

Introduzione

I compositi sono tutti quei corpi ottenuti mediante la sovrapposizione o la miscelazione di materiali diversi con l'intento di ottenere un complesso che presenti caratteristiche meccaniche e chimiche migliori rispetto a quelle dei singoli componenti. Una classe molto importante di compositi è quella dei fibrorinforzati, quei materiali in cui l'accoppiamento avviene mediante l'inserimento di fibre, filamenti, setole in una matrice di diverso materiale. L'idea di rinforzare un corpo con l'aggiunta di fibre non è dell'uomo, ma è fornita spontaneamente dalla natura: è noto, infatti, che le radici delle piante contribuiscono a migliorare le caratteristiche meccaniche dei terreni nei quali penetrano.

L'uso dei compositi si è molto sviluppato negli ultimi anni, come conseguenza delle migliori caratteristiche possedute rispetto ai materiali tradizionali. In particolare, un notevole impulso all'impiego dei fibrorinforzati è venuto dalla constatazione sperimentale che lo stesso materiale impiegato come fibra – di dimensioni microscopiche – mostra qualità superiori di quelle che avrebbe se fosse impiegato a livello macroscopico. Ciò viene di solito giustificato ammettendo che nelle fibre si riduce la probabilità di avere microfessure, con conseguente miglioramento delle caratteristiche meccaniche medie.

Lo sviluppo tecnologico è stato favorito dalla grande varietà di matrici e di fibre che la scienza dei materiali ha messo a disposizione; tutto ciò ha reso possibile la realizzazione, mediante opportuni accoppiamenti, di una grande quantità di nuovi materiali, con la conseguenza di avere una grande versatilità nel loro utilizzo. Inoltre, lo sviluppo dei compositi non sarebbe stato possibile senza il perfezionamento delle tecniche di produzione, che ha reso questi materiali economicamente concorrenti di altri più tradizionali.

Il primo fibrorinforzato impiegato dall'uomo in ingegneria fu il legno: basti pensare alle palafitte della preistoria. Il legno è un prodotto naturale, ma già gli uomini primitivi intuirono come migliorare artificialmente le proprietà dei materiali mediante l'aggiunta di fibre di rinforzo. Essi infatti miscelevano nel fango delle pagliuzze, ottenendo così un ottimo materiale per la costruzione delle loro capanne.

Il calcestruzzo armato, invece, è il primo fibrorinforzato prodotto industrialmente dall'uomo. Le prime applicazioni risalgono alla metà del 1800, e la prima casa in calcestruzzo armato sembra sia quella realizzata nel 1865 da Wilkinson in Inghilterra.

Procedendo verso applicazioni più moderne, un altro esempio di manufatto fibrorinforzato è rappresentato dai pneumatici, introdotti da Dunlop nel 1888 in sostituzione dei cerchioni di gomma piena. In questo caso la maglia di fibre (di raion, nailon o acciaio) inserite nella gomma ha lo scopo di contenere la camera d'aria, mentre la gomma fornisce la solidità e la resistenza all'usura. A partire da quel periodo, molte altre prove furono effettuate per cercare di produrre fibrorinforzati con matrici sintetiche, in particolare polimeriche. Nelle prime applicazioni si impiegarono fibre naturali, di legno o di lino, inserite in una matrice fenolica.

Solo dopo alcuni anni, però, si riuscì a produrre dei materiali affidabili che potessero essere impiegati nella pratica. Fu la vetroresina (fibre di vetro in matrice di poliestere), il primo fibrorinforzato ad essere usato con successo, a partire dal 1940. È proprio in questo periodo, infatti, che si cominciò ad utilizzare questo materiale per la costruzione delle carene delle piccole imbarcazioni da diporto, mentre nel 1941 fu realizzato il primo radar in vetroresina.

La prima applicazione di rilievo da un punto di vista strutturale la si ebbe nel 1944, quando un aereo realizzato in vetroresina fece con successo il suo primo volo di prova. Questa realizzazione aprì la strada verso un nuovo progresso di questi materiali. La fine degli anni quaranta, infatti, vide il termine della prima fase dello sviluppo dei compositi moderni, contraddistinta da un'evoluzione empirica, disorganica e, in alcuni casi, addirittura casuale. Dai primi anni cinquanta inizia lo studio sistematico dei compositi, e vaste campagne sperimentali vennero programmate e realizzate. È

proprio a questo periodo che può essere fatta risalire la nascita della moderna disciplina di questi materiali, ed è proprio in questo periodo che si è andata affermando la tendenza di indicare con il termine “compositi” solo i materiali innovativi, moderni. Per esempio, anche se tutti convengono che il calcestruzzo armato è un materiale composito a tutti gli effetti, pochi usano questo vocabolo per indicarlo.

