sopraelevazioni.

Per quanto riguarda l'impiego nel rinforzo e per la conservazione del patrimonio storico, architettonico e ambientale si evidenzia come le caratteristiche meccaniche e prestazionali del materiale bene si concilino con la problematica in quanto trattasi di materiale molto leggero e reversibile. A solo titolo di esempio nel campo del confronto con il patrimonio storico e architettonico si evidenzia la possibilità di irrigidire gli orizzontamenti senza l'incremento notevole di peso proprio, l'impiego con funzione di architrave per la risoluzione di problematiche puntuali, l'irrigidimento di paramenti storici soprattutto ai piani più elevati. Ancora nel caso del recupero di elementi snelli in muratura storica quali torri e campanili è plausibile l'attuazione di un rinforzo alle quote più elevate assicurando elevate resistenze a fronte di ridotti carichi aggiunti. Per quanto riguarda la conservazione dei beni ambientali la durabilità degli elementi in fibrorinforzato a matrice polimerica garantiscono, nel tempo e alle normali condizioni di servizio, il mantenimento delle prestazioni meccanico-strutturali.

Ad oggi l'approccio conoscitivo è sufficientemente supportato sia dal punto di vista dell'impianto teorico e normativo di riferimento (CNR-DT 205/2007, EUROCOMP 1996) sia dalle validazioni ricavate direttamente dalle esperienze sviluppate nell'ambito della ricerca e dalle opere realizzate fino ad oggi.

Nonostante, comunque, la giovane età del materiale alcune applicazioni in campo internazionale e nazionale, recenti e meno recenti, hanno fornito lo spunto per verificare al vero comportamenti e prestazioni strutturali, Keller (2003) e Russo (2007).

Complessivamente il tema dell'applicazione in campo strutturale di elementi in composito fibrorinforzato è stato affrontato in modo ampio da un punto di vista della risposta meccanica alle azioni a carattere statico (Giangreco 2002), più contenute risultano essere le informazioni che si riferiscono alla caratterizzazione dinamica, (Boscatto e Russo 2009, Boscatto 2009).

L'argomento è di particolare interesse in quanto se da un lato il legame costitutivo di tipo elasto fragile con un comportamento meccanico ortotropo - in dettaglio anisotropo trasversalmente isotropo - unitamente all'assenza di comportamenti a carattere duttile impongono già alcune limitazioni, dall'altro lato il ridotto peso proprio del materiale, 1600-1800 kg/m<sup>3</sup> (variabile in funzione della percentuale di fibra presente) a fronte di valori di resistenza elevati e la possibilità di poter definire a monte l'entità della

rigidezza, con un ampio margine di variazione, sollecitano spunti e riflessioni che possono avere rilievo anche nel settore applicativo dell'ingegneria sismica, (Russo 2007).

Si fa riferimento non solo alla realizzazione di costruzioni interamente in composito – che comunque dovranno avere dimensioni contenute anche sulla base dei bassi valori di modulo elastico e di modulo a taglio caratteristici dei profili strutturali con rinforzo a base di vetro, ma anche alla possibilità di utilizzare i profili quali rinforzi locali in edifici esistenti, ad esempio per incrementare le rigidzze flessionali in corrispondenza dei piani più elevati. In detto caso infatti si può realizzare un rinforzo con adeguate prestazioni resistenziali e deformative ma con un'aggiunta molto contenuta di massa rispetto alla struttura originaria. Analogo interesse applicativo riveste anche la possibilità di realizzare sopraelevazioni con struttura a telaio interamente in composito fibrorinforzato.

In termini generali l'assenza di degrado di rigidzza al crescere degli stati tensionali applicati, derivata dal legame costitutivo, sembra circoscrivere in modo sensibile la variabilità del coefficiente di smorzamento (Giangreco 2002, Boscato e Russo 2007), per quanto i risultati della sperimentazione di seguito illustrata si prestano ad alcuni interessanti approfondimenti.

Anche le modalità di connessione fra elementi in composito, garantite a mezzo di imbullonatura o incollaggio, o utilizzando le due tecniche in parallelo, possono essere trattate con il medesimo approccio teorico impiegato in presenza di carpenteria metallica, con alcune variazioni che tengono conto della meccanica del materiale. Parimenti l'elevato livello di deformabilità dovrà essere tenuto in conto calibrando di volta in volta le dimensioni degli elementi in gioco, (Mottram e Zheng 1999, EUROCOMP 1996).

Lo stato attuale della letteratura internazionale evidenzia peraltro uno sforzo mirato proprio a raggiungere una codificazione degli impieghi strutturali di questo materiale, (ASCE 1984); è inoltre presente un documento tecnico del CNR dedicato alla progettazione strutturale con profili in composito fibrorinforzato prodotti con tecnica di pultrusione, CNR-DT 205/2007.

## **2. INQUADRAMENTO GENERALE**

### **2.1. IL MATERIALE E GLI ELEMENTI STRUTTURALI**

Il termine Composito è utilizzato per indicare il materiale FRP in quanto costituito da materiali con caratteristiche fisiche e meccaniche diverse. L'associazione dei due materiali base, fibra e matrice, non garantisce la realizzazione di un prodotto finale caratterizzato dalla somma delle proprietà dei singoli materiali associati e quindi il raggiungimento di un miglioramento complessivo del prodotto finito, vedi Figura 1.

