

UTILIZZO MIRATO DI COMPOSITI IN FRP IN EDILIZIA E NELLA COSTRUZIONE DI PONTI

Thomas Keller

Istituto Federale Svizzero di Tecnologia di Losanna, EPFL
Laboratorio Costruzione Compositi CCLab, CH-1015 Losanna, Svizzera
thomas.keller@epfl.ch

SOMMARIO. *Quest'articolo riferisce sull'utilizzo mirato di compositi FRP in edilizia e nella costruzione di ponti. Nella costruzione di ponti si mostra che l'utilizzo di compositi FRP in sistemi ibridi associati a calcestruzzo o acciaio permette di progettare strutture economiche con un elevato grado di sicurezza, grazie alla ridondanza e alla duttilità dei sistemi. In edilizia, invece, si mostra come la possibilità di avere insieme trasparenza, illuminazione e colore, nonché la bassa conduttività termica dei compositi GFRP permettano di integrare le funzionalità architettoniche e fisico-edilizie in componenti strutturali. L'integrazione di queste funzioni permette di ridurre la quantità di componenti costruttivi, accorciando i tempi di costruzione e riducendo gli elevati costi per i materiali.*

1. INTRODUZIONE

I compositi polimerici rinforzati in fibra (FRP) vengono utilizzati sempre più frequentemente nelle strutture tecniche per le vantaggiose proprietà dei materiali che li compongono. Le applicazioni a scopo di rinforzo sono note e accettate universalmente. Sta però instaurandosi anche l'uso di componenti strutturali in FRP, come ad esempio stampi e sandwich pultrusi. Le applicazioni principali sono ponti pedonali e impalcati, dove sono ben accolti i vantaggi prodotti da questi materiali [1].

Le caratteristiche dei materiali compositi FRP che influiscono maggiormente sulla progettazione di strutture in FRP sono l'elevata resistenza specifica (elevato rapporto resistenza – peso unitario), l'anisotropia, la bassa rigidità delle fibre di vetro (GFRP), nonché la possibile traslucidità e la bassa conduttività termica del GFRP. L'elevata resistenza specifica e la bassa rigidità del GFRP influiscono in modo particolare sulla configurazione del sistema strutturale, mentre l'anisotropia e la friabilità influiscono soprattutto sulla composizione dei collegamenti. La friabilità dei compositi FRP è una caratteristica svantaggiosa per quanto riguarda l'accettazione delle strutture in FRP da parte degli ingegneri civili, soliti ad utilizzare materiali duttili come il ferro o il cemento armato. Ma anche le strutture in FRP possono essere duttili. La possibile traslucidità e la bassa conduttività termica del GFRP permette di integrare funzionalità architettonica e fisico-edilizia nei componenti strutturali. L'integrazione di queste funzioni permette di ridurre la quantità di componenti costruttivi, riducendo i tempi di costruzione e gli elevati costi dei materiali. In questo articolo si discutono brevemente, illustrandoli con esempi di alcuni progetti, i quattro costituenti sopra citati per utilizzo mirato dei compositi FRP: sistema strutturale, tecnologia di collegamento, duttilità e integrazione funzionale.

2. SISTEMA STRUTTURALE

2.1 Panoramica

Sulla progettazione concettuale di una struttura tecnica influiscono non solo le caratteristiche dei materiali, ma anche i componenti strutturali e i metodi di costruzione disponibili. La disponibilità stessa dei componenti strutturali dipende direttamente dalle tecnologie di lavorazione esistenti. Lo standard odierno mette a disposizione innanzitutto stampi GFRP pultrusi mono-dimensionali e cavi in fibre di carbonio (CFRP), nonché elementi sandwich GFRP bi-dimensionali. La limitatezza della scelta dei componenti limita anche le possibilità di progettazione di strutture in FRP. La costruzione di componenti non standardizzati risulta spesso non economica, a causa dell'elevato costo della manodopera (laminazione manuale) e delle ridotte quantità (elevato costo degli stampi). Sotto questo punto di vista risulta quindi fondamentale approfondire la fase di sviluppo di tecnologie di lavorazione mirate sui materiali, consentendo così lo sviluppo ed il successo in futuro di strutture in FRP [2]. Oltre a queste limitazioni attuali, è necessario considerare altri aspetti della configurazione di un sistema strutturale per strutture

in FRP. Questi aspetti sono innanzitutto dovuti in generale all'elevata resistenza specifica intrinseca dei compositi in FRP dal punto di vista generale, ed in particolare alla bassa rigidità dei compositi in GFRP.

