

I MATERIALI COMPOSITI FIBRORINFORZATI NEL MIGLIORAMENTO E NELL'ADEGUAMENTO SISMICO DELLE COSTRUZIONI

*E. COSENZA, G. FABBROCINO, G. MANFREDI, A. PROTA,
Dipartimento di Analisi e Progettazione Strutturale, Università di Napoli Federico II
Via Claudio, n° 21, 80125 – Napoli
M. PECCE
Dipartimento di Ingegneria, Università del Sannio, Piazza Roma, 82100 – Benevento*

1. PREMESSA

La presente memoria rappresenta una sintesi di alcuni studi condotti dal Gruppo di Ricerca dell'Università di Napoli Federico II e dell'Università del Sannio sull'impiego dei materiali compositi nel rinforzo strutturale.

Come è noto, i materiali compositi possono coprire un ampio spettro di applicazioni, giacchè agendo opportunamente sulle caratteristiche della matrice polimerica, delle fibre e della loro percentuale relativa è possibile modificare le proprietà meccaniche risultanti ed ottimizzarle per lo specifico progetto. e sicuramente un grande vantaggio rispetto ad altri materiali è la ridottissima propensione al degrado nel tempo.

Le problematiche proposte da simili potenzialità sono molteplici, ma è altresì vero che l'uso dei materiali compositi nel mondo delle costruzioni è una realtà consolidata [1]. Tra i punti di forza sicuramente va evidenziata la ridottissima propensione al degrado nel tempo e la grande semplicità e velocità di applicazione. Tali caratteristiche hanno, infatti, condotto a numerose applicazioni dei materiali compositi fibrorinforzati nel rinforzo di ponti, sia a seguito di degrado dei materiali originali che a incidenti che hanno diminuito la capacità portante della struttura [2,3].

Nel seguito si esaminano due importanti casi relativi alle costruzioni in zona sismica: il miglioramento sismico di edifici in muratura di interesse architettonico e l'adeguamento sismico di edifici in cemento armato progettati per soli carichi gravitazionali o in presenza di codici sismici obsoleti.

I temi proposti sono di un certo interesse, perchè riguardano tipologie costruttive particolarmente rappresentative della realtà italiana, anche alla luce della nuova classificazione sismica e della normativa tecnica italiana ad essa correlata [4] che ha introdotto l'uso dei materiali compositi nell'adeguamento sismico degli edifici esistenti.

In particolare nel paragrafo 2 della presente nota sono sintetizzati alcuni studi relativi al miglioramento sismico di uno dei campanili più alti delle Marche, condotti in accordo con la Soprintendenza, mentre nel paragrafo 3 sono riportati studi sperimentali relativi al rinforzo sismico dei nodi trave – pilastro in cemento armato ed alle conferme sperimentali del sistema di rinforzo con prove su telai realizzati e sottoposti a prova pseudodinamica in scala reale.

2. I MATERIALI COMPOSITI PER LA SALVAGUARDIA DEI BENI ARCHITETTONICI

2.1 Introduzione

La moderna ricerca applicata richiede oramai competenze multidisciplinari fortemente integrate fra loro. Infatti tutti i problemi attuali di maggior impatto nella società hanno un livello di complessità tale da coinvolgere diversi aspetti tecnici, oltre che sociali ed economici. Dunque nel futuro diventa

essenziale la creazione di gruppi di ricercatori, di discipline anche molto diverse, fortemente integrati, che riescano a mettere in rete le proprie competenze, interagendo proficuamente.

Nel settore dei Beni Architettonici un'istanza di questo tipo è ancora più rilevante, dal momento che solo una forte interazione di Ingegneri di diversa estrazione con Storici ed Architetti consente la risoluzione dei casi più difficili di rafforzamento e/o adeguamento, ovvero di conservazione e/o salvaguardia del costruito storico.

In particolare, così come sancito dalla Carta di Venezia, gli interventi di rinforzo strutturale devono rispettare i requisiti della "reversibilità" e della "trasparenza". Devono cioè risultare il più possibile rimovibili e tali da garantire il ripristino della configurazione originale portatrice di contenuti di natura storica ed artistica; gli interventi, quindi, non possono essere invasivi e devono facilmente distinguibili dalla struttura originaria.

Nel passato, anche recente, i requisiti citati sono stati tenuti in scarsa considerazione e ciò ha provocato danni talvolta irreversibili al patrimonio culturale; molte tecniche costruttive utilizzate nelle costruzioni ordinarie sono state applicate su manufatti anche millenari, come templi greci e romani, provocando effetti collaterali impreveduti, spesso irreparabili. E' ben noto che l'impiego di acciaio ordinario inserito con barre o piatti in costruzioni in muratura e i conseguenti fenomeni di corrosione hanno provocato quadri fessurativi progressivi ed irreversibili a causa dell'aumento di volume degli inserti.

I concetti di "reversibilità" e di "trasparenza" sono in realtà asintotici: qualsiasi intervento può tendere a conseguire tali obiettivi, ma non è mai capace di coglierli pienamente, per cui è sempre essenziale la ricerca su nuovi materiali e nuove tecnologie.

A tali esigenze possono rispondere alcuni materiali innovativi come i compositi fibrorinforzati, che al variare della qualità della matrice e quindi delle resine utilizzate, della qualità delle fibre e delle relative percentuali, aprono scenari nuovi nel mondo delle costruzioni. Infatti, in linea di principio risulta possibile sviluppare un materiale ottimizzato per ciascuna applicazione strutturale, associando ad elevate prestazioni meccaniche una durabilità di gran lunga superiori a quella dei tradizionali materiali da costruzione.

Queste potenzialità restano talvolta inesprese giacché la disponibilità su larga scala dei materiali e delle soluzioni tecnologiche è ovviamente condizionata da motivazioni di carattere economico ed industriale. Allo stesso modo, materiali metallici avanzati come le leghe di alluminio e titanio stanno affermandosi sul mercato delle costruzioni e del restauro per l'elevata resistenza alla corrosione e conseguente durabilità.

