

Comportamento di nodi trave-pilastro sismo-resistenti in struttura mista di tipo tralicciato soggetti ad azioni cicliche

R. Scotta¹, L. Tesser² ■

Sommario

L'articolo presenta i principali risultati di esperimenti eseguiti su nodi trave-pilastro innovativi realizzati con struttura composta acciaio e calcestruzzo. Trattasi di cinque prove in cui altrettanti nodi a due vie in scala reale sono sottoposti a spostamenti pseudo-statici di tipo ciclico tali da indurre una condizione di sollecitazione di tipo sismico. Quattro nodi hanno le travi di tipologia mista acciaio e calcestruzzo ed un nodo è intera-

mente in calcestruzzo armato normale per stabilire utili confronti. Per quanto riguarda i primi quattro, due nodi hanno i pilastri in c.a., un nodo è realizzato con pilastro con camicia di acciaio di sezione quadrata ed infine un nodo ha anche i pilastri in struttura reticolare mista. I risultati ottenuti sono analizzati criticamente e confrontati tra loro per poter trarre utili conclusioni sulla duttilità e sulla resistenza dei nodi innovativi nei confronti delle sollecitazioni di natura sismica.

1. Introduzione

Il collegamento tra travi e pilastri nelle strutture a telaio che prevedono l'impiego di travi parzialmente prefabbricate riserva tutt'oggi delle problematiche legate all'ottenimento di soddisfacenti livelli di resistenza e di duttilità (1-3). Infatti i nodi trave-pilastro di telai sismo-resistenti possono essere fortemente sollecitati e divengono determinanti nell'assicurare il rispetto dei criteri di gerarchia delle resistenze.

Dal punto di vista progettuale le difficoltà sono insite nel garantire la continuità delle armature di travi e di pilastri attraverso il nodo. Infatti se le travi sono parzialmente prefabbricate la loro armatura ben difficilmente può attraversare il nodo e diviene necessario l'inserimento di elementi dopo la messa in opera delle travi e prima dell'esecuzione del getto di completamento del solaio. Tale armatura addizionale deve essere inglobata nel getto di calcestruzzo integrativo da solidarizzare alla porzione prefabbricata delle travi.

2. Nodi trave-pilastro sottoposti a prova

Per la progettazione dei nodi trave-pilastro da sottoporre alle prove di laboratorio si è fatto riferimento ad un tipico edificio di 4 piani con struttura a telaio regolare in c.a. con maglia dei pilastri in pianta di 4 m x 6 m (Figura 1). In partico-

Dal punto di vista meccanico i nodi devono possedere una sufficiente resistenza alle sollecitazioni taglianti e devono preservare l'integrità della colonna per permettere la formazione di cerniere plastiche nelle sezioni delle travi adiacenti ai nodi stessi.

Focalizzando l'attenzione su un particolare tipo di travi miste di tipo tralicciato con fondello in calcestruzzo, gli autori hanno condotto degli studi su alcuni innovativi nodi trave-pilastro teoricamente in grado di garantire adeguata resistenza e duttilità d'insieme (Tesser, 2009).

L'obiettivo del presente lavoro è la verifica sperimentale del comportamento dei nodi precedentemente sviluppati ed il loro confronto con quello di un nodo in c.a. tradizionale progettato in classe di duttilità alta nel rispetto della normativa vigente in Italia (D.M. 14 gennaio 2008). In particolare l'attenzione sarà posta nel valutare la resistenza e la duttilità dei nodi soggetti a sollecitazioni cicliche che simulano le tipiche azioni sismiche.

lare si è focalizzata l'attenzione su un telaio portante con interasse dei pilastri pari a 4,00 m ed altezza interpiano pari a 3,20 m (Figura 2). La progettazione è coerente con il vigente D.M. 14 gennaio 2008 nel rispetto delle prescrizioni generali e dei dettagli costruttivi previsti per la classe di

¹ Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, Università degli Studi di Padova, Padova - ✉ scotta@dic.unipd.it

² Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, Università degli Studi di Padova, Padova - ✉ tesser@dic.unipd.it

Tabella 1 - Parametri dello spettro di progetto orizzontale

Accelerazione di picco al suolo per un tempo di ritorno pari a 475 anni:	a_g	0.260 g
Valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro orizzontale:	F_0	2.36
Periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro orizzontale:	T_C^*	0.340 s

duttilità alta. L'azione sismica di progetto è valutata per la città de L'Aquila (Lat. 42°21'57" N; 13°23'39"E) con suolo di categoria C ed è caratterizzata dai parametri indicati in Tabella 1. Dall'edificio di riferimento è stato idealmente estratto un nodo trave-pilastro interno del primo impalcato (Figura 2). I nodi a 2 vie sottoposti a prova hanno i pilastri di altezza 3.2 m con sezione quadrata di 0.40 m di lato e le travi di lunghezza complessiva pari a 4.8 m con sezione rettangolare di base 0.40 m e di altezza 0.35 m. Il progetto dell'armatura delle varie sezioni è stato quindi adattato alla geometria ed allo schema statico di laboratorio mantenendo

come parametro di riferimento il taglio massimo di progetto allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita, pari a 150 kN, agente alla base del pilastro estrapolato dall'edificio analizzato. Al fine di stabilire utili confronti con le tipologie costruttive tradizionali, uno dei nodi oggetto di sperimentazione è stato realizzato in calcestruzzo armato normale. Altri quattro nodi sono invece realizzati con travi in struttura mista di tipo tralicciato con fondello in calcestruzzo, progettati con appositi tralicci integrativi che attraversano il nodo. Ciascun nodo trave-pilastro viene descritto in dettaglio nei successivi paragrafi.

Figura 1
Pianta dell'edificio tipo con indicazione del telaio scelto (misure espresse in cm).

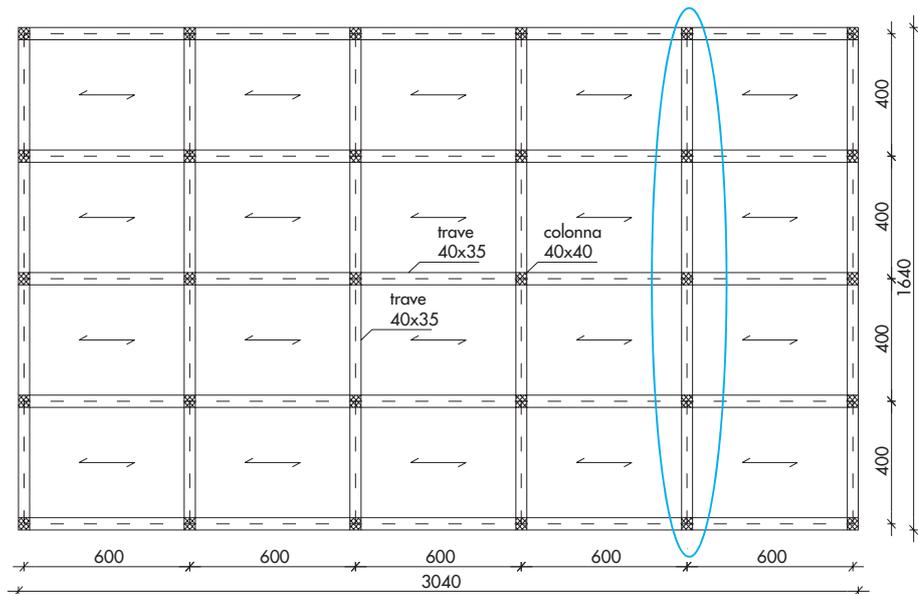
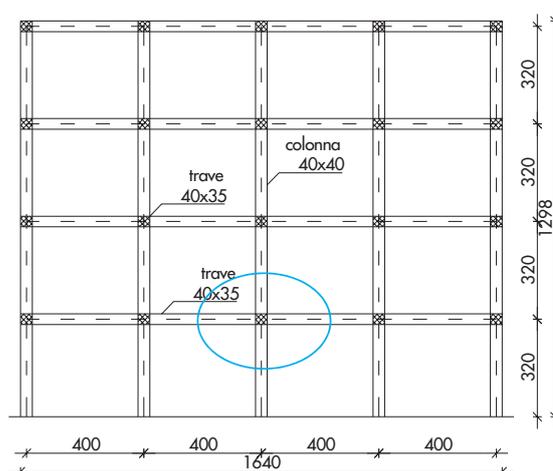


