

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO**  
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE**

**Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Strutture e del Recupero Edilizio e Urbano**  
**XIV Ciclo N.S. (2013-2015)**

**INNOVATIVE GFRP SECTIONS SHAPE AND PROPORTIONAS IN CIVIL**  
**ENGINEERING STRUCTURES**

**Autore: Marco Lamberti**

**Abstract**

Sebbene i materiali tradizionali (acciaio, cemento, legno e muratura) continuano a dominare l'industria delle costruzioni, nuovi materiali sono costantemente in fase di studio da parte di ingegneri e scienziati. Ad esempio, l'uso dei materiali compositi denominati FRP (Fiber-Reinforced Polymers) si sta gradualmente diffondendo in tutto il mondo [1-4].

L'idea principale alla base dei materiali compositi è la combinazione, su scala macroscopica, di due differenti materiali: fibre e resina polimerica. Più specificamente, le fibre ad alta resistenza (vetro, carbonio, aramidiche o fili d'acciaio ultra-sottili) forniscono resistenza e rigidità, mentre la resina (poliestere, vinilestere o epossidica) protegge le fibre e garantisce il trasferimento delle sollecitazioni. Come risultato, le proprietà meccaniche finali sono migliori rispetto a quelle presentate dai singoli componenti.

Tra i vari tipi di fibre, i materiali compositi in fibra di vetro (GFRP) sono ampiamente utilizzati grazie al loro costo relativamente basso nonostante siano caratterizzati da un modulo elastico e da una resistenza ultima inferiore a quella esibita dalle fibre di carbonio. In aggiunta, ulteriori svantaggi emergono nei confronti della durabilità negli ambienti alcalini e della risposta a lungo termine sotto carichi applicati [5-6]

Dalla fine degli anni 90, tra gli elementi in materiale composito, i materiali pultrusi sono quelli maggiormente utilizzati nel campo dell'ingegneria civile.

Essi, sono ottenuti per il tramite del processo di pultrusione che rende possibile la produzione di profili con sezione sia aperta che chiusa; l'unica limitazione è dovuta alla presenza di una sezione costante per tutta la lunghezza del profilo.

I profili pultrusi rinforzati con fibre di vetro (GFRP) presentano molti vantaggi, tra cui elevati rapporti tra rigidità, resistenza e peso, trasparenza magnetica, resistenza alla corrosione, e prodotti da un efficace processo di produzione.

Per tali caratteristiche, possono anche essere qualificati come materiali non soggetti a corrosione, con elevata resistenza meccanica ed un peso ridotto.

Negli ultimi anni, i materiali compositi sono stati utilizzati in numerose strutture civili, acquisendo un rilevante ruolo come elementi strutturali primari per applicazioni tra cui cavi, elementi di capriate, passerelle, pali dell'elettricità ad alta tensione e piccoli edifici [7-9].

Esempi di strutture pertinenti costituite da profili pultrusi comprendono una serie di ponti e passerelle pedonali, generalmente realizzati con una forma della sezione sia aperta che chiusa. Tra le più comuni sezioni ci sono i profili ad I-, L, H e profili tubolari.

All'inizio degli anni '80 si sono registrate le prime applicazioni di FRP in Cina. Al giorno d'oggi in questo Paese si contano numerosi ponti in materiale composito rinforzato, tra i quali i più importanti sono il ponte di Miyun a Pechino e il ponte Xiangyong di recente costruzione a Chengdu.

Lo stesso è accaduto negli USA, dove i ponti di maggior rilievo sono Creek Bridge Tom (1996), Clear Bridge Creek (1996), il ponte di Laurel Leccare (1997), il ponte Wickwire Run (1997), il Bentley Creek Bridge (2000) e il Deer Creek (2001).

In particolare, l'impalcato del ponte Deer Creek, poggiante su travi in acciaio, situato nello stato del Maryland (Stati Uniti d'America) è stato sostituito da un impalcato in materiale composito. Il peso del nuovo impalcato è diminuito del 40% rispetto a quello ottenuto per mezzo di un calcestruzzo convenzionale, con conseguente aumento della capacità di carico.

Applicazioni avanzate di tubi in materiale composito si possono trovare anche in Nord America, dove sono state proposte configurazioni ibride di FRP combinati con calcestruzzi alleggeriti per elementi curvi. Inoltre, sono anche stati utilizzati pali in materiale composito per installazioni marine.