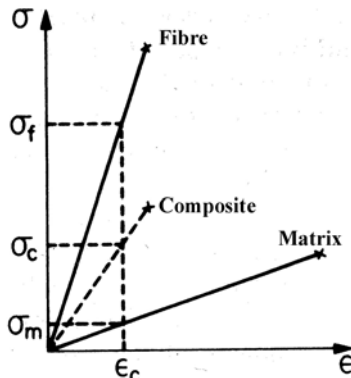


Figura 1, Comportamento a trazione del composito, fibra e matrice (Russo 2007)

La Figura 1 evidenzia, infatti, la riduzione delle proprietà meccaniche della fibra nuda causata dalla presenza e dall'interazione con la matrice.

La matrice risulta essere comunque necessaria per la realizzazione dell'elemento strutturale in quanto crea continuità fra i filamenti di fibra, trasferisce gli sforzi alle fibre, garantisce la trasmissione delle sollecitazioni tra fibra e fibra per mezzo della propria rigidità tagliante, protegge il rinforzo fibroso da danni locali e aggressioni chimiche e infine definisce la forma del profilo durante il processo di polimerizzazione. Generalmente parlando le proprietà meccaniche del composito dipendono esclusivamente dalla risposta strutturale del rinforzo fibroso. Il composito fibrorinforzato a matrice polimerica ha un comportamento strutturale a trazione del tipo elastico-lineare sino al collasso caratterizzato complessivamente da una rottura fragile con una ridotta capacità deformativa priva infatti di fasi di snervamento, plasticizzazione, o di incrudimento e softening.

Per quanto riguarda la resistenza a compressione la fibra, e quindi il composito, ha un comportamento sostanzialmente poco performante. Tale risposta è interamente governata dalla componente matrice che, offrendo una ridotta rigidità trasversale, è particolarmente vulnerabile ai fenomeni instabilizzanti. A tal proposito l'orientamento delle fibre e la loro tessitura sono dei fattori determinanti per la caratterizzazione meccanica e prestazionale del materiale composito.

Nel caso specifico la legge costitutiva del materiale composito per gli elementi strutturali è anisotropa in direzione parallela alle fibre e isotropa nel piano normale alle stesse; tale piano è il più debole in quanto controllato esclusivamente dalle prestazioni meccaniche della matrice. Gli assi principali che corrispondono. Dall'analisi stratigrafica il roving è costituito dalle fibre longitudinali mentre il mat è definito da fibre corte disposte a  $\pm 45^\circ$  e  $0^\circ$ , (vedi Figura 2).

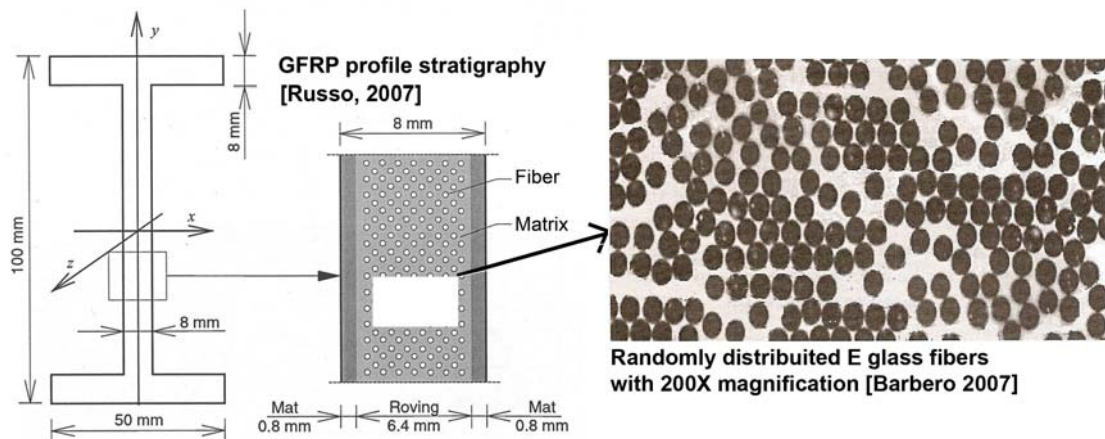


Figura 2, Stratigrafia del profilo GFRP e dettaglio

Tranne che per gli elementi laminati, che per natura propria sono prodotti a strati ben definiti, l'interfaccia tra i due materiali costituenti è di difficile identificazione e modellazione. L'ipotesi di perfetta aderenza tra i materiali è di fondamentale importanza per l'impiego in ambito strutturale degli elementi compositi e perciò è assunta come uno dei principi base di calcolo nella teoria delle miscele, (Russo 2007). In realtà il comportamento dell'interfaccia rinforzo-matrice è il primo parametro di valutazione sull'omogeneità meccanica del composito che condiziona e definisce la risposta dell'elemento strutturale FRP rispetto a sollecitazioni longitudinali, trasversali e di durabilità nei confronti degli agenti aggressivi e di impermeabilità all'acqua.