Nel seguito viene presentato un caso-studio che evidenzia con chiarezza le fasi del processo di conservazione e la salvaguardia dei beni architettonici: analisi storico-costruttiva, diagnostica non distruttiva, analisi numeriche complesse per poter cogliere l'effettivo comportamento strutturale, e soprattutto impiego di materiali e tecnologie innovative capaci di assicurare durabilità e compatibilità con l'esistente.

2.2 Il caso del campanile della chiesa di S. Lucia, Serra San Quirico, Ancona

Il caso studiato riguarda un campanile, facente parte del complesso della Chiesa di S. Lucia a Serra San Quirico, in provincia di Ancona. Lo stato della costruzione dopo il noto terremoto di Marche ed Umbria ha indotto la Soprintendenza per i Beni Architettonici, culturali ed ambientali delle Marche (Ancona) ad eseguire un consolidamento. I requisiti dell'intervento delineati dal Soprintendente Enrico Guglielmo e sottoposti all'attenzione del progettista strutturale, Prof. Edoardo Cosenza, hanno trovato nell'impiego dei materiali compositi una soluzione formalmente e strutturalmente adeguata.

Il campanile risale al XV secolo, è alto 32 m ed è inglobato completamente nel tessuto edilizio del centro storico, Fig. 1. Per il suo inserimento in un complesso aggregato strutturale comprendente sia

la chiesa che l'adiacente chiostro, la risposta strutturale risulta dipendente dall'effettivo livello di vincolo offerto dalle costruzioni limitrofe.

Tale circostanza ha condotto all'esecuzione di una prova di identificazione dinamica della struttura, mediante eccitazione forzata con vibrodina e misura delle vibrazioni indotte dal vento [5]. L'utilizzo di accelerometri ad elevate prestazioni ha consentito energie di eccitazione molto basse, diminuendo il rischio di danno al complesso.

L'identificazione strutturale è passata attraverso la modellazione 3D della struttura (Fig. 2), basata sull'accurato rilievo effettuato in sito. E' stata simulata sia la presenza e l'assenza del vincolo costituito dagli elementi circostanti, in modo da stimare il relativo effetto sulle frequenze di vibrazione e di forme modali.

La sperimentazione [5] ha mostrato con chiarezza l'assenza di vincolo costituito da chiesa e chiostro.

La progettazione strutturale del rafforzamento è stata impostata per conseguire gli obiettivi di reversibilità e trasparenza già introdotti. Pertanto, oltre agli interventi locali sulla muratura di natura tradizionale, è stata adottata una soluzione che si inserisse nella parte interna del campanile e che assicurasse un sostanziale incremento della resistenza sismica complessiva [6].

E' stato, infatti, realizzato un traliccio in tessuto di carbonio con elementi verticali ed elementi inclinati ed anelli orizzontali continui sulle quattro pareti interne. Tutti i fori e le aperture esistenti sono stati salvaguardati insieme alle travi in legno dei solai esistenti. Queste non sono state rimosse, poiché si è intervenuti sul solo tavolato esistente. Alcuni grafici di progetto sono riportati in Fig. 3.

Il dimensionamento degli elementi in composito è stato effettuato in modo da conferire un'apprezzabile resistenza a trazione agli elementi murari, capace di quasi raddoppiare la resistenza sismica del campanile. Dunque la struttura conserva completamente la sua consistenza per terremoti di bassa intensità, in quanto la rigidità della struttura non si modifica con l'intervento; nel caso di terremoti di rilevante intensità la struttura muraria, se sottoposta a forti decompressioni, perde la sua coesione ed attiva il materiale composito. Particolare attenzione è stata rivolta ai dettagli costruttivi come le sovrapposizioni intermedie dei compositi e i vincoli del traliccio in fondazione. A tal proposito, si osservi che la flessibilità del composito è stata sfruttata proprio nelle zone di ancoraggio, dove il flusso tensionale caratterizzato da isostatiche fortemente curvilinee è stato contrastato mediante l'utilizzo del tessuto quadriassiale.

Il trattamento superficiale delle pareti murarie è stato particolarmente curato, anche con analisi di laboratorio eseguite presso il laboratorio della Mapei s.p.a. .

Alcuni dettagli dell'intervento sono mostrati in Fig. 4 e 5. La prima si riferisce alla parte inferiore delle pareti; sono visibili i compositi e l'attacco con in fondazione realizzato con piastre metalliche; la seconda evidenzia la cura nel disegno progettuale per evitare la rimozione delle travi esistenti.

2.3 Osservazioni conclusive

In conclusione si evidenzia che il tema della salvaguardia del patrimonio architettonico e storico è di fondamentale importanza ed attualità [7]. In tale ambito l'Ingegneria delle Strutture ha un ruolo importante, ma non esclusivo sulle attività di consolidamento statico, conservazione e salvaguardia del costruito storico.

Il caso studiato mostra la necessità di studiare i problemi caso per caso, e contemporaneamente come la condivisione della conoscenza e l'integrazione delle competenze siano essenziali nel processo progettuale e come sia necessario introdurre nel settore le tecnologie più avanzate e i materiali più innovativi. Si osservi che è stato dimostrato sperimentalmente un elevatissimo grado di reversibilità dell'elemento mediante riscaldamento [8].

