

# I materiali compositi per il rinforzo statico e l'adeguamento sismico delle strutture in c.a.

Luigi Coppola - Dipartimento di Ingegneria e scienze applicate, Università degli Studi di Bergamo

Alessandra Buoso – PhD, Ingegnere civile, Libero Professionista

Tratto dal libro di Luigi Coppola e Alessandra Buoso, edito da ULRICO HOEPLI, "IL RESTAURO DELL'ARCHITETTURA MODERNA IN CEMENTO ARMATO - Alterazione e dissesto delle strutture in c.a. - Diagnostica – Interventi di manutenzione e adeguamento antisismico - Materiali, tecniche e cantieristica".

## Introduzione

Negli ultimi due decenni nel settore delle nuove costruzioni e, soprattutto, in quello del restauro e dell'adeguamento sismico delle strutture esistenti diventano sempre più diffusi gli interventi effettuati impiegando i *materiali compositi*. Con questo termine si identifica *un sistema di due o più componenti che, pur conservando la propria identità chimica ed elasto-meccanica, contribuiscono mutuamente a garantire l'ottenimento di un materiale di prestazioni superiori a quelle conseguibili utilizzando i singoli componenti separatamente*. In questo articolo, viene presentata una panoramica sia sui materiali compositi disponibili in edilizia che sulle possibilità dagli stessi offerti nel restauro delle strutture esistenti senza, tuttavia, entrare nel merito del calcolo strutturale che, necessariamente, è alla base dell'utilizzo di questi sistemi e per il quale si rimanda alla letteratura scientifica e alle linee guida sia nazionali che internazionali.

I *materiali compositi per il rinforzo delle strutture in c.a.* vengono suddivisi in:

- *sistemi preformati* prevalentemente in forma di *lamine* (Fig. 1a) o di *barre* indicati per il rinforzo di membrature con profili uniformi e rettilinei, privi di convessità o concavità, e per substrati in calcestruzzi che non presentino forme di alterazione della superficie;
- *sistemi impregnati in situ* costituiti da *tessuti uni o multi-direzionali* (Fig. 1b) in *carbonio, vetro e aramide impregnati in cantiere con sistemi epossidici* che fungono sia da matrici polimeriche che da adesivo al substrato.

Tra i sistemi impregnati in situ rientrano anche *i tessuti unidirezionali in fibre di acciaio lunghe che vengono applicati ricorrendo sia all'utilizzo di matrici epossidiche – FRP (Fiber Reinforced Polymer) (Fig. 2a) che di malte a base cementizia – FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix) (Fig. 2b) e le reti (in vetro, aramide, basalto, acciaio o combinazione di questi materiali) impregnati in situ in matrici inorganica a base cementizia FRCM*. Questi sistemi sono tra i materiali compositi quelli più diffusi grazie alla loro versatilità d'impiego e alla possibilità di poterli installare su membrature in calcestruzzo con forme e geometrie complicate.



a. Lamina pultrusa

b. Tessuto in fibra di carbonio

Fig. 1 - Sistemi preformati ed impregnati in situ



Fig. 2 – Modalità di impregnazione in situ dei sistemi

## Principali campi di applicazione dei materiali compositi in edilizia

I principali campi di applicazione dei materiali compositi nel settore del ripristino delle costruzioni esistenti attengono al:

- **RINFORZO A FLESSIONE** di elementi strutturali quali travi, solai a travetti e pignatte e a soletta piena laddove il momento flettente derivante dai carichi agenti risulta maggiore del momento resistente della sezione (Fig.4).



Fig. 4 – Rinforzo a flessione dei travetti di un solaio latero-cemento mediante lamine pultruse in carbonio.

- **RINFORZO A TAGLIO DI TRAVI** da realizzarsi laddove la resistenza a taglio dell'elemento strutturale, desunta sia dal contributo del calcestruzzo che dell'armatura tradizionale, è inferiore alla sollecitazione derivante dai carichi agenti (Fig.5).