In Europa, la prima applicazione (struttura) di materiale fibrorinforzato è stata realizzata tramite un sistema innovativo nato nel Regno Unito e denominato ACCS (Advanced Composite Construction System). L'ACCS sviluppato da Maunsells Structural Plastic Ltd è un esempio di metodo di collegamento, in cui le unità multi cellulari sono state montate per incastro dei lembi appartenenti alle singole unità. Tra le strutture più importanti ritroviamo ponti in Scozia, in Galles e in Inghilterra, in particolare il ponte Aberfeldy (1992), il ponte Bonds Mill Lift (1992), il ponte Bromley South (1992) ed il ponte del Parson (1995).

Il ponte Aberfeldy è stato il primo ponte sospeso realizzato interamente in materiale composito: l'impalcato e le colonne sono realizzate con i sistemi ACCS, mentre i cavi sono costituiti da fibra aramidica (Kevlar).

Impossibile non ricordare il ponte pedonale Fiberline a Kolding, in Danimarca, aperto il 18 giugno del 1997. Il ponte pedonale Fiberline è stato il primo del suo genere ad attraversare una linea ferroviaria. Tale linea è stata occupata soltanto per poche ore durante la notte per permettere i lavori di installazione. Il così breve tempo di installazione ha illustrato uno degli evidenti vantaggi dei materiali compositi.

Un'altra importante applicazione è il ponte pedonale composito Ooypoort che è stato aperto ufficialmente a Nijmegen, nei Paesi Bassi. La struttura è stata costituita puramente in materiale poliestere rinforzato con fibra di vetro. Con il suo arco di 56m è tra i più lunghi ponti nel mondo, in composito, caratterizzati da una singola campata.

Significativo è il ponte Lleida in Spagna con una luce di 38 m, costituito da una coppia di archi che attraversano una strada esistente e una linea ferroviaria ad alta velocità. Gli archi e le travi dell'impalcato longitudinale sono costituiti da una sezione trasversale cava rettangolare in FRP ottenuta da per il tramite di due profilati ad U uniti tra loro con due piastre piane incollate per formare un profilato tubolare rettangolare.

Altre applicazioni importanti di materiale composito nel campo dell'Ingegneria Civile riguardano edifici sperimentali.

I primi edifici ad un solo piano realizzati con profili in FRP hanno trovato impiego nell'industria elettronica come laboratori di prova ad interferenza elettromagnetica (EMI).

Due esempi importanti sono la Compaq Computer Corporation e l'edificio Apple Computer in California. In entrambi i casi la scelta è stata dettata dalla necessità di evitare possibili interferenze tra i campi elettromagnetici interni ed esterni.

Una delle più famose strutture interamente realizzata in composito è l'edificio Eyecatcher di cinque piani in GFRP eretto a Basilea, Svizzera nel 1998 per la Swiss Building Fair. Essa è anche la struttura più alta in FRP costruita fino ad ora.

In tutte queste strutture, i profili pultrusi non sono stati utilizzati nella loro forma originale ma sono stati uniti per formare sezioni complesse, non disponibili sul mercato.

Infatti, al fine di rendere i profili pultrusi più attraenti nel campo dell'edilizia, la maggior parte dei produttori producono profili che imitano i profili standard in acciaio (es I-, H-, C-, e profili angolari), ma nel campo della ricerca dei materiali compositi, la convinzione che questi profili, non siano caratterizzati da una geometria ottimale sta guadagnando gradualmente consenso. Considerando che le linee guida sviluppate per i materiali convenzionali non sono applicabili ai materiali in FRP, diversi documenti tecnici sono stati sviluppati o sono in via di sviluppo riguardanti formule e metodi di progettazione, proprietà dei materiali e fattori di sicurezza per gli elementi pultrusi.

Partendo dal Design Code Eurocomp e Handbook [11], pubblicato nel 1996, che ha fornito, per la prima volta, una guida pratica ed indipendente sulla progettazione strutturale di compositi polimerici.

In seguito, nel 2002, la EN 13706 [12] definì due differenti classi di materiali, associate ai valori minimi delle proprietà dei materiali. Anche se fornisce molte specifiche per i profili pultrusi, in questo documento nessun riferimento è fornito alla progettazione.

Nel 2007, il Consiglio Nazionale delle Ricerche italiano (CNR) ha pubblicato la prima guida italiana (DT 205/2007) per la progettazione e realizzazione di strutture in elementi pultrusi [13].

Nel 2011, l' American Society of Civil Engineers (ASCE) ha pubblicato i manuali (MOP) # 102 per la progettazione di connessioni composite [14].