2.2 Influenza dell'elevata resistenza specifica

Il rapporto tra peso proprio, g , e peso totale, $g+q$, (peso proprio più sovraccarico, q) di una struttura è chiamato rapporto di carico proprio, ω [3]:

$$\omega = \frac{g}{g+q} = k \cdot \frac{l}{l_{limit}} = k \cdot \frac{\gamma \cdot l}{f_u} \quad (1)$$

Il rapporto di carico proprio indica quanta resistenza viene impiegata per sopportare il peso proprio, e quanta resta disponibile per il sovraccarico. Questo stesso rapporto può essere espresso tramite il rapporto intervallo, l , su lunghezza limite l_{limit} , dove la lunghezza limite corrisponde alla resistenza specifica, f_u , divisa per il peso unitario, γ . La costante k dipende dalle condizioni dei limiti. La configurazione possibile di un sistema strutturale dipende da questo rapporto di carico proprio. Per strutture con rapporti di carico proprio superiori a circa 0,5 ($\omega > 0,5$) si possono utilizzare sistemi a forma attiva con bassa resistenza alla flessione, come sistemi di cavi, archi o gusci. Il peso proprio è sufficientemente alto da permettere la stabilizzazione della forma strutturale rispetto ai sovraccarichi variabili, come illustrato nella Fig. 1 sulla sinistra. Se il peso proprio è troppo piccolo ($\omega < 0,5$), come è tipico nel caso di strutture di peso leggero, la forma diventa instabile (Fig. 1, caso centrale). Sistemi idonei per tali strutture sono sistemi a sezione attiva, con elevata resistenza alla flessione, quali fasci o gabbie. Ma per strutture leggere si possono utilizzare anche sistemi a forma attiva, ammesso che la forma venga stabilizzata con ulteriori elementi, ad esempio zavorratura o precompressione [3]. Nella Fig. 1 sulla destra è illustrato un concetto di precompressione. La precompressione può essere considerata come un ulteriore peso proprio, Δg , che aumenta il fattore di carico proprio. Strutture di peso leggero di questo tipo sono strutture con membrana precompressa con curvatura opposta. Un ulteriore esempio è illustrato nella Fig. 7.

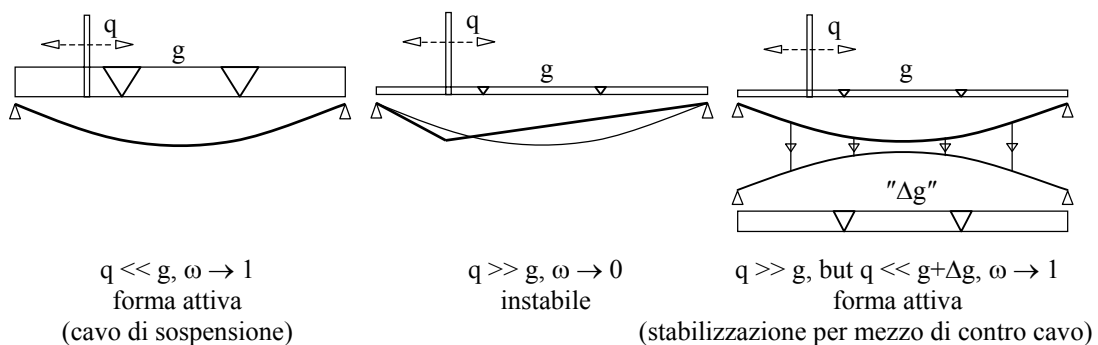


Figura 1: Stabilizzazione di sistemi a forma attiva di peso leggero [3]

La Tabella 1 riporta i sistemi a forma attiva particolarmente idonei per strutture in cemento armato. L'utilizzo di tali sistemi per strutture in acciaio

spesso risulta difficoltoso. Le strutture in FRP, tuttavia, hanno spesso fattori di carico proprio molto bassi, quindi dei sistemi a forma attiva possono essere idonei solo adottando ulteriori misure di stabilizzazione della forma. Poiché i sistemi a forma attiva richiedono una quantità molto inferiore di materiale rispetto ai sistemi a sezione attiva, risulta particolarmente interessante il loro utilizzo per strutture in FRP, in considerazione dell'elevato costo del materiale dei compositi FRP. È tuttavia necessario avere già considerato nel progetto concettuale la stabilizzazione della forma. In numerose passerelle pedonali sospese e su cavo costruite in compositi FRP trova conferma il fatto di dover ricorrere in seguito ad un ulteriore zavorramento per garantire la stabilizzazione della struttura.

Materiale	Cemento	Ferro	FRP
Lunghezza limite, l_{limite} [km]	1-2	4-7	20-200
Fattore di carico proprio, ω	0.5-0.8	0.3-0.6	0.1-0.4
Sistemi a forma attiva	idoneo	dipende da caso a caso	necessità di provvedere alla stabilizzazione

Tabella 1: Influenza delle caratteristiche del materiale sul sistema strutturale [3]

