

# RINFORZO DI NODI TRAVE-PILASTRO D'ANGOLO CON INCAMICIATURA IN CALCESTRUZZO FIBRO-RINFORZATO AD ELEVATE PRESTAZIONI

**CONSUELO BESCHI, Università di Bergamo**  
**ALBERTO MEDA, Università di Roma, Tor Vergata**  
**PAOLO RIVA, Università di Bergamo**

## SUMMARY

*The experimental results on full-scale corner beam-column joints tests are presented herein, with the aim of studying the effectiveness in strengthening existing RC structures of a retrofitting technique based on the application of a HPFRC jacket. The specimens subassemblies were designed only for gravity loads and with structural deficiencies typical of the Italian construction practice of the 60's-70's: absence of any capacity design principle, use of smooth bars, inadequate reinforcement detailing, such as total lack of stirrups in the joint panel and hooked-end anchorages.*

*Both unretrofitted and retrofitted specimens were subjected first to the serviceability loads combination and then to simulated seismic loads up to failure.*

*The results underline the significant vulnerability of the joint panel region and the critical role of the slip phenomena related to the use of smooth bars and show that, with the application of a HPFRC jacket, it is possible to increase the bearing capacity of the columns, reaching also an adequate level of ductility and strength of the beam column joints.*

## 1. INTRODUZIONE

I recenti terremoti (Abruzzo 2009 ed Emilia Romagna 2012) hanno drammaticamente dimostrato come in Italia una vasta parte degli edifici in c.a., progettati per soli carichi gravitazionali, non sia stata in grado di sostenere le azioni sismiche, principalmente a causa di carenze strutturali, quali proprietà scadenti dei materiali, solitamente calcestruzzi con basse resistenze; assenza di qualsiasi principio di Gerarchia delle Resistenze; scarso confinamento nelle zone di potenziale formazione delle cerniere

plastiche, tipicamente assenza di armatura trasversale nei nodi; dettagli inadeguati delle armature, come ancoraggi insufficienti, uso di barre lisce con ancoraggi d'estremità a uncino.

Dall'osservazione degli effetti dei terremoti del passato, è comunemente riconosciuto che i nodi trave-pilastro rappresentano una regione estremamente critica in strutture soggette a carichi sismici di elevata intensità.

Il comportamento dei nodi influenza la risposta dell'intero sistema strutturale sia in termini di resistenza sia in termini di deformabilità. Tra i meccanismi di collasso si annoverano a livello globale l'esistenza di sistemi a travi/forti-pilastri/deboli, mentre a livello locale si può avere la formazione di meccanismi di collasso fragili legati a un'inadeguata protezione del pannello nodale, ed in particolare del pannello d'angolo.

Il rinforzo e la valutazione della risposta sismica di strutture esistenti in c.a., progettate prima dell'introduzione di adeguate normative, sono quindi divenuti argomenti di grande attualità in Italia.

Negli ultimi decenni differenti tecniche sono state proposte per l'adeguamento sismico di strutture esistenti in c.a. [01, 02, 03].

Relativamente al rinforzo dei pilastri, è possibile adottare incamiciature in c.a. che 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, con conseguente aumento delle dimensioni delle sezioni e quindi della massa e della rigidità degli elementi, che richiede particolare attenzione con riferimento alla risposta sismica dell'intero sistema strutturale.

Una seconda tipologia è quella che utilizza placcaggi metallici, con una riduzione notevole dei tempi di intervento, ma inconvenienti quali il problema della resistenza al fuoco, della corrosione e non ultimo dell'impatto estetico.

Un'altra tecnica di rinforzo prevede l'uso di fasciature in FRP, 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.

Una soluzione alternativa riguarda l'adozione di incamiciature in calcestruzzo fibro-rinforzato ad elevate prestazioni (HPFRC) [04, 05]. Questa tecnica si è dimostrata efficace per il rinforzo di pilastri esistenti in c.a. e nodi trave-pilastro interni [06].

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 incrudente 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.

La presente memoria riporta i risultati di prove cicliche su quattro campioni di nodi trave-pilastro d'angolo in scala reale (due non rinforzati e due rinforzati con incamiciatura in HPFRC).