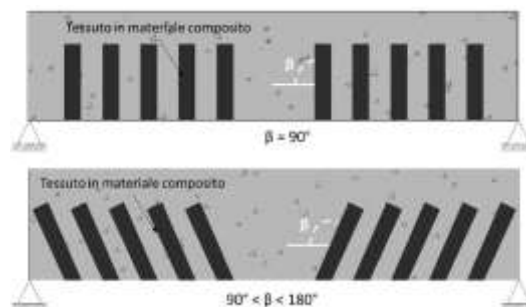


Fig. 5 – Disposizione di tessuti unidirezionali sulla superficie laterale della trave per il rinforzo a taglio.

Le strisce di tessuto possono essere applicate, qualora si ricorra a tessuti unidirezionali, sia in adiacenza che in maniera discontinua. La disposizione dei tessuti può avvenire ricorrendo alle configurazioni ad una conformazione a U e, ove possibile, in totale avvolgimento della sezione della trave (Fig. 6).

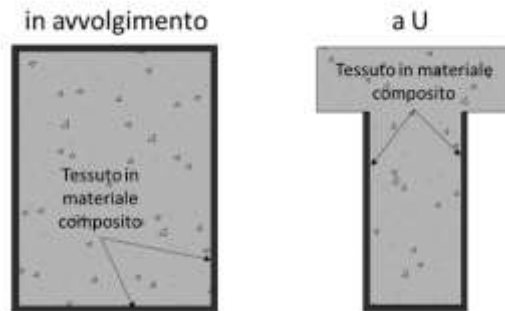


Fig. 6 – Applicazione dei tessuti per il rinforzo a taglio di travi in totale avvolgimento o con conformazione a U.

- **RINFORZO A TORSIONE** di elementi strutturali, con resistenza a questa sollecitazione inferiore rispetto a quella agente, mediante incollaggio, generalmente di tessuti applicati sulla superficie esterna della trave le cui fibre siano disposte con un angolo di inclinazione rispetto all'asse della trave di  $90^\circ$  e in avvolgimento totale;
- **CONFINAMENTO DI ELEMENTI VERTICALI IN C.A.** soggetti a sforzo normale centrato o con piccola eccentricità laddove risulta necessario aumentare la resistenza e la corrispondente deformazione ultima oppure ove si necessita negli elementi pressoinflessi di un incremento della duttilità e (congiuntamente all'utilizzo di rinforzi disposti nella direzione dell'asse principale dell'elemento) della resistenza ultima (Fig.7).

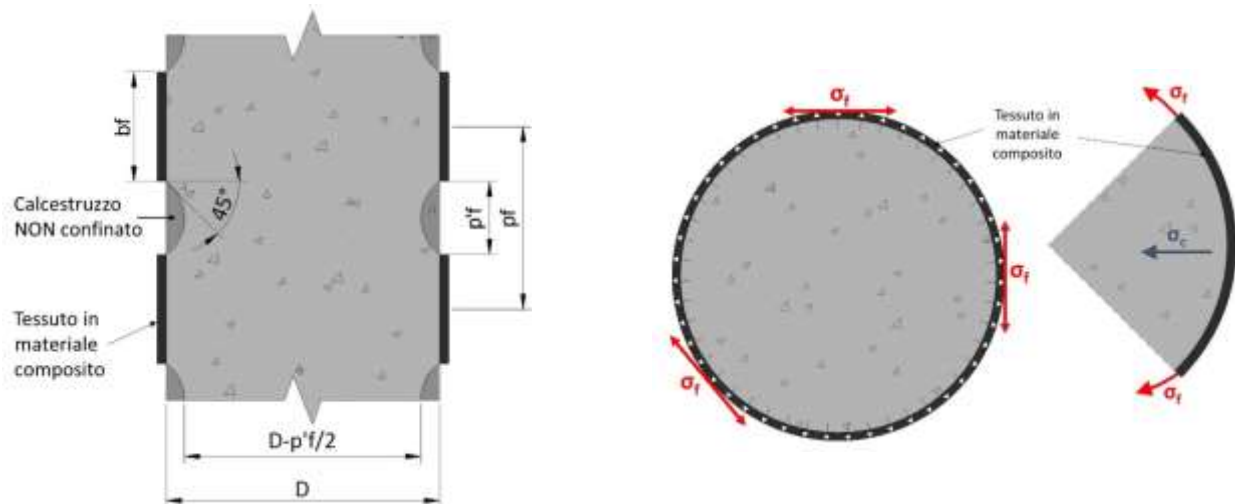


Fig. 7 – Confinamento dei pilastri di tipo discontinuo (sx) e continuo (dx).

