

Rinforzo di Nodi Trave-Pilastro d'Angolo di Strutture a Telaio in C.A. con Incamiciatura in HPFRC



Consuelo Beschi, Paolo Riva

Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Bergamo, v.le Marconi 5, 24044 Dalmine (BG).

Alberto Meda

Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Roma "Tor Vergata", via del Politecnico 1, 00133 Roma.

Keywords: edifici esistenti in c.a., nodi trave-pilastro d'angolo, adeguamento sismico, carichi ciclici, incamiciatura in HPFRC.

ABSTRACT

La presente memoria illustra i risultati sperimentali di prove su nodi trave-pilastro d'angolo in scala reale, con lo scopo di studiare l'efficacia dell'applicazione di un'incamiciatura in HPFRC nel rinforzo di strutture esistenti in c.a..

I campioni di prova sono stati progettati riproducendo le carenze strutturali tipiche della pratica costruttiva italiana degli anni '60-'70: assenza di qualsiasi principio di Gerarchia delle Resistenze, uso di barre d'armatura lisce, dettagli inadeguati delle armature, quali assenza di staffe all'interno del pannello nodale e ancoraggi sagomati ad uncino.

Sia i campioni non rinforzati che quelli rinforzati sono stati sottoposti a carichi ciclici applicando cicli di spostamento di ampiezza crescente fino a collasso. I risultati sottolineano l'elevata vulnerabilità del pannello nodale e il ruolo critico assunto dal fenomeno di scorrimento delle barre d'armatura longitudinali legato all'uso di barre lisce e mostrano come, con l'applicazione di un'incamiciatura in HPFRC, è possibile incrementare la capacità portante dei pilastri, raggiungendo anche un adeguato livello di duttilità e di resistenza dei nodi trave-pilastro.

1 INTRODUZIONE

1.1 *L'importanza del rinforzo di nodi trave-pilastro di edifici a telaio in c.a.*

Gli effetti dei terremoti del passato hanno sempre più confermato che i nodi trave-pilastro rappresentano una regione estremamente critica in strutture a telaio in c.a. soggette a carichi sismici.

Il comportamento dei nodi, infatti, influenza la risposta dell'intero sistema strutturale non solo in termini di resistenza, ma anche in termini di deformabilità. Tra i meccanismi di collasso possibili si annoverano a livello globale l'esistenza di sistemi a travi/forti-pilastri/deboli e a livello locale la formazione di meccanismi di

collasso fragili legati a un'inadeguata protezione del pannello nodale.

L'obiettivo di un intervento di rinforzo su nodi trave-pilastro è, quindi, quello di modificare i possibili meccanismi fragili, legati alla rottura per taglio della regione nodale, in meccanismi di collasso duttili, forzando la formazione di cerniere plastiche alle estremità delle travi.

Il terremoto dell'Aquila (2009), e in misura minore anche quello dell'Emilia Romagna (2012), hanno drammaticamente dimostrato come in Italia una vasta parte degli edifici in c.a., progettati per soli carichi verticali, non sia stata in grado di sostenere le azioni sismiche. La causa va ricercata principalmente nelle carenze strutturali, quali proprietà scadenti dei materiali (solitamente calcestruzzi con basse resistenze); assenza di qualsiasi principio di Gerarchia delle Resistenze; ridotto confinamento nelle zone di potenziale

formazione delle cerniere plastiche (in particolare assenza di armatura trasversale nei nodi); dettagli inadeguati delle armature, come ancoraggi insufficienti e uso di barre lisce con ancoraggi d'estremità a uncino.

Il rinforzo di strutture esistenti in c.a. è, quindi, divenuto argomento di grande attualità in Italia. D'altra parte la valutazione della risposta sismica di telai in c.a. progettati prima dell'introduzione di adeguate normative sismiche (DM 14.01.2008, EN 1998 2004), è stata solo recentemente oggetto di studi sperimentali e numerici, così che in letteratura poche sono le prove sperimentali disponibili sul comportamento di nodi trave-pilastro rinforzati e non.

1.2 Tecniche di rinforzo di nodi trave-pilastro

Negli ultimi decenni diverse tecniche sono state proposte per l'adeguamento sismico di strutture esistenti in c.a. (Fib Bulletin No. 24, no. 35, Fib Report 1991).

Per quanto riguarda il rinforzo dei pilastri, è comunemente diffuso l'uso di incamiciature in c.a. Queste, tuttavia, presentano l'inconveniente di essere caratterizzate da spessori superiori a 70-100 mm, dal momento che lo spessore della camicia è governato dal copriferro sia interno sia esterno, con conseguente aumento delle dimensioni delle sezioni e, quindi, della massa e della rigidità degli elementi, con la necessità di prestare particolare attenzione alla risposta sismica dell'intero sistema strutturale rinforzato. Sebbene sia risaputo che l'adozione di incamiciature in c.a. permette di incrementare non solo la resistenza degli elementi strutturali, ma anche la duttilità, questa tecnica di rinforzo è con ogni probabilità la più laboriosa a causa delle difficoltà nell'inserimento di armatura trasversale aggiuntiva, oltre a soffrire di problemi legati alla perdita di spazio e interruzione d'uso dell'edificio.

Una seconda tipologia di rinforzo, che ha conosciuto una grande diffusione negli ultimi decenni, è quella basata sull'applicazione di compositi in FRP. L'uso di fasciature in FRP fornisce una soluzione estremamente pratica per incrementare le prestazioni di una struttura in c.a., offrendo numerosi vantaggi, legati all'elevato rapporto resistenza-peso del materiale, alla resistenza alla corrosione e all'applicazione relativamente semplice e veloce.

Tuttavia, fasciature in FRP risultano utili per aumentare la duttilità, ma non del tutto idonee quando sia richiesto un significativo incremento della resistenza degli elementi, oltre a presentare problemi nei riguardi della resistenza al fuoco. In

aggiunta, questa tecnica è difficilmente applicabile in edifici con un certo valore storico e architettonico per problemi di compatibilità tra il materiale di base e il materiale di rinforzo.