## 2. PROVE SPERIMENTALI

### 2.1. GEOMETRIA DEI CAMPIONI E CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

#### 2.1.1. Campioni non rinforzati

I campioni non rinforzati (CJ1 e CJ2) sono rappresentativi del nodo d'angolo del primo livello di una struttura in c.a. di quattro piani progettata secondo le prescrizioni fornite dalle normative nazionali in vigore prima degli anni '70 [07] e suggerite dalla manualistica dell'epoca [08].

I dettagli costruttivi degli elementi sono stati definiti sulla base di un progetto simulato, considerando l'edificio sottoposto ai soli carichi verticali: pilastri soggetti a carico assiale centrato e travi progettate secondo lo schema di trave continua su più appoggi, con armature di congruenza alle estremità.

Le travi sono caratterizzate da sezione 30 x 50 cm, armatura longitudinale realizzata con barre lisce dotate di ancoraggi terminali ad uncino e staffe  $\varnothing 8$  a passo 200 mm.

Il pilastro, di sezione 30 x 30 cm, è armato con quattro barre longitudinali  $\varnothing 16$  con ancoraggio a uncino e staffe  $\varnothing 6$  a passo 150 mm. All'interno del nodo non è stata disposta armatura trasversale in accordo con la pratica costruttiva degli anni '70.

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

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

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).

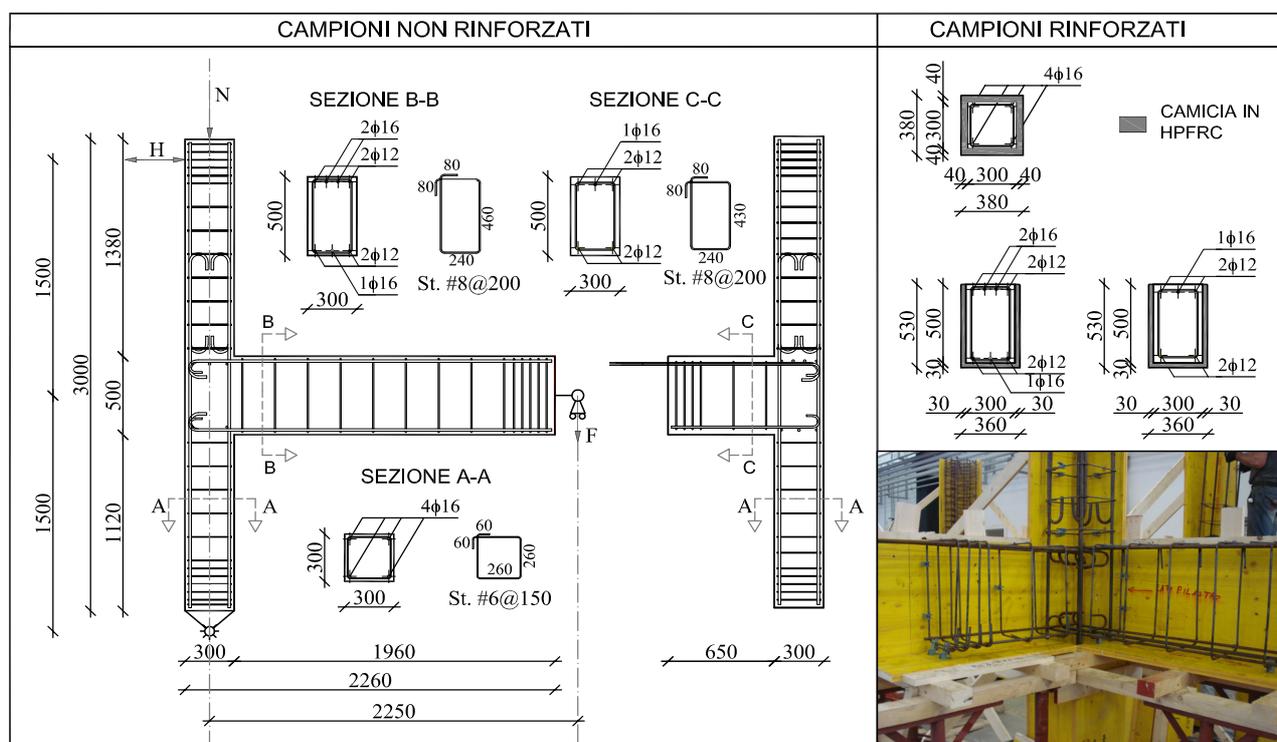


Figura 1. Geometria dei campioni di prova e dettagli delle armature

Armatura			
Diametro	Resistenza a snervamento	Resistenza a rottura	Deformazione ultima
	[MPa]	[MPa]	[%]
φ12	365	558	15.91
φ16	445	546	13.66
φ6	493	556	16.14
φ8	337	440	21.03