3. MATERIALI INNOVATIVI PER IL RINFORZO SISMICO DELLE STRUTTURE IN CEMENTO ARMATO

3.1 Introduzione

Il miglioramento delle prestazioni delle strutture esistenti soggette ad azioni sismiche può essere perseguito o migliorando la capacità di risposta della struttura oppure limitando la richiesta a cui la struttura stessa è soggetta in caso di terremoto. A seconda della tecnica di rinforzo che si adotta, il miglioramento del comportamento strutturale può ottenersi, come mostrato in figura 6, mediante: (a) un incremento di resistenza e/o di rigidezza; (b) un incremento di resistenza e di duttilità; (c) un aumento della sola capacità deformativa. Nel caso in cui, invece, non si vuole o non si può procedere ad un intervento di rinforzo, la vulnerabilità può essere ridotta agendo sulla richiesta (in termini di prestazioni) a cui la struttura è chiamata a rispondere durante un terremoto (sistemi di isolamento alla base o di dissipazione energetica, oppure interventi tesi alla riduzione della massa globale). Nel seguito si discuterà degli interventi collocabili nella prima categoria di soluzioni, ed, in particolare, di quelli che tendono al miglioramento delle prestazioni globali di un telaio agendo localmente su alcuni suoi elementi. Attraverso essi, è possibile migliorare la capacità deformativa globale conferendo a singoli elementi una maggiore duttilità oppure modificando la gerarchia delle resistenze, cioè la sequenza con cui i differenti elementi (travi e pilastri) si plasticizzano.

L'intervento per incrementare la duttilità locale dipende dal tipo di elemento, trave o pilastro, e dalla modalità di crisi che lo caratterizza. Generalmente la capacità di deformazione in campo plastico degli elementi è limitata quando la crisi è legata al calcestruzzo compresso; in tal caso un intervento di confinamento determina una modifica del legame costitutivo del calcestruzzo che, essendo più confinato, diventa capace di raggiungere deformazioni ultime maggiori, conferendo maggiore duttilità agli elementi. La necessità di modificare la gerarchia delle resistenze è, invece, tipica di strutture progettate per soli carichi verticali e dunque caratterizzate da sezioni inadeguate e da carenza di armatura longitudinale. Tali caratteristiche fanno sì che si determini una condizione di colonna debole-trave forte, la quale, in caso di terremoto, può causare la formazione delle prime cerniere plastiche nei pilastri ed eventualmente generare un collasso caratterizzato da un meccanismo di piano. Tale modalità di crisi risulta fragile e poco dissipativa. Il progetto del rinforzo deve in questo caso tendere a migliorare la risposta sismica globale al fine di spostare la formazione delle prime cerniere plastiche sulle travi (meccanismo di trave) in modo da ottenere un meccanismo più duttile e dissipativo. L'introduzione di materiali avanzati ed innovativi, quali i Fiber Reinforced Polymer (FRP), consente oggi di raggiungere questi obiettivi con notevoli vantaggi rispetto alle tecniche tradizionali, in termini di costi e tempi di realizzazione, facilità di messa in opera, riduzione degli spazi interni fruibili, durabilità e ridotta influenza sulla massa globale originaria.

3.2. Applicazioni dei materiali compositi in zona sismica

I materiali compositi fibrorinforzati rappresentano una soluzione molto efficace per il rinforzo strutturale nei casi in cui la filosofia di intervento si basi su interventi di tipo locale [9]. Essi possono essere utilizzati sotto forma di fogli o di barre cosiddette NSM (near surface mounted). Generalmente, per il rinforzo di strutture in cemento armato si adottano fogli in fibra di carbonio (CFRP), anche se in alcuni casi sono stati impiegati anche tessuti in fibra di vetro (GFRP) o aramidica (AFRP). Per quanto riguarda le barre, sono ancora più evidenti le buone prestazioni negli elementi in c.a. legate alle caratteristiche meccaniche delle fibre di carbonio [10].

Nonostante l'utilizzazione degli FRP sia una tecnica recente, le esperienze presenti in letteratura relative alle tecnologie di rinforzo sismico con FRP sono già numerose [11]. Nel seguito, se ne forniscono due esempi che riguardano il rinforzo con materiali compositi di nodi trave-colonna e telai in cemento armato.

3.3 Il Rinforzo di nodi trave-colonna.

Il nodo trave-colonna rappresenta un'altra regione critica all'interno delle strutture intelaiate. Per le varie tipologie di nodo che si differenziano a seconda della loro posizione in elevazione ed in pianta, il concetto alla base del rinforzo sismico è ancora rappresentato dal raggiungimento di una corretta gerarchia delle resistenze. Agendo localmente sui suoi componenti, si deve tendere a conferire al nodo un comportamento più duttile, spostando la crisi del telaio verso meccanismi di tipo globale.

Come evidenziato in precedenza, gli edifici in cemento armato più vulnerabili sismicamente sono caratterizzati da una condizione di colonna debole-trave forte. Rinforzando i pilastri mediante un incremento del grado di confinamento o dell'armatura a flessione si tende a spostare la crisi dal pilastro verso il pannello (intersezione trave-colonna). Ciò accade perché il rinforzo del pilastro ne aumenta la resistenza e quindi fa sì che la sua crisi sia prevenuta dal collasso del pannello. In tal modo si ottiene un beneficio in termini di prestazioni globali del telaio. Un ulteriore intervento sul pannello, in aggiunta a quello del pilastro, può poi consentire di muoversi verso il livello successivo della gerarchia delle resistenze, e cioè la crisi delle travi. Come già sottolineato, tale modalità di crisi è quella più favorevole in quanto è caratterizzata da un meccanismo duttile e da una elevata capacità dissipativa.

Seguendo tale filosofia, è stata condotta una campagna sperimentale (svolta presso il Center for Infrastructure Engineering Studies (CIES) della University of Missouri-Rolla) finalizzata a validare l'efficacia di una tecnica innovativa per il rinforzo di nodi interni trave-colonna [11] con l'impiego di compositi. L'intervento si basa sull'uso combinato di fogli e barre NSM in fibra di carbonio. Il programma di prove ha riguardato 11 nodi in cemento armato in scala 1/2, sui quali si è variato il livello di sforzo normale e lo schema di rinforzo con CFRP. I livelli di forza assiale analizzati sono stati 3, corrispondenti ad una tensione media di compressione nel pilastro pari a 3 MPa, 6 MPa e 9 MPa.