Figura 2
Prospetto del telaio con indicazione del nodo trave-pilastro estrapolato (misure espresse in cm).



2.1 Nodo n. 1 in c.a. normale

Il nodo in c.a. normale viene indicato con nodo n. 1 (Figura 3). Il pilastro è armato con 12 barre di diametro 20 mm e staffe a 4 braccia di diametro 8 mm ad un interasse di 100 e 150 mm. Le travi sono armate con 8+8 barre longitudinali di diametro 16 mm e da staffe a 4 braccia di

diametro 8 mm ed interasse compreso fra 80 e 120 mm.

Nella progettazione del nodo si è assicurato un rapporto di sovrarresistenza a flessione pari a 1.3 del pilastro rispetto alla trave, nel rispetto di quanto richiesto dal D.M. 14 gennaio 2008 al §7.4.4.2.1.

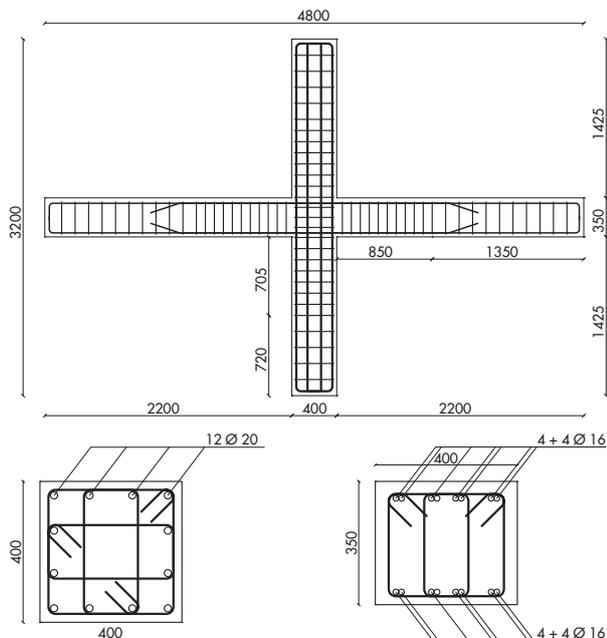


Figura 3
Vista laterale e sezioni di pilastro e trave del nodo n. 1.

2.2 Nodi n. 2 e n. 3 con travi in struttura mista e pilastri in c.a. normale

Trattasi di nodi con pilastri in c.a. normale, armati come nel nodo n. 1, e travi miste di tipo tralicciato dotate di fondello in calcestruzzo. La continuità delle travi è assicurata da due tralicci integrativi lineari che attraversano il nodo, late-

ralmente rispetto all'armatura di confezionamento delle travi (Figura 4). Nel nodo n. 2 tali tralicci integrativi non hanno alcun collegamento reciproco, mentre nel nodo n. 3 i due tralicci sono collegati tramite delle barre trasversali superiori saldate con funzione di calastrelli (Figura 5).

Ognuno dei tralicci integrativi è formato da 2

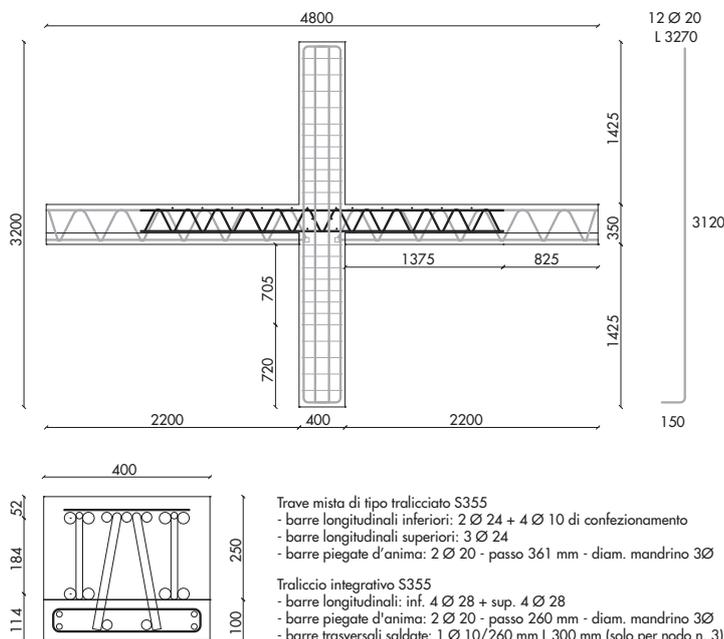


Figura 4
Prospetto esecutivo nodo n. 2 e n. 3 con travi in struttura mista e pilastri in c.a. normale.

Figura 5
Sezione della trave dei nodi n. 2 e n. 3 composta da zoccolo in calcestruzzo e traliccio integrativo a U rovescia.

Trave mista di tipo tralicciato S355
 - barre longitudinali inferiori: 2 Ø 24 + 4 Ø 10 di confezionamento
 - barre longitudinali superiori: 3 Ø 24
 - barre piegate d'anima: 2 Ø 20 - passo 361 mm - diam. mandrino 3Ø

Traliccio integrativo S355
 - barre longitudinali: inf. 4 Ø 28 + sup. 4 Ø 28
 - barre piegate d'anima: 2 Ø 20 - passo 260 mm - diam. mandrino 3Ø
 - barre trasversali saldate: 1 Ø 10/260 mm L 300 mm (solo per nodo n. 3)

barre longitudinali superiori e inferiori di diametro 30 mm e da barre d'anima piegate e saldate di diametro 20 mm disposte ad un interasse di 260 mm.

I tralicci integrativi vengono inseriti nel nodo dopo il posizionamento dell'armatura del pilastro inferiore e l'appoggio delle travi ma prima del getto di completamento del solaio.

I momenti resistenti di progetto delle travi e dei pilastri rispettano gli stessi criteri di gerarchia delle resistenze già adottati per i nodi in c.a. normale.

2.3 Nodo n. 4 con travi in struttura mista, pilastri in c.a. e traliccio integrativo a croce

Il nodo n. 4 differisce dai nodi 2 e 3 solamente per il fatto che i tralicci integrativi delle travi ven-

gono saldati ad un traliccio che si inserisce nei pilastri, in modo da formare un traliccio integrativo a croce (Figura 6).