Per quanto riguarda le proprietà termiche ed elettriche del materiale composito possono essere calibrate e quindi progettate in funzione del tipo e della quantità degli elementi che lo costituiscono, (Russo 2007).

### 2.1.1. CARATTERISTICHE FISICO-MECCANICHE

Le caratteristiche del materiale composito fibrorinforzato e le distinte tecniche di produzione unite alle sensibili differenze prestazionali dei componenti fibra e matrice rendono ancora oggi di difficile definizione una serie di valori meccanici univoci per il generico materiale composito fibrorinforzato, ciò anche per la forte dipendenza dalla percentuale presente degli elementi che lo costituiscono. Per questo motivo l'indagine e i valori di seguito elencati fanno riferimento a materiale ed elementi di tipo standard per applicazioni strutturali, con rinforzo in vetro, da cui il termine GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), che rappresentano la tipologia oggi più impiegata e più facilmente reperibile nel mercato. Le percentuali medie in volume fra matrice e fibra sono pari rispettivamente al 60% e 40% , le caratteristiche in termini di valori medi dei componenti il materiale composito sono illustrate nella Tabella 1.

Fibra	$\sigma_t$ (MPa)	E (MPa)	Diametro ( $\mu\text{m}$ )	Densità ( $\text{g/cm}^3$ )	Allungamento(%)
E-Glass	4350	72400	10	2.54	4.8

Matrice	$\sigma_t$ (MPa)	E (MPa)	E flessionale (MPa)	Resistenza a trazione (MPa)	Allungamento (%)
Vinilestere (980-35)	87	3309	3379	149	4.2

Tabella 1, Caratteristiche meccaniche delle fibre in vetro e della matrice vinilestere (valori medi)

Nella Tabella 2 per un profilo ad “I” prodotto a mezzo di tecnica di pultrusione sono evidenziati i valori meccanici medi di riferimento.

Densità	$\gamma$	1600-2100 daN/m <sup>3</sup>
Resistenza longitudinale a trazione (campione)	$\sigma_t$	200-500 MPa
Modulo elastico a trazione (campione)	$E_t$	20000-30000 MPa
Modulo elastico flessionale (campione)	$E_f$	15000-20000 MPa
Modulo elastico flessionale (profilo)	$E_L$ (Longitudinale)	25000-30000 MPa
	$E_T$ (Trasversale)	8500 MPa
Modulo di taglio (profilo)	G	3000-5000 MPa
Coefficiente di Poisson	$\nu_L$ (Longitudinale)	0.23
	$\nu_T$ (Trasversale)	0.09

Tabella 2, Caratteristiche meccaniche degli elementi strutturali pultrusi FRP

Dal confronto fra le Tabelle 1 e 2 è possibile verificare le variazioni prestazionali nel passaggio dai componenti al materiale composito fibrorinforzato e da questo all'elemento strutturale.

## 2.2. IL COMPORTAMENTO STATICO, OSSERVAZIONI GENERALI

Generalmente parlando le prestazioni meccaniche dei profili dipendono dalla tipologia della sezione, dal tipo di matrice e di fibra, dalla percentuale in volume dei componenti e dalla direzione delle fibre rispetto al carico applicato. In termini quantitativi se il carico è applicato parallelamente alla direzione delle fibre il profilo composito massimizza la sua risposta strutturale. Nel caso invece che la direzione del carico sia trasversale alle fibre il profilo pultruso ha una riduzione delle prestazioni di circa 80-90%. Tale decremento raggiunge il 50% già con sensibili rotazioni di 20° della direzione del carico applicato rispetto all'orientamento delle fibre.

Nell'analisi micromeccanica dei due strati costituenti il composito, (mat e roving), è evidente il comportamento pressoché simile tra le due parti. La risposta globale evidenzia la buona risposta dell'interfaccia rinforzo-matrice, giustificando l'utilizzo della teoria dei laminati per la modellazione numerica e supportando l'ipotesi della perfetta aderenza nella teoria delle miscele (Russo 2007).

Il comportamento viscoso dei profili pultrusi GFRP deve essere opportunamente calibrato in funzione del livello del carico di servizio soprattutto per quanto riguarda i profili a sezione aperta. Con sollecitazioni contenute, circa il 50-75% del carico di collasso, la risposta ad azioni cicliche non risente di rilevanti degni di rigidità.

La riparazione localizzata dei profili GFRP permette di raggiungere risultati pressoché simili alla risposta strutturale del profilo integro. A tal proposito anche il rinforzo, opportunamente progettato in funzione del tipo di sollecitazione, garantisce un incremento globale delle prestazioni strutturali.

Le ricerche condotte sull'interazione strutturale tra gli elementi in composito e il calcestruzzo offrono degli interessanti spunti applicativi. Per quanto riguarda gli elementi inflessi la resina strutturale evidenzia un promettente incremento della rigidità flessionale con un'ottimizzazione della risposta della sezione rispetto alle sollecitazioni esterne. Gli elementi compressi subiscono l'effetto della ridotta resistenza trasversale dei profili pultrusi, infatti la ricerca prevede l'utilizzo di elementi prodotti per mezzo della tecnologia filament winding.