**Tabella 1.** Caratteristiche dell'acciaio d'armatura

HPFRC			
Matrice cementizia	Resistenza a compressione	Resistenza a trazione	Modulo elastico
	[MPa]	[MPa]	[GPa]
19 gg	99.68	4.8	36
41 gg	112.55	4,8	36
Fibre d'acciaio	Lunghezza equivalente	Diametro equivalente	Volume delle fibre
	[mm]	[mm]	[%]
	15	0.18	1.2

**Tabella 2.** Caratteristiche dell'HPFRC

Dopo il getto e un periodo di maturazione di un mese, la superficie dei campioni è stata sottoposta a sabbiatura, 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 [04] (Fig.2).

Al pilastro è stata quindi applicata una camicia in HPFRC di 40 mm di spessore, mentre per le travi è stata adottata un'incamicatura a U di spessore pari a 30 mm.

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.

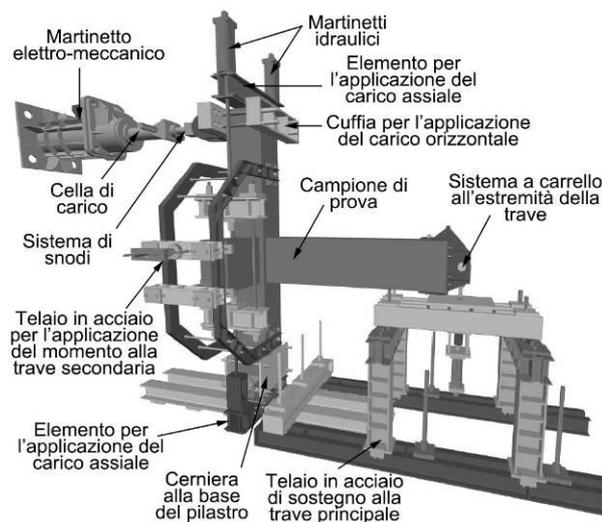
I campioni rinforzati saranno identificati in seguito con le sigle RCJ1 e RCJ2.

## 2.2. TEST SET-UP

Il set-up di prova intende riprodurre la configurazione di nodo trave-pilastro d'angolo di un telaio in c.a. Le dimensioni dei campioni sono state determinate in base alla distanza tra i punti a momento nullo (supposti essere a metà campata per la trave e a metà altezza per il pilastro) per una risposta elastica lineare di un generico telaio soggetto a carichi orizzontali.



**Figura 2.** Campione RCJ1 prima e dopo la sabbiatura



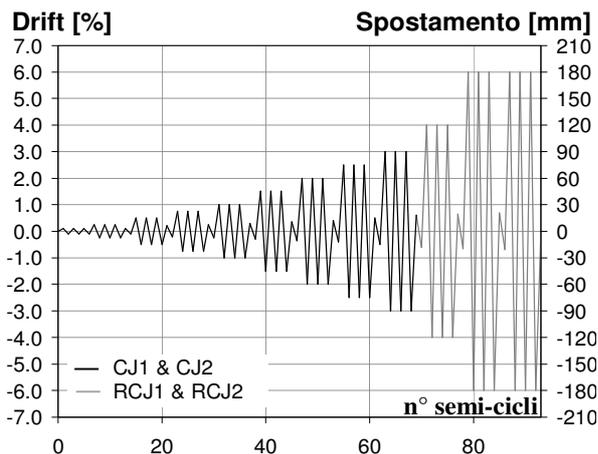
**Figura 3.** Banco di prova

A questo scopo, è stato progettato un banco di prova, tale da consentire lo sviluppo di vincoli a cerniera in testa e al piede del pilastro e a carrello all'estremità della trave principale, come mostrato in Figura 3.

La procedura di prova ha previsto in una prima fase l'applicazione di un carico assiale pari a 210 kN, rappresentativo del carico di esercizio agente sul pilastro del primo livello di un edificio di riferimento, utilizzando due martinetti idraulici: tale carico assiale è stato mantenuto costante per tutta la durata della prova.