Infine, il Comitato Tecnico 250 del CEN (Comité Européen de Normalization), responsabile per gli Eurocodici strutturali, ha nominato un gruppo specifico di lavoro (WG4: Fibre Reinforced Polymer Structurestrutture) al fine di redigere una relazione scientifica e tecnica per la progettazione e la verifica delle strutture interamente in materiale composito. Il rapporto, pubblicato di recente, rappresenta il primo passo verso un Eurocodice strutturale su questo tema e il suo obiettivo principale è quello di stimolare il dibattito sul tema delle strutture interamente realizzate in composito.

Lo stato attuale delle conoscenze ha permesso al WG4 di dare risposte a molte domande relative alla progettazione ed alla verifica di strutture in FRP.

In tutti questi documenti, gli elementi pultrusi possono essere considerati come materiale elastico lineare, omogeneo e trasversalmente isotropo nel caso di fibre allineate, con il piano di isotropia normale all'asse longitudinale (cioè l'asse di pultrusione) [15].

Il comportamento meccanico, in particolare nel caso di profili con sezione aperta, è fortemente influenzato da deformazioni da ingobbamento [16-17]. Inoltre, i bassi valori dei moduli di taglio (più o meno uguali ai valori della resina polimerica), accoppiati con la dipendenza dal tempo, possono provocare aumenti non trascurabili di inflessioni laterali, influenzando così il comportamento locale che globale. In particolare, una trave snella sottoposta a flessione intorno all'asse forte può curvare attraverso fenomeni che combinano torsione e flessione laterale della sezione trasversale, un fenomeno noto come instabilità flessionale-torsionale.

Di conseguenza, i profili in FRP esibiscono un comportamento complesso legato alla multi-interazione tra deformabilità a taglio, ingobbamento, rigidità torsionale e fenomeni a lungo termine.

Inoltre, i bassi valori del modulo di elasticità rendono spesso il principale stato limite quello di servizio e di stabilità inibendo il grande vantaggio dovuto all'elevata resistenza di FRP.

Per garantire l'affidabilità strutturale dei profili pultrusi, le proporzioni e la forma dei suddetti profili PFRP devono essere ottimizzati e progettati correttamente.

Poiché il processo industriale ottimizza la produzione di un numero limitato di sezioni, è difficile produrre forme complesse con costi bassi.

Di conseguenza, le sezioni convenzionali rappresentano un punto critico per la risposta meccanica in termini di deformazione, deformabilità e resistenza dello strato adesivo di tali elementi.

Il primo obiettivo della presente tesi è stato quello di sviluppare un modello meccanico innovativo, al fine di studiare il comportamento di elementi pultrusi con complessa (non convenzionale) forma della sezione trasversale in grado di tenere in conto la deformabilità a taglio, i fenomeni di ingobbamento e le possibili discontinuità in corrispondenza della connessione ala-anima.

Il modello sopra citato, è stato tradotto in un codice agli elementi finiti che studia il comportamento meccanico di possibili nuove forme della sezione trasversale riportato nella prima parte della presente tesi.

La tecnica migliore per unire insieme due profili in GFRP è senza dubbio l'incollaggio.

Questa scelta è motivata dal fatto che la tecnologia dell'adesione consente l'incollaggio riducendo il costo ed il peso delle strutture nonché limita elevate concentrazioni delle sollecitazioni, fenomeno tipico delle giunzioni bullonate, a causa della presenza di numerosi fori.

Inoltre, da questo punto di vista, la tecnica dell'incollaggio rappresenta un eccellente strumento per ottenere forme complesse in materiale composito.

Sebbene la tecnica dell'incollaggio è oggi una consuetudine, relativamente alla connessione di piastre pultruse e/o per l'incollaggio di lamine pultruse al calcestruzzo, muratura e all'acciaio [18-24], vi è una mancanza di conoscenza rispetto all'unione di due profili pultrusi per formare forme più complesse. Questa mancanza di conoscenza ha ispirato il secondo oggetto della presente ricerca, focalizzata sulla possibilità di realizzare un profilo in GFRP con una forma complessa della sezione trasversale, non disponibile sul mercato, con un costo inferiore rispetto alla stessa ottenibile per il tramite del processo di pultrusione, unendo un numero appropriato di semplici piatti rettangolari mediante una resina epossidica comune.

Sostanzialmente, l'idea è di individuare una strategia progettuale basata sulla modularità.