Il proporzionamento dei provini e dell'armatura metallica è stato effettuato secondo i dettami del codice americano ACI 318 del 1963, al fine di simulare una condizione tipica di una struttura degli anni '60 progettata per soli carichi verticali. La percentuale di armatura longitudinale dei pilastri è risultata così pari allo 1.9% dell'area di calcestruzzo, ottenuta disponendo 4 barre metalliche longitudinali $\Phi 16$: si realizza in questo modo una tipica condizione di colonna debole-trave forte. Inoltre, non si sono disposte staffe nel pannello nodale, così come tipicamente accadeva per strutture realizzate senza dettagli sismici.

Per ogni serie di nodi caratterizzati dallo stesso sforzo normale, si sono studiati tre schemi di rinforzo. Il primo schema, mostrato in Figura 7, è stato caratterizzato dalla fasciatura dei pilastri con due strati di fibre unidirezionali in CFRP.

Nel secondo schema, il rinforzo del pilastro è stato effettuato sia con un incremento del grado di confinamento (fasciatura come nello schema precedente) che con un'aggiunta di barre longitudinali in CFRP passanti attraverso il pannello (Figura 8). L'ultimo schema ha, infine, riproposto il rinforzo dei pilastri appena descritto (barre e fasciatura) aggiungendo, però, il rinforzo del pannello (Figura 9). Tale rinforzo è stato realizzato con tessuto in CFRP nella direzione parallela all'asse dei pilastri e con barre NSM nella direzione parallela all'asse delle travi. Al fine di confinare tali barre, si sono realizzati sulle travi degli ancoraggi ad U, lasciando libero l'estradosso delle travi stesse che nella realtà costruttiva è reso inaccessibile dalla presenza del solaio.

I risultati sperimentali hanno confermato l'efficacia della tecnica proposta per il rinforzo sismico di nodi trave-colonna. I provini non rinforzati hanno effettivamente subito una crisi dovuta allo schiacciamento del calcestruzzo nei pilastri, come mostrato in Figura 10. La sola fasciatura dei pilastri si è dimostrata efficace per spostare la crisi dalla colonna al pannello solo per sforzo assiale elevato. Per sforzo assiale corrispondente ad una tensione media di 3 MPa, la crisi del nodo ha coinvolto sia il pilastro (a trazione) che il pannello. Decisiva per spostare in ogni caso la crisi dal pilastro al pannello è apparsa l'introduzione delle barre longitudinali in CFRP. Indipendentemente dal valore dello sforzo assiale, tutti i nodi rinforzati con lo schema di Figura 8 hanno mostrato crisi per taglio del pannello (Figura 11). L'aggiunta di materiale composito sul pannello (Figura 9) ha consentito di aumentare la resistenza di quest'ultimo, determinando una crisi per tranciamento all'interfaccia pilastro-pannello.

Le differenti modalità di rottura determinano differenti prestazioni in termini di resistenza e di duttilità che possono essere espresse rispettivamente in termini di taglio nei pilastri, ed in termini di spostamento relativo tra i due pilastri del nodo (angolo di story drift), che è equivalente allo spostamento orizzontale relativo tra due piani di un telaio. In figura 12 sono rappresentati i fusi di tali parametri per ciascuna classe di provini (non rinforzati e rinforzati secondo gli schemi di Figure 7-9), relativamente all'inizio della fessurazione nel pannello (aree in rosso in Figura 12 e alla condizione ultima del nodo (aree in blu in Figura 12). La condizione di inizio della fessurazione del pannello è molto importante in quanto rappresenta il primo stadio di un deterioramento delle prestazioni strutturali.

Nella figura 12, con riferimento invece alla condizione ultima del nodo, si osserva che lo schema 1 di rinforzo (confinamento dei pilastri) determina un incremento di resistenza compreso tra il 10% ed il 26%, mentre l'aggiunta delle barre NSM (schema 2) ha comportato incrementi di resistenza ultima compresi tra il 43% ed il 55%. In entrambi i casi, all'incremento di resistenza non corrisponde un altrettanto significativo miglioramento della duttilità che è risultata addirittura minore rispetto al non rinforzato per sforzo assiale basso (nel caso dello schema 1) o per resistenza del calcestruzzo ridotta (nel caso dello schema 2). In tali due casi, all'aumento di duttilità della sezione del pilastro dovuta all'azione di confinamento del composito corrisponde un modesto irrigidimento del nodo considerato nel suo insieme. Il rinforzo del pannello (schema 3) consente, infine, di ottenere le migliori prestazioni con valori di resistenza tra il 44% ed il 75% maggiori rispetto al non rinforzato e, soprattutto, un aumento di capacità deformativa compreso tra il 50% ed il 75%. Tali considerazioni assumono particolare rilievo se si considera che il nodo analizzato rappresenta una sottostruttura estratta da un tipico telaio in cemento armato progettato per soli carichi verticali. Pertanto, il suo comportamento fornisce indicazioni estendibili poi all'intera struttura intelaiata ed alle sue prestazioni sismiche.

3.4 Riparazione di un telaio danneggiato da azioni sismiche

Una struttura intelaiata in cemento armato è stata realizzata in scala reale e sottoposta a prova nell'ambito dell'attività del network ICONS presso il laboratorio ELSA del JRC di Ispra. La struttura era costituita da due telai paralleli collegati da diaframmi rigidi; un telaio è stato progettato secondo le regole dell'Eurocodice 8, l'altro seguendo l'approccio del Displacement Based Design (Dbd). Ciascun telaio aveva una configurazione caratterizzata da due setti ravvicinati collegati da travi corte; in particolare, ciascuno aveva due pilastri con sezione rettangolare, un setto a sezione rettangolare ed uno avente sezione ad L, le cui dimensioni sono riportate in Figura 13. Dei quattro piani, gli ultimi tre avevano altezze pari a 3 m, mentre il primo era alto 3.5 m.