3. TECNOLOGIA DI COLLEGAMENTO

3.1 Legame adesivo

Il collegamento di componenti strutturali in FRP è difficoltoso a causa dell'anisotropia e della fibrosità e friabilità dei materiali. La prassi attuale prevede l'utilizzo di collegamenti bullonati, che nella maggior parte dei casi producono un notevole sovradimensionamento dei componenti. Per materiali FRP [4] risulta molto più idoneo un legame di tipo adesivo. Rispetto alla giunzione bullonata, i giunti adesivi sono molto più rigidi (vedi Fig. 6). Questo dato è importante per una progettazione di strutture in GFRP in cui si richiede un'attenta analisi della rigidità. Il trasferimento del carico, inoltre, risulta più uniforme e con minori concentrazioni di tensione rispetto a quanto si verifica con i giunti bullonati. Le parti aderenti non vengono danneggiate da fori, che potrebbero fornire via di accesso all'umidità, compromettendo la durata del sistema. D'altro canto però, i giunti adesivi sono sensibili ai carichi eccentrici (sollecitazione di delaminazione). La preparazione superficiale e il processo di applicazione degli adesivi rappresentano inoltre un'ulteriore sfida. Attualmente non esistono possibilità di eseguire dei controlli di qualità semplici e non distruttivi. In una struttura tecnica composta da componenti in FRP e giunti adesivi, non si può quindi escludere un danneggiamento imprevisto di un giunto bullonato; tale evenienza deve dunque rientrare nel concetto strutturale.

3.1 Aspetti della progettazione

In linea generale, la capacità di portanza del carico di giunti bullonati o legati è inferiore alla capacità dei componenti in FRP coinvolti. Poiché sia i giunti bullonati, sia i giunti legati trasferiscono le forze assiali dei componenti attraverso meccanismi di taglio, la capacità dei giunti può essere aumentata aumentando il numero di strati dei componenti che partecipano al trasferimento del carico. Da tale concetto sono nate le strutture multi-strato illustrate nelle Figure 2, 5 e 11. Poiché le forme pultruse sono particolarmente sensibili alle sollecitazioni a tensione su tutto il loro spessore, nei giunti con legame adesivo è necessario ridurre al minimo le eccentricità e dare una forma simmetrica ai giunti stessi. Come già descritto nel paragrafo precedente, non si può escludere il cedimento imprevisto di un giunto legato, fatto che deve quindi essere tenuto presente nella fase concettuale della strutturazione. Strutture di questo tipo, dunque, devono essere progettate in ridondanza. È necessario ricorrere a sistemi staticamente indeterminati o sistemi di back-up.

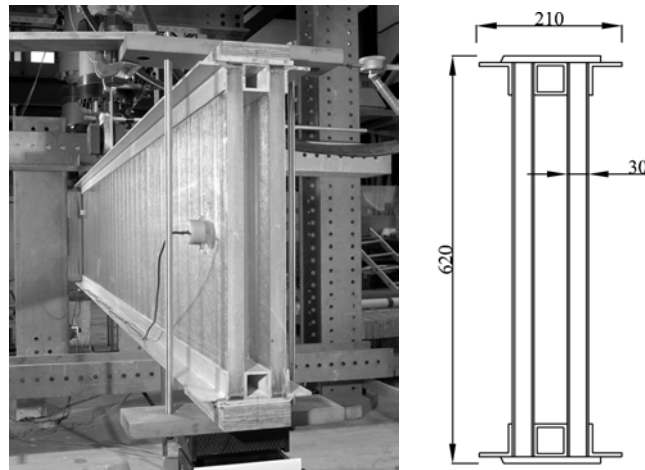


Figura 2: Trave legata ottenuta da sandwich traslucidi e forme pultruse [5]

I giunti di componenti FRP presentano ovviamente numerosi problemi; si rende quindi necessario adottare una strategia di progettazione che riduca al massimo il numero di giunti da inserire. A tal proposito, le barre longitudinali ottenute da forme pultruse, illustrate, ad esempio, in Fig. 5, non sono sistemi strutturali idonei per compositi FRP. Travi come quelle illustrate in Fig. 2 presentano, invece, caratteristiche molto più vantaggiose. Queste strutture sono composte da tessuti sandwich continui con flangie adesive ottenute da forme pultruse. Diversamente da quanto si verifica in parecchi giunti con trasferimento di carico molto concentrato sulle corde della struttura portante, il trasferimento del carico da tessuto a flangia che si verifica nelle travi sandwich è continuo e mostra solo piccole tensioni di taglio dovute all'ampiezza delle superfici di legame; sono così evitate sollecitazioni di delaminazione [5]. Nelle Figure 7 e 8 è illustrato lo stesso concetto di superfici con legame continuo su tutta la lunghezza della trave.

4. DUTTILITÀ

Uno degli svantaggi che presentano i compositi FRP è l'assenza di duttilità del materiale. I materiali duttili permettono una redistribuzione vantaggiosa delle forze interne correlata ad un aumento della sicurezza strutturale, una dissipazione dell'energia derivante da azioni di impatto o sismiche, nonché la possibilità di prevedere un possibile problema strutturale dovuto a ampie deformazioni plastiche o inelastiche prima del cedimento. Per ovviare all'assenza di duttilità del materiale con cui sono formati i componenti friabili in FRP, si può fornire duttilità al sistema strutturale. La duttilità del sistema in tale contesto può dunque includere due diversi concetti secondari diversi: duttilità e pseudo-duttilità, vedi Tabella 2 [6].