Ad esempio, un generico profilo ad I può essere ottenuto mediante l'incollaggio di tre pannelli rettangolari (l'ala superiore/inferiore ed il pannello dell'anima), piuttosto che per il tramite di un processo unico di pultrusione.

Per raggiungere questo scopo, è stata condotta una ampia campagna sperimentale seguita da un'ampia analisi numerica.

I risultati sono riportati nella parte II della presente tesi.

## REFERENCES

- [1] Advisory Committee on Technical Recommendations for Constructions, Italian National Research Council (2007) CNR DT205/2007. Guide for the Design and Construction of Structures made of FRP Pultruded Elements.
- [2] Canadian Standard Association (2002) CAN/CSA S806\_02-2002. Design and Construction of Building Components with fibre-reinforced polymers. Rexdale, Canada.
- [3] JSCE (1997). Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing Materials. Japan Society of Civil Engineering.
- [4] American Concrete Institute (2006) ACI 440.1R-06-2006. Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars.
- [5] Halliwell S M. Polymer composites in construction, BRE/DETR UK, BR405, Building Research Establishment, UK, 2000.
- [6] Borri A, Castori G, Corradi M, Speranzini E. Durability analysis for FRP and SRG composites in civil applications. *Key Engineering Materials* (2015): 624, 421-428.
- [7] Hollaway L.C. Applications of fibre-reinforced polymer composite materials. In *ICE manual of construction materials: Polymers and Polymer Fibre Composites*. London: Thomas Telford Limited, 2010, 109–127.
- [8] Bank L.C. *Composites for Construction—Structural Design with FRP Materials*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
- [9] Zhao L, Burguono R, Rovere H L, Seible F, Karbhari V. Preliminary evaluation of the hybrid tube bridge system. Technical Report No TR-2000/4–59A0032, California Department of Transportation. 2000.
- [10] Ascione F. *Modellazione di Giunti di FRP*. PhD thesis, Tor Vergata University, 2008.
- [11] Eurocomp design code and handbook. *Structural design of polymer composites*. The European Structural Polymeric Composites Group; 1996. ISBN 0419194509.
- [12] European Committee for Standardization (CEN). EN 13706: Reinforced plastics composites – Specifications for pultruded profiles. Part 1: Designation; Part 2: Methods of test and general requirements; Part 3: Specific requirements, Brussels: CEN; 2002.
- [13] Technical Document CNR-DT 205/2007. Guide for the design and construction of structures made of FRP pultruded elements. Rome: Italian National Research Council (CNR); 2008.
- [14] Mosallam A. S., *Design guide for FRP composite connections*. Manuals of Practice (MOP) 102. American Society of Civil Engineers (ASCE); 2011. ISBN9780784406120: 624.
- [15] *Methods of test and general requirements; Part 3: Specific requirements*. Brussels: CEN; 2002.
- [16] Lofrano, E., Paolone, A. & Ruta, G. (2013) A numerical approach for the stability analysis of open thin-walled beams. *Mechanics Research Communications*, 48, 76–86.

- [17] Pignataro, M., Ruta, G., Rizzi, N. & Varano, V. (2009) Effects of warping constraints and lateral restraint on the buckling of thin-walled frames. ASME 2009 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Volume 10: Mechanical Systems and Control, Parts A and B, Lake Buena Vista, Florida, USA, November 13–19, 2009
- [18] Chataigner S, Caron J F, Diaz A, Aubagnac C, Benzarti K. Non-linear failure criteria for a double lap bonded joint. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2010; 30: 10-20
- [19] Cognard J Y, Devaux H, Sohier L. Numerical analysis and optimization of cylindrical adhesive joints under tensile loads. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2010; 30: 706-719
- [20] Freddi F, Sacco E. Mortar joints influence in debonding of masonry element strengthened with FRP. *Key Engineering Materials* 2015; 624: 197-204
- [21] Carrara P, Freddi F. Statistical assessment of a design formula for the debonding resistance of FRP reinforcements externally glued on masonry units. *Composites Part B* 2014; 66: 65-82.
- [22] D’Aniello M, Portioli F, Landolfo R. Lap shear tests on hot-driven steel riveted connections strengthened by means of C-FRPS. *Composites Part B* 2014; 59C: 140-152.
- [23] Ascione F. Adhesive lap-joints: a micro-scale numerical investigation. *Mechanics Research Communications* 2010; 37:169-172.
- [24] Ascione F. A preliminary numerical and experimental investigation on the shear stress distribution on multi-row bolted FRP joints. *Mechanics Research Communications* 2010; 37:164-168.