La struttura è stata prima sottoposta a due prove pseudodinamiche, la prima corrispondente al terremoto di progetto e la seconda ad un terremoto pari ad 1.5 volte il precedente. La struttura ha riportato danni significativi per effetto del secondo terremoto, la cui azione è stata interrotta prima che i due telai raggiungessero livelli di danno così elevati da impedirne la riparazione. Si è

osservato un quadro fessurativo con lesioni particolarmente concentrate sui due setti del primo piano e sulla trave corta che li collegava (Figura 14). Al momento in cui l'applicazione del secondo terremoto è stata interrotta, si era già verificata una crisi a taglio dei setti.

Dopo queste prove, si è proceduto alla riparazione del telaio originario usando tessuti in fibra di carbonio [12]. Prima dell'applicazione dei tessuti, le fessure presenti sono state iniettate con resina epossidica (Figura 15). In seguito si è eseguita l'applicazione del rinforzo che è stato progettato sfruttando diverse possibili tessiture dei fogli di carbonio (uniassiali, biassiali e quadriassiali) in base all'elemento strutturale che andava riparato e rinforzato. Nel far ciò, si è tenuto conto dei danni e delle carenze osservate nelle prove sulla struttura originaria e si è cercato di ottimizzare la disposizione del tessuto in base all'andamento prevalente delle tensioni principali su ciascun elemento. La riparazione dei setti e delle travi corte è stata realizzata con fogli quadriassiali (Figura 16); le fasciature dei pilastri sono state fatte con fibre uniassiali (Figure 17 e 18). Al fine di comparare due soluzioni, i nodi interni e quelli dei setti sono stati riparati con tessuto quadriassiale (Figure 16 e 17), mentre per gli esterni si è adottato il biassiale (Figura 18). Globalmente, il peso dei materiali compositi usati per la riparazione dei due telai (Figura 19) è risultato pari allo 0.8% del peso della struttura originaria in cemento armato.

Le due prove pseudodinamiche fatte sulla struttura originaria sono state ripetute su quella riparata con l'obiettivo di misurarne la resistenza ultima e verificare l'efficacia del rinforzo. Anche nel caso della struttura riparata i danni più significativi sono stati causati dal terremoto più gravoso (1.5 volte quello di progetto). La crisi si è avuta per rottura delle barre metalliche longitudinali nella sezione di base dei setti, che si sono completamente staccati dalla fondazione. Si è osservato che la struttura riparata ha mostrato una risposta molto simile rispetto a quella originaria ed è stata anzi caratterizzata da maggiore capacità deformativa. Inoltre, a differenza di quella originaria essa è stata capace di sopportare l'intera azione del terremoto pari a 1.5 volte quella di progetto. Inoltre, dall'esame dei dati sperimentali, si è anche osservato che la capacità dissipativa è equivalente a quella relativa alla struttura originaria.

3.5 Conclusioni

La possibilità di selezionare il tipo di fibra, la tessitura dei fogli, la loro grammatura ed il numero di strati di FRP da applicare offre al progettista una grande flessibilità nella scelta di schemi di rinforzo degli elementi strutturali che consentano di operare sulla gerarchia delle resistenze sia a livello locale che globale. Quando si adottano i materiali compositi, tale obiettivo può essere raggiunto con trascurabile influenza sulla massa globale della struttura. Inoltre, il peso ridotto e le modalità di installazione consentono di semplificare e velocizzare la messa in opera, che in molte applicazioni può essere eseguita senza interrompere l'uso ordinario della struttura.

D'altra parte, la mancanza di standard per il controllo di qualità, sia in fase di produzione che di installazione, e la carenza di criteri di progetto ben definiti rappresentano dei fattori che ostacolano la diffusione delle soluzioni di rinforzo sismico basate sull'uso degli FRP. Va infine sottolineato che, per le loro proprietà, i materiali fibro-rinforzati sono molto sensibili ad azioni trasversali, forniscono un contributo molto modesto quando sono soggetti a compressione e sono poco capaci di trasferire sforzi locali.

4. BIBLIOGRAFIA

[1] COSENZA E., MANFREDI G., NANNI A. (Editors), Proceedings of the International Workshop Composites in Construction: A Reality, Capri, Italy, 20-21 July, 2001, American Society of Civil Engineering, pp. 231-240 (ISBN: 0-7844-0596-4)

- [2] NANNI, A., DI LUDOVICO, M., PARRETTI, R., Shear Strengthening of a PC Bridge Girder with NSM CFRP Rectangular Bars, *Advances in Structural Engineering*, Multi-Science Publishing, in stampa.
- [3] DI LUDOVICO M., NANNI A., PROTA A., COSENZA E., Repair of PC Girders using FRP Laminates: Experimental and Analytical Validation, *ACI Structural Journal*, in stampa.
- [4] PRESIDENZA DEL CONSIGLIO, Dipartimento Protezione Civile, Ordinanza 3274 del 20 marzo 2003, modificata con ordinanza 3316, Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismiche, G.U. 8 maggio 2003.
- [5] PELELLA T., MANNARA G., COSENZA E., IERVOLINO I., LECCE L., Structural dynamic investigations on the bell tower from the S.Lucia's church – Serra S. Quirico, Ancona; 7th Int. Sem. on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures, Assisi, 2001.
- [6] COSENZA E., IERVOLINO I., GUGLIELMO E., Seismic Performance Improvement of the Bell Tower in Serra S. Quirico by Composites, *FRPRCS-6 Int. Symposium*, Singapore, 2003.
- [7] COSENZA E., FABBROCINO G., Tecnologie e materiali innovativi per la salvaguardia dei beni architettonici, storici ed archeologici, *L'Edilizia, Speciale FRP*, n. 127, Marzo-Maggio 2003.
- [8] GUGLIELMO E., COSENZA E., Un esempio di miglioramento sismico reversibile: il caso del campanile della chiesa di S. Lucia, Serra San Quirico – Marche, *Atti del XIX Convegno Internazionale Scienza e Beni Culturali; La reversibilità nel restauro: riflessioni, esperienze, percorsi di ricerca*, Bressanone, 1-4 Luglio 2003.
- [9] MANFREDI G., PECCE M., PROTA A., L'uso dei Compositi nel Rinforzo Sismico delle Strutture in Cemento Armato, *L'Edilizia, Speciale FRP*, n. 127, Marzo-Maggio 2003. PECCE M., MANFREDI G., COSENZA E., Experimental response and code models of GFRP r.c. beams in ultimate and serviceability conditions, *ASCE Journal of Composites for Construction*, Vol.4, n° 4, November 2000 (ISSN: 1090-0268).
- [10] MANFREDI G., PROTA A., Seismic Strengthening with FRP: Opportunities and Limitations, *Proceedings of the International Workshop Composites in Construction: A Reality*, Capri, Italy, 20-21 July, 2001, American Society of Civil Engineering, pp. 231-240 (ISBN: 0-7844-0596-4)
- [11] PROTA A., MANFREDI G., NANNI A., COSENZA E., Selective Seismic Strengthening of RC Frames with Composites, *Proceeding CD-ROM of the Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Boston, Massachusetts, July 21-25, 2002, sponsored by the Earthquake Engineering Research Institute, Paper N. 383.
- [12] BALSAMO A., COLOMBO A., MANFREDI G., NEGRO P., PROTA A., Full-scale Test on a RC Dual System Repaired with Advanced Composites 12th European Conference on Earthquake Engineering, 9-13 September 2002, London, UK.