I concetti di duttilità comprendono a loro volta combinazioni di componenti o collegamenti strutturali "friabili" e "duttili" al livello del sistema. Ne sono esempi gli impalcati in GFRP legati con adesione a travi di acciaio illustrati nella Fig. 8. Pseudo-duttilità è il termine utilizzato per il comportamento delle combinazioni di componenti o collegamenti strutturali "friabili" e "friabili". Un comportamento di deformazione a carico non lineare e inelastico, che mostra una rigidità decrescente al crescere del carico, simile al comportamento di strutture duttili, può essere ottenuto tramite un cedimento progressivo di componenti o collegamenti friabili. Per prevenire il collasso strutturale è comunque necessaria la ridondanza strutturale. Un comportamento di deformazione a carico non lineare e inelastico comparabile può verificarsi anche a livello dei componenti in presenza di un aumento non lineare e inelastico della deformazione, causato da cedimenti interni progressivi.

Duttilità del sistema		Ridondanza del sistema	
Concetti	Descrizione	Concetti	Descrizione
Duttilità	Combinazione di componenti o collegamenti friabili/duttili	Ridondanza strutturale (sistemi staticamente indeterminati)	Sistemi con vie di carico alternative, sistemi di back-up
Pseudo-duttilità	Combinazione di componenti o collegamenti friabili/friabili	Ridondanza trasversale	Sezioni trasversali multi-componente

Tabella 2: Duttilità e ridondanza del sistema – panoramica [6]

Analogamente alla duttilità a livello del sistema, di seguito si propone e discute il termine ridondanza del sistema, considerato come un requisito di un comportamento pseudo-duttile. La Tabella 2 offre anche una panoramica dei possibili concetti secondari di ridondanza del sistema. Si deve differenziare tra ridondanza strutturale (sistemi staticamente indeterminati) e ridondanza trasversale. In caso di cedimento di un componente o di un collegamento, i sistemi staticamente indeterminati permettono il ricorso a vie di carico alternative. Un esempio può essere la struttura portante del ponte pedonale di Ponteresina illustrato nella Fig. 5. L'aggiunta di bulloni ai giunti adesivi fornisce inoltre un

sistema di back-up meccanico. Il secondo concetto di ridondanza, la cosiddetta ridondanza trasversale, è presente in sezioni trasversali multi-componente. Esempi di tale concetto sono le travi sandwich con flangie collegate con legame adesivo o le sezioni residenziali del Eyecatcher Building (Figg. 5 e 11). In questi esempi, possono venire a cadere singoli componenti trasversali o il legame adesivo tra i singoli componenti, senza causare il cedimento dell'intera sezione.

5. INTEGRAZIONE FUNZIONALE

I materiali compositi FRP presentano delle caratteristiche che non sono presenti nei materiali tradizionali, come l'acciaio o il calcestruzzo. Tali caratteristiche permettono di integrare la funzione strutturale dei componenti edilizi con ulteriori funzioni. L'integrazione di queste funzioni permette di ridurre la quantità di componenti costruttivi, abbreviando i tempi di costruzione e gli elevati costi per i materiali. Nei paragrafi seguenti sono descritte di possibilità di integrazione funzionale.

5.1 Involucro edilizio mono-strato

La possibilità di avere insieme trasparenza, traslucidità, illuminazione e colore, nonché la bassa conduttività termica dei compositi GFRP permettono di integrare le funzionalità architettoniche e fisico-edilizie in componenti strutturali. Diversamente dai materiali tradizionali, il GFRP non forma ponti termici. Questa caratteristica permette di integrare la struttura portante e l'involucro edilizio isolante in un involucro strutturale mono-strato funzionalmente integrato. Nella Fig. 2 è illustrata una trave traslucida con la possibilità di integrare il sistema di illuminazione [5]. Nella Fig. 12, inoltre, è illustrato uno studio di progetto di una torre in FRP, dove l'involucro mono-strato racchiude i cinque alberi sollevatori portanti [7]. Nel 2006 è stato costruito per il Novartis Entrance Building di Basilea un tetto in sandwich GFRP multifunzionale. La struttura del tetto vede integrate le funzioni strutturale, fisico-edilizia e architettonica, come illustrato nella Fig. 13.

5.2 Resistenza al fuoco di strutture in FRP e climatizzazione

È stato sviluppato un concetto di componenti edili (pareti e pavimenti) che integra le funzioni di supporto strutturale, resistenza al fuoco e climatizzazione. I componenti portanti sono formati da una struttura cellulare in FRP con laminati sulle facce esterne e tessuti all'interno. Facendo circolare acqua attraverso le celle interne dei pannelli di pareti e pavimento, l'acqua riscaldata viene allontanata rapidamente dalla zona soggetta al fuoco. Le Figure 3 e 4 illustrano un esperimento di questo tipo eseguito su un pannello di pavimentazione a due celle con matrice in poliestere [8]. Un flusso d'acqua modesto di soli 0,22 litri/secondo è stato sufficiente a mantenere per due ore la temperatura sul lato freddo del laminato esposto al fuoco, spesso soli 16 mm, al di sotto della temperatura di transizione vetrosa (80°C), mentre il lato caldo raggiungeva circa i 1050°C.