L'elevata deformabilità trasversale dei profili pultrusi induce dei fenomeni di instabilità locale che condizionano la risposta strutturale globale; a tal proposito, in fase di dimensionamento, è necessario utilizzare gli algoritmi che tengono conto della deformabilità a taglio.

### **2.3. IL COMPORTAMENTO DINAMICO, OSSERVAZIONI GENERALI**

I parametri dinamici – smorzamento, modi di vibrare, frequenza e periodo di vibrazione - che identificano i profili in composito e le strutture all-FRP fanno riferimento ai risultati sperimentali e analitici definiti dalle prove condotte nel Laboratorio di Scienza delle Costruzioni dell'Università Iuav di Venezia. Le prove riguardano profili monodimensionali di diversa sezione, pannelli (Boscatto and Russo 2009), strutture bidimensionali e tridimensionali soggette alle vibrazioni libere (Boscatto 2009).

La capacità di dissipare l'accelerazione accumulata delle strutture GFRP, 2D e 3D, è simile ai profili GFRP. Lo smorzamento dei profili GFRP con il momento d'inerzia maggiore, configurazione appoggio-appoggio, varia tra 2.25% and 3.5%. I profili "I" e "C" con il momento d'inerzia minore, soggetti a carico assiale, hanno il coefficiente di smorzamento uguale a 4%. L'intervallo dei valori di smorzamento del telaio bidimensionale è compreso tra 1.4% e 1.9%, mentre per la struttura tridimensionale la capacità di dissipare l'accelerazione cambia da 1.66% a 1.96%. Il valore medio dello smorzamento dei telai 2D e 3D – con collegamento trave-colonna imbullonato - è uguale a 1.7% .

La tabella 3 riassume i valori medi dei parametri dinamici dei profili monodimensionali e delle strutture GFRP.



Elementi, sistemi strutturali e condizioni al contorno		Configurazione	Hz	Tempo (s)	$\omega$ (rad/sec)
Elementi monodimensionale, configurazione appoggiata	“I”	$J_{max}$	24.41	0.04	157
	“Q”	/	35.09	0.028	224.3
	“H”	$J_{max}$	16.47	0.06	104.6
	“P”	$J_{max}$	11.9	0.08	78.5
Telaio bidimensionale		$J_{max}$	7.12	0.14	44.86
Telaio tridimensionale		x	20.34	0.05	125.6
		y	9.36	0.1	62.8

Tabella 3, Parametri dinamici degli elementi strutturali pultrusi FRP

L'analisi del modo proprio di vibrare dei profili pultrusi GFRP a sezione aperta e con un'elevata snellezza può essere condotta con le formulazioni teoriche relative ai materiali isotrope.

Le formulazioni che tengono conto dell'influenza della deformabilità a taglio sono generalmente più appropriate per lo studio del comportamento dinamico degli elementi GFRP e forniscono infatti risultati in buona concordanza rispetto ai risultati sperimentali.

Nel caso specifico della deformata dinamica dei profili a sezione chiusa e con un ridotto rapporto  $L/h$  si rileva una maggiore influenza del taglio rispetto a quella del momento flettente. Per quanto riguarda il profilo “C”, l'impiego dell'algoritmo che considera la deformabilità a taglio e la rigidità torsionale consente di bene interpretare la prestazione del profilo stesso e l'influenza non trascurabile dovuta alla presenza di una sezione aperta e asimmetrica.

### 3. GLI ELEMENTI STRUTTURALI FRP PER LE NUOVE COSTRUZIONI E IL RINFORZO

Gli aspetti caratterizzanti il materiale composito come la versatilità, dovuta alla possibilità di controllare e calibrare la risposta prestazionale a monte, la durabilità rispetto agli agenti aggressivi esterni insieme al beneficio offerto dal ridotto peso proprio suggeriscono interessanti possibilità di impiego degli elementi FRP come rinforzo strutturale, adeguamento funzionale e anti-sismico. Di seguito si riportano alcuni degli esempi realizzati dell'interazione tra elementi e sistemi strutturali FRP e le costruzioni storiche.

La realizzazione del soppalco nella casa “Cogollo”, conosciuta meglio come “Casa del Palladio”, è stata richiesta per ragioni funzionali al fine di incrementare la superficie utile. La tecnologia impiegata risponde al meglio ai requisiti richiesti attraverso una soluzione leggera e reversibile, quindi per nulla invasiva. Le immagini della Figura 3 mostrano la fase esecutiva di assemblaggio e le immagini del soppalco completato ed installato. I giunti tra gli elementi GFRP, i bulloni di collegamento e le parti di controvento sono in acciaio; l'impalcato è stato realizzato con dei pannelli in legno multistrato di spessore 5 cm.

