

47° CONGRESSO NAZIONALE DEGLI ORDINI DEGLI INGEGNERI D'ITALIA

I materiali compositi e le nuove tecnologie applicate per il recupero, il rinforzo ed il consolidamento di strutture storico-artistico-civili, industriali, infrastrutture, edifici monumentali: alcuni esempi applicativi.

Dott. Ing. Giancarlo Celestini
TEC. INN. S.r.l.

Dopo una prima fase di sperimentazione e di ricerca, confortate da risultati positivi, l'impiego dei materiali compositi nelle costruzioni è ormai a pieno titolo una realtà consolidata. Le applicazioni al momento più significative riguardano interventi di riparazione e di rinforzo di strutture civili, industriali, monumentali, ecc...

L'innovazione tecnologica in questo specifico settore ha subito, negli ultimi anni, una notevole accelerazione. L'approfondimento iniziato nel '94 ha visto nei materiali fibrosi la risposta adeguata alla naturale evoluzione del béton plaquè in quelle situazioni in cui (ambienti ad elevata corrosione, zone sismiche, cantieri di lavoro disagiati ecc) era richiesto l'utilizzo di materiale leggero, durevole ed altamente resistente.

I materiali compositi fibrosi a matrice polimerica sono costituiti da fibre continue ad alta resistenza o ad alto modulo elastico, comunemente di carbonio (CFRP), vetro (GFRP) e aramide (AFRP). Gli aspetti peculiari del CFRP sono l'elevata resistenza (con tensioni di rottura fino a 3500 N/mm²) ed il modulo elastico, che, in caso di necessità, può essere anche particolarmente elevato (le fibre ad altissimo modulo raggiungono valori pari a 6,40x10⁵ N/mm²).

La realizzazione dei rinforzi con FRP si attua mediante l'applicazione di nastri di fibra di carbonio (o vetro, o aramide) applicati attraverso resine epossidiche bicomponenti.

Trattandosi di una tecnica molto sofisticata, è indispensabile una procedura d'intervento supportata da una adeguata progettazione ed eseguita da personale altamente specializzato e continuamente aggiornato; sarebbe un grave errore banalizzare la tecnologia considerandola una semplice applicazione di fasciature: l'aggiunta di FRP sulla struttura esistente modifica anche sostanzialmente lo stato tensionale del supporto su cui è applicato e per questo motivo deve, in ogni caso, essere perfettamente recepito e controllato dal progettista.

Per tali motivi la progettazione deve essere accompagnata da un'accurata indagine sia sulla qualità dei materiali impiegati che del supporto su cui si deve operare.

L'esecuzione di prove dirette di carico, sia prima che dopo l'intervento, permette di verificare la quantità di sollecitazione indotta dal carico sul composito e di conseguenza stimare un coefficiente di sicurezza nei riguardi del carico ultimo. Queste procedure sono perfettamente in linea con quanto previsto dalla normativa per interventi di tipo "non convenzionale" (tecnologie innovative).

L'attuale legislazione italiana, infatti, recepisce marginalmente una metodologia di approccio alla progettazione che quasi tutti gli altri paesi invece adottano. Il D.M. 9/1/96, nella parte generale al punto 5, scrive: *"Nella progettazione si possono adottare metodi di verifica e regole di dimensionamento diverse da quelli contenuti nelle presenti norme tecniche, purché fondati su ipotesi teoriche e risultati sperimentali scientificamente comprovati e purché sia comprovata una sicurezza non inferiore a quella qui prescritta"*.

Nel D.M. 16/06/96, al punto C.9.3.2. *"Provvedimenti tecnici di adeguamento o di miglioramento intesi ad aumentare la resistenza strutturale"*, secondo capoverso, si legge: *"Possono usarsi anche tecniche di intervento non ivi esplicitamente menzionate, purché risultino, sulla base di adeguata documentazione, di eguale efficacia"*. Nello stesso Decreto, al punto C.9.4. *"Collaudo degli interventi di adeguamento"*, si legge: *"Il collaudo, da eseguirsi in corso d'opera, deve tendere ad accertare che la realizzazione degli interventi sia avvenuta conformemente alle prescrizioni progettuali...<omissis>... Il collaudo deve essere basato sulle risultanze di saggi e di prove sia in situ che su campioni, in laboratorio"*.

Sostanzialmente quindi, il nostro paese ammette la libera progettazione, purché sia fondata su basi scientificamente corrette e sia corredata da verifiche sperimentali. L'approccio del *design by testing* è la forma più appropriata per la progettazione d'interventi di rinforzo, dove i parametri in gioco sono tanti e il modello di calcolo non può essere costruito, senza tenere in considerazione la reale struttura su cui si interagisce.