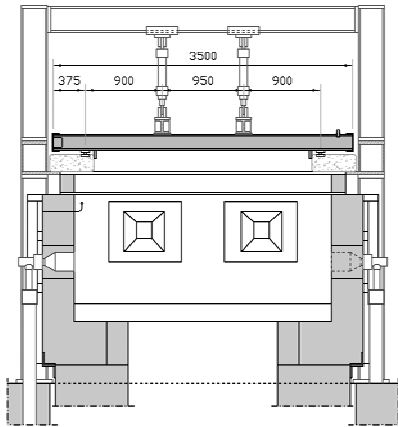


Figura 3: Esperimenti con installazione anti-incendio con raffreddamento ad acqua [8]

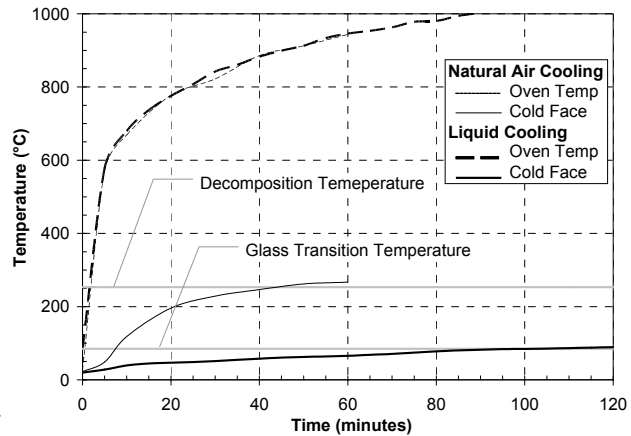


Figura 4: Effetto del raffreddamento ad acqua [8]

La temperatura dell'acqua è aumentata solo di 30°C. Questo sistema anti-incendio può essere utilizzato anche come sistema di climatizzazione. In condizioni normali, la rete di celle presente nelle pareti e nei pavimenti è perfettamente idonea a riscaldare e rinfrescare un edificio.

6. ESEMPI CON L'IMPIEGO DEL CCLAB

6.1 Ponte pedonale di Ponteresina, interamente in FRP

Descrizione:	Ponte pedonale, campate 2 x 12,5 m, uso temporaneo in inverno.
Forma strutturale:	Barre longitudinali ottenute da forme pultruse, grado di snellezza/9,5 (Fig. 5)
Tecnologia di collegamento:	Giunti epossidici in una campata, forma stratificata
Duttilità e ridondanza:	Comportamento pseudo-duttile: Ridondanza del sistema dovuta a diagonali incrociati e componenti stratificati, bulloni di back-up in giunti legati.
Integrazione funzionale:	Corde a struttura portante nella parte alta con funzione di mancorrente.
Bibliografia:	[9].



Figura 5: Ponte di Ponteresina interamente in FRP, 1997

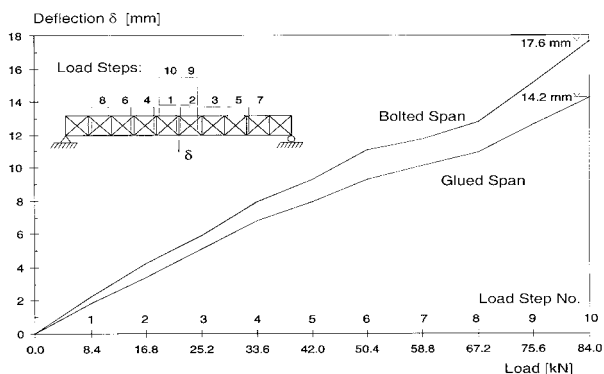


Figura 6: Rigidità di campata bullonata e legata

6.2 Sistema di ponte modulare interamente in FRP

Descrizione:	Sistema di ponte modulare pedonale per campate fino a 50 m e larghezza fino a 4 m.
Forma strutturale:	Travi ottenute da forme e sandwich in GFRP poltrusi (vedi Fig. 2), sotto-rinforzato con cavi CFRP, stabilizzazione di forma con contro-cavi (Fig. 7)
Tecnologia di collegamento:	Collegamenti con giunzione epossidica tra tessuti sandwich e flangie di forme pultruse (Fig. 2)
Duttilità e ridondanza:	Comportamento pseudo-duttile: Ridondanza del sistema tramite sistema staticamente indeterminato (i cavi possono cadere), ridondanza trasversale tramite sezioni trasversali multi-componente.
Integrazione funzionale:	Funzioni statica e architettonica: Travi sandwich traslucide con illuminazione integrata.
Bibliografia:	[9].