Una soluzione alternativa, di sviluppo relativamente recente, riguarda l'uso di incamiciature in calcestruzzo fibro-rinforzato ad elevate prestazioni (HPFRC) (Martinola et al. 2007, Maisto et al. 2007). La soluzione proposta consiste nel getto attorno all'elemento strutturale di una camicia in HPFRC di spessore contenuto entro i 30-40 mm.

Il materiale utilizzato è caratterizzato da comportamento debolmente incoerente a trazione, accoppiato ad un'elevata resistenza a compressione e grande capacità deformativa, se confrontato con i tradizionali calcestruzzi fibro-rinforzati.

Inoltre, la tecnica di rinforzo proposta si basa sull'adozione di un materiale più simile al calcestruzzo di base rispetto a qualsiasi altra soluzione precedentemente citata, risolvendo il problema della compatibilità tra materiali diversi.

Questa tecnica si è dimostrata efficace per il rinforzo di pilastri esistenti in c.a. e nodi trave-pilastro interni, in particolare nel caso in cui la struttura sia caratterizzata da calcestruzzi di bassa resistenza (Beschi et al. 2011).

Nella presente memoria l'efficacia di questo intervento viene valutata anche per il rinforzo di nodi trave-pilastro d'angolo.

2 PROVE SPERIMENTALI

Nel seguito verranno riportati i risultati di prove cicliche su quattro campioni di nodo in scala reale: due non rinforzati e due rinforzati.

2.1 Geometria dei campioni di prova

2.1.1 Campioni non rinforzati (CJ1 e CJ2)

I campioni non rinforzati sono rappresentativi del nodo d'angolo del primo livello di una struttura di riferimento in c.a. di quattro piani realizzata sulla base di un progetto simulato sviluppato secondo le prescrizioni fornite dalle normative nazionali in vigore prima degli anni '70 (R.D. 16/11/1939) e suggerite dalla manualistica dell'epoca (Santarella 1945).

L'edificio di riferimento e i campioni di prova, sono stati quindi progettati per i soli carichi gravitazionali, con i pilastri soggetti a carico assiale centrato e le travi progettate secondo lo schema di trave continua su più appoggi, con armature di congruenza alle estremità per il controllo della fessurazione in esercizio.

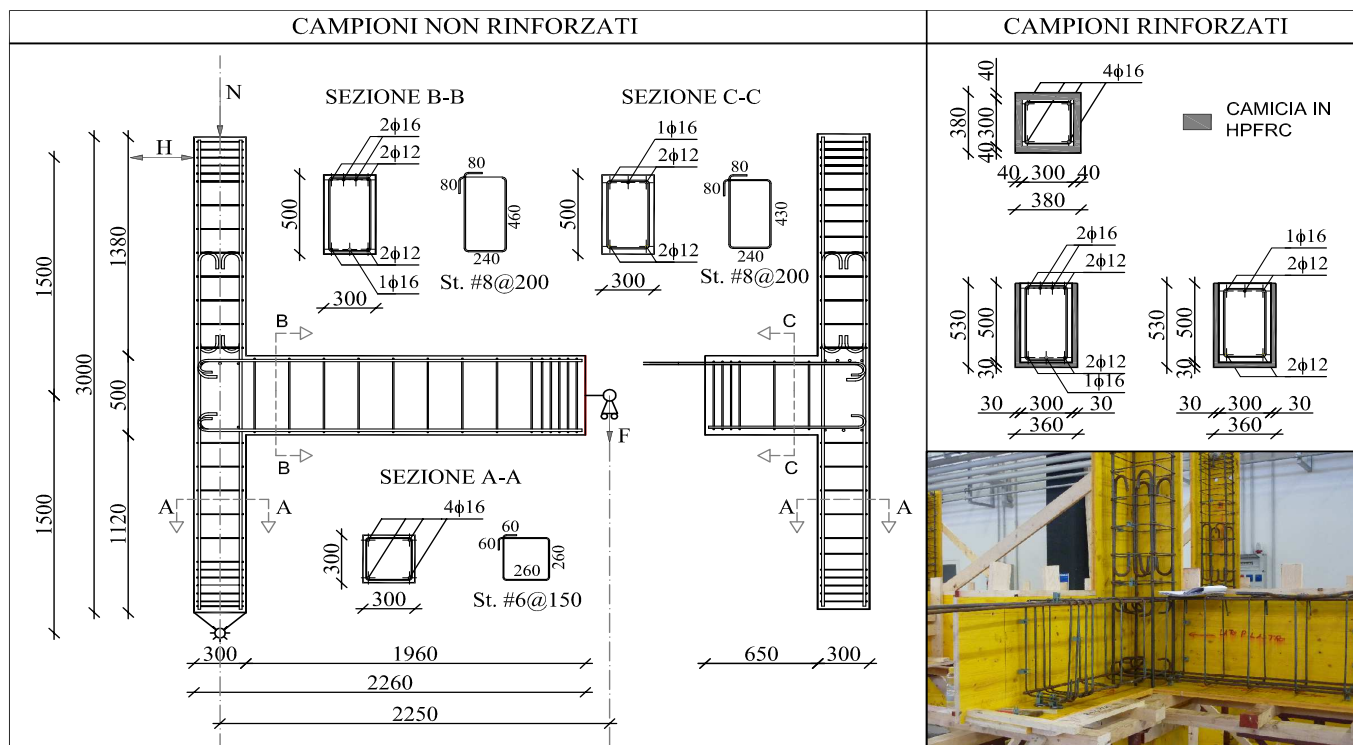


Figura 1. Geometria dei campioni di prova e dettagli delle armature

Le caratteristiche geometriche e i dettagli delle armature sono mostrati in Figura 1.

Le travi sono caratterizzate da sezione 30x50 cm e armatura longitudinale realizzata con barre lisce dotate di ancoraggi terminali ad uncino. Nella trave principale sono stati posizionati 2 Ø12 e 2 Ø16 nella parte superiore e 2 Ø12 e 1 Ø16 nella parte inferiore con staffe Ø8 a passo 200 mm. Nella trave secondaria sono stati previsti 2 Ø12 e 1 Ø16 nella parte superiore e 2 Ø12 nella parte inferiore

Il pilastro, di sezione 30x30 cm, è armato con quattro barre longitudinali Ø16 e staffe Ø6 a passo 150 mm. All'interno del nodo non è stata disposta armatura trasversale come diffuso nella pratica costruttiva degli anni '60-'70.