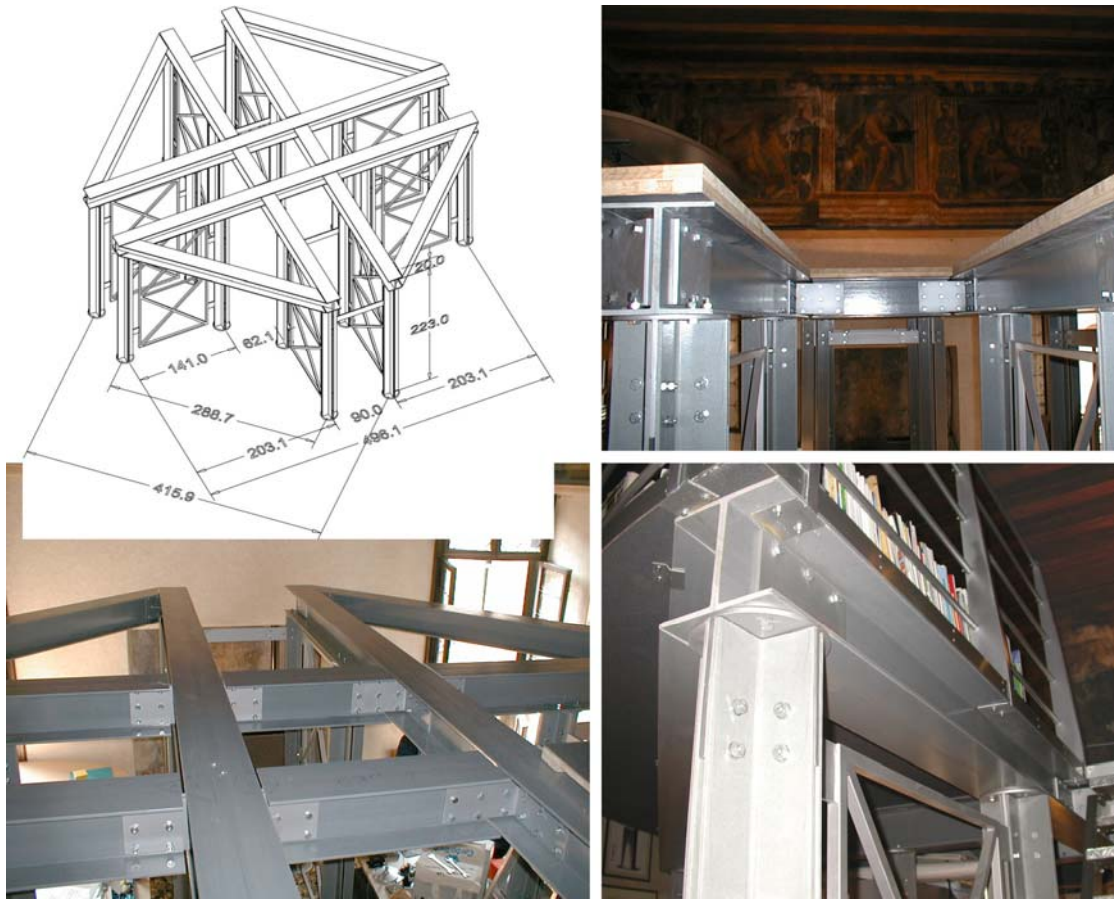


Figura 3, Assonometria generale (dimensioni in cm) e dettagli (Russo 2007)

Lo studio di Borri e Corradi (2004), ripreso sinteticamente in questo capitolo, riguarda il cosiddetto rinforzo in parallelo di un impalcato in legno; la soluzione proposta permette di aumentare il braccio fra le azioni interne della sezione composta costituita dagli elementi in linea trave in legno – trave GFRP. La soluzione proposta è stata applicata al solaio in legno del palazzo “Collicola” di Spoleto al fine di incrementare la rigidezza flessionale globale. La Figura 4 illustra le fasi di preparazione dei profili - applicazione di resina strutturale ed inserimento di pioli in vetroresina per aumentare l’aderenza con la trave in legno – e l’inserimento degli elementi strutturali FRP.



Figura 4, Fase di inserimento della trave GFRP nel solaio in legno (Borri, 2004)

L'ultima applicazione riguarda la riabilitazione strutturale del ponte pedonale "Paludo" di Venezia (Boscato e Russo, 2008). Il ponte è una costruzione della fine del XIX secolo, con schema statico ad arco – lunghezza 12.7 m, larghezza 3.25 m – costruito interamente in acciaio e legno. Come illustrato nelle Figure 5, 6 e 7 la struttura portante è costituita da due travi reticolari in ferro collegate da profili a sezione composta in ferro; sulle travi trasversali appoggia l'impalcato in legno.