Questa situazione si rende ancor più necessaria qualora s'impieghino materiali anisotropi come gli FRP, cioè materiali che presentano elevate prestazioni meccaniche nella direzione delle fibre, ma prestazioni mediocri nelle altre direzioni di carico.

L'esecuzione di una serie di prove sperimentali prima e dopo l'intervento, mette in grado il progettista di calibrare un modello di calcolo aderente alla risposta della struttura specifica su cui si interviene, ottenendo il duplice obiettivo di conoscere con precisione lo stato di salute della struttura e ottimizzare l'uso del materiale di rinforzo per il raggiungimento dei requisiti voluti.

Il rinforzo con FRP presenta, a differenza delle tecnologie tradizionali, caratteristiche quali l'estrema leggerezza, la non invasività dell'intervento, una elevata durabilità in qualsiasi tipo d'ambiente, la velocità di esecuzione e la completa reversibilità. Tali caratteristiche rendono l'intervento di rinforzo versatile rispetto a quelli possibili con tecniche tradizionali, senza contare il fatto che l'elemento da rinforzare non modifica la sua sagoma e

non incrementa significativamente il peso, beneficio importante se si opera in zona sismica.

I recenti eventi sismici che hanno colpito Umbria e Marche nel '97-'98 hanno indotto molti progettisti ad orientarsi verso l'uso di questi materiali per il rinforzo di edifici in muratura, specie se con connotazioni di valore storico-artistico, proprio per le qualità sopra ricordate.

L'uso dei materiali compositi, infatti, a differenza di altre tecniche, non comporta modificazioni nelle inerzie delle murature nelle normali condizioni d'esercizio, mentre si manifesta in luogo di particolari condizioni di carico (ad esempio la forza orizzontale provocata da un sisma), quando la muratura da sola non sarebbe in grado di sviluppare le caratteristiche di resistenza richieste dall'evento. Ad esempio, l'intervento di cerchiatura di un edificio consente di operare un contenimento dei maschi murari non ammortati tra loro in modo non invasivo, laddove prima si sarebbe magari costruito un cordolo in c.a. Il consolidamento di archi e volte è un altro tema delicato, visto che spesso ci si trova a dover rispondere ad esigenze non solo statiche, ma anche architettoniche: in Italia spesso ci si trova dinanzi ad elementi strutturali che fanno anche da supporto, per esempio, ad affreschi di grande pregio (come nel caso, di seguito citato, della cattedrale di Città di Castello), dove un intervento tradizionale avrebbe delle limitazioni notevoli, e comunque vietate dalla Soprintendenza, mentre l'intervento in FRP consente un intervento veloce, reversibile e non invasivo.

In ciò che segue, verranno illustrati alcuni degli interventi che TEC. INN., società leader nel campo del consolidamento e rinforzo con materiali innovativi, ha realizzato nel corso degli anni.

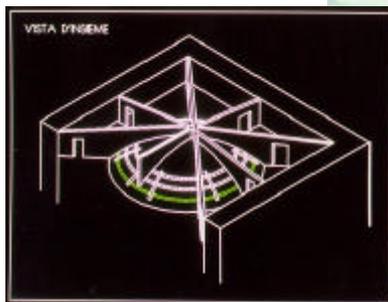


Fig. 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - *Duomo di Città di Castello (PG)* - Cerchiatura con fibre di carbonio dell'estradosso di cupole in muratura di mattoni lesionate. Intercettazione ed eliminazione dell'innesco del cinematisimo (disconnessione degli elementi in fase sismica) attraverso maglia in fibra disposta secondo meridiani e paralleli.



Fig. 6 - 7 - 8 - *Palazzo della Consulta - Roma* - Rinforzo della zona d'imposta delle volte mediante la realizzazione di un cordolo di fibre di carbonio.



Figure 9 . 10 . 11 . 12- *Duomo di Urbino - Urbino* – Fornitura di fibre di carbonio compreso il trasferimento tecnologico con consulenza specialistica al personale tecnico ed operativo per il lavoro di consolidamento e miglioramento sismico della Cattedrale di Urbino (intervento sul tamburo della cupola, sul transetto, l'abside e le travi di collegamento lignee della navata principale).