Figura 1. Il campanile della Chiesa di S. Lucia nel tessuto edilizio di Serra S. Quirico (An).

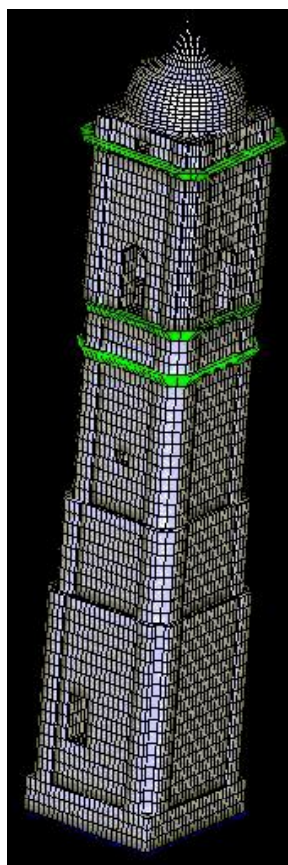


Figura 2. Modello FEM tridimensionale.

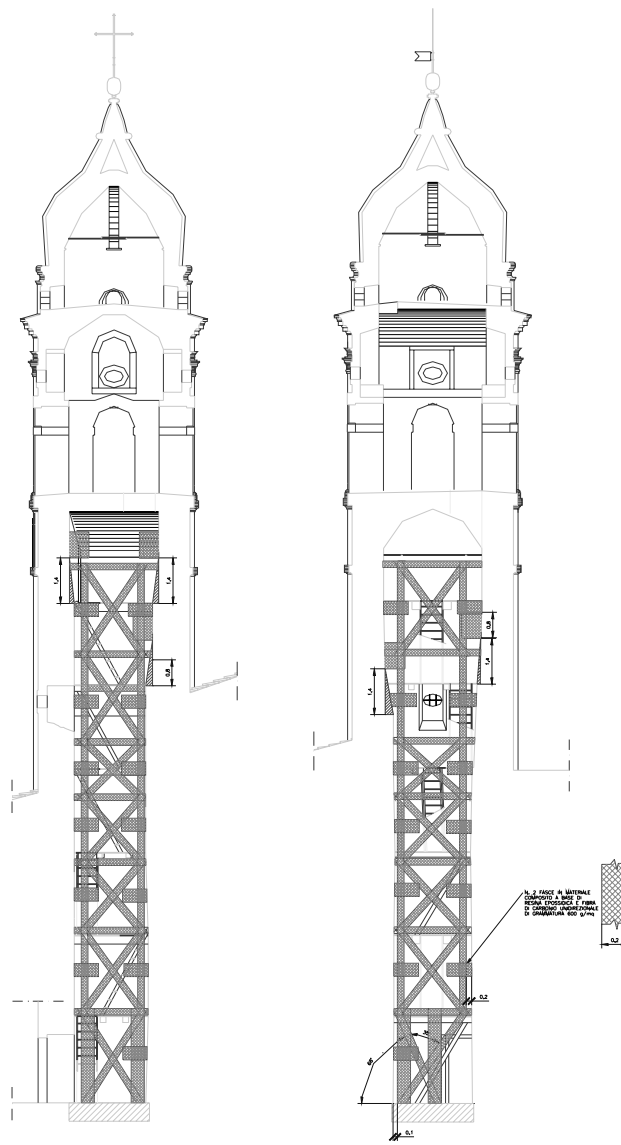


Figura 3. Alcuni grafici di progetto con il rinforzo in composito.



Figura 4. Vista del sistema di controventamento in carbonio e dei collegamenti in fondazione.



Figura 5. Dettagli del rinforzo in corrispondenza dell'incrocio delle pareti murarie e degli impalcati lignei.

