

Nel campo del recupero di parti ed elementi strutturali, la tecnologia dei materiali compositi fibrorinforzati rappresenta, ormai da alcuni anni, un'efficace alternativa alle convenzionali tecniche di intervento di rinforzo in virtù delle elevate prestazioni di resistenza meccanica e di salvaguardia dei caratteri architettonici e spaziali degli edifici. L'impiego di materiali compositi fibrorinforzati, caratterizzati da un'elevata resistenza meccanica unita a una notevole versatilità di impiego, ha contribuito a indirizzare il progetto di recupero del patrimonio costruito - con particolare riferimento agli edifici in muratura e in c.a. - verso modalità operative in cui prevalgono le logiche del basso impatto e della leggerezza.

tecnologiche dei settori di provenienza.

I processi di adeguamento al contesto delle costruzioni hanno fatto propria la possibilità di intervenire con una progettazione mirata (tailor made) in modo da rispondere a specifiche prestazioni e a determinate condizioni contestuali di intervento. Ciò si è reso possibile grazie alla tipologia di sistemi costituiti da materie lavorate e semilavorati (tessuti, lamine, barre e matrici) che, per il loro basso grado di complessità, risultano idonei a garantire caratteristiche di flessibilità, adattabilità e dematerializzazione.

Il principio di funzionamento dei materiali compositi fibrorinforzati si fonda sulla sinergia tra due elementi di base: il rinforzo e la matrice. Le diver-

RINFORZI... ALTERNATIVI

Importati dal settore aeronautico, i compositi fibrorinforzati si fondano sull'azione integrata di matrici e rinforzi combinati ad hoc a seconda dell'impiego. Innovazione e sperimentazione

Valeria D'Ambrosio

Tale tecnologia nasce da settori a tecnologia avanzata come quello aerospaziale e aeronautico e l'approdo al settore edilizio è avvenuto per trasferimento tecnologico con l'obiettivo di "importare" materiali con elevate prestazioni strutturali e di applicarli nel recupero di strutture esistenti. Il processo di adattamento alle problematiche e alle caratteristiche del settore edilizio è stato caratterizzato da continue sperimentazioni, studi di compatibilità, verifiche di adesione e resistenza che hanno indotto procedure operative e progettuali di carattere innovativo, radicalmente differenti sia dalle tecniche di origine sia dalle prassi consolidate nel recupero edilizio. Si sono attuati processi di adattamento caratterizzati da significative innovazioni di prodotto e di processo per il fatto di aver dovuto concepire integrazioni, tipologie di prodotti, sequenze operative, modalità di cantierizzazione ed altre azioni tecniche del tutto nuove rispetto alle applicazioni



In alto, computer models of fiber-reinforced polymer composites used in automotive structures. Top image shows deposited fibers with void space shown as spheres, and bottom image shows void space only.
Sopra, 2 Fiber Reinforced Polymer Repair of Aluminum Overhead Sign Structures.

Fibra di carbonio + resina epossidica

Intervento di consolidamento delle travi a vista di un solaio in legno. La necessità di realizzare un intervento non visibile ha indirizzato la scelta progettuale verso l'impiego di barrette in fibra di carbonio inserite lateralmente alla trave e sigillate con resina epossidica, applicando all'estradosso della trave un profilato pultruso con connettori metallici (progetto Riccardo Vetturini, Perugia).



se caratteristiche del rinforzo (fibre di carbonio, aramide o vetro, fibre metalliche) incidono sulla resistenza meccanica del composito mentre la matrice (organica o inorganica) garantisce la protezione delle fibre e l'adesione al supporto. Le applicazioni iniziali hanno visto l'affermazione della tecnologia FRP – Fiber Reinforced Polymer – basata su matrice organica (resine epossidiche) e su rinforzi prevalentemente in fibre di carbonio, capaci di offrire maggiori garanzie dal punto di vista strutturale per le prestazioni meccaniche particolarmente elevate.