- **REINTEGRO DELL'ARMATURA** in elementi strutturali che presentano ferri fortemente corrosi con rilevante riduzione della sezione del tondino e perdita di materiale metallico.
- **MIGLIORAMENTO DEL COMPORTAMENTO ANTISISMICO:** il ricorso all'impiego dei materiali compositi consente di migliorare la risposta nei confronti dell'azione sismica attraverso:
  - a) l'eliminazione dei meccanismi di collasso fragile;
  - b) l'eliminazione dei meccanismi di collasso di piano (soft floor);
  - c) il miglioramento della capacità deformativa globale della struttura;
  - d) l'eliminazione del ribaltamento dei pannelli di tamponamento al di fuori del piano.

## Meccanismi di collasso di tipo fragile del sistema calcestruzzo/composito

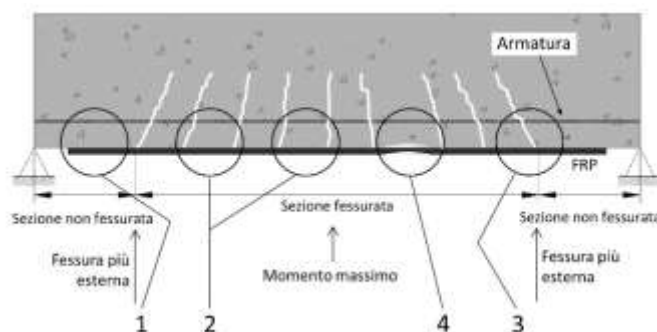
Negli interventi di adeguamento strutturale a flessione e/o taglio realizzati con sistemi compositi è fondamentale evitare i meccanismi di rottura fragile rappresentati dal distacco delle lamine e/o dei tessuti dal substrato in calcestruzzo. In sostanza, la perdita di aderenza tra calcestruzzo e materiale composito non deve manifestarsi prima della crisi per flessione e/o taglio dell'elemento rinforzato. In via teorica, il distacco può avvenire

per rottura coesiva dell'adesivo, all'interfaccia adesivo/calcestruzzo, all'interfaccia adesivo/lamina e, infine, nel substrato in calcestruzzo con asportazione di qualche millimetro di "pelle" del conglomerato. Nella realtà, il distacco avviene sempre per *crisi del calcestruzzo del substrato per superamento della resistenza a taglio del conglomerato cementizio* di gran lunga inferiore a quella dell'adesivo e alle resistenze che si mobilitano all'interfaccia adesivo/calcestruzzo e adesivo/sistema composito.

Con riferimento a una trave rinforzata a flessione mediante applicazione di una lamina pultrusa all'intradosso dell'elemento (Fig.8),

si possono presentare i seguenti **MECCANISMI DI COLLASSO**:

- Modalità 1: distacco *all'estremità della lamina* nella zona in cui la sezione in calcestruzzo si presenta integra.
- Modalità 2: distacco *innescato dalle fessure di tipo flessionale* nella zona della trave a momento positivo.
- Modalità 3: distacco *innescato da fessure di tipo tagliante*;
- Modalità 4: distacco *promosso da irregolarità (mancanza di planarità) della superficie* sulla quale è stata applicata la lamina pultrusa.



**Fig. 8**– Modalità di collasso di tipo fragile in una trave rinforzata a flessione mediante incollaggio di lamina pultrusa all'intradosso

## Accorgimenti tecnologici e di cantiere

In relazione all'importanza di prevenire la formazione di collassi di tipo fragile, ossia all'aspetto fondamentale relativo all'aderenza tra calcestruzzo/adesivo/sistema composito, è necessario rispettare alcune regole e accorgimenti tra cui:

- non applicare i materiali compositi su elementi in calcestruzzo con resistenza a compressione in opera (resistenza strutturale) inferiore a  $15 \text{ N/mm}^2$ ;
- prima di procedere all'applicazione di un sistema composito su un *elemento in c.a. che non presenta forme di alterazione e degrado e la cui superficie è integra e priva di difetti* occorrerà, comunque, procedere ad una operazione di *sabbiatura* o di *idropulizia* in pressione. Qualora dopo la sabbiatura, la superficie dovesse presentare *eccessiva polverosità superficiale* per scadente qualità del conglomerato, sarà necessario, per aumentare la resistenza a trazione superficiale, *effettuare una preliminare impregnazione della superficie del conglomerato cementizio con un primer epossidico a bassa viscosità*;
- prima di procedere all'applicazione dei sistemi compositi è necessario, *se l'elemento in calcestruzzo presenta espulsioni di copriferro con armature corrose*, procedere dapprima alla *ricostruzione della sezione*;
- qualora l'elemento da rinforzare presenti *soluzioni di continuità di ampiezza superiore a 0.3 mm* è necessario *procedere alle operazioni di sigillatura e iniezione della lesione* prima dell'applicazione dell'FRP;
- negli interventi di confinamento, di rinforzo a taglio e a torsione e in tutte le situazioni in cui i sistemi compositi in forma di *tessuti debbono essere applicati sugli spigoli* di un elemento in calcestruzzo occorrerà *procedere a smussare gli angoli arrotondandoli con un raggio di curvatura e non inferiore a 20 mm*;

- prima di procedere alle operazioni di incollaggio sarà necessario *rimuovere qualsiasi traccia di polvere di sporco prodotto dalle lavorazioni che hanno preceduto quella di stesa dell'adesivo* onde evitare una diminuzione dell'aderenza composito/calcestruzzo;
- tutte le operazioni di incollaggio che prevedono l'utilizzo di *adesivi epossidici* debbono essere effettuate sul *substrato completamente asciutto*, anche se attualmente esistono in commercio dei prodotti epossidici evoluti che possono essere applicati anche su supporti umidi. Riguardo a questo aspetto, si tenga conto che nelle applicazioni di tessuti l'incollaggio avviene in diversi stadi (Fig. 9) che prevedono l'utilizzo di sistemi epossidici a diversa consistenza. In condizioni di temperatura mite (circa 20 °C) il tempo a disposizione tra l'applicazione di un sistema epossidico e quello successivo è all'incirca di 50-60 minuti. Questo intervallo di tempo, si riduce, quando la temperatura supera i 30 °C, a circa 20-30 minuti e potrebbero orientare la direzione lavori a rimandare le lavorazioni in quanto alto è il rischio che l'applicazione di un sistema epossidico avvenga quando quello già steso sulla superficie del calcestruzzo sia già indurito;



**Fig. 9** – Sequenza di operazioni per l'incollaggio di tessuti con sistemi epossidici

- se il composito è costituito da *fibre in acciaio, vetro, basalto o di altra natura, annegate in una matrice cementizia*, l'applicazione della malta di cemento deve avvenire *previa bagnatura a saturazione dell'elemento in calcestruzzo e rimozione dell'acqua liquida in eccesso* mediante stracci umidi e/o aria compressa.
- per migliorare l'efficienza di interventi di rinforzo effettuati mediante incollaggio di tessuti impregnati con matrici polimeriche è possibile valutare se ad impregnazione ultimata applicare il vuoto al fine di eliminare le bolle d'aria che immancabilmente rimangono intrappolate nel sistema composito impregnato;
- prima di procedere all'esecuzione su larga scala dell'intervento è sempre opportuno individuare delle *aree campione sulle quali simulare tutte le fasi del processo che porta all'incollaggio del sistema composito al calcestruzzo*.
- se vengono utilizzati *compositi in carbonio* è indispensabile evitare il contatto del sistema con i *ferri di armatura* in quanto l'accoppiamento potrebbe condurre a fenomeni di corrosione per contatto galvanico;
- per quanto attiene alla protezione dei compositi dall'irraggiamento solare, al fine di prevenire alterazione della matrice epossidica si potrà procedere alla verniciatura mediante rivestimenti protettivi di natura acrilica ai quali si potrà ricorrere anche per esigenze di natura estetica;
- al fine della protezione dalle alte temperature gli elementi rinforzati potranno essere protetti con intonaci termoisolanti oppure con pannelli intumescenti.