Il traliccio integrativo a croce e le travi devono essere posizionate e sostenute provvisoriamente prima del getto del pilastro al piano inferiore. L'armatura dei pilastri si interrompe in corrispondenza del nodo. La gabbia di armatura dei pilastri deve essere conformata in modo tale da consentire l'agevole inserimento al suo interno della parte verticale del traliccio. In Figura 7 vi sono le sezioni del pilastro e delle travi del nodo 4.

Anche in questo caso i momenti resistenti di progetto delle travi e dei pilastri rispettano gli stessi criteri di gerarchia delle resistenze già adottati per i nodi precedentemente presentati.

Figura 6
Prospetto esecutivo nodo n. 4 con evidenziato il traliccio integrativo a croce.

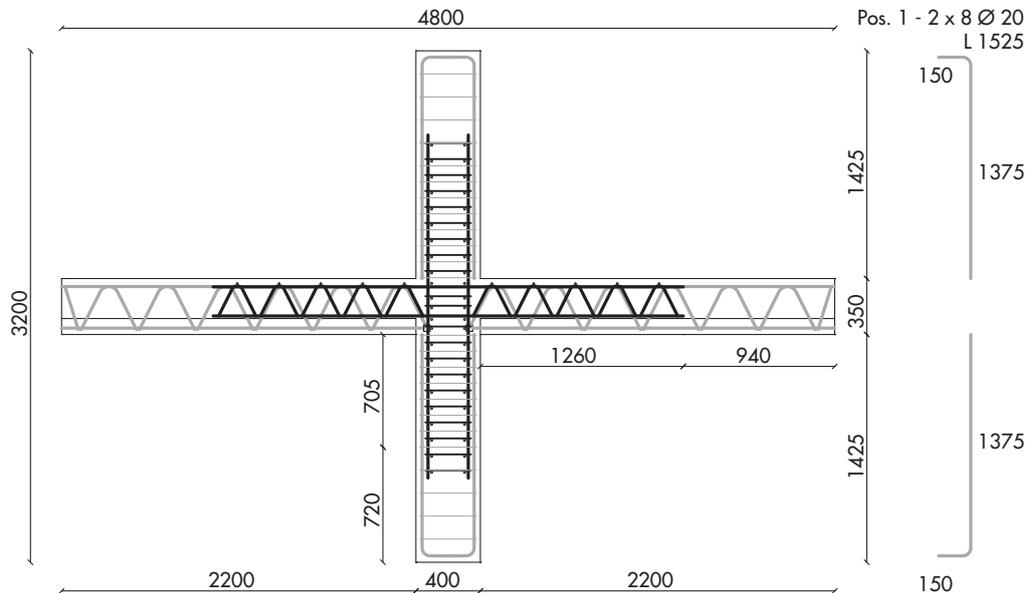
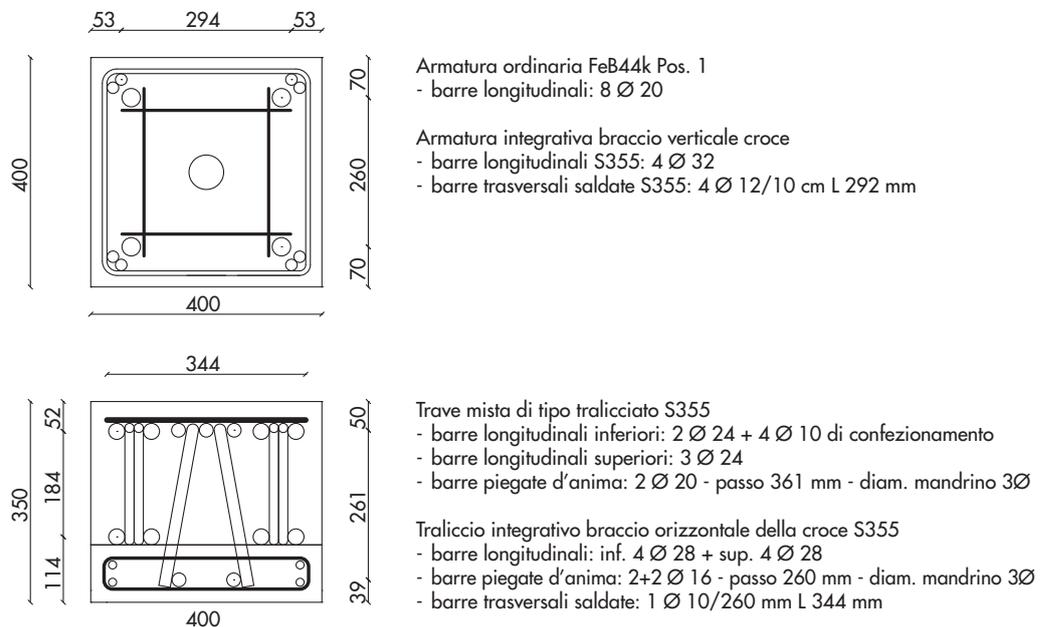


Figura 7
Sezione del pilastro e della trave del nodo n. 4 con traliccio integrativo a croce.



2.4 Nodo n. 5 con travi in struttura mista e pilastri misti incamiciati con traliccio integrativo a croce

Trattasi di un nodo con pilastri in c.a. incamiciati con profilo quadro in acciaio, travi miste acciaio e calcestruzzo di tipo tralicciato con fondello in calcestruzzo e traliccio integrativo a croce, come nel nodo n.4, a ripristinare la continuità sia delle travi che dei pilastri.

L'armatura di travi e pilastri e anche quella del traliccio a croce sono le stesse del nodo n. 4.

Solamente in questo caso il traliccio integrativo a croce ha maglie non rettangolari anche nei pilastri, secondo il disegno dell'originale idea brevettuale dell'Ing. Salvatore Leone.

La continuità della camicia in acciaio del pilastro, interrotta in corrispondenza del nodo, è parzialmente ripristinata mediante 4 barre filettate $\phi 20$ passanti attraverso la testa delle travi. La rappresentazione completa del nodo n. 5 è riportata nelle Figure 8 e 9.