Fig. 13 - 14 - 15 - 16 - 17 - 18 - *Fontana Maggiore - Perugia* - Rinforzo, confinamento e collegamento tramite FRP delle formelle di marmo realizzato all'interno del bacino inferiore della Fontana Maggiore di Perugia (XIII sec.). Nel caso specifico l'intervento è consistito nell'applicazione controllata di nastri di fibre di vetro con preventiva fase di rilievo dello stato fessurativo delle formelle anche con metodi non distruttivi, e relativa schedatura ed informatizzazione.



Fig. 19 - 20 - 21 - 22 - *Chiesa Santa Teresa - Perugia* - Presidio degli stati fessurativi dell'intradosso dell'abside mediante intersezione di fogli di fibra incrociati secondo due direzioni principali. Cerchiatura su due livelli con fibre di carbonio del tamburo dell'abside a livello di copertura e di imposta della cupola sottostante.

Come già anticipato, l'utilizzo di queste tecniche innovative nel consolidamento e rinforzo di strutture necessita di controlli attenti e consapevoli nelle seguenti tre fasi:

- Progettazione;
- Esecuzione del rinforzo;
- Fase finale di controllo della qualità del rinforzo.

Proprio quest'ultimo aspetto rappresenta un punto nodale, in quanto consente di realizzare interventi efficaci ed un adeguato controllo oggettivabile.

Una volta controllate, prima di mettere in opera il rinforzo, le caratteristiche del supporto, è importante verificare l'incollaggio del FRP, e questo può essere fatto con prove di pull-out (o "a strappo"), con prove ultrasoniche o con indagini termografiche, che mettano in evidenza eventuali difetti.

L'esecuzione di prove di carico sulle strutture rinforzate, devono essere confrontate con prove sulla stessa struttura prima dell'intervento, per avere informazioni sull'efficacia del rinforzo stesso, e sul modo in cui esso ha variato le modalità di risposta della struttura ai carichi accidentali (diminuzione di frecce, collaborazione trasversale, maggior duttilità dei nodi, ecc...).

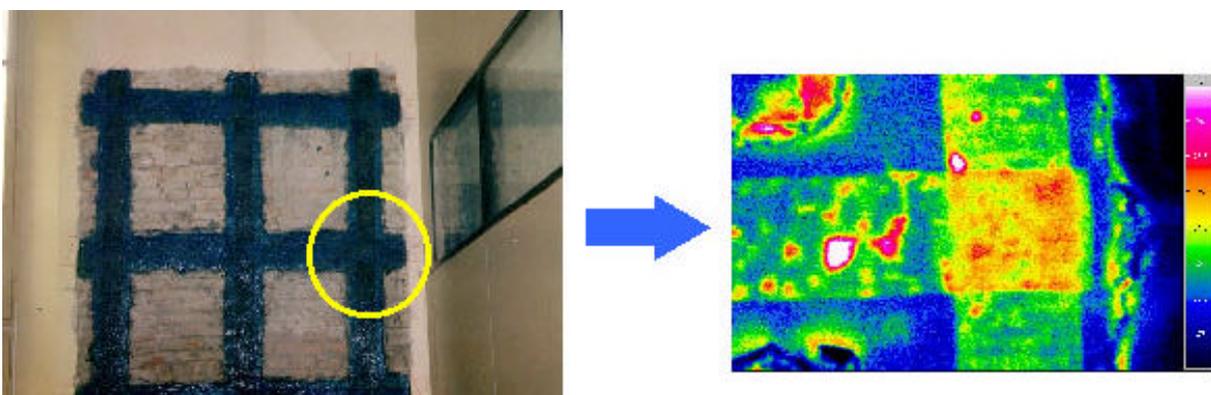


Fig. 23 - *Indagini termografiche*: la differente distribuzione delle temperature, visibile sull'immagine come una diversa distribuzione dei colori, serve ad evidenziare eventuali difetti di incollaggio del tessuto FRP al supporto