Le prime e più importanti applicazioni moderne si sono avute in aeronautica e nell’industria aerospaziale, settori che hanno inizialmente avuto un ruolo trainante nello sviluppo della tecnologia in quanto il vincolo delle prestazioni risultava più importante del vincolo del costo. Dalle prime pionieristiche applicazioni in cui la vetroresina veniva usata come fusoliera nei velivoli leggeri si è oggi arrivati agli aerei “all composite” nei quali ai compositi è anche affidata la resistenza strutturale.

Successivamente i compositi hanno trovato applicazione nell’ingegneria navale e in quella meccanica, in particolare nel settore automobilistico. L’uso dei compositi in ingegneria civile risale invece agli anni settanta, soprattutto come elemento di rinforzo a flessione e taglio di ponti autostradali negli Stati Uniti d’America. Solo successivamente, attorno agli anni novanta, si è avuta una lenta diffusione fino ad interessare strutture strategicamente meno importanti, e oggi cerchiature di pilastri e rinforzo a taglio e flessione delle travi sono le applicazioni più usuali nel miglioramento o nell’adeguamento sismico di edifici comuni in cemento armato.

Per quello che riguarda la muratura, una certa eco hanno avuto le sperimentazioni effettuate nel 1996 presso l’Università di Zurigo su pannelli di due piani rinforzati a taglio con strisce di compositi inclinate. Negli edifici storici, i materiali fibrorinforzati trovano impiego nel consolidamento delle volte, nel confinamento di pilastri murari, nel collegamento tra le pareti murarie e nella cerchiatura di edifici in sostituzione delle vecchie catene.

Nonostante un iniziale interesse, un minor sviluppo sembra aver conosciuto l’applicazione dei compositi per il rinforzo di strutture lignee ed in acciaio, a causa di problematiche specifiche dell’accoppiamento di questi materiali (compatibilità termo-igrometrica nel primo caso, elettrochimica nel secondo).

In Italia un notevole contributo allo sviluppo della disciplina si è avuto negli ultimi dieci anni grazie a varie commissioni del CNR e a vari progetti di ricerca finanziati dal Ministero dell’Università, che hanno portato a numerose campagne sperimentali e ricerche teoriche, che intelligentemente hanno successivamente condotto a documenti pre-normativi.

I materiali compositi sono oggi una realtà nell’ingegneria civile e strutturale, da molti conosciuta anche se non da tutti gli ingegneri comunemente usati. Non è quindi necessario ribadire in dettaglio le loro caratteristiche, ma è sufficiente rammentare i motivi del loro successo:

- 1) le straordinarie caratteristiche meccaniche in termini di rigidità (modulo di Young) e resistenza (tensione di rottura), anche se mostrano un comportamento fragile che ne limita in parte l’uso;
- 2) l’esistenza di resine per l’incollaggio con caratteristiche meccaniche adeguate, che permettono, nei problemi di consolidamento, la trasmissione degli sforzi tra il composito e la struttura che lo stesso va a rinforzare. Senza questa interfaccia il composito risulterebbe inutilizzabile;
- 3) la relativa stabilità strutturale, essendo resistenti alla corrosione e ad altre azioni chimiche che possono invece degradare materiali classici quali il calcestruzzo o l’acciaio;
- 4) l’adattabilità a qualunque forma nei problemi di restauro e la relativa facilità di applicazione (anche se vengono richieste maestranze qualificate);
- 5) il peso pressoché trascurabile, che soprattutto in applicazioni di tipo sismico risulta un fattore importante;
- 6) la parziale reversibilità dell’intervento, che ha fatto accettare a molte sovrintendenze restauri strutturali con questi materiali di opere di pregio;

- 7) il fatto, non ultimo, che avendo raggiunto una certa maturità sono oramai prodotti a livello industriale e quindi il loro prezzo è molto calato. Il loro uso risulta oramai competitivo anche da un punto di vista economico.

Nonostante tutte queste qualità, i compositi hanno attualmente dei limiti intrinseci:

- 1) soffrono le alte temperature (indicativamente oltre 60÷80 °C) e l'irraggiamento solare. Esistono compositi resistenti alle temperature, ma sono ancora troppo costosi;
- 2) hanno bisogno di una attenta e accurata posa in opera, che richiede personale qualificato;
- 3) non è ancora chiaro l'orizzonte temporale sul quale garantiscono efficacia, e il problema della durabilità è ancora aperto;
- 4) sono derivati del petrolio e quindi non sono materiali ecologici. Non possono essere riciclati.

È pertanto bene sottolineare che i compositi non sono la panacea di tutti i mali, non sono la soluzione di tutti i problemi strutturali, anche se in certe situazioni risultano oramai insostituibili. In molti casi soluzioni più tradizionali sono assolutamente preferibili, e l'uso di questi materiali risulterebbe velleitario se non addirittura pericoloso. L'uso consapevole rappresenta la condizione necessaria per il successo di interventi di rinforzo con questi materiali. Uno degli obiettivi del libro è di fornire quegli elementi di conoscenza necessari per il corretto e consapevole impiego dei compositi nell'ingegneria strutturale.