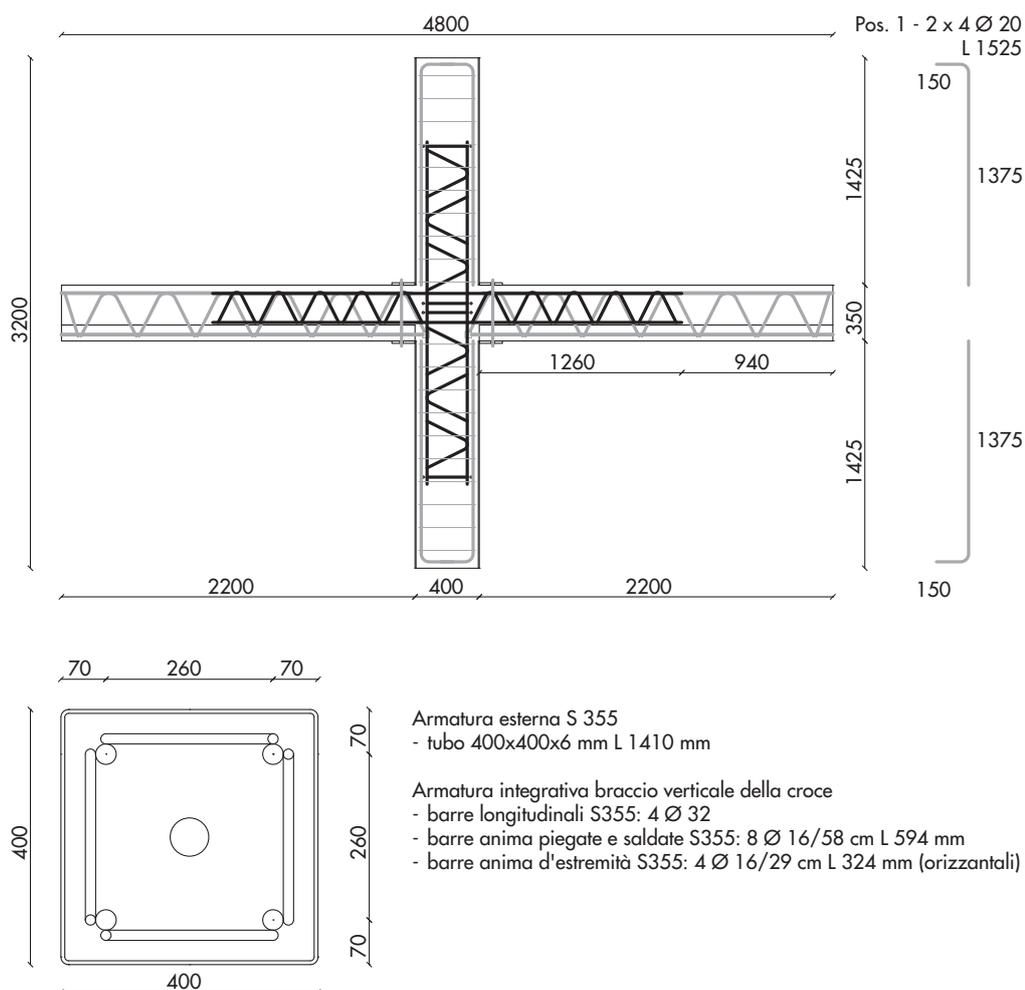


Figura 8
Prospetto esecutivo nodo n. 5 con travi in struttura mista, traliccio integrativo a croce e pilastro incamiciato.

Figura 9
Sezione del pilastro composto incamiciato del nodo n. 5 con inserito il traliccio a croce saldato.

3. Risultati delle prove sperimentali

Le prove sono state effettuate presso il laboratorio del Dipartimento di Costruzione e Trasporti dell'Università di Padova. I nodi trave-pilastro sono stati vincolati tramite una cerniera alla base del pilastro e due bielle all'estremità delle travi e sono stati sollecitati mediante un martinetto a doppia azione che applicava uno spostamento orizzontale in sommità al pilastro (Figura 10). Le prove sono di tipo quasi-statico e pertanto le forze di inerzia sono decisamente trascurabili. Tale schema statico ha permesso di simulare l'effetto delle azioni orizzontali tipiche di eventi

sismici sugli edifici. Per riprodurre la presenza di uno sforzo normale nel pilastro, è stata disposta una barra filettata all'interno di una guaina annegata in asse al pilastro. Tale barra è stata serrata con una chiave dinamometrica per applicare una forza costante pari a 100 kN.

Per l'applicazione degli spostamenti in sommità al pilastro è stato utilizzato un martinetto di capacità di spinta pari a 930 kN e di trazione pari a 430 kN e di corsa massima pari a 30 cm. Durante il corso delle prove i dati di carico, spostamento e deformazione sono stati acquisiti automaticamente e con continuità mediante opportuni stru-

Tabella 2 - Trasduttori induttivi di spostamento

1 trasduttore per la misura dello spostamento longitudinale delle travi	strumento	n. 11
2 trasduttori per la misura della cedevolezza del vincolo di appoggio delle travi	strumento	n. 12 e 15
1 trasduttore per la misura della traslazione longitudinale del pilastro	strumento	n. 13
1 trasduttore per la misura della cedevolezza del vincolo di cerniera del pilastro	strumento	n. 14
1 trasduttore per la misura dello spostamento in sommità al pilastro dove è applicata la forza	strumento	n. 16

menti di misura. In particolare sono stati disposti sei trasduttori induttivi di spostamento con corsa massima pari a 10, 50 e 200 mm, disposti come in Figura 11 ed utilizzati in accordo con quanto riportato in Tabella 2. Sulle barre di armatura e sui tralicci integrativi si sono disposti degli strain-gauges

prima del getto di calcestruzzo per monitorare le deformazioni delle barre ai diversi livelli di carico. Gli strain-gauges, con resistenza pari a $120 \Omega \pm 0.35\%$ e fattore calibro $2.08 \pm 1\%$, sono stati applicati sulle barre di acciaio costituenti armatura e tralicci secondo gli schemi di Figura 12.

Figura 10
Pianta del sistema di vincolo al piano del laboratorio e applicazione carico del nodo trave-pilastro.

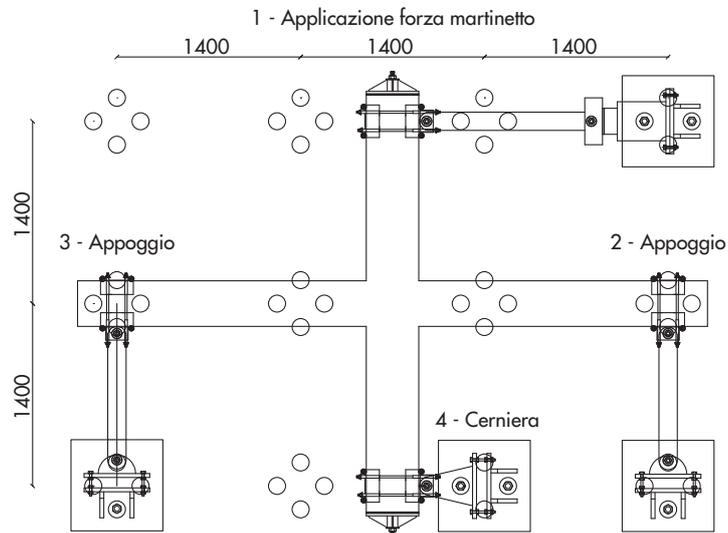


Figura 11
Schema di posizionamento di vincoli e di trasduttori induttivi di spostamento.