Figura 5, Vista laterale

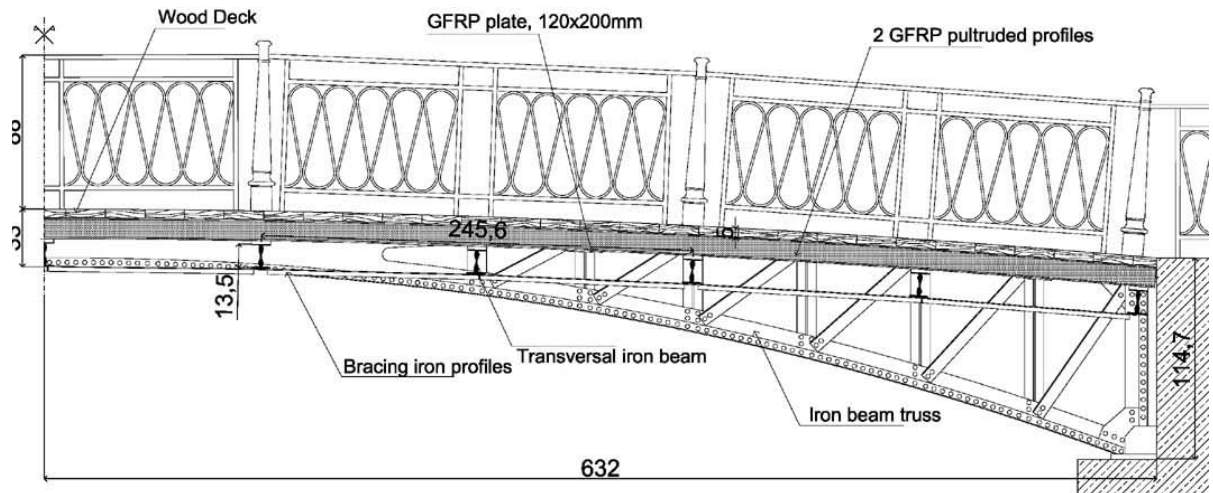


Figura 6, Sezione longitudinale (dimensioni in cm)

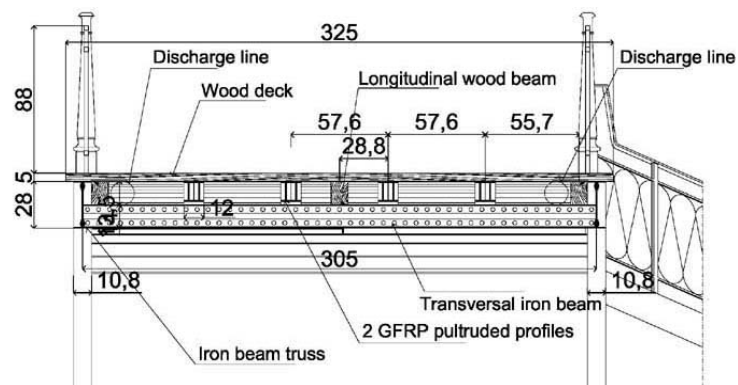


Figura 7, Sezione trasversale (dimensioni in cm)

Il rinforzo strutturale e il generale intervento di restauro è stato necessario per l'elevato livello di degrado rilevato; le aggressive condizioni ambientali sono state le principali cause del deterioramento e della riduzione delle caratteristiche meccaniche delle travi di legno (Boscato e Russo, 2008).

L'intervento di riabilitazione strutturale ha previsto l'incremento della rigidità flessionale per mezzo dell'inserimento di travi GFRP (vedi Figura 8) nell'impalcato con un ridotto aumento del peso proprio.