Nel mondo della produzione e della ricerca applicata, l'attenzione si è successivamente spostata dal prevalente impiego delle fibre di carbonio abbinate a matrici epossidiche alla possibilità di integrare fra loro altri tipi di rinforzi e matrici, basandosi sulle potenzialità intrinseche della progettazione "su misura" propria dei materiali compositi fibrorinforzati e rendendo più versatile la

tecnologia dal punto di vista prestazionale e applicativo.

Le più recenti sperimentazioni sono orientate a valutare le combinazioni di matrici e rinforzi unitamente all'evoluzione delle tecniche realizzative in funzione di risposte differenziate che tengono conto di più variabili, riferite alla compatibilità con i supporti, a specifici impieghi strutturali (duttilità, resistenza meccanica, dissipazione di energia derivante da azioni sismiche), alla reperibilità dei materiali sul mercato, ai costi, alle prestazioni di durabilità, traspirabilità, affidabilità e resistenza al fuoco, reversibilità, nonché alle capacità tecniche delle imprese di costruzione e alle modalità di cantierizzazione.

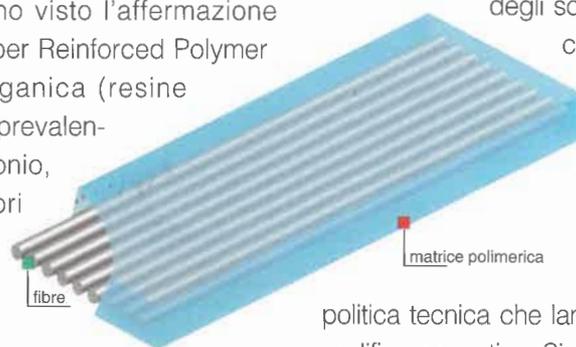
Le spinte all'innovazione: perfezionare la tecnologia e innovare i prodotti

Numerosi segnali – ampliamento del mercato, avanzamento della ricerca, evoluzione del quadro normativo, sviluppo di programmi di calcolo, coinvolgimento del mondo della ricerca, di professionisti e imprese, ecc. – indicano quanto la tecnologia dei materiali compositi fibrorinforzati sia in fase di crescita, anche per la maggiore consapevolezza sulle indubbe qualità espresse rispetto ad altre tecniche – acciaio, c.a. - convenzionalmente utilizzate negli interventi di recupero delle strutture portanti. Con l'impiego degli FRP nel recupero si è assistito a una prima fase di introduzione sul mercato di tecnologie basate sull'uso di lamine e tessuti in fibra di carbonio e di matrici epossidiche applicate con modalità quasi analoghe in edifici con caratteristiche costruttive fra loro diverse, quali gli edifici in muratura e quelli in c.a. In tale periodo, riconducibile alle applicazioni degli scorsi anni, i sistemi sono stati

caratterizzati da poche varianti, alti costi, ancora limitate e poco diffuse conoscenze tecnologiche da parte della maggior parte dei soggetti del processo edilizio, in un contesto di

politica tecnica che lamentava la mancanza di una codifica normativa. Si sono così delineate le numerose potenzialità della tecnologia in un contesto produttivo e progettuale ancora in embrione, che richiedeva lo sviluppo di ulteriori conoscenze e modalità di controllo tecnico per passare a uno stadio di diffusione della tecnologia.

L'attuale ingresso in una fase di crescita della tecnologia dei materiali compositi fibrorinforzati applicati al recupero delle strutture vede in prima istanza la



Rappresentazione schematica di un composito costituito da una matrice in resina e da un rinforzo costituito in fibre di carbonio (BASF).

stabilizzazione e il rafforzamento delle posizioni della tecnologia basata sugli FRP, attraverso una maggiore penetrazione nel mercato. Entro tale scenario vanno inquadrati le innovazioni e specializzazioni che ne perfezionano e specializzano le applicazioni, come per esempio i sistemi di ancoraggio e di connessione per l'affidabilità dei rinforzi che utilizzano nuovi semilavorati quali fiocchi e pioli al fine di evitare fenomeni di delaminazione. Su un altro versante del prodotto e di sistema consentono di sviluppare applicazioni prevalentemente sperimentali, introducendo nuove concezioni di intervento accanto a nuovi abbinamenti tra i materiali. Si perseguono in tal modo una linea di microinnovazioni proprie dei materiali compositi, attuate cioè alla piccola scala e in termini di elevati livelli prestazionali a fronte di apporti materici contenuti e soprattutto "nascosti".