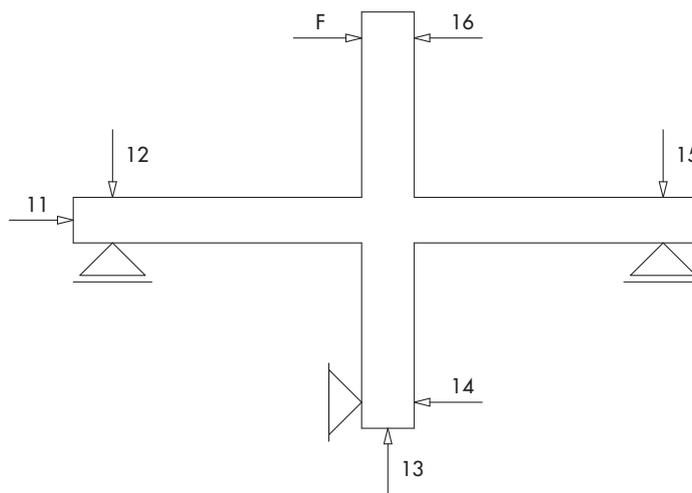
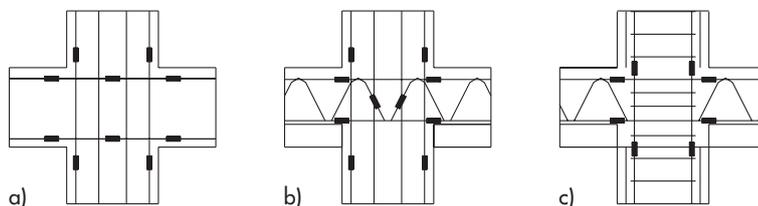


Figura 12
Schema di posizionamento degli strain-gauges applicati alle barre di acciaio all'interno dei nodi: (a) nodo n. 1 in c.a. ordinario; (b) nodi n. 2 e 3 con tralicci integrativi lineari; (c) nodi n. 4 e 5 con tralicci integrativi a croce.



La tipica storia di carico dei nodi prevede 3 cicli di carico/scarico con valori massimi di forza imposta crescenti pari a ± 50 kN, ± 100 kN, ± 150 kN e poi gli ultimi cicli estesi fino al raggiungimento della corsa massima in spostamento del martinetto (cfr. Figura 13). Ogni ciclo comprende la ripetizione per 3 volte degli spostamenti massimi e minimi raggiunti. Gli spostamenti misurati sono stati depurati dalle componenti di movimento a corpo rigido dovuti alla cedevolezza dei sistemi di vincolo. Così, ad esempio, lo spostamento in sommità al pilastro depurato dal moto rigido di traslazione e rotazione, u_{16}^d , è dato dalla seguente formula

$$u_{16}^d = u_{16}^m - u_{14}^m - (u_{12}^m - u_{15}^m) \frac{L_p}{L_t}$$

in cui, u_{12}^m , u_{14}^m , u_{15}^m e u_{16}^m sono gli spostamenti misurati dai trasduttori n. 12, 15 e 16 rispettivamente, L_p e L_t sono le lunghezze complessive del pilastro e delle travi. In modo del tutto analogo lo spostamento longitudinale delle travi depurato è calcolato come segue

$$u_{11}^d = u_{11}^m - u_{14}^m - (u_{12}^m - u_{15}^m) \frac{L_p}{2L_t}$$

La valutazione teorica della forza di attrito non è immediata per effetto della complessità del sistema di vincolo. Perciò si è deciso di misurare sperimentalmente la forza applicata dal martinetto per produrre uno spostamento in sommità alla colonna pari a 0.3 mm corrispondenti ad uno spostamento interpiano relativo di 0.01%. Tale livello di attrito statico si è attestato in tutti i casi, sia in spinta che in trazione, intorno ad un livello di 5 kN, pari a circa il 2.5% del livello di carico di rottura del nodo, e quindi tale da non inficiare la significatività del risultato.

I cicli di spostamento applicati dal martinetto sono stati di entità crescente anche oltre il raggiungimento dello snervamento della struttura. Si è proceduto con i cicli fino al raggiungimento della massima capacità di estensione del martinetto. Anche per effetto dei giochi dei sistemi di vincolo, la corsa limitata del martinetto non ha permesso di esaurire completamente la duttilità dei nodi travepilastro sebbene ciascuno di essi abbia maturato notevoli deformazioni plastiche.

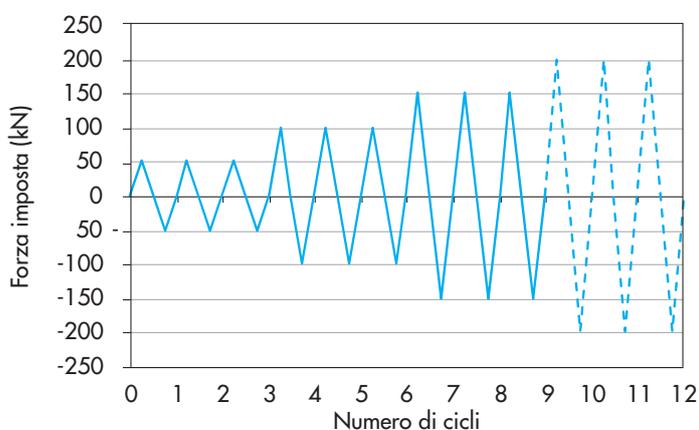


Figura 13
Tipica storia di carico dei nodi.

3.1 Caratteristiche dei materiali

Le caratteristiche dei materiali con cui sono stati realizzati i nodi sono state determinate mediante prove di compressione su cilindri di calcestruzzo e prove di trazione su spezzoni di acciaio. I risultati ricavati dalle prove di caratterizzazione dei

materiali sono riassunti nelle tabelle che seguono. Sono stati prelevati 5 provini cilindrici mediante carotaggio nella zona del getto di completamento delle travi. I valori sperimentali ottenuti dalle prove di compressione eseguite secondo il vigente D.M. 14 gennaio 2008 sono riportati in Tabella 3.

Tabella 3 - Resistenze cilindriche dei provini cilindrici di calcestruzzo ottenuti da carote estratte a prove ultimate

ID cilindro	ID nodo	f_c (MPa)
1	1	48
2	2	54
3	3	60
4	4	50
5	5	41

Tabella 4 - Resistenze di snervamento e di rottura e allungamenti a rottura degli acciai ottenute da spezzoni prelevati dai nodi

ID barra	ID nodo	Tipo	ϕ_n (mm)	f_y (MPa)	f_t (MPa)	A_t (%)
1	1	B450C	16	509	638	13
2	1	B450C	16	510	638	14
3	2	S355	24	380	523	15
4	2	S355	24	386	527	13
5	2	S355	30	414	557	14
6	2	S355	30	409	553	15
7	3	S355	24	386	532	10
8	3	S355	24	384	526	11
9	3	S355	30	417	561	10
10	3	S355	30	410	556	10
11	4	S355	24	468	607	10
12	4	S355	24	468	608	10
13	4	S355	28	408	564	17
14	4	S355	28	419	569	16
15	5	S355	24	391	524	11
16	5	S355	24	378	525	12
17	5	S355	28	419	570	14
18	5	S355	28	411	560	15

Il progetto costruttivo dei campioni sottoposti a prova prevedeva l'utilizzo di un acciaio da carpenteria metallica S355 e acciai per cemento armato B450C. Dalla demolizione dei nodi si sono ricavati spezzoni dei due acciai, nei diversi diametri previsti. I risultati delle prove a trazione eseguite secondo il vigente D.M. 14 gennaio 2008 su tali spezzoni sono riportati in Tabella 4.

3.2 Prova Nodo n. 1

Nel corso della prova del nodo in c.a. normale sono stati effettuati 3 cicli di carico/scarico con valori massimi crescenti di ± 50 N, ± 100 kN, ± 150 kN ciascuno dei quali è stato ripetuto 3 volte. Infine è stato effettuato un ulteriore ciclo di carico/scarico che ha visto il raggiungimento della resistenza del nodo seguito da un nuovo carico che è stato protratto fino ad oltrepassare la massima corsa in termini di spostamento del martinetto di applicazione del carico. Gli spostamenti massimi depurati in sommità del pilastro sono risultati prossimi a ± 150 mm.