Per quanto riguarda i materiali utilizzati, il calcestruzzo è caratterizzato da una resistenza media a compressione pari a 38.7 MPa, mentre le caratteristiche dell'acciaio delle barre d'armatura sono riassunte in Tabella 1.

2.1.2 Campioni rinforzati (RCJ1 e RCJ2)

La soluzione proposta per il rinforzo consiste nell'applicazione di una camicia in HPFRC a campioni che presentano le stesse caratteristiche geometriche e gli stessi dettagli d'armatura dei campioni non rinforzati (Fig.1).

Dopo il getto e un periodo di maturazione di un mese, la superficie dei campioni è stata sabbiata, al fine di ottenere una rugosità pari a 2÷3 mm, sufficiente per garantire l'aderenza tra il

calcestruzzo di base e il calcestruzzo della camicia (Martinola et al. 2007) (Fig.2(a)). Al pilastro è stata quindi applicata una camicia in HPFRC di 40 mm di spessore, mentre per le travi è stata adottata un'incamiciatura a U di spessore pari a 30 mm (Fig.2(b)).

Le caratteristiche meccaniche dell'acciaio d'armatura sono le stesse dei campioni CJ1 e CJ2, mentre il calcestruzzo di base è caratterizzato da una resistenza media a compressione pari a 27 MPa. Le caratteristiche dell'HPFRC sono invece mostrate in Tabella 2.

Tabella 1. Caratteristiche dell'acciaio di armatura

ϕ [mm]	f_{ym} [MPa]	f_{um} [MPa]	ϵ_u [%]
12	365	558	15.91
16	445	546	13.66
6	493	556	16.14
8	337	440	21.03

ϕ : diametro; f_{ym} : resistenza media a snervamento; f_{um} : resistenza media a rottura; ϵ_u : deformazione a rottura

Tabella 2. Caratteristiche dell'HPFRC

Matrice cementizia			
	R_{cm} [MPa]	f_{tm} [MPa]	E [GPa]
19 gg	99.68	4.8	36
41 gg	112.55	4.8	36
Fibre d'acciaio			
	D_{eq} [mm]	l_{eq} [mm]	V [%]
	15	0.18	1.2

R_{cm} : resistenza media cubica a compressione; f_{tm} : resistenza media a trazione; E: modulo elastico; D_{eq} : diametro equivalente; l_{eq} : lunghezza equivalente; V: volume delle fibre



Figura 2. Campione RCJ1 prima e dopo la sabbiatura (a); Getto della camicia in HPFRC (b)

2.2 TEST SET-UP

Il set-up di prova intende riprodurre la configurazione di un nodo trave-pilastro d'angolo del primo livello di un telaio in c.a. soggetto a carichi orizzontali. A questo scopo, è stato progettato un banco di prova che consentisse lo sviluppo di vincoli a cerniera in testa e al piede del pilastro e a carrello all'estremità della trave principale, simulando i punti a momento nullo (supposti essere metà altezza per il pilastro e a metà campata per la trave) per una risposta elastica lineare a carichi laterali di una generica struttura a telaio (Fig.3).

In una prima fase, ai campioni è stato applicato, tramite due martinetti idraulici, un carico assiale, mantenuto costante per tutta la durata della prova, rappresentativo del carico di esercizio agente sul pilastro del primo livello dell'edificio di riferimento. Due martinetti idraulici sono stati utilizzati anche per l'applicazione di un carico verticale in testa alla trave principale e una coppia di forze all'estremità della trave secondaria, per simulare rispettivamente la combinazione di taglio e momento e il momento di esercizio nel nodo.

Per quanto riguarda la storia di carico, i campioni sono stati sottoposti a cicli di spostamento con incrementi successivi di drift: 0.25% fino a un drift dell'1%, 0.5% fino al 3% e 1% fino a collasso. Per ogni valore di drift sono stati effettuati tre cicli. Tra i tre cicli ad un drift e i tre cicli al drift successivo è stato effettuato un ciclo in campo elastico per permettere al campione il recupero dell'effettiva rigidità (Fig.4).

Per i campioni non rinforzati le prove sono state interrotte in corrispondenza di un drift del 3%, pari a 90 mm di spostamento in sommità, mentre i campioni rinforzati hanno raggiunto drift del 6%, pari a uno spostamento in sommità di 180 mm.

Spostamenti e rotazioni sono stati misurati

tramite trasduttori potenziometrici. Il carico orizzontale, il carico verticale applicato alla trave principale e la coppia di forze applicata alla trave secondaria sono stati monitorati tramite celle di carico.

2.3 RISULTATI

2.3.1 Campioni non rinforzati (CJ1 e CJ2)

La Figura 5(a) mostra i risultati sperimentali in termini di carico orizzontale – spostamento del punto di applicazione del carico per i campioni non rinforzati.