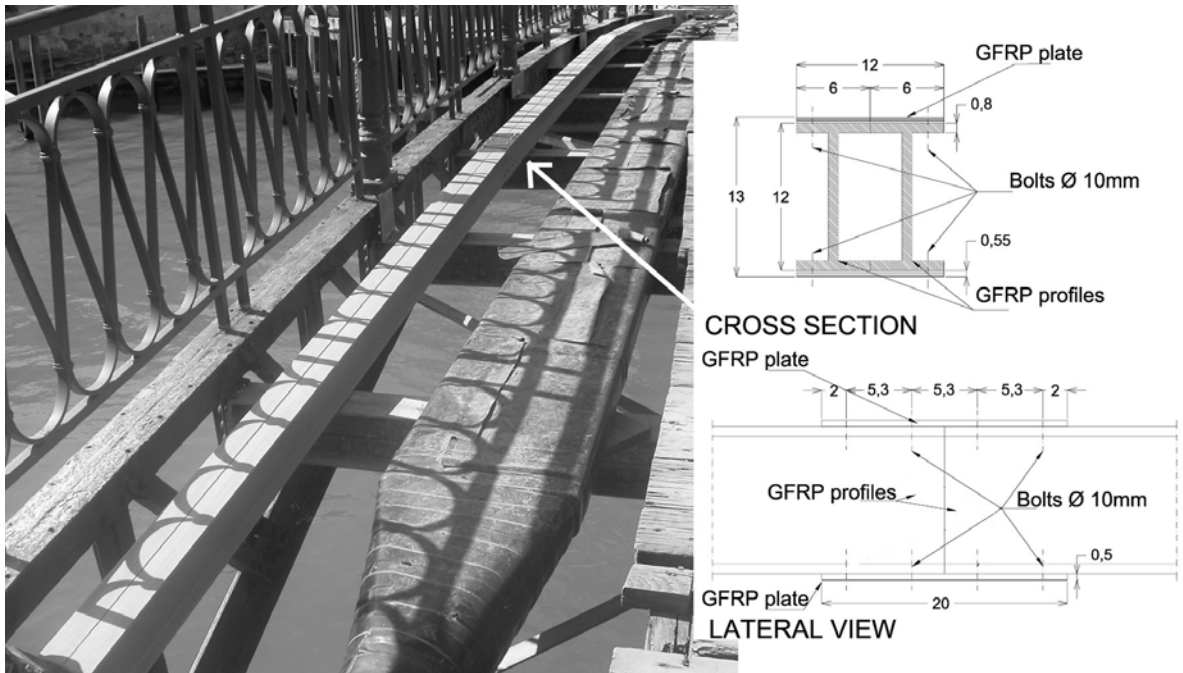


Figura 8, Inserimento del profilo GFRP e dettaglio del giunto trave-trave.

Le immagini che seguono (Figure 9 e 10) evidenziano la facilità esecutiva nelle fasi di trasporto, assemblaggio ed installazione delle travi GFRP. La Figura 11 illustra l'intradosso del ponte a lavoro ultimato.