Alla segmentazione della tecnologia dei compositi fibrorinforzati corrisponde un incremento dei sistemi proposti dalle aziende produttrici che, basandosi sulla integrazione di prodotti diversi, determinano differenti offerte di prestazioni, inducendo condizioni di scelta progettuale e di impiego anch'esse di volta in volta differenziate. Con l'ampliamento del panorama

dell'offerta ciascun sistema presenta caratteristiche particolari poiché risulta più idoneo in determinati contesti e per dati interventi. Nel confronto fra vari sistemi si evidenzia il ridimensionamento di alcune qualità e l'accrescimento del livello di alcune prestazioni. Per esempio negli edifici in muratura gli interventi con FRP mantengono il carattere di dema-

Fiocchi metallici + fibra di vetro + fibra di carbonio + resina epossidica

Rinforzo a presso flessione di pilastri in cemento armato. L'intervento ha previsto l'applicazione di fiocchi metallici inseriti alla base del pilastro iniettati con resina epossidica e sfioccati per favorire l'adesione e ricoperti con tessuto in fibra di vetro per evitare fenomeni elettrochimici di corrosione dovuti al contatto del metallo con il carbonio. Il rinforzo è completato mediante un confinamento con tessuto in fibra di carbonio. (progetto Alberto Balsamo, Napoli; brevetto Mapei).



| Denominazione | Matrice | Rinforzo | Caratteristiche del sistema | Caratteristiche degli interventi | Campi d'applicazione |
|---|---|--|---|---|--|
| FRP (Fiber Reinforced Polymer) | Organica a base di resine epossidiche | Fibra di carbonio (CFRP) Fibra di aramide (AFRP) Fibra di vetro (GFRP) | Ridotto spessore (nell'ordine del mm). Peso estremamente ridotto. Elevata resistenza agli agenti aggressivi. Elevata adattabilità alla morfologia dei supporti*. Bassa conduttività termica. Costo medio/elevato. <i>*Per i sistemi con tessuti</i> | Salvaguardia dei caratteri costruttivi. Non invasività. Reversibilità. Manodopera specializzata. Velocità di posa in opera. | -Strutture in cemento armato. -Strutture in muratura. -Strutture in legno. -Strutture metalliche. |
| FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix) | Inorganica stabilizzata a base cementizia | Fibra di carbonio Fibra di PBO (poliparafenilenebisoxasolo) | Ridotto spessore (nell'ordine del cm). Peso ridotto. Buona resistenza al fuoco. Costo medio. Buona adattabilità alla morfologia dei supporti. | Salvaguardia dei caratteri costruttivi. Manodopera non specializzata. Facilità di posa in opera. | -Strutture in cemento armato. -Strutture in muratura. |
| SRP (Steel Reinforced Polymer) | Organica a base di resine epossidiche | Fibra di acciaio | Ridotto spessore (nell'ordine del mm). Peso ridotto. Costo medio. Buona adattabilità alla morfologia dei supporti. | Salvaguardia dei caratteri costruttivi. Non invasività. Reversibilità. Manodopera specializzata. Velocità di posa in opera. | -Strutture in cemento armato. -Strutture in muratura. |
| SRG (Steel Reinforced Grout) | Inorganica stabilizzata a base cementizia | Fibra di acciaio | Ridotto spessore (nell'ordine del cm). Peso ridotto. Buona resistenza al fuoco. Costo basso. Buona adattabilità alla morfologia dei supporti. | Salvaguardia dei caratteri costruttivi. Economicità. Manodopera non specializzata. Facilità di posa in opera. | -Strutture in cemento armato. -Strutture in muratura. |

Reti di acciaio + matrice cementizia

Gli elementi murari rinforzati con reti in acciaio perlitico e matrice cementizia offrono comportamenti strutturali tipici di elementi resistenti a flessione (sperimentazioni Antonio Borri, Perugia 2005/2006).