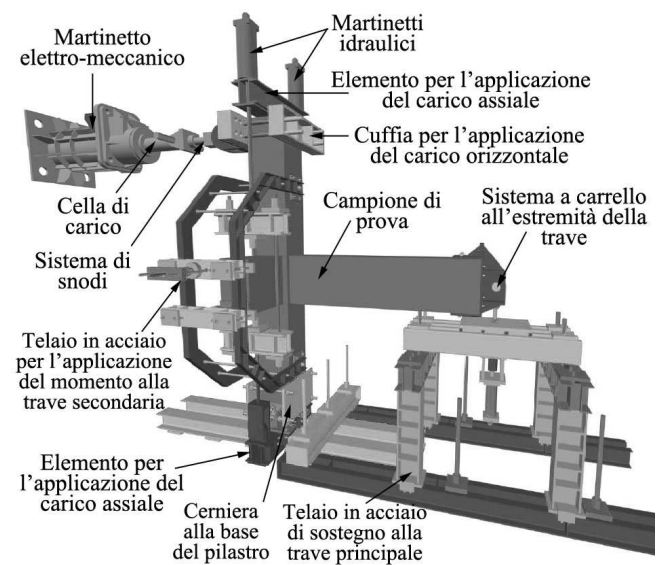


Figura 3. Banco di prova

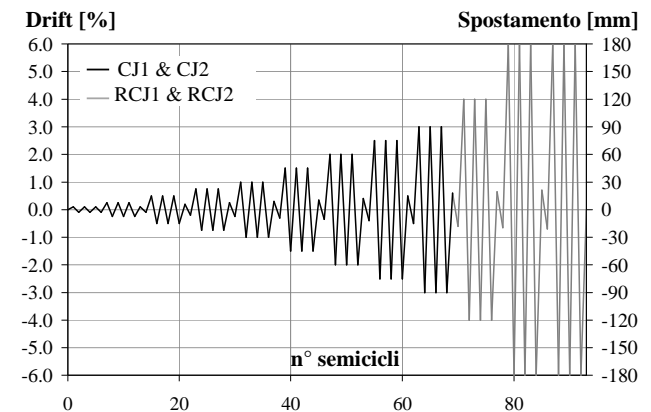


Figura 4. Storia di spostamento

Per spostamenti positivi i campioni hanno raggiunto il carico di picco, pari a 31.3 kN per il campione CJ1 e 34.7 kN per il campione CJ2 in corrispondenza di un drift del 2% e del 2.5% rispettivamente. Nei cicli successivi, i campioni hanno mostrato un leggero degrado di resistenza con una capacità resistente residua intorno al 97% del carico massimo in corrispondenza di un drift del 3%.

Per spostamenti negativi i campioni hanno raggiunto il carico di picco entrambi in corrispondenza di un drift dell'1%, con valori pari a -36.0 kN e 35.4 kN per il campione CJ1 e CJ2 rispettivamente. Dopo il valore di picco, si è osservata una diminuzione di resistenza più significativa per il campione CJ1 rispetto al campione CJ2 (rispettivamente 63% e 76.5% del valore massimo per un drift del 3%).

I risultati sperimentali hanno confermato l'elevata vulnerabilità dei nodi trave-pilastro d'angolo, con un danneggiamento significativo del pannello nodale, e il ruolo fondamentale del fenomeno di scorrimento delle barre d'armatura longitudinali, evidenziato dal degrado di rigidità, sempre più marcato a ogni ciclo, accoppiato ad un evidente pinching dei cicli di isteresi.

La rottura è stata caratterizzata da collasso lato trave per spostamenti positivi, con una fessura flessionale all'interfaccia trave-nodo e da collasso per taglio del pannello nodale per spostamenti negativi, con la formazione di un cuneo in calcestruzzo, combinato con gli effetti della concentrazione di sforzi in corrispondenza degli uncini all'estremità delle barre longitudinali della trave. Come mostrato in Figura 6(a), fessure flessionali nella trave principale si sono formate per bassi valori di drift (0.25% in direzione negativa e 0.5% in quella positiva). La comparsa delle prime fessure per un drift negativo è in accordo con il set-up di prova, che ha previsto

inizialmente l'applicazione di una forza verticale dall'alto verso il basso all'estremità della trave e, di conseguenza, di un momento negativo per simulare la combinazione di carichi di esercizio agenti sul nodo. In corrispondenza con l'innesto della trave secondaria, non sono state, invece, osservate fessure fino a un drift dello 0.75%.

In corrispondenza di un drift negativo dell'1% si è verificata la comparsa della prima fessura diagonale nel pannello nodale, mentre fessure diagonali in direzione opposta sono apparse per un drift positivo del 2%.

In corrispondenza di un drift del 3% è iniziato il fenomeno di espulsione di una vasta area di copriferro nella parte inferiore del nodo, legato alle spinte degli uncini delle barre longitudinali della trave principale. Sulla faccia interna del nodo, grazie al confinamento fornito dalla trave secondaria, si è riscontrato un danneggiamento piuttosto limitato.

2.3.2 Campioni rinforzati (RCJ1 e RCJ2)

In Figura 5(b) sono riportati i risultati sperimentali in termini di carico orizzontale – spostamento per i campioni rinforzati.

E' possibile osservare come la forma delle curve inviluppo sia ben rappresentativa del comportamento di una sezione caratterizzata da un nucleo in c.a. con una camicia esterna in HPFRC, dove il valore di picco corrisponde al raggiungimento della massima deformazione a trazione nella camicia in HPFRC per la fibra più lontana dall'asse neutro. All'aumentare degli spostamenti orizzontali, il contributo a trazione della camicia viene meno e la resistenza della sezione tende a quella del solo nucleo in c.a.

In direzione positiva, il campione RCJ1 ha raggiunto il carico massimo, pari a 44.2 kN in corrispondenza di un drift dello 0.75%, mentre per il campione RCJ2 il valore di picco è pari a 49.5 kN per un drift dello 0.5%.