In Figura 14 viene mostrata la foto ravvicinata del pannello nodale al termine dell'esperimento. In particolare si vedono le fessure che si sono progressivamente palesate. Per facilitarne la lettura, sono state evidenziate con colori diversi le fessurazioni formatesi in seguito a ciascuna tripla di cicli di carico: il colore blu evidenzia le fessurazioni comparse nei primi cicli a ± 50 kN, il colore verde quelle comparse a ± 100 kN, il colore rosso quelle apparse a ± 150 kN ed infine

il colore viola indica le fessure rilevate dopo il raggiungimento degli spostamenti massimi imposti alla struttura, pari a circa ± 150 mm.

Dall'analisi di tali dati si può affermare che i cicli a 1/3 della forza di taglio di progetto hanno prodotto una fessurazione limitata al nodo, a partire dagli spigoli di raccordo tra trave e pilastro. Nel corso dei cicli a 2/3 della forza di taglio di progetto si sono verificate le prime fessure flessionali sulle travi e alcune modeste fessurazioni diagonali sul pannello di nodo. Al raggiungimento della forza di taglio di progetto il sistema di fessurazioni è rimasto stabile e successivamente si è visto solo l'assestamento di fessure già presenti. Nell'ultimo ciclo, all'aumentare del carico, le fessurazioni si sono estese fino alla formazione della cerniera plastica sulle travi in prossimità del nodo in corrispondenza ad un valore del carico pari a circa 180 kN. La resistenza del provino è stata quindi pari a circa 190 kN. Non si è potuto esaurire la duttilità del nodo trave-pilastro a causa dei limiti della strumentazione di laboratorio. Alla fine della prova si è potuto constatare l'assenza di fessurazioni taglienti in travi e pilastri e l'integrità dei pilastri al di fuori della zona nodale, verificando così il soddisfacimento delle prestazioni di progetto relative alla gerarchia delle resistenze.

Il grafico forza applicata-spostamento in sommità al pilastro è riportato in Figura 19. Deve essere sottolineato che il tratto a resistenza costante pari a 120 kN che si verifica nel corso



Figura 14
Particolare del pannello del
nodo n. 1 dopo la prova.

dell'ultimo ciclo per spostamenti superiori a 120 mm è dovuto ad un errore dovuto al riassetto della strumentazione di prova utilizzata per le misure. Motivazioni simili legate alla lettura degli spostamenti sono da addurre per minori anomalie contenute nelle curve carico-spostamento presentate.

3.3 Prova Nodo n. 2

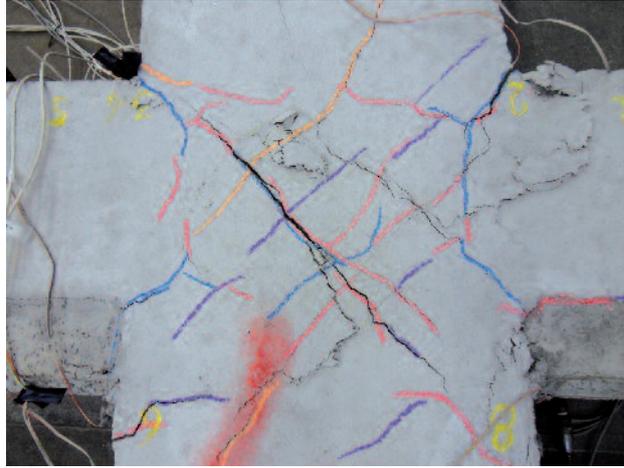
Vengono ora descritti i risultati del nodo con travi in struttura mista, pilastri in c.a. e tralicci integrativi lineari non collegati. Oltre ai primi cicli con valori di carico applicato crescenti e pari a ± 50 kN, ± 100 kN, ± 150 kN, è stato effettuato un ultimo ciclo asimmetrico che ha raggiunto in spinta uno spostamento depurato in sommità del pilastro pari a 60 mm ed in trazione pari a -120 mm. Questo ultimo valore è corrisposto, per il caso in esame, al raggiungimento del fine corsa del martinetto. La foto di Figura 15 mostra il sistema fessurativo progressivamente prodottosi nel pannello di nodo. Con una procedura già descritta per le prove precedenti, le fessure sono state rimarcate per mezzo

di gessi colorati. In questo caso il colore blu evidenzia le fessurazioni comparse nei primi cicli con forza applicata pari a ± 50 kN, il colore rosso quelle comparse a circa ± 100 kN ed confermatesi nei cicli a ± 150 kN ed infine il colore viola indica le fessure prodottesi in concomitanza all'ultimo ciclo effettuato in cui sono stati raggiunti i massimi valori di spostamento. I primi cicli di carico per i quali è stato applicato 1/3 della forza di progetto hanno prodotto una limitata fessurazione del pannello di nodo con alcune fessure principali sviluppatesi a partire dagli spigoli di raccordo tra travi e pilastri e solo una coppia di modeste fessure diagonali al centro del nodo stesso. Nei successivi cicli a 2/3 della forza di progetto, sono apparse nuove fessure sulle travi e diagonali sul pannello di nodo. La loro ampiezza si è mantenuta modesta. Ancor più modesta è stata la fessura apparsa su un pilastro. Tale sistema fessurativo si è poi stabilizzato nel corso dei cicli alla forza di progetto. Nel corso dell'ultimo ciclo di carico scarico si sono formate fessure flessionali più ampie nelle travi a testimoniare l'avvenuta formazione



Figura 15
Particolare del pannello del
nodo n. 1 dopo la prova.

Figura 16
Particolare del pannello del
nodo n. 3 dopo la prova.



di cerniere plastiche in corrispondenza di un carico applicato pari a circa 180 kN. La resistenza finale del nodo è stata pari a circa 210 kN. Al raggiungimento del massimo spostamento imposto pari a circa 120 mm una fessura ha interessato il pilastro nella zona limitrofa al pannello di nodo. Il grafico forza applicata-spostamento in sommità al pilastro è riportato in Figura 20.

3.4 Prova Nodo n. 3

Come più sopra precisato, il nodo n. 3 differiva rispetto al nodo n. 2 per effetto del collegamento trasversale dei tralicci integrativi mediante spezzoni di barre saldati trasversalmente alla direzione longitudinale delle travi. Oltre a 9 cicli comuni a tutti gli esperimenti con carichi/scarichi ripetuti pari a ± 50 kN, ± 100 kN, ± 150 kN, è stato effettuato un ulteriore ciclo fino al raggiungimento della massima corsa in spostamento del martinetto corrispondente nel caso in esame ad uno spostamento depurato in sommità al pilastro in spinta pari a circa 100 mm ed in trazione pari a circa -120 mm.

La foto in Figura 16, scattata a prova ultimata, rappresenta il sistema fessurativo del pannello di nodo che si è progressivamente prodotto. Con la medesima convenzione adottata per il nodo n. 2, le fessure evidenziate con il colore blu si sono formate nei cicli a ± 50 kN, con il colore rosso nei cicli a ± 100 kN, con il colore viola a ± 150 kN, mentre il colore arancione rimarca le fessure verificatesi nell'ultimo ciclo di carico/scarico.