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.

La storia di carico è caratterizzata da 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 (Fig.4). Per ogni valore di drift sono stati effettuati tre cicli. 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 e per i campioni rinforzati in corrispondenza di un drift del 6%, pari a uno spostamento in sommità di 180 mm.



**Figura 4.** Storia di carico

Spostamenti e rotazioni sono stati misurati tramite trasduttori potenziometrici. Il carico orizzontale e la coppia di forze applicata alla trave secondaria sono stati monitorati tramite celle di carico, mentre il carico verticale applicato alla trave principale è stato misurato da strain gauges applicati sulla barra all'estremità della trave.

## 2.3. RISULTATI SPERIMENTALI

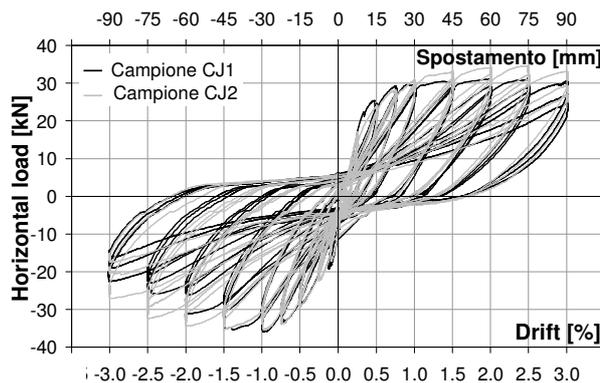
### 2.3.1. Campioni non rinforzati (CJ1 e CJ2)

La Figura 5 riporta i risultati in termini di carico orizzontale – spostamento del punto di applicazione del carico per entrambi i campioni non rinforzati.

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 approssimativamente pari al 98% del carico massimo per il campione CJ1 e al 96% del carico massimo per il campione CJ2 in corrispondenza di un drift del 3%.

Per spostamenti negativi i campioni hanno raggiunto un carico di picco pari a -35.98 kN e -35.41 kN per il campioni CJ1 e CJ2 rispettivamente, entrambi in corrispondenza di un drift dell'1%. 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.



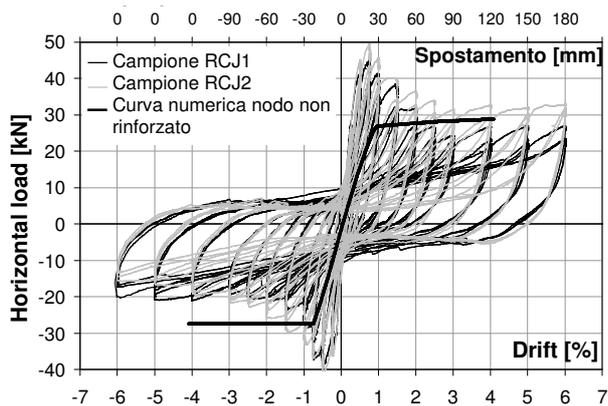
**Figura 5.** Diagramma carico orizzontale-spostamento per i campioni CJ1 e CJ2

In aggiunta, il degrado di rigidità, sempre più marcato a ogni ciclo, accoppiato ad un evidente pinching dei cicli di isteresi, ha evidenziato il ruolo fondamentale giocato dai fenomeni di scorrimento delle barre d'armatura longitudinali.

La modalità di rottura è stata caratterizzata da collasso lato trave per spostamenti positivi, con una fessura flessionale all'interfaccia trave-nodo, legata allo scorrimento delle barre d'armatura, 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, fenomeni che hanno portato a un collasso localmente fragile e a una repentina perdita di capacità portante.

La colonna di sinistra di Figura 7 rappresenta l'evoluzione del quadro fessurativo per il campione CJ1, ma le considerazioni seguenti possono ritenersi valide per entrambi i campioni non rinforzati. Come mostrato, 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 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. Sull'altra faccia del nodo, in corrispondenza con l'innesto della trave secondaria, non sono state osservate fessure fino a un drift dello 0.75%.

La comparsa della prima fessura diagonale nel pannello nodale si è verificata in corrispondenza di un drift negativo dell'1%. Fessure diagonali in direzione opposta sono apparse per un drift positivo del 2%, innescando così la formazione del cuneo in calcestruzzo.