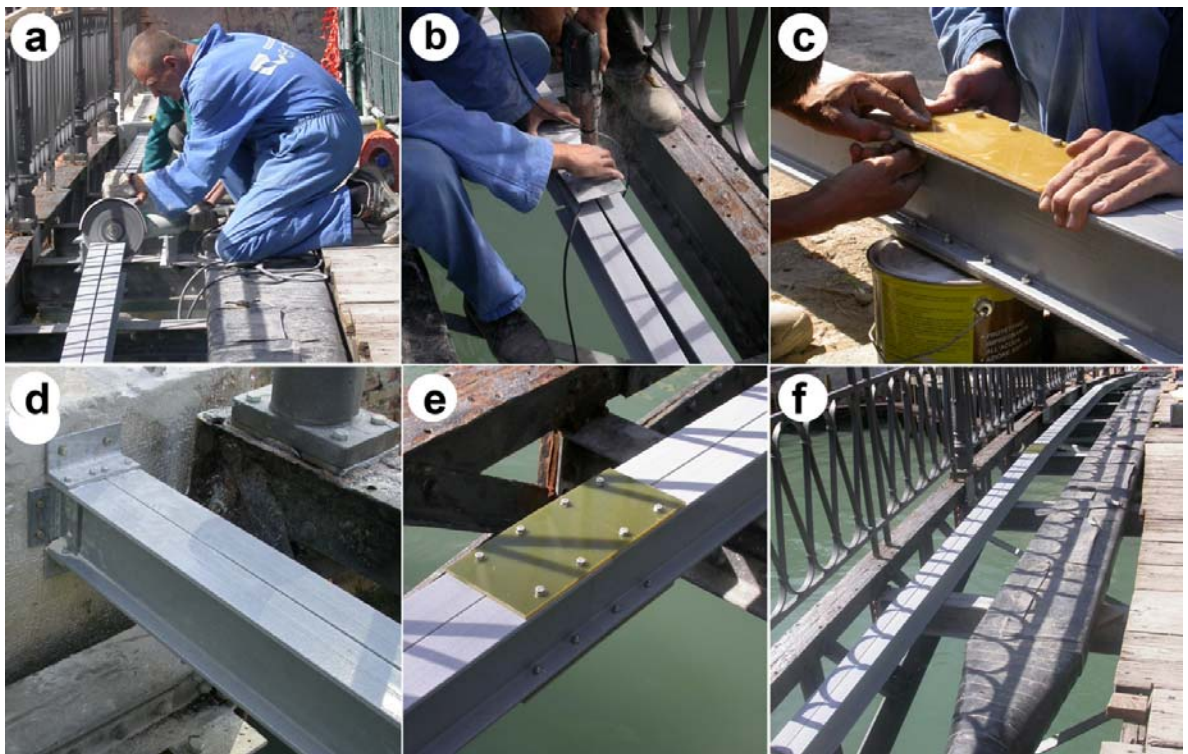


Figura 9, Fase di assemblaggio delle travi GFRP



Figura 10, Fase di posizionamento delle travi GFRP

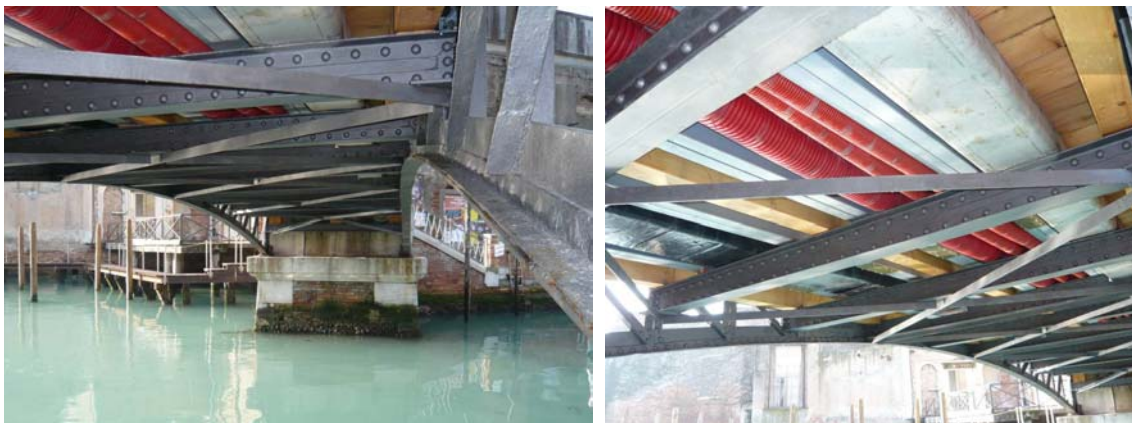


Figura 11, Immagini dell'intradosso

Complessivamente il confronto con l'acciaio – con sezione opportunamente ottimizzata – evidenzia l'ottimo rapporto tra la resistenza e il peso proprio del materiale GFRP. A parità di risposta strutturale l'uso dell'acciaio causa un incremento del peso proprio 1.4 volte maggiore del rinforzo eseguito con i profili GFRP. La massa partecipante al carico totale (peso proprio + carico accidentale) del materiale composito è uguale al 6% mentre per l'acciaio è pari a 9.5%. L'uso del materiale GFRP permette un incremento del carico accidentale.

La stessa risposta strutturale deve essere valutata considerando i benefici assicurati dall'utilizzo del materiale composito: resistenza agli agenti aggressivi, facilità di assemblaggio e installazione.

Il collaudo statico ha evidenziato un'elevata rigidità flessionale del ponte.

Nonostante il raggio sia notevolmente grande il comportamento ad “arco” risulta prevalente rispetto al comportamento a “trave”. Al momento dello scarico non si sono rilevati valori di freccia residua significativi evidenziando un comportamento globale complessivamente uniforme tra le due travi principali.

#### 4. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

*Structural plastics design manual*, Volume 1 and 2, ASCE manuals and reports on engineering practice, No. 63, ASCE NY, 1984.

Boscato G., *Numerical analysis and experimental tests on dynamic behaviour of gfrp pultruded elements for conservation of the architectural and environmental heritage*, PhD thesis, 2009

Boscato G., Russo S., *Lo smorzamento nel comportamento dinamico degli elementi strutturali in composito fibrorinforzato*, Atti del Workshop Materiali ed Approcci Innovativi per il Progetto in Zona Sismica e la Mitigazione della Vulnerabilità delle Strutture, Università di Salerno, Salerno, Italy, 2007.

Boscato G., Russo S., Proceedings of CICE 08, *Structural performance of iron-wood-FRP pedestrian bridge*. 4th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, July 22-24, 2008, Zurich, Switzerland.

Boscato G., Russo S., *Free Vibrations of Pultruded FRP Elements: Mechanical Characterization, Analysis and Applications*, ASCE, Journal of Composites for Construction, accepted for the publication in the December 2009.

Borri, M. Corradi, *Rinforzo di travi lignee con elementi pultrusi in FRP*, *Meccanica delle Strutture in Muratura Rinforzate con FRP – materials*, Venice, Italy, 6-8 dicembre 2004.

CNR-DT 205/2007 (2008). *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture realizzate con Profili Sottili Pultrusi di Materiale Composito Fibrorinforzato (FRP)*, Roma CNR. CNR-DT 205/2007.

Giangreco E., *Ingegneria delle Strutture*, UTET, Volume 3, *Le strutture in materiale composito*, 2002.

*Structural Design of Polymer Composites -EUROCOMP Design Code and Handbook*, Edited by John L. Clarke, E. & F. N. Spon, London, 1996.

Keller, T., *Use of fibre reinforced polymers in bridge construction*, Structural Engineering Documents 7, Inter. Association for Bridges and Structural Engineering (IABSE-AIPC-IVBH), Zurich, 2003.

Mottram, J.T. and Zheng, Y., *Further tests on beam-to-column connections for pultruded frames: Web-cleated*, J. Composites for Construction, 3 1, 1999.

Mottram, J.T. and Zheng, Y., *Further tests on beam-to-column connections for pultruded frames: Flange-cleated*, J. Composites for Construction, 3 3, 1999.

Russo, S., *Strutture in composito – Sperimentazione, teoria e applicazioni*, Ulrico Hoepli Editore S.p.A., Milan, 2007. (In Italian) ISBN 978-88-203-3643-1.

Keller, T., Bai, Y. and Vallee, T., *Long-term performance of a glass fiber-reinforced polymer truss bridge*, J. of Composites for Construction, 11 1, 2007.

Russo, S., *Strutture in composito – Sperimentazione, teoria e applicazioni*, Ulrico Hoepli Editore S.p.A., Milan, 2007. ISBN 978-88-203-3643-1

Toni, M., *FRP Architettura. Costruire con materie plastiche rinforzate con fibre*, Casa Editrice Alinea, 2005.

Tromp, L., *Can Resin Infusion Technology complement Pultrusion in Bridge – and Civil Engineering*, EPTA 9<sup>th</sup> World Pultrusion Conference, Rome, Italy, 26-28 March 2008.