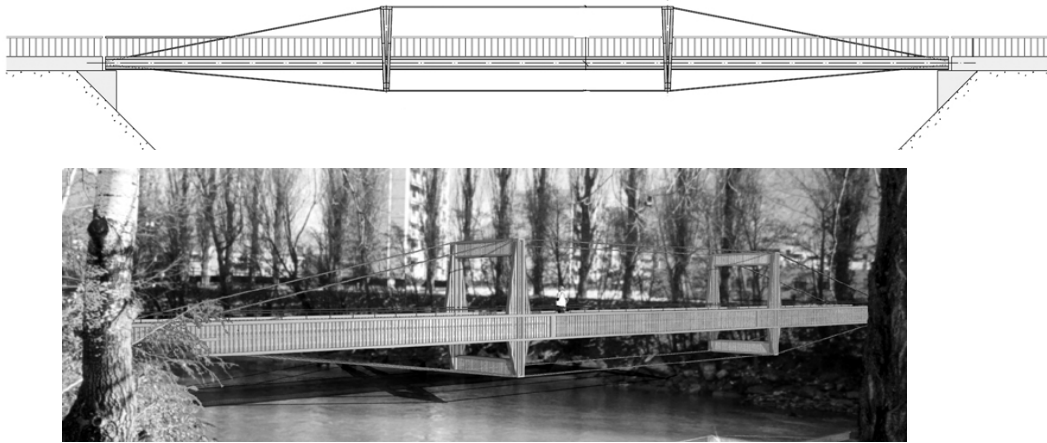


Figura 7: Sistema di ponte pedonale modulare interamente in FRP (studio di progetto).

6.3 Ponti stradali ibridi-FRP

Descrizione:	Ponti ibridi ottenuti da coperte in GFRP e travi in acciaio (Fig. 8).
Forma strutturale:	Campata singola e travi ibride continue.
Tecnologia di collegamento:	Collegamenti con giunzione epossidica tra coperte e travi in acciaio forniscono azione composita totale
Duttilità e ridondanza:	Comportamento duttile: cedimento copertura per snervamento di travi di acciaio, ridondanza trasversale in caso di cedimento del legame.
Integrazione funzionale:	Copertura in GFRP che agisce come parte della corda superiore della trave ibrida.

Bibliografia: [10].

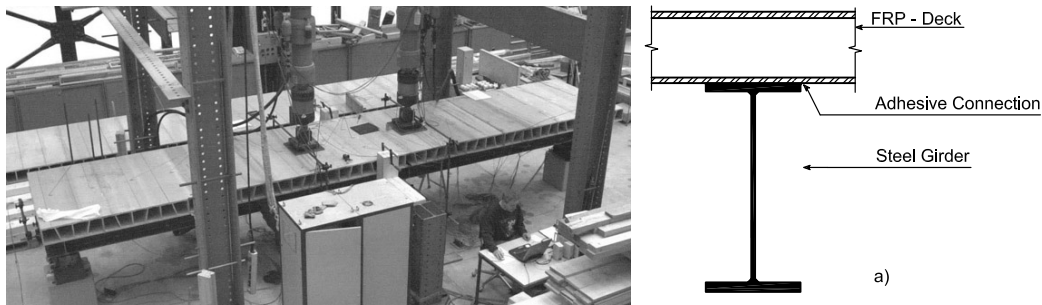


Figura 8: Copertura ibrida in GFRP / trave ponte in acciaio [10]

6.4 Elemento con trasferimento di carico ibrido-GFRP

- Descrizione: Elementi termoisolante con trasferimento di carico per strutture in calcestruzzo.
- Forma strutturale: Unità compressa con tre celle pultruse e piastre di copertura (Fig. 9 e 10).
- Tecnologia di collegamento: Piastre di copertura giuntate con legame epossidico all'unità in GFRP pultruso.
- Duttilità e ridondanza: Comportamento duttile: Cedimento del calcestruzzo per snervamento delle barre di acciaio.
- Integrazione funzionale: Il giunto ibrido GFRP/acciaio riduce del 35% il trasferimento del carico termico nel giunto rispetto a un giunto interamente in acciaio.

Bibliografia: [11].

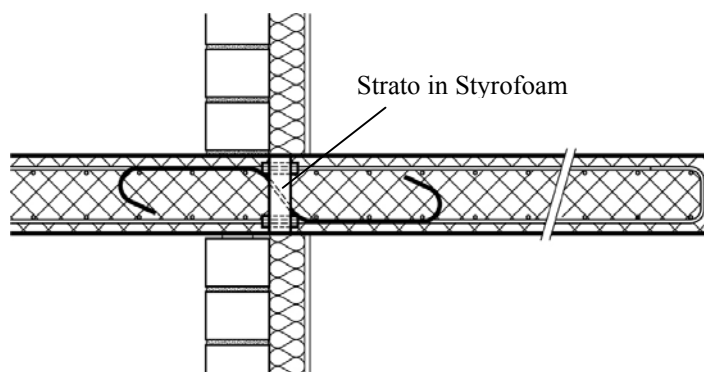


Figura 9: Giunto interamente in acciaio con strato in Styrofoam. FRP/acciaio [11]



Figura 10: Giunto ibrido FRP/acciaio

6.5 Eyecatcher Building in ibrido-FRP

Descrizione:	Edificio a cinque piani, alto 15 metri, il più alto edificio in GFRP del mondo.
Forma strutturale:	Intelaiatura in forme di GFRP pultruse, sandwich facciata in GFRP con funzione portante secondaria (Fig. 11).
Tecnologia di collegamento:	Sezioni trasversali residenziali con giunzione epossidica, struttura stratificata (Fig. 11).
Duttilità e ridondanza:	Comportamento pseudo-duttile: Ridondanza del sistema tramite sistema stratificato, ridondanza trasversale tramite sezioni trasversali multi-componente.
Integrazione funzionale:	Funzioni statica, architettonica e fisico-edilizia: Le intelaiature in GFRP della facciata non formano ponti termici, facciate in materiale sandwich traslucido, altamente isolanti, riempite con aerogel.
Bibliografia:	[5, 7].