terializzazione (spessori nell'ordine del millimetro), reversibilità e traspirabilità poiché interessano basse percentuali di superficie rinforzata, mentre le soluzioni con matrice cementizia, pur riducendo i costi e favorendo la familiarità delle imprese con una tecnologia di base convenzionale a umido, si applicano prevalentemente su ampie superfici murarie o volte presentando minori caratteristiche di traspirabilità e di non reversibilità. Le ricerche e le sperimentazioni su differenti combinazioni fra matrici e rinforzi di differenti materiali (FRCM, Fiber Reinforced Cementitious Matrix; SRG, Steel Reinforced Grout) rientrano nel quadro di progressiva segmentazione della tecnologia con lo sviluppo di varianti di prodotti e sistemi, meglio indirizzate a determinate condizioni d'esercizio, a specifiche caratteristiche costruttive dei manufatti da recuperare, a differenziate capacità tecniche dei soggetti che operano nel pro-



Fibra di carbonio + matrice cementizia

Applicazione di CFRCM (Carbon Fiber Reinforced Cementitious Matrix), reti in fibra di carbonio con matrice cementizia, per il rinforzo strutturale di volte in muratura (documentazione tecnica azienda Ruredil).

cesso edilizio. Numerose sono infatti le aziende produttrici che si stanno posizionando sul mercato e che stanno individuando i punti di debolezza di tecniche e prodotti più consolidati, attuando azioni correttive che sfociano in innovazioni incrementali, promuovendo lo sviluppo di nuovi prodotti – reti in microtrefoli di acciaio, fibre in Poliparafenilbenzobisoxazolo (PBO) ad elevata resistenza – attraverso attività di R&S, spesso in collaborazione con importanti settori della ricerca di base e applicata (CNR, Università, Centri di ricerca). Il riconoscimento nell'ambito della comunità scientifica e professionale insieme alla validazione in campo normativo – Istruzioni DT 2000 del CNR – delineano il profilo di una tecnologia pronta per il passaggio da un'applicazione ancora di tipo sperimentale a una diffusione dell'innovazione. Un perfezionamento delle tecniche e dei sistemi con FRP consolidati da un lato e la sperimentazione di nuove soluzioni e sistemi dall'altro rappresentano, rispettivamente, il versante della diffusione dell'innovazione e quello della ricerca di soluzioni innovative originali e mirate, più adeguate alla fase di crescita in atto.

Prodotti innovativi e tecniche applicative sperimentali

Le recenti tendenze della tecnologia dei materiali compositi stanno orientando le nuove sperimentazioni verso l'impiego di rinforzi e matrici maggiormente legate alla cultura del costruire tradizionale, prevedendo l'utilizzo di rinforzi metallici e di matrici a base cementizia.

Tale impulso si sviluppa dalla ricerca e dalle applicazioni degli SRP (Steel Reinforced Polymer) e degli SRG (Steel Reinforced Grout) che si sono diffuse negli ultimi anni negli Stati Uniti dove l'esigenza di ridurre i costi degli interventi di rinforzo di circa 180.000 ponti presenti sul territorio ha indotto l'utilizzo di materie lavorate e semilavorati più comuni ed economici. Tali sistemi prevedono l'impiego di reti in fibre metalliche caratterizzate da corde o trefoli realizzati in acciaio perlitico (ovvero con contenuti in carbonio compresi tra lo 0.8 e lo 0.96%) dalle elevate caratteristiche meccaniche con rivestimento in ottone o zinco per resistere in maniera più efficace agli agenti atmosferici e per aumentare l'aderenza con la matrice. I trefoli sono costituiti da filamenti di piccolo diametro per conferire maggiore flessibilità ai laminati e possono avere diverse conformazioni e caratteristiche meccaniche che definiscono tessuti con diverse densità.

Valeria D'Ambrosio, architetto, dottore in Tecnologia dell'architettura, svolge attività di ricerca presso il Dipartimento di Progettazione Urbana dell'Università degli Studi di Napoli Federico II.