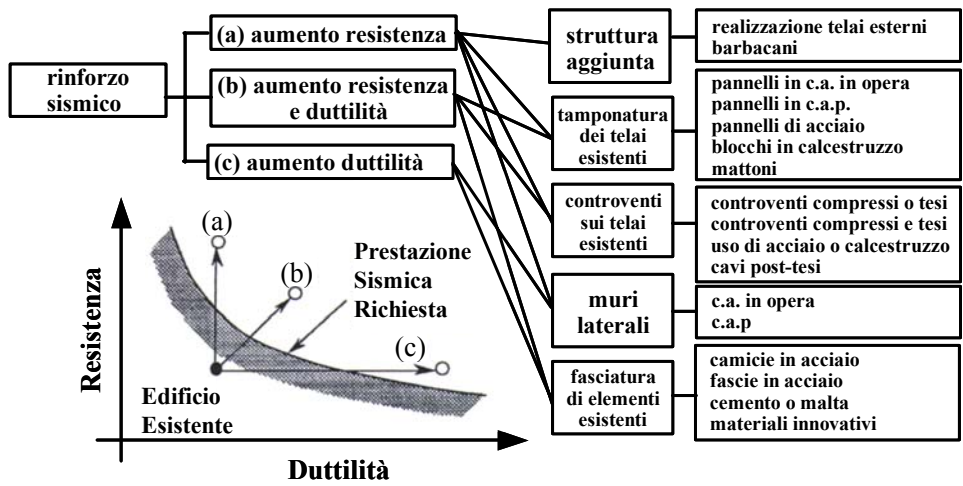


Figura 6. Strategie di rinforzo sismico

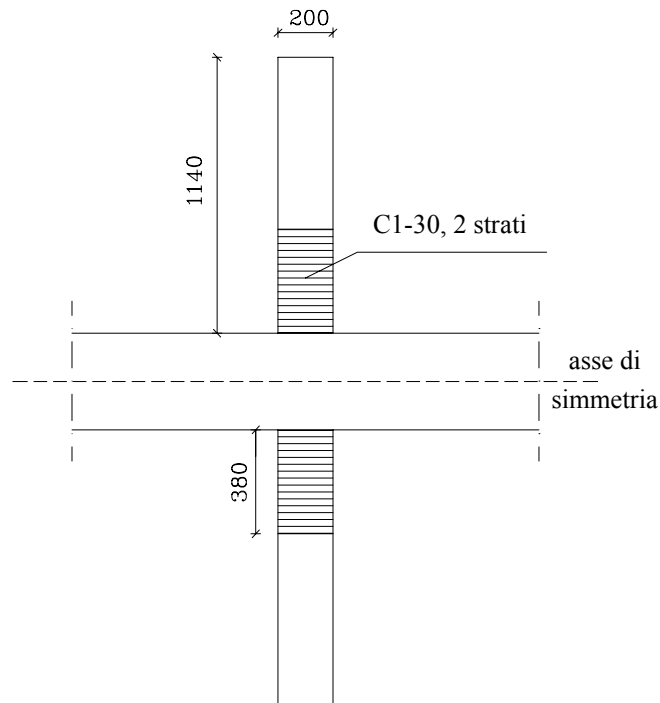


Figura 7. Primo schema di rinforzo di nodi trave-colonna: fasciatura delle colonne

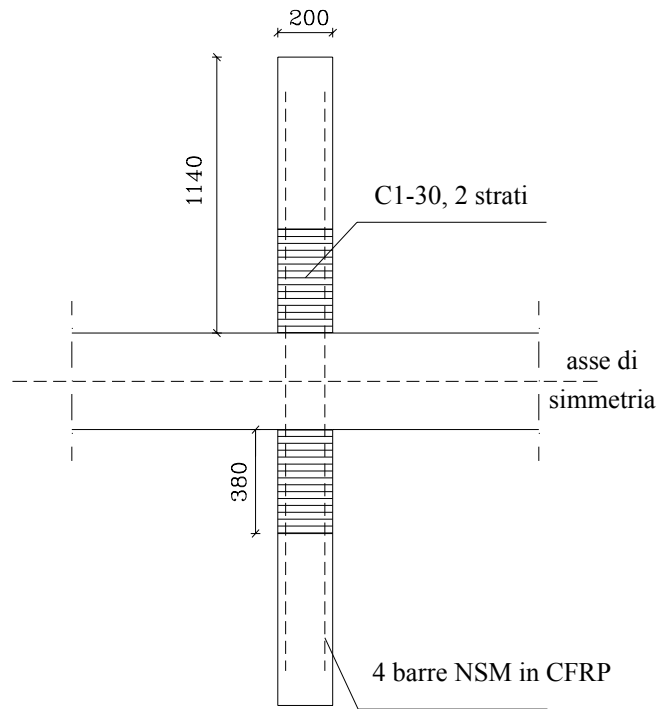


Figura 8. Secondo schema di rinforzo di nodi trave-colonna: fasciatura e barre NSM nelle colonne

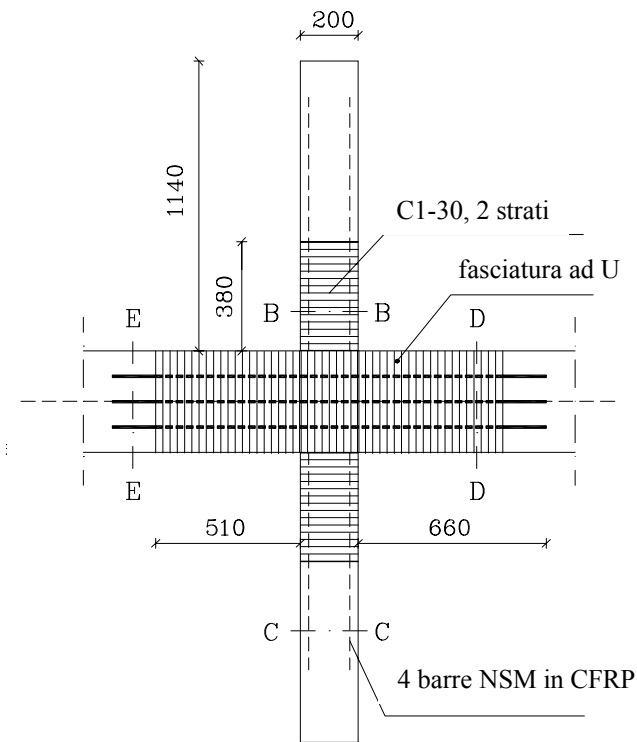


Figura 9. Terzo schema di rinforzo di nodi trave-colonna: intervento sia sulle colonne che sul pannello