**Figura 6.** Diagramma carico orizzontale - spostamento per i campioni RCJ1 e RCJ2

In corrispondenza di un drift del 3%, si è osservata l'espulsione di una vasta area di copriferro nella parte inferiore del nodo in corrispondenza dell'innesto con la trave secondaria, a causa delle spinte degli uncini terminali 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 senza fenomeni di espulsione di copriferro.

### 2.3.2. Campioni rinforzati (RCJ1 e RCJ2)

In Figura 6 sono riportati i risultati in termini di carico orizzontale - spostamento per i campioni rinforzati.

E' possibile osservare come la forma delle curve involucro, confrontabile per entrambi i campioni, sia ben rappresentativa del comportamento di una sezione caratterizzata da un nucleo in c.a. con una camicia esterna in HPFRC. Il valore di picco corrisponde al raggiungimento della massima deformazione a trazione nella camicia in HPFRC per la fibra più lontana dall'asse neutro. 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. All'aumentare dell'entità degli spostamenti orizzontali, il contributo a trazione della camicia in HPFRC viene gradualmente 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 44.25 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%.

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, che, a differenza di quanto avviene per spostamenti positivi, non è legato allo snervamento delle barre d'armatura longitudinali inferiori, ma al pull-out delle fibre all'interfaccia trave-nodo, una volta che viene meno il loro effetto di cucitura.

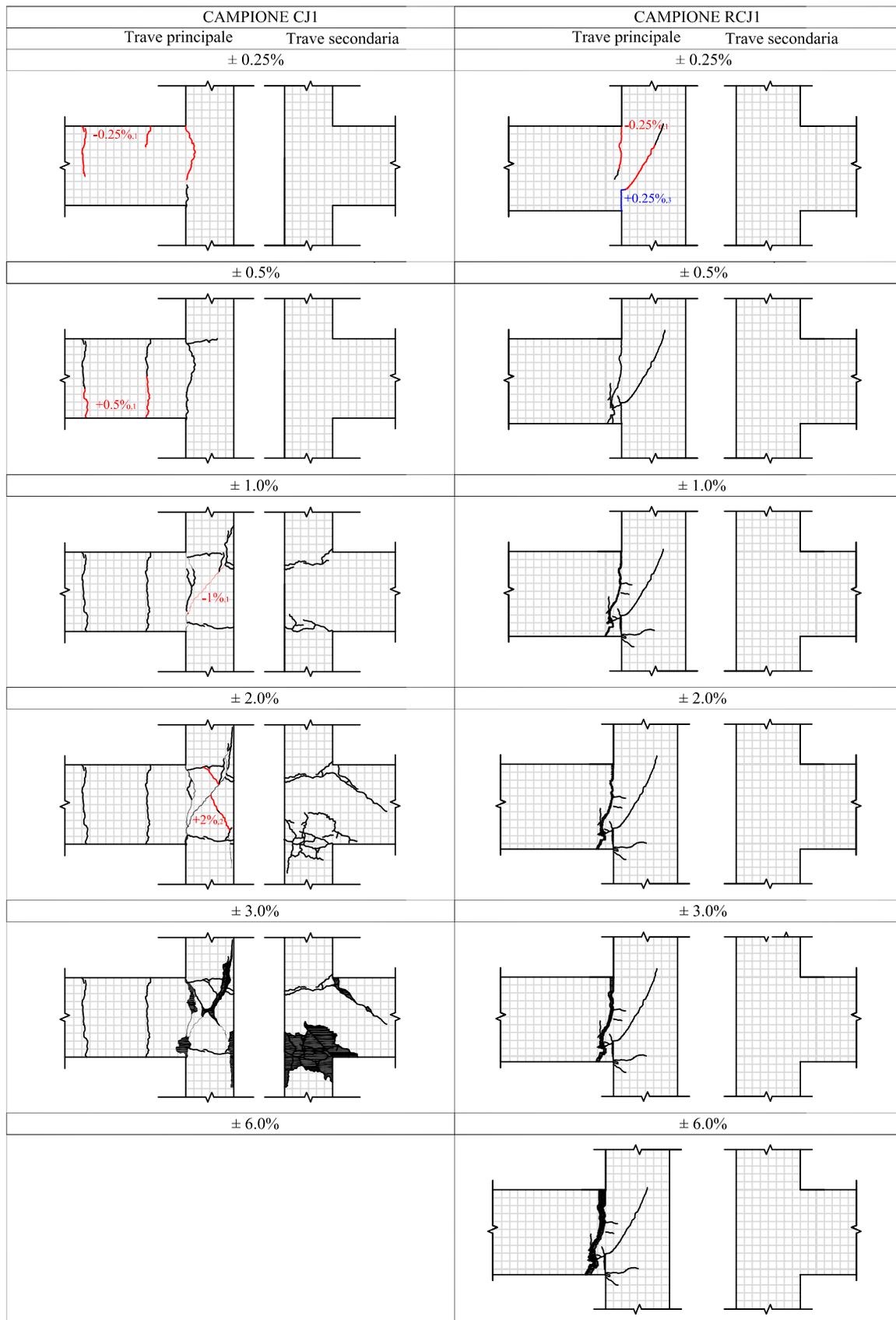
Se si effettua un confronto tra la resistenza residua e il carico di picco, il campione RCJ2 mostra un degrado minore per spostamenti positivi (66% contro 61% del campione RCJ1) e un degrado maggiore per spostamenti negativi (39% contro 51%).