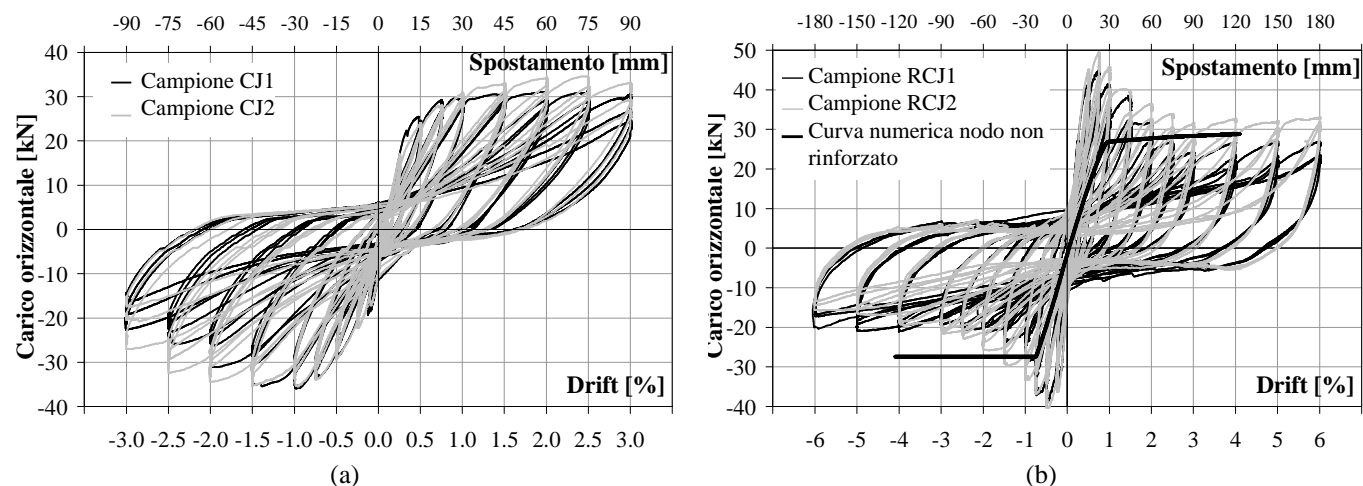
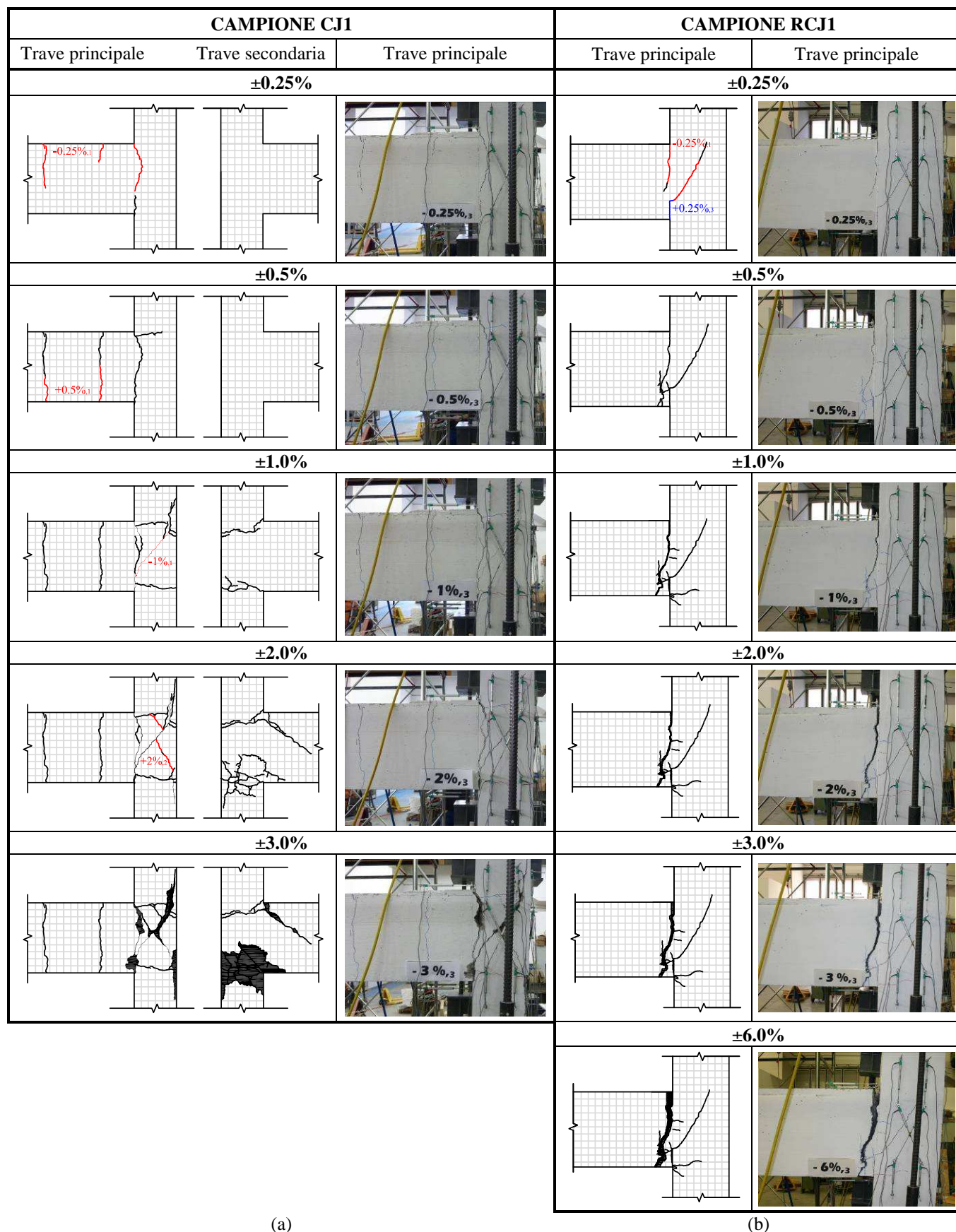


Figura 5. Diagramma carico orizzontale-spostamento per i campioni: (a) CJ1 e CJ2; (b) RCJ1 e RCJ2

Dai grafici si osserva come per spostamenti positivi, dopo aver raggiunto il carico massimo, la resistenza dei campioni degradi rapidamente fino al momento in cui si verifica lo snervamento

delle barre d'armatura longitudinali, come risulta evidente dai plateau in corrispondenza di un drift del 2% e dell'1.5% per i campioni RCJ1 e RCJ2 rispettivamente.



(a)

(b)

Figura 6. Evoluzione del quadro fessurativo e fasi della prova per i campioni: (a) CJ1; (b) RCJ1

In direzione negativa entrambi i campioni hanno raggiunto un carico di picco pari a circa 40 kN in corrispondenza di un drift dello 0.75%.

Sulla curva sperimentale del campione RCJ1 in corrispondenza di un drift dell'1% è possibile individuare un piccolo plateau, legato al pull-out delle fibre all'interfaccia trave-nodo, una volta che viene meno il loro effetto di cucitura delle fessure.

Per quanto riguarda la resistenza residua, il campione RCJ2 mostra, rispetto al campione RCJ1, un degrado minore per spostamenti positivi (66% contro 61%) e un degrado maggiore per spostamenti negativi (39% contro 51%).