Anche in questo caso i cicli a 1/3 della forza di progetto hanno prodotto alcune modeste fessure prodottesi a partire dagli spigoli al raccordo tra travi e pilastri e molto limitatamente all'interno del pannello di nodo. I cicli di carico a 2/3 della forza di progetto hanno provocato la formazione di nuove fessure ed in particolare di fes-

sure sulle travi, diagonali sul pannello di nodo e molto limitate fessure sui pilastri.

Solo alcune nuove e limitate fessure si sono aperte nei cicli con forza superiore a quella di progetto. Nel corso dell'ultimo ciclo di carico/scarico fessure flessionali notevoli si sono verificate nelle travi accompagnate anche da una modesta crisi a compressione del copriferro nelle travi. Anche il copriferro nel pannello di nodo ha mostrato alcune screpolature mentre alcune fessure prodottesi nell'area nodale sono progredite verso le regioni dei pilastri adiacenti. La formazione delle cerniere plastiche nelle travi è avvenuta in corrispondenza di un carico applicato pari a circa 180 kN. La resistenza del provino è stata quindi pari a circa 210 kN. Il grafico forza applicata-spostamento in sommità al pilastro è riportato in Figura 20.

3.5 Prova Nodo n. 4

I risultati del nodo n. 4 caratterizzato dalla presenza di un traliccio a croce innestato in pilastri in c.a. normale sono esposti qui di seguito. Il provino è stato sottoposto ai nove cicli preliminari ripetuti con carichi/scarichi pari a ± 50 kN, ± 100 kN, ± 150 kN nonché ad ulteriori tre cicli di carico/scarico di ampiezza in termini di spostamento pari a quella consentita dalla corsa del martinetto che corrisponde a spostamenti depurati in sommità al pilastro in spinta pari a circa +100 mm ed in trazione pari a circa -130 mm. La foto in Figura 17 mostra il quadro fessurativo complessivo alla fine dell'esperimento. Le fessure sono state evidenziate con diversi colori in conformità a quanto già fatto per i nodi già descritti. Il colore blu evidenzia le fessurazioni comparse nei primi cicli a ± 50 kN, il colore rosso quelle comparse a ± 100 kN e approfonditesi a ± 150 kN ed infine il colore viola indica le fessure apertes in concomitanza dei massimi spostamenti.

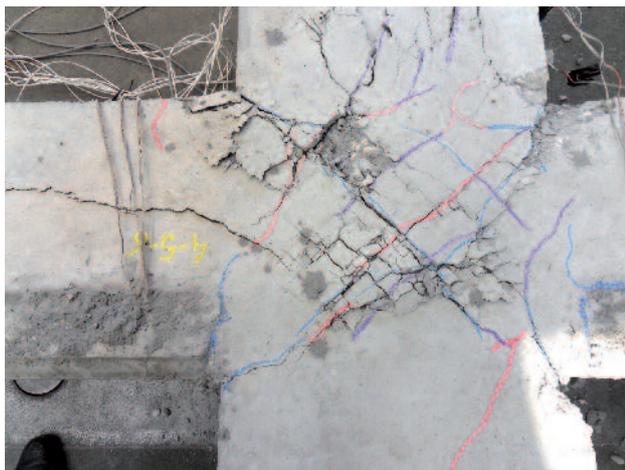


Figura 17
Particolare del pannello del
nodo n. 4 dopo la prova.

I cicli di carico a 1/3 della forza di progetto hanno prodotto anche in questo caso una fessurazione molto limitata del nodo. A loro volta i cicli a 2/3 della forza di progetto hanno causato le fessurazioni flessionali nelle sezioni delle travi ed alcune fessure diagonali nel pannello nodale. Tali fessure si sono quindi stabilizzate nel corso dei cicli alla forza di progetto. Il primo ciclo successivo ha visto lo snervamento della struttura a seguito della formazione di cerniere plastiche nelle sezioni delle travi. Queste sono state accompagnate dall'amplificarsi delle fessure di origine flessionale e da una parziale perdita del copriferro. Sono contestualmente apparse anche nuove fessure del pannello nodale. La formazione delle cerniere plastiche delle travi si è verificata per un carico applicato pari a circa 165 kN. La resistenza ultima raggiunta dal provino è stata di circa 180 kN. Nel corso degli ultimi cicli tutte le fessure già presenti si sono ampliate dando luogo ad intenso danneggiamento del pannello nodale. Alcune fessure diagonali del pannello nodale si sono progressivamente inoltrate nelle regioni adiacenti di travi e pilastri. Si sottolinea che il degrado del nodo n. 4

visibile in Figura 17 è stato prodotto dai tre cicli consecutivi di ampiezza massima. Il grafico forza applicata-spostamento in sommità al pilastro è riportato in Figura 19.

3.6 Prova Nodo n. 5

I risultati della prova del nodo n. 5 caratterizzato dalla presenza del traliccio integrativo a croce innestato in pilastri incamiciati, sono di seguito descritti. Il nodo è stato sottoposto ai 3 triplette di cicli di carico/scarico comuni a tutti i nodi sperimentati con forza applicata pari a ± 50 kN, ± 100 kN, ± 150 kN. Esso è stato inoltre assoggettato ad un ulteriore ciclo di carico/scarico fino al raggiungimento della massima corsa del martinetto corrispondente agli spostamenti massimi depurati in spinta pari a circa +100 mm ed in trazione pari a circa -160 mm.

A termine della prova è stata scattata la foto del pannello nodale di Figura 18 che raffigura lo stato fessurativo. Il colore blu ricalca le fessure comparse nei cicli a ± 50 kN, il colore verde quelle a ± 100 kN ed approfonditesi a ± 150 kN ed infine il colore rosso indica le fessure apertes

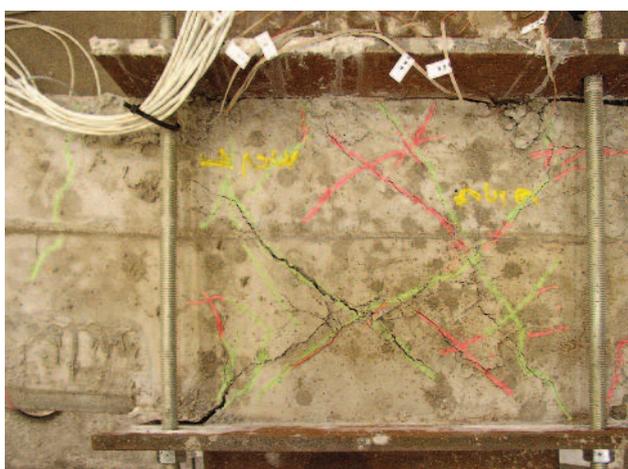


Figura 18
Particolare del pannello del
nodo n. 5 dopo la prova.

nel corso dell'ultimo ciclo di carico. Dall'immagine si evince che le fessurazioni seguite ad 1/3 della forza di progetto sono nulle nella regione nodale. Nel successivo ciclo a 2/3 della forza di progetto si sono create le principali fessure sulle travi e diagonali nel pannello di nodo. Tali fessure si sono poi amplificate progressivamente in tutti i cicli successivi. Nei cicli in cui la forza applicata era pari a quella di progetto sono apparse alcune nuove modeste fessure diagonali nella regione nodale, che sono comunque rimaste di ampiezza limitata fino alla fine della prova. La formazione delle cerniere

plastiche sulle travi è avvenuta per un carico applicato pari a circa 160 kN e la resistenza del nodo trave-pilastro è risultata di circa 190 kN. Il primo ciclo di carico, a differenza delle prove precedenti, non ha prodotto una fessurazione interna al nodo, ma solo delle fessurazioni sulle travi. All'aumentare dello spostamento applicato le fessurazioni si sono estese al nodo, creando un campo fessurativo molto evidente e marcato, che si è insinuato pure nello zoccolo di calcestruzzo inferiore della trave. La Figura 22 riporta il grafico forza applicata-spostamento in sommità al pilastro per la prova in esame.