Dalla colonna di destra di Figura 7, che rappresenta l'evoluzione del quadro fessurativo del campione RCJ1, è possibile osservare, già per bassi valori di drift, la formazione di una fessura verticale e di una fessura diagonale all'interno del pannello nodale. Quest'ultima fessura, tuttavia, non si sviluppa significativamente durante la prova.

Nei due campioni la posizione della fessura verticale è differente: per il campione RCJ1 essa è localizzata all'interfaccia tra la trave e il nodo, mentre si sviluppa all'interno del nodo per il campione RCJ2. Per questa ragione nel caso del campione RCJ2 il braccio della coppia interna risulta maggiore in direzione positiva, dal momento che, essendo la fessura verticale posizionata nel nodo, anche una zona di calcestruzzo compresso nel pilastro collabora ad aumentare la resistenza flessionale. Ciò giustifica i maggiori valori di carico di picco raggiunti ad ogni drift positivo dal campione RCJ2 rispetto a quelli raggiunti dal campione RCJ1, con differenze in media del 10% fino a un drift dell'1% e del 20% per drift maggiori fino al termine della prova.

Col progredire della prova, il danneggiamento del campione RCJ1, localizzato all'interfaccia tra trave e nodo, è caratterizzato da un'apertura progressivamente crescente della fessura verticale con valori che raggiungono anche i 45 mm in corrispondenza di un drift del 6%.

Per il campione RCJ2, la localizzazione del danneggiamento all'interfaccia trave-nodo si verifica 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 per un drift del 2%. A partire da un drift del 4% la fessura si sviluppa verso l'esterno raggiungendo l'interfaccia trave-pilastro.



**Figura 7.** Evoluzione del quadro fessurativo per i campioni CJ1 (a sinistra) e RCJ1 (a destra)



**Figura 8.** Campioni al termine delle prove: (a) RCJ1 e (b) RCJ2



**Figura 9.** Danneggiamento della faccia interna dei nodi alla fine delle prove: (a) Campione RCJ1; (b) Campione RCJ2

Le Figure 8(a) e 8(b) mostrano rispettivamente i campioni RCJ1 e RCJ2 al termine della prova in corrispondenza di un drift del 6%.

E' importante sottolineare come non si sia osservato alcun danneggiamento sulla faccia esterna del nodo in corrispondenza dell'innesto con la trave secondaria, mentre la superficie interna risulta maggiormente danneggiata, come mostrato nelle Figure 9(a) e 9(b). Relativamente al campione RCJ1 è possibile osservare in Figura 9(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 9(b).

### 3. CONFRONTI

Nel presente paragrafo vengono messi a confronto i risultati delle prove sperimentali eseguite sui quattro campioni di nodo.

Non è possibile effettuare confronti diretti in termini di forza-spostamento o di momento-rotazione tra campioni rinforzati e non dal momento che il calcestruzzo utilizzato per il getto dei campioni non rinforzati è caratterizzato da una resistenza media a compressione maggiore rispetto a quella dei campioni rinforzati (38.7 MPa e 27 MPa rispettivamente).