Dall'evoluzione del quadro fessurativo del campione RCJ1, rappresentato in Figura 6(b) è possibile osservare la formazione di una fessura verticale e di una fessura diagonale all'interno del pannello nodale già per bassi valori di drift. La fessura diagonale, tuttavia, non si sviluppa significativamente durante la prova.

Come mostrato nelle Figure 7(a) e 7(b), la posizione della fessura verticale è differente per i due campioni: per il campione RCJ1 essa è localizzata all'interfaccia tra la trave e il nodo, mentre nel campione RCJ2 si sviluppa all'interno del nodo. Per questo motivo nel campione RCJ2 il braccio della coppia interna risulta maggiore per spostamenti positivi, dal momento che, essendo la fessura verticale posizionata nel nodo, anche una zona di calcestruzzo compresso nel pilastro collabora alla resistenza flessionale. A

ogni drift positivo il campione RCJ2 raggiunge valori del carico di picco superiori di quelli raggiunti dal campione RCJ1, con differenze anche del 20% per drift superiori all'1%.

Il danneggiamento del campione RCJ1, localizzato fin dall'inizio della prova nella fessura verticale all'interfaccia tra trave e nodo, è caratterizzato da un'apertura progressivamente crescente della fessura stessa con valori che raggiungono anche i 45 mm al termine della prova (Fig.7(a)). Per il campione RCJ2, il danneggiamento si localizza all'interfaccia trave-nodo fin dai primi cicli per spostamenti positivi, mentre per spostamenti negativi, la fessura rimane spostata di qualche centimetro all'interno del nodo con la formazione di un cuneo di HPFRC nel pilastro al di sopra del nodo. A partire da un drift del 4% la fessura si sviluppa verso l'esterno raggiungendo l'interfaccia trave-pilastro, come mostrato in Figura 7(b).

A differenza della faccia esterna del nodo, per cui non si è osservato alcun danneggiamento in corrispondenza dell'innesto con la trave secondaria, la superficie interna risulta maggiormente danneggiata, come mostrato nelle Figure 8(a) e 8(b). Per il campione RCJ1 è possibile osservare in Figura 8(a) il distacco della camicia in HPFRC dal calcestruzzo di base della trave secondaria, mentre per il campione RCJ2 il distacco tra i due materiali si è verificato nel pilastro all'interno del nodo mentre non è stato osservato alcun distacco in corrispondenza della trave secondaria, come mostrato in Figura 8(b).



Figura 7. Campioni rinforzati al termine delle prove in corrispondenza di un drift del 6%: (a) RCJ1; (b) RCJ2



Figura 8. Danneggiamento della faccia interna dei nodi alla fine delle prove: (a) Campione RCJ1; (b) Campione RCJ2

3 CONFRONTI

E' necessario premettere che non è possibile effettuare confronti diretti in termini di forza-spostamento o di momento-rotazione tra i risultati sperimentali dei campioni rinforzati e non dal momento che il calcestruzzo utilizzato per il getto dei campioni non rinforzati è caratterizzato da una resistenza a compressione maggiore (38.7 MPa e 27 MPa rispettivamente).

L'incremento di prestazioni fornito dalla camicia in HPFRC è stato valutato, quindi, confrontando i risultati delle prove sperimentali sui campioni rinforzati con i risultati di simulazioni numeriche su un corrispondente campione non rinforzato con le stesse proprietà dei materiali.

La fase di modellazione numerica si basa sul modello analitico descritto in Riva et al. 2011 e in Riva et al. 2012, e denominato PSLM, in cui la resistenza del nodo è governata dal raggiungimento dello sforzo principale di trazione all'interno del pannello nodale.

Dai diagrammi di Figura 5(b), in cui è riportato il confronto tra i risultati sperimentali dei campioni RCJ1 e RCJ2 e l'involuppo della curva ottenuta dall'analisi numerica su un corrispondente campione non rinforzato, è possibile osservare come l'applicazione di una camicia in HPFRC consenta di aumentare la resistenza del nodo di circa il 40-45% per spostamenti positivi e di circa il 30% per spostamenti negativi.

Per quanto riguarda la resistenza residua, è possibile notare come, per entrambe le direzioni di carico, il comportamento dei campioni rinforzati tenda al termine delle prove a quello dei campioni non rinforzati. Per il campione RCJ2 il modello numerico sovrastima la resistenza residua nella prova sperimentale, a causa del maggiore braccio della coppia interna che comporta un aumento della resistenza del campione per spostamenti positivi.

In direzione negativa, invece, l'analisi numerica sovrastima in entrambi i casi la resistenza residua sperimentale. Questo è dovuto al fatto che l'applicazione di un momento negativo preliminare sulla trave secondaria fornisce un confinamento trasversale nella parte inferiore del nodo, così che per momenti positivi applicati alla trave principale, il suo contributo è favorevole. D'altra parte, per momenti negativi, il momento trasversale iniziale fornisce un contributo sfavorevole, per la nascita di forze di

trazione all'interfaccia tra l'HPFRC e il calcestruzzo di base, così che, per spostamenti negativi, al nodo non è permesso sviluppare completamente la sua resistenza. In una struttura reale, tuttavia, le forze di trazione agenti nel nodo per effetto del momento negativo di esercizio applicato alla trave secondaria, sono già presenti al momento del getto della camicia in HPFRC, mentre nella prova il momento di esercizio è stato applicato dopo il getto della camicia.

Il set-up di prova è quindi più gravoso della situazione reale in cui l'interfaccia tra HPFRC e il calcestruzzo di base è scarica. E' opportuno sottolineare che l'applicazione di un momento dopo il getto della camicia può essere comunque rappresentativo di un evento sismico reale con carichi laterali agenti nella direzione della trave secondaria.

E' possibile, invece, effettuare un confronto tra i risultati sperimentali delle quattro prove in termini di energia dissipata adimensionalizzata all'energia elastica, come mostrato in Figura 9. Dal grafico è possibile osservare come le energie dissipate dai campioni non rinforzati siano approssimativamente confrontabili, con il campione CJ1 che dissipa il 10% di energia in più. I campioni rinforzati dissipano in media il 25% di energia in più rispetto a quelli non rinforzati ad ogni valore del drift.