Figura 10. Crisi del nodo per schiacciamento del calcestruzzo nelle colonne



Figura 11. Crisi per taglio del pannello

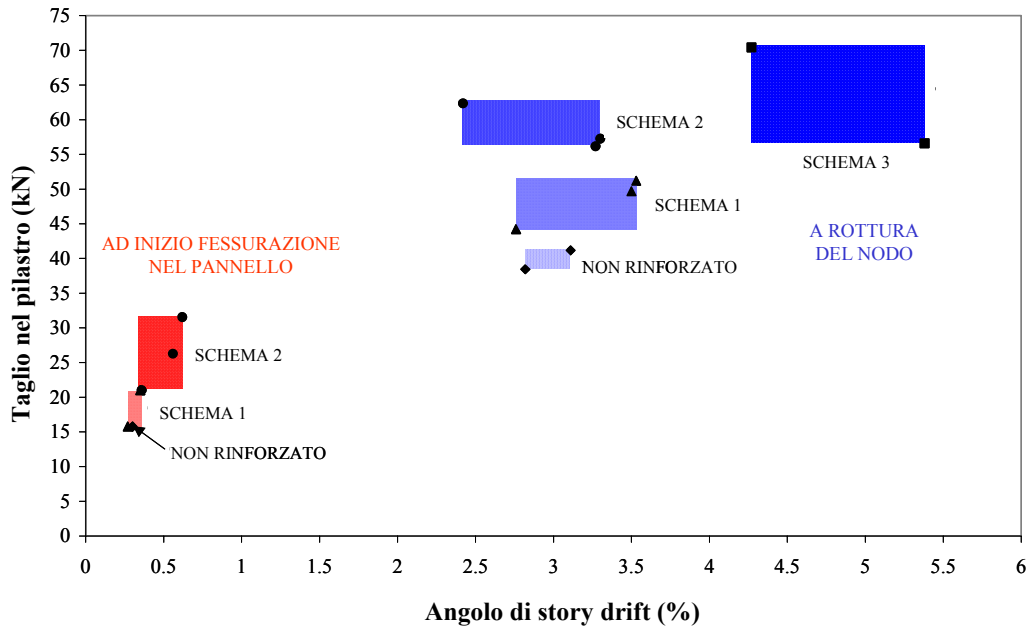


Figura 12. Prestazioni dei nodi in termini di resistenza e duttilità

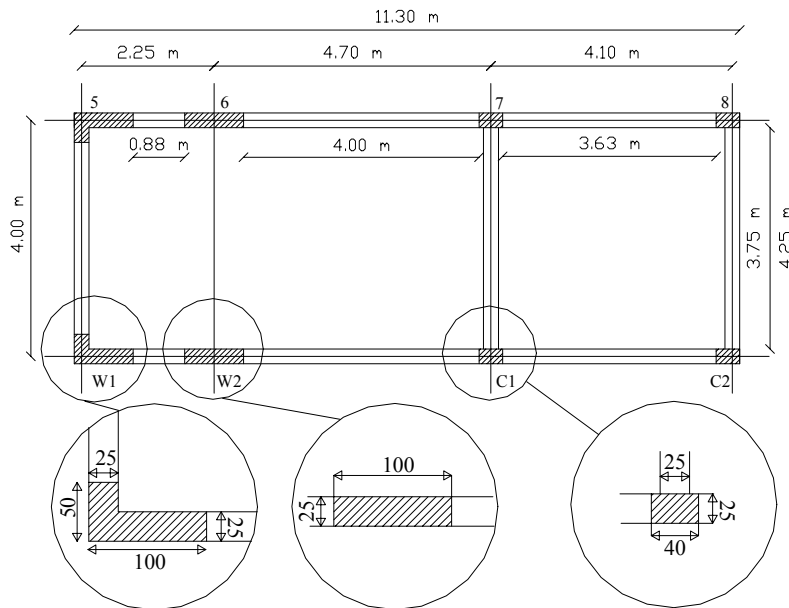


Figura 13. Geometria del telaio provato

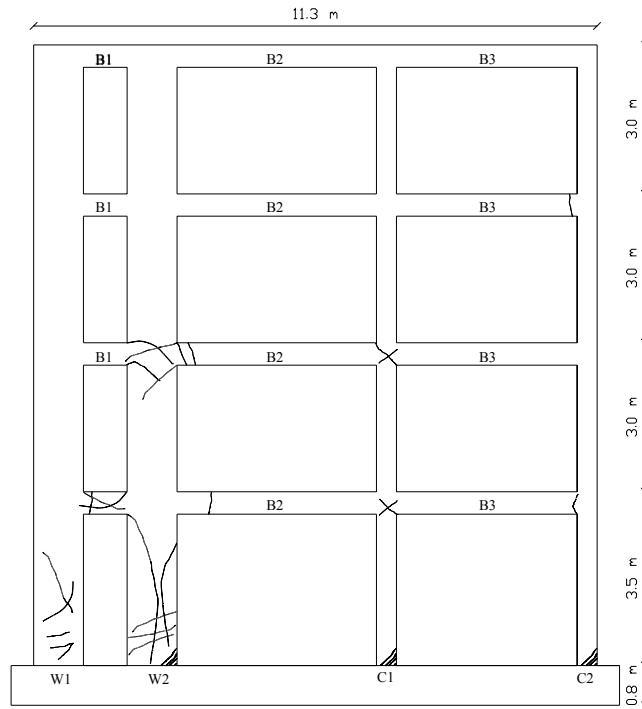


Figura 14. Quadro fessurativo del telaio non rinforzato



Figura 15. Fessure iniettate con resina epossidica



Figura 16. Riparazione dei setti mediante l'utilizzo di fogli quadriassiali



Figura 17. Fasciatura dei pilastri interni con fogli uniassiali



Figura 18. Fasciatura dei pilastri esterni con fogli uniassiali



Figura 19. Vista d'insieme dei telai riparati