L'incremento di prestazioni derivante dal contributo dell'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 caratterizzato dalle medesime proprietà dei materiali. La fase di modellazione numerica si basa sul modello analitico descritto in Riva et al. [09, 10] in cui la resistenza del nodo è governata dal raggiungimento dello sforzo principale di trazione all'interno del pannello nodale.

Dai diagrammi di Figura 6, 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.

Con riferimento alla 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 la resistenza residua fornita dal modello numerico sovrastima quella ottenuta 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, perché comporta 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.

Un confronto tra i risultati sperimentali delle prove sui quattro campioni può essere invece effettuato in termini di energia dissipata adimensionalizzata all'energia elastica, come mostrato in Figura 10.

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 in corrispondenza di ogni drift. Tuttavia, a differenza dei campioni non rinforzati, per i quali l'energia dissipata decresce a partire da un drift pari al 2%, per il campione rinforzato RCJ1 la dissipazione di energia è sempre crescente.

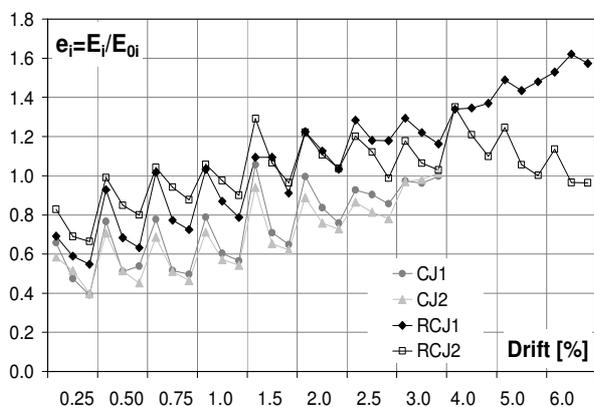


Figura 10. Energia dissipata adimensionalizzata

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.

Come mostrato in Figura 10, 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.

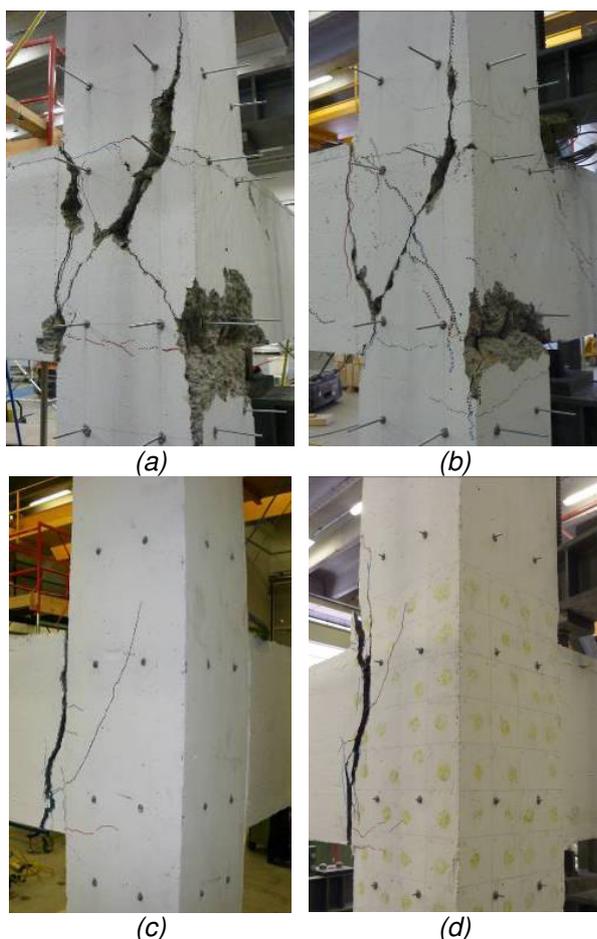
La Figura 11 mostra i quattro campioni al termine delle prove. Per i campioni non rinforzati CJ1 e CJ2 è chiaramente evidente l'interazione tra tre differenti modalità di rottura: collasso lato trave con la formazione della fessura verticale all'interfaccia con il nodo, collasso per taglio del nodo con 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.11(a) e 11(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.11(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.11(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÷0.07 mm, ha raggiunto valori massimi di 0.35÷0.4 mm tendendo poi a chiudersi fino a un'apertura di 0.1÷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 sono state osservate fessure sulla faccia esterna del nodo in corrispondenza dell'innesto con la trave secondaria. E' quindi evidente che l'incamiciatura del nodo con HPFRC è in grado di contenere le spinte degli uncini di estremità delle barre d'armatura della trave nella parte inferiore del nodo, evitandone il danneggiamento.