Tuttavia, a differenza dei campioni non rinforzati, per i quali l'energia dissipata decresce a partire da un drift del 2%, per il campione rinforzato RCJ1 la dissipazione di energia è sempre crescente. Questo fenomeno è evidente anche nelle curve carico orizzontale-spostamento, dove per i campioni non rinforzati è possibile osservare un progressivo effetto di pinching dei cicli di isteresi, legato al fenomeno di scorrimento delle armature e al danneggiamento del pannello nodale. Nelle curve dei campioni rinforzati, l'effetto di pinching è meno pronunciato anche per elevati valori di drift.

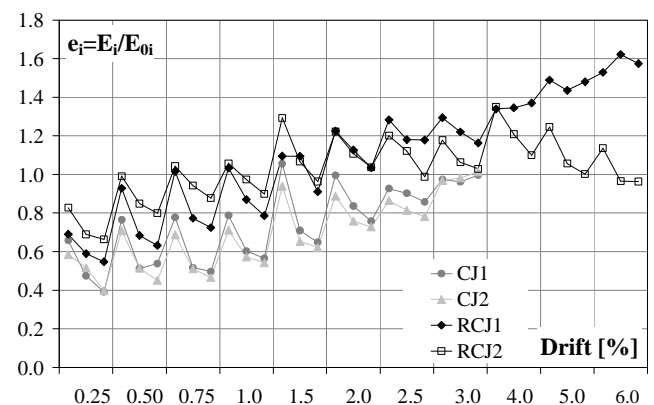


Figura 9. Energia dissipata adimensionalizzata

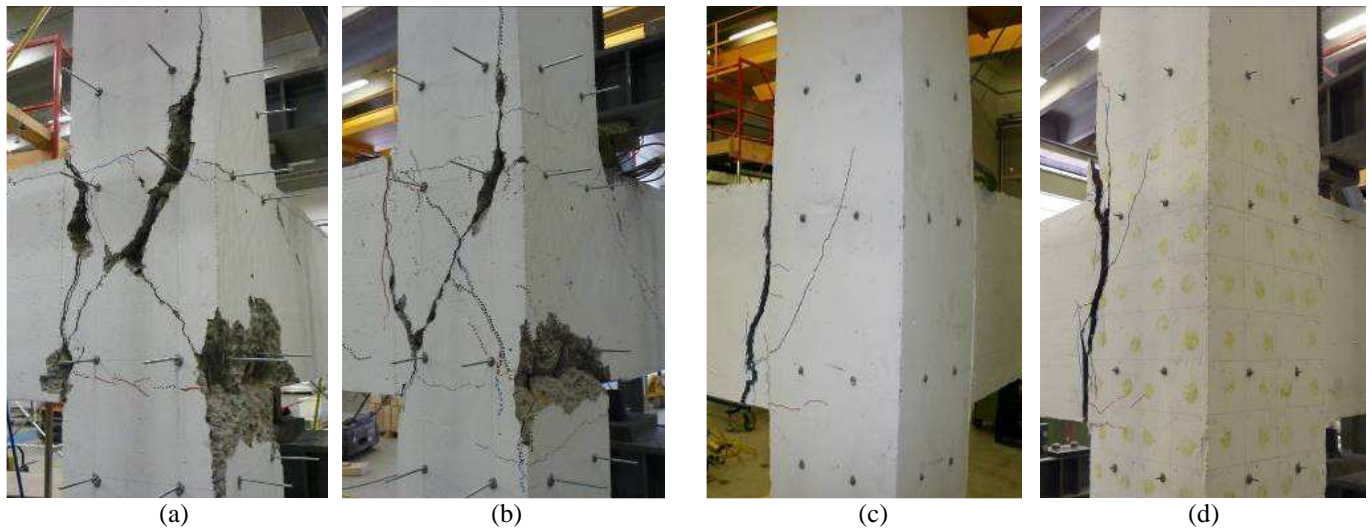


Figura 10. I campioni al termine delle prove: (a) CJ1; (b) CJ2; (c) RCJ1; (d) RCJ2

Come mostrato in Figura 9, per il campione RCJ2 la quantità di energia dissipata decresce a partire da un drift del 4%. Anche se per elevati valori di drift la dissipazione di energia diminuisce, è importante sottolineare che il campione RCJ2 ha raggiunto comunque valori di drift più elevati rispetto ai campioni non rinforzati (6% contro 3%), esibendo quindi una duttilità doppia.

In Figura 10 sono mostrati i quattro campioni al termine delle prove.

Per i campioni non rinforzati CJ1 e CJ2 è evidente l'interazione tra tre differenti modalità di rottura: collasso lato trave con la formazione della fessura verticale all'interfaccia con il nodo, collasso per taglio del nodo con le fessure diagonali nel pannello nodale ed espulsione del copriferro nella parte inferiore del nodo a causa della spinta degli uncini di estremità delle barre d'armatura della trave (Figg.10(a) e 10(b)).

Per il campione rinforzato RCJ1, anche se qualche fessura capillare è visibile sulla faccia esterna del nodo in corrispondenza con l'innesto della trave principale, il danneggiamento si è localizzato principalmente nella fessura verticale passante all'interfaccia trave-nodo (Fig.10(c)).

Per il campione RCJ2 la fessura verticale si è sviluppata pochi centimetri all'interno del nodo per poi propagarsi esternamente solo per valori di drift elevati (Fig.10(d)). Il nodo è risultato, quindi, maggiormente danneggiato rispetto al caso precedente, anche se l'apertura delle altre fessure sulla superficie del nodo è rimasta contenuta entro poche decine di millimetri.

Per entrambi i campioni rinforzati la prima fessura diagonale nel pannello nodale è comparsa per un drift negativo pari allo 0.25% con un'apertura di circa $0.06 \div 0.07$ mm, ha raggiunto

valori massimi di $0.35 \div 0.4$ mm tendendo poi a chiudersi fino a un'apertura di $0.1 \div 0.2$ mm per drift elevati, mentre per i campioni non rinforzati CJ1 e CJ2 l'apertura delle fessure ha raggiunto valori anche superiori a 3 mm.