La ricerca che sta dietro a questo libro riguarda lo studio del problema della valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici esistenti, con particolare riferimento al miglioramento sismico degli edifici in c.a. e muratura mediante l'applicazione dei compositi. Per concentrarsi su questo obiettivo sono state fatte delle drastiche limitazioni, e in particolare verranno trattati solo:

- 1) i cosiddetti FRP (Fiber Reinforced Plastics) con diversi tipi di fibre (in particolare fibre di carbonio, CFRP, o di vetro, GFRP);
- 2) i compositi a fibra lunga, tipicamente unidirezionali e in forma di strisce o tessuti;
- 3) il consolidamento di strutture in calcestruzzo ad armatura lenta o in muratura.

Non vengono pertanto considerati i compositi a fibra corta, barre in composito, i compositi a matrice cementizia, il consolidamento di strutture in legno, acciaio e precompresso, il progetto di strutture nuove in composito (pultrusi), ecc. Inoltre, l'attenzione è stata focalizzata sulle prestazioni strutturali e sul loro calcolo secondo normativa; non vengono quindi trattate tutte le questioni legate ai collaudi, alle certificazioni, ecc.

Per meglio perseguire gli obiettivi che ci si era dati, si è deciso di dividere il libro sostanzialmente in due parti. Nella prima vengono trattate tutte le questioni del rinforzo "statico" mediante i compositi. Questa parte riguarda più il singolo elemento strutturale che non l'intera struttura, e, oltre ad avere un interesse in sé, risulta propedeutica per la seconda. Qui l'edificio viene considerato nella sua interezza e sono trattate in dettaglio le problematiche della valutazione della vulnerabilità sismica, prima e dopo l'intervento di consolidamento con i compositi, con costante riferimento ai dettami della normativa.

L'idea di questo libro nasce poco più di due anni fa, quando l'allora recente uscita di nuove normative specifiche, in particolare della CNR-DT200/2004, aveva confermato che l'argomento era oramai maturo, da un lato, ma non ancora sufficientemente conosciuto dall'altro, visto l'oggettiva complicazione della norma per i professionisti. Ci si propose quindi di illustrare alcuni aspetti meno evidenti delle normative stesse, cercando dove possibile di mostrare le motivazioni che hanno condotto a formule apparentemente "magiche" ma in realtà spesso ben fondate scientificamente o sperimentalmente.

La scrittura è stato un percorso ad ostacoli, che si è dovuto confrontare con l'evoluzione continua del quadro normativo di riferimento. Vogliamo qui ricordare solo le principali:

- 20 marzo 2003, “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica,” Ordinanza n. 3274 della Presidenza del Consiglio dei Ministri.
- 26 aprile 2005, “Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l’utilizzo di Compositi Fibrorinforzati,” Consiglio Nazionale delle Ricerche, Documento CNR-DT200/2004.
- 3 maggio 2005, “Ulteriori modifiche ed integrazioni all’OPCM n. 3274 del 20.3.2003,” Ordinanza n. 3431 della Presidenza del Consiglio dei Ministri.
- 23 settembre 2005, “Norme tecniche per le costruzioni,” Decreto Ministeriale.
- 14 gennaio 2008, “Nuove norme tecniche per le costruzioni,” Decreto Ministeriale.
- 2 febbraio 2009, Circolare n. 617: “Istruzioni per l’applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008,” Ministero dei lavori pubblici.
- 24 luglio 2009, “Linee Guida per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di Strutture di cemento armato, cemento armato precompresso e murarie mediante FRP,” Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.
- 27 agosto 2009, “Linee guida per la riparazione e il rafforzamento di elementi strutturali, tamponature e partizioni,” Dipartimento della protezione civile, Reluis (bozza).
- 23 settembre 2009, “Allegato alle Linee guida per la riparazione e il rafforzamento di elementi strutturali, tamponature e partizioni. Esempio di calcolo su rafforzamento locale di nodi d’angolo con compositi,” Dipartimento della protezione civile, Reluis (bozza).

All’uscita di ogni nuovo documento è stato necessario ripartire da capo, verificando la compatibilità di quanto finora scritto con le nuove indicazioni. È stato un lavoro abbastanza faticoso da questo punto di vista: anche a bozze chiuse, il 23 settembre 2009, è uscito un documento che ci ha costretto a una ulteriore revisione, comportando dei ritardi nella pubblicazione rispetto al programma originario.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare Laura Marcheggiani, Giuseppe Pace, Cristhian Clementi, Fabio Belardini, Francesco Monni, Matteo Falzetti, per la fattiva collaborazione prestata.

Questo libro nasce da una fruttuosa collaborazione con l’Ordine degli Ingegneri della Provincia di Ancona, che con lungimiranza ha cofinanziato una borsa di dottorato da cui è scaturito questo lavoro. Il ringraziamento non è formale o dovuto, ma sincero e convinto.

Ancona, settembre 2009

Francesco Clementi
Stefano Lenci