**Figura 11.** I campioni al termine delle prove: (a) CJ1; (b) CJ2; (c) RCJ1; (d) RCJ2

#### 4. CONCLUSIONI

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

Sono stati individuati due fenomeni che contribuiscono a influenzare significativamente il comportamento del nodo: 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 di collasso per flessione, con la formazione di una cerniera plastica nella trave.

Con la tecnica proposta ci si è posti l'obiettivo di valutare la possibilità di eseguire interventi di rinforzo in grado di realizzare sistemi a pilastri/forti-travi/deboli, in accordo con principi della Gerarchia delle Resistenze, che sono alla base delle moderne normative sismiche.

I risultati sperimentali hanno confermato un miglioramento delle prestazioni sismiche dei campioni con incamiciatura in HPFRC, che non hanno mostrato un danneggiamento apprezzabile del pannello nodale come è avvenuto invece per i campioni non rinforzati. 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, testimoniando un significativo miglioramento delle prestazioni nel caso di azioni sismiche.

Inoltre vale la pena prestare attenzione al fatto che il comportamento del nodo si è rivelato approssimativamente simmetrico in direzione positiva e negativa, 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.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [01] **FIB BULLETIN No. 24**, "Seismic assessment and retrofit of rein-forced concrete buildings", State-of-art report, International Federation for Structural Concrete, Agosto 2003, 312 pp.
- [02] **FIB BULLETIN NO. 35**, "Retrofitting of concrete structures by externally bonded FRPs, with emphasis on seismic

applications”, Technical report, International Federation for Structural Concrete, Aprile 2006, 220 pp.

- [03] **FIB REPORT 1991**, “Repair and strengthening of concrete structures. Guide to good practice”, Thomas Telford Ltd. 1991, 37 pp.
- [04] G. MARTINOLA, A. MEDA, G.A. PLIZZARI, Z. RINALDI, “An application of high performance fiber reinforced cementitious composites for R/C beams strengthening”, Atti del Convegno FRAMCOS 6, Catania (Italia), 18–21 Giugno 2007.
- [05] **L. MAISTO, A. MEDA, G.A. PLIZZARI, Z. RINALDI**, “R/C beams strengthening and repair with high performance fiber reinforced concrete jacket”, Atti del 4° Convegno Internazionale su Conceptual Approach to Structural Design, Venezia (Italia), 27–29 Giugno 2007.
- [06] **C. BESCHI, A. MEDA, P. RIVA**, “Column and joint retrofitting with high performance fiber reinforced concrete jacketing”, Journal of Earthquake Engineering, 15:7 (2011), pp. 989-1014, ISSN: 1363-2469.
- [07] **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.
- [08] **L. SANTARELLA**, “Il cemento armato – Le applicazioni alle costruzioni civili e industriali”, Milano Edizioni Hoepli, 1945, 559 pp.
- [09] **P. RIVA, G. METELLI, C. BESCHI, F. MESSALI**, “Modellazione di nodi trave-pilastro esterni di telai in cemento armato soggetti ad azioni cicliche”, Atti del X Convegno Nazionale ANIDIS “L’ingegneria Sismica Italia”, Bari 18-22/09/2011, ISBN 978-88-7522-040-2.
- [10] **P. RIVA, G. METELLI, C. BESCHI, F. MESSALI**, “Modelling of exterior beam to column joint in '60-70s RC existing buildings”, Atti del IV International Symposium “Bond in Concrete”, Brescia, 17-20 Giugno 2012.

## 6. RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro si inserisce nell’ambito del progetto ReLUIIS-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.

*Contatti con gli autori:*

*Consuelo Beschi:* [consuelo.beschi@unibg.it](mailto:consuelo.beschi@unibg.it)

*Alberto Meda:* [alberto.meda@uniroma2.it](mailto:alberto.meda@uniroma2.it)

*Paolo Riva:* [paolo.riva@unibg.it](mailto:paolo.riva@unibg.it)