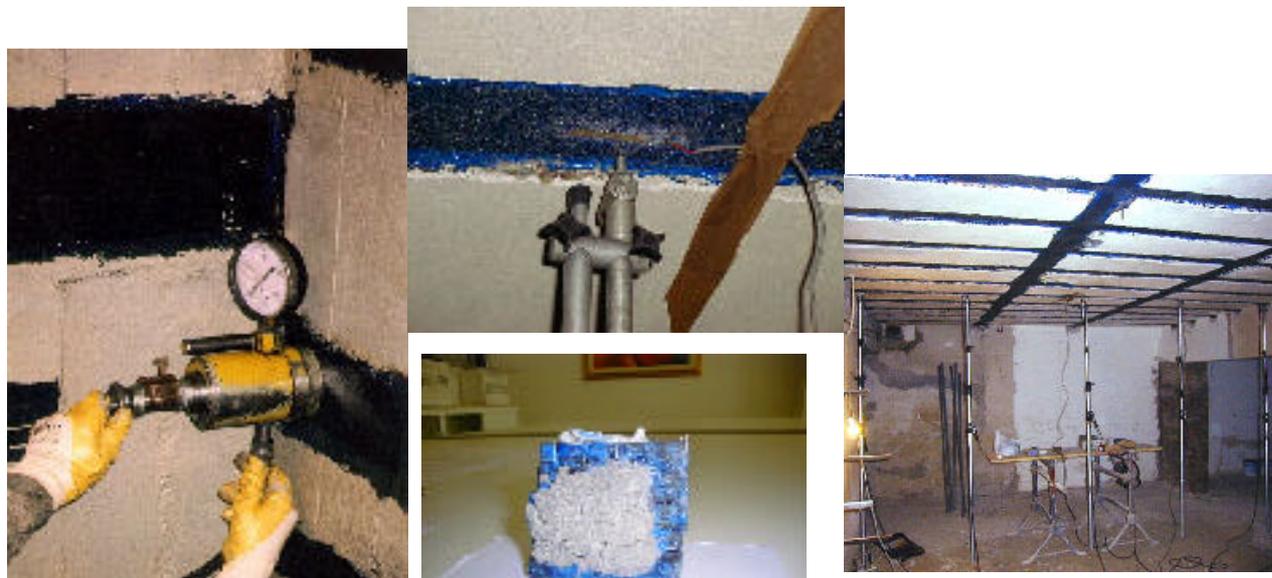


Fig.- 24 –25 – 26 – Prove di adesione, prove di carico, strumentazione delle fibre.

Dall'esperienza maturata da TEC. INN. negli ultimi quindici anni è nata un'opera di riferimento per progettisti, Direttori dei Lavori, Collaudatori ed utilizzatori pubblici e privati, "COMPOSITI FRP – Linee guida per il rinforzo strutturale", che riporta esperienze reali e concrete riguardanti la sperimentazione su prototipi e su strutture in vera grandezza, realizzate dalla nostra Società

L'opera si compone di quattro volumi che, pur nella loro singolarità ed autonomia, costituiscono un percorso logico basato su concrete esperienze, applicando conoscenze sempre finalizzate ad interventi su strutture reali, dalle differenti caratteristiche tipologiche.

Segue una breve descrizione del contenuto dei quattro volumi dell'opera.

Volume 1

Il volume si suddivide in due parti: una di studio e analisi delle strutture oggetto degli interventi, l'altra di conoscenza dei compositi FRP disponibili sul mercato e già da tempo utilizzati. La prima parte tratta delle prove distruttive e non, eseguite sui materiali da costruzione e sulle strutture, sia in situ che in laboratorio, offrendo una vasta e coerente gamma di esempi, documentata anche con foto di studi, analisi e sperimentazioni possibili. Questo al fine di conoscere e definire le caratteristiche del "paziente-struttura" per una diagnostica finalizzata al corretto intervento di rinforzo e/o recupero e/o messa in sicurezza. La seconda parte traccia un iter progetto-installazione-manutenzione dei materiali compositi FRP, fornendo dati medi sulle caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali, ottenuti da esperienze applicative e d'impiego concreto; il tutto corredato da numerose foto, schemi, diagrammi che arricchiscono e rendono fruibili tutte le informazioni, fornendo uno strumento di rapido accesso alla materia.

Volume 2

In questo volume, attraverso foto, grafici, diagrammi, schede, vengono illustrati gli interventi eseguiti da TEC INN dal 1995 ad oggi su strutture in muratura (pietra, mattoni, etc.), visualizzando in particolare le sperimentazioni precedenti, contemporanee e successive alle lavorazioni, svolte prima per conoscere l'oggetto dell'applicazione, poi per controllare in corso d'opera e - ad interventi eseguiti -, la coerenza, correttezza, efficacia e dunque riuscita dell'intervento.

Gli esempi illustrati interessano edifici di valore storico-artistico-monumentale come anche elementi strutturali di edifici a carattere residenziale, rinforzati dopo il terremoto del 1997 in Umbria e nelle Marche.