In entrambi i campioni rinforzati non è stato osservato alcun danneggiamento sulla faccia esterna del nodo in corrispondenza dell'innesto con la trave secondaria. È quindi evidente che l'incamiciatura in HPFRC è stata in grado di contenere le spinte degli uncini di estremità delle barre d'armatura della trave nella parte inferiore del nodo.

4 CONCLUSIONI

I risultati delle prove cicliche su quattro campioni di nodo hanno confermato l'elevata vulnerabilità dei nodi trave-pilastro d'angolo in c.a. progettati con i dettagli tipici della pratica costruttiva italiana degli anni '60-'70.

Due sono i fenomeni ritenuti responsabili del degrado ciclico dei nodi: la deformabilità del pannello nodale e lo scorrimento delle barre longitudinali d'armatura.

I risultati ottenuti consentono di concludere che strutture costruite con gli stessi dettagli adottati per i campioni di prova (barre lisce con ancoraggi a uncino, assenza di staffe nel nodo, calcestruzzo scadente) necessitano di un intervento di rinforzo nei confronti dei carichi orizzontali, allo scopo di spostare il meccanismo di rottura da un collasso fragile per taglio del pannello nodale a uno più duttile per flessione, con la formazione di una cerniera plastica nella trave.

I risultati sperimentali hanno confermato un miglioramento delle prestazioni sismiche dei

campioni rinforzati con incamiciatura in HPFRC, che non hanno mostrato un danneggiamento apprezzabile del pannello nodale. Inoltre, anche se il comportamento dei campioni rinforzati è caratterizzato da un degrado significativo di rigidità dopo il raggiungimento del valore di picco, l'effetto di pinching dei cicli di isteresi risulta meno evidente, per la minore entità del fenomeno di scorrimento delle barre di armatura dopo l'apertura della fessura all'interfaccia trave-nodo.

L'applicazione di una camicia in HPFRC permette inoltre di aumentare la duttilità del nodo: i campioni rinforzati hanno raggiunto un drift del 6% contro il 3% raggiunto dai campioni non rinforzati. Anche la capacità di dissipazione energetica è superiore in media del 30% rispetto ai nodi non rinforzati.

Inoltre vale la pena prestare attenzione al fatto che il comportamento del nodo si è rivelato approssimativamente simmetrico nelle due direzioni di carico, con un evidente vantaggio nel caso in cui il nodo sia soggetto a inversione del carico come accade durante un evento sismico.

Per eliminare l'inconveniente del distacco della camicia in HPFRC si suggerisce l'adozione di pioli di connessione tra il vecchio e il nuovo calcestruzzo. L'uso di connettori può essere utile anche per il posizionamento di un'eventuale rete metallica qualora sia richiesto un ulteriore incremento della resistenza a taglio della trave. L'uso di una rete attorno al nodo, che prosegue all'interno della trave, può consentire inoltre il controllo dell'apertura della fessura all'interfaccia trave-nodo.

Futuri passi della presente ricerca verranno indirizzati allo sviluppo di modelli analitici e numerici semplificati, come effettuato per i nodi non rinforzati, per la valutazione della resistenza e della rigidità dei nodi, allo scopo di fornire ai progettisti un semplice strumento per la valutazione dell'incremento delle prestazioni di nodi trave-pilastro rinforzati con incamiciatura in HPFRC.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro si inserisce nell'ambito del progetto ReLUIS-DPC 2010-2013.

Gli autori sono grati a Tecnochem Italiana s.p.a. e Schnell per il supporto economico alla ricerca e il sig. Daniele Di Marco per il supporto tecnico nelle prove sperimentali.

REFERENCES

- Beschi, C., Meda, A., and Riva, P., 2011. Column and joint retrofitting with high performance fiber reinforced concrete jacketing. *Journal of Earthquake Engineering*, 15:7, 989-1014, ISSN: 1363-2469.
- DM 14/01/2008. Nuove norme tecniche per le costruzioni. *G.U. n. 29, 2/02/2008*, Supplemento Ordinario n. 30, Roma, 645 pp.
- EN 1998-1-1, 2004. EUROCODE 8: Design structures for earthquake resistance, part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. *CEN*, Brussels, 229 pp.
- Fib Bulletin No. 24., 2003. Seismic assessment and retrofit of reinforced concrete buildings. State-of-art report, *International Federation for Structural Concrete*, August 2003, 312 pp.
- Fib Bulletin No. 35, 2006. Retrofitting of concrete structures by externally bonded FRPs, with emphasis on seismic applications. Technical report, *International Federation for Structural Concrete*, April 2006, 220 pp.
- Fib Report 1991, 1991. Repair and strengthening of concrete structures. Guide to good practice, Thomas Telford Ltd. 1991, 37 pp.
- Martinola, G., Meda, A., Plizzari, G.A., and Rinaldi, Z., 2007. An application of high performance fiber reinforced cementitious composites for R/C beams strengthening. *FRAMCOS 6*. June 18-21, Catania, Italy.
- Maisto, L., Meda, A., Plizzari, G.A., and Rinaldi, Z., 2007. R/C beams strengthening and repair with high performance fiber reinforced concrete jacket. *4th International Conference on the Conceptual Approach to Structural Design*. June 27-29, Venezia, Italy.
- Regio Decreto R.D. 16/11/1939 n. 2229. Norme per la esecuzione delle opere in conglomerato cementizio semplice e armato. *G.U. n. 92, 18/04/1940*.
- Riva, P., Metelli, G., Beschi, C. and Messali, F., 2011. Modellazione di nodi trave-pilastro esterni di telai in cemento armato soggetti ad azioni cicliche. *X Convegno Nazionale ANIDIS "L'ingegneria Sismica Italia"*. Settembre 18-22, Bari, Italia. ISBN 978-88-7522-040-2.
- Riva, P., Metelli, G., Beschi, C. and Messali, F., 2012. Modelling of exterior beam to column joint in '60-70s RC existing buildings. *IV International Symposium "Bond in Concrete"*. June 17-20, Brescia, Italy.
- Santarella, L., 1945. Il cemento armato – Le applicazioni alle costruzioni civili e industriali. *Milano Edizioni Hoepli*, 1945, 559 pp.