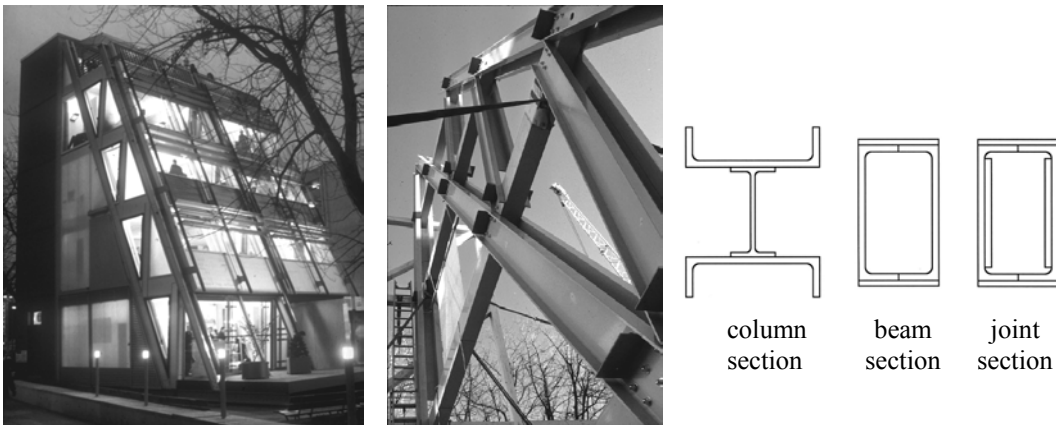


Figura 11: Eyecatcher Building con intelaiature in GFRP e sezioni legate, 1999 [7]

6.6 Dock Tower interamente in FRP

Descrizione:	Edificio in FRP di 36 piani, alto 108, sezione circolare di 27 m di diametro (Fig. 12).
Forma strutturale:	Struttura in FRP con celle interne e involucro edilizio esterno mono-strato.
Tecnologia di collegamento:	Collegamenti e giunti con legame adesivo duttile.
Duttilità e ridondanza:	Duttilità del sistema ottenuta tramite adesivi duttili, ridondanza del sistema ottenuta tramite sezioni multi-componente e sistema staticamente indeterminato.

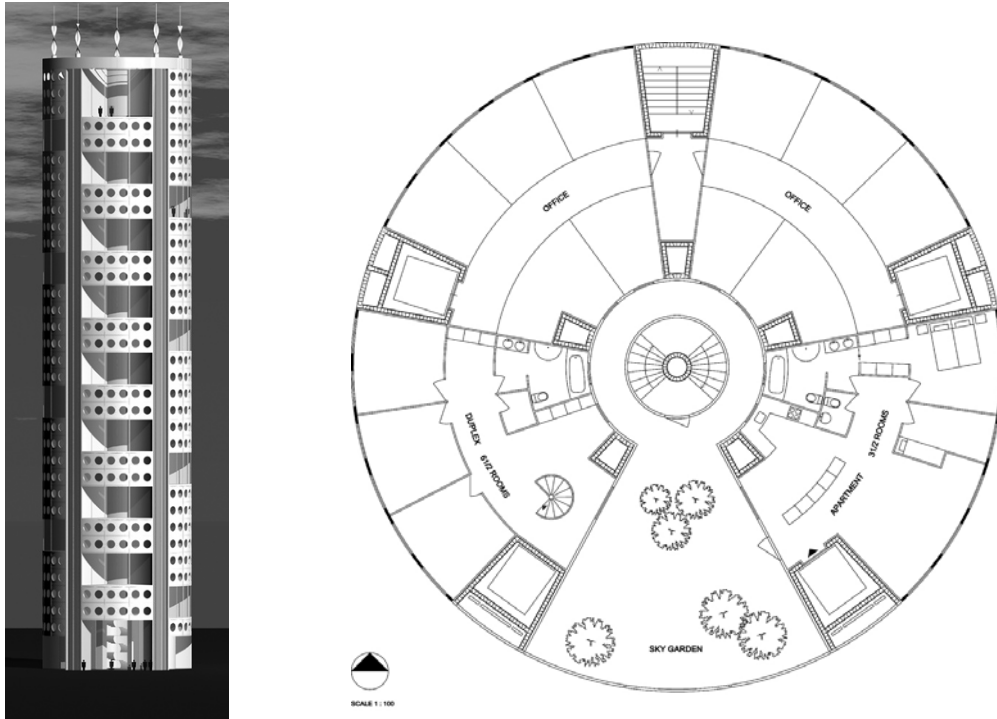


Figura 12: Dock Tower (studio di progetto) [7]

Integrazione funzionale: Integrazione di funzioni statica, anti-incendio, climatizzazione in struttura interna a celle in GFRP: l'acqua circolante nelle celle fornisce la sicurezza anti-incendio e serve anche per riscaldare e rinfrescare l'edificio.
Integrazione delle funzioni statica, architettonica e fisico-edilizia in involucro mono-strato: sandwich traslucidi riempiti con aerogel con funzione di rinforzo statico.