Si passa quindi dall'intervento in carbonio sulle cupole affrescate della Cattedrale di Città di Castello del 1996, il confinamento in vetro e carbonio delle formelle della Fontana Maggiore di Perugia, il Duomo di Urbino con confinamenti, rinforzi in carbonio e vetro, nonché l'impiego di fibre aramidiche presso la sede della Banca d'Italia in Roma.

Nel testo vengono inoltre illustrati e commentati numerosi altri interventi di rinforzo, confinamento e fasciatura complessiva di interi edifici, sia storici che di civile abitazione, eseguiti anche come interventi di messa in sicurezza post-sisma.

Volume 3

Questa parte contiene oltre 20 esempi di applicazioni eseguite per il rinforzo di strutture in c.a. e c.a.p., unitamente a numerosi grafici, schemi, schede, foto illustrative dei vari interventi; schede sui materiali impiegati, prove e sperimentazioni pre-post intervento eseguite come analisi, verifica e controllo della correttezza ed efficacia delle applicazioni.

Attraverso i lavori svolti, viene ripercorsa la storia della TEC INN, ricordando in particolare l'Amba-sciata Italiana di Mogadiscio (1986), le cui solette nervate in c.a. furono rinforzate con l'utilizzo di piatti di acciaio (*Béton plaqué*); il Ponte Giorgini di Castiglion della Pescaia dove, per le particolari condizioni ambientali, venne usato acciaio inox AISI 316; viene quindi illustrato il passaggio del materiale di rinforzo dall'acciaio al carbonio, nel 1994, su di un ponte ad arco di grande luce, situato sulla S.S. Flaminia, in corrispondenza del valico della Somma. In questo ultimo caso vennero utilizzati allo stesso tempo placche di acciaio per il recupero e l'ancoraggio di pilastri in c.a. al piede dell'arco e nastri in fibra di carbonio per la fasciatura di cerniere *mesnager* fortemente degradate e danneggiate sulla testa dell'arco. Dal '95 in poi sempre più numerosi e raffinati interventi di rinforzo con utilizzo di materiali compositi FRP a diverso modulo elastico a seconda delle diverse necessità strutturali.

Volume 4

La ricerca e la sperimentazione, sia su prototipi che su strutture in grandezza vera, hanno da sempre rappresentato gli strumenti chiave di conoscenza e di sviluppo della società TEC INN.

Nel volume si riportano le prime sperimentazioni su travi in c.a.p. in grandezza vera, rinforzate con *Béton plaqué* svolte in stabilimento (1987); le prove su campioni in c.a. nudi e rinforzati con piatti di acciaio (1988), sottoposti ad azioni meccaniche, statiche, cicliche, dinamiche con maturazione di provini a temperatura ambiente, in forno ed in frigorifero, per uno studio degli effetti della temperatura sulla maturazione delle resine e del sistema.

Anche qui viene testimoniato un graduale e coerente passaggio dall'uso dell'acciaio ai materiali compositi, attraverso varie sperimentazioni condotte sui compositi, alcune delle quali in collaborazione e presso i laboratori della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna.

Seguono gli studi svolti in collaborazione con la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Perugia, riguardanti numerose sperimentazioni su campioni e

provini in muratura (mista, pietra, mattoni, tufo, ed anche legno), rinforzati con carbonio, vetro, aramide.

Non sono mancati altri contatti con l'ambiente della Ricerca Universitaria, in particolare con i Ricercatori dell'Istituto Universitario di Architettura di Venezia. Altra fase sperimentale fondamentale ha riguardato provini in calcestruzzo rinforzati e non sottoposti a prove meccaniche di tipo statico, dinamico e ciclico; stress di tipo ambientale (temperature, aggressione salina, raggi UVA), presso i laboratori del CSM Centro Sviluppo Materiali di Castel Romano - Roma con il contributo del Parco Scientifico Tecnologico - Sitech S.c.a.r.l. dell'Umbria.

Vengono ancora testimoniati studi di applicazioni ed ancoraggi tramite barre in carbonio. Seguono numerose sperimentazioni sul rinforzo di tubazioni in acciaio (ad esempio reti di trasporto e distribuzione del gas) con materiale composito: esperienze di straordinario interesse che, dallo studio preventivo e previo danneggiamento programmato, ha portato alla riparazione con compositi ed alla successiva rottura per scoppio in pressione di tubi di diverso diametro.

In conclusione, tutte le attività di ricerca e sperimentazione condotte sono state e saranno lo strumento insostituibile per lo sviluppo di conoscenze finalizzate ad una corretta sperimentazione, progettazione, impiego e manutenzione delle strutture.