Bibliografia: [7].

6.7 Tetto in sandwich interamente in FRP del Novartis Campus Entrance Building

Descrizione: Tetto leggero di 21,6 x 18,5 m, supportato solo da quattro pareti di vetro (Fig. 13).

Forma strutturale: Lastra sandwich centrale a celle in GFRP di profondità variabile

Tecnologia di collegamento: Collegamenti con giunzione epossidica.

Duttilità e ridondanza: Comportamento pseudo-duttile dovuto a cedimento progressivo.

Integrazione funzionale: Integrazione di funzioni strutturali (lastra tetto, stabilizzazione facciata), funzioni fisico-edilizie

(isolamento termico, acustica) e funzioni architettoniche (forma complessa, colore e aspetto superficiale).



Figura 13. Edificio Novartis, assemblaggio del tetto in cantiere

7. CONCLUSIONI

La progettazione di strutture ibride con FRP o interamente in FRP deve tenere conto delle caratteristiche specifiche dei materiali che vanno a comporre il FRP. In questo articolo si discute dei quattro elementi che rientrano nella progettazione – sistema strutturale, tecnologia di collegamento, duttilità e integrazione funzionale – in riferimento all'utilizzo mirato di compositi FRP. La leggerezza delle strutture in FRP influisce sulla configurazione del sistema strutturale. Sistemi di forma attiva, come sistemi in sospensione, su cavi, ad archi o gusci, evidenziano un basso consumo di materiale, ma richiedono una stabilizzazione per resistere ai carichi vivi variabili. Per quanto riguarda i giunti tra i componenti, una tecnologia di collegamento efficace per i compositi in FRP risulta essere quella del legame adesivo. Una composizione multi-strato e con giunto simmetrico è in grado di aumentare in modo notevole la resistenza del giunto. Le strutture in FRP con giunti adesivi devono però essere ridondanti, al fine di garantire la prevenzione del collasso strutturale in caso di cedimento dei giunti. L'assenza di duttilità del materiale di compositi in FRP può essere compensata introducendo una duttilità di sistema di strutture interamente in FRP o utilizzando strutture ibride FRP combinate con materiali duttili. In conclusione, le strutture in FRP possono sfruttare l'elevato grado di integrazione funzionale che non è invece offerto dai materiali tradizionali. Nei componenti strutturali si possono integrare funzioni architettonica, fisico-edilizia e anti-incendio.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Keller, T., *Use of fibre reinforced polymers in bridge construction*, Structural Engineering Documents, No. 7, IABSE, Zurich, Switzerland, 2003, 131 pp.
- [2] Dooley, S., *The development of material-adapted structural form*, doctoral thesis EPFL-CCLab, No. 2986, 2004.
- [3] Keller, T., “Struktur und Form im Kontext der Materialisierung”, *Dokumentation D 0160*, Schweizer Ingenieur und Architekt, 1999, pp. 55-59.
- [4] Vallée, T., *Adhesively bonded lap joints of pultruded GFRP shapes*, doctoral thesis EPFL-CCLab, No. 2964, 2004.
- [5] Keller, T., de Castro, J., Schollmayer, M., “Development of adhesively bonded GFRP sandwich girders”, *Journal of Composites for Construction*, 8/5, 2004.
- [6] De Castro, J. *System ductility and redundancy of FRP structures with ductile adhesively-bonded joints*, doctoral thesis EPFL-CCLab, No. 3214, 2005.
- [7] Keller, T., “Fiber reinforced polymers in building construction”, *Symposium Towards a Better Built Environment*, International Association for Bridge and Structural Engineering IABSE, ISBN 3-85748-107-2, Melbourne Australia, 2002.
- [8] Tracy, C., *Fire endurance of multicellular panels in an FRP building system*, doctoral thesis EPFL-CCLab, No. 3235, 2005.
- [9] Keller, T., “Influences of advanced composite materials on structural concepts for bridges and buildings”, *The 3rd International Conference on Composites in Infrastructure ICCI'02*, San Francisco, 2002.
- [10] Gürtler, H., *Composite action of FRP bridge decks adhesively bonded to steel main girders*, doctoral thesis EPFL-CCLab, No. 3135, 2005.
- [11] Riebel, F., *Structural behavior and durability of multifunctional fiber-reinforced polymer components*, doctoral thesis EPFL-CCLab, No. 3695, 2006.