4. Principali confronti

Nel presente paragrafo vengono confrontati qualitativamente e quantitativamente i risultati sperimentali dei diversi nodi trave-pilastro al fine di trarne utili considerazioni. In primo luogo si valuta la confronto la resistenza sperimentale di ciascun nodo trave-pilastro con la resistenza teorica calcolata sulla base dei valori medi dei materiali ricavate dalle prove sui cilindri di calcestruzzo e sui campioni delle barre di acciaio. La Tabella 5 riassume il valore di resistenza sperimentale, il valore di resistenza teorico e l'errore percentuale.

Vengono quindi analizzate le curve forza-spostamento dalle quali è possibile ricavare informazioni circa i massimi spostamenti relativi interpiano e i livelli di duttilità. Gli spostamenti relativi interpiano ("drift") sono stati ottenuti dividendo la differenza di spostamento orizzontale fra lo strumento 16 e 14 (Figura 9), depurata dagli effetti di rotazione rigida del nodo,

per la distanza fra i punti di vincolo del pilastro (3.20 m). Dall'analisi di involucro dei cicli di carico attraverso la procedura dell'analisi statica non-lineare secondo la Circolare n. 617 del 2009, si possono calcolare il valore di spostamento corrispondenti allo snervamento strutturale e di conseguenza i livelli di duttilità raggiunti nel corso degli esperimenti. Si ritiene necessario premettere che tali risultati sono quelli raggiunti nel corso delle prove di laboratorio che sono state influenzate dai limiti della strumentazione utilizzata. In nessun caso, per gli spostamenti imposti, si è raggiunta una rilevante perdita di resistenza del nodo e pertanto la capacità in spostamento dei nodi trave-pilastro deve ritenersi maggiore di quella effettivamente raggiunta nel corso delle prove effettuate.

Nei grafici da Figura 19 a Figura 22 vengono confrontate le curve forza applicata - spostamento assoluto interpiano delle coppie dei nodi 1-4, 2-3, 3-4 e 4-5.

Tabella 5 - Confronto tra la resistenza sperimentale e la resistenza teorica dei nodi trave-pilastro

ID nodo	Resistenza sperimentale (kN)	Resistenza teorica (kN)	Differenza relativa
1	190	190	0%
2	210	200	+5%
3	210	200	+5%
4	180	190	-5%
5	180	190	-5%

4.1 Nodo n. 1 e Nodo n. 4

Le prove che riguardano il nodo n. 1 ed il nodo n. 4 sono le più ricche di informazioni in quanto sono stati effettuati più cicli anche dopo la formazione di cerniere plastiche. In particolare gli spostamenti relativi interpiano allo snervamento risultano pari a 2.0% e a 1.7% per il nodo n. 1 ed il nodo n. 4 rispettivamente. Gli ultimi cicli di

carico sono stati quindi condotti per livelli di spostamenti relativi interpiano pari a rispettivamente a 4.7% e 4.0%, per il nodo n. 1 ed il nodo n. 4. Focalizzando l'attenzione sulla capacità dissipativa del nodo in campo plastico si osserva che l'effetto "pinching" è praticamente identico per i due nodi. In modo particolare dai semicicli con spostamenti imposti positivi, la forma dei dia-

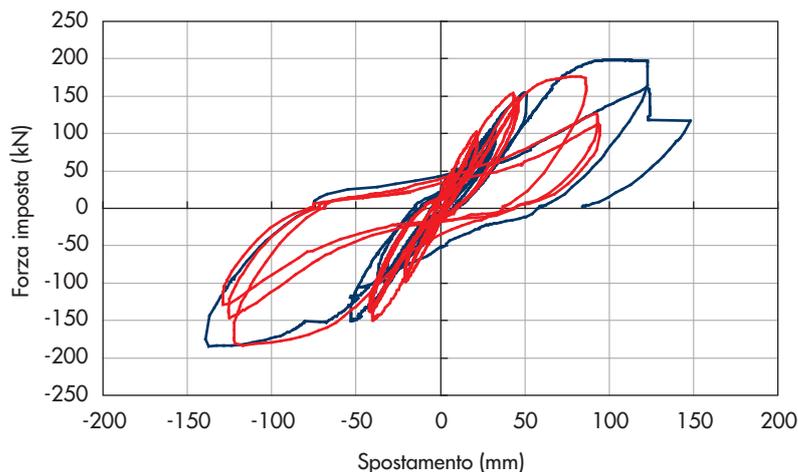


Figura 19
Curve carico-spostamento
interpiano del nodo n. 1
(in blu) e del nodo n. 4
(in rosso).

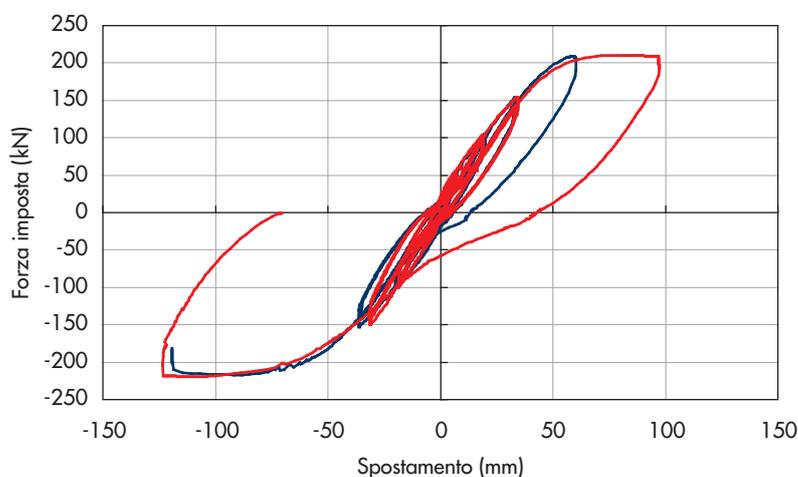


Figura 20
Curve carico-spostamento
interpiano del nodo n. 2
(in blu) e del nodo n. 3
(in rosso).

grammi è molto simile, cosicché la capacità dissipativa per isteresi dei due nodi (l'energia dissipata è pari all'area sottesa dai cicli di carico-deformazione) risulta comparabile, confermando le analogie di comportamento fra il nodo in c.a. tradizionale ad alta duttilità e quello in struttura mista.

4.2 Nodo n. 2 e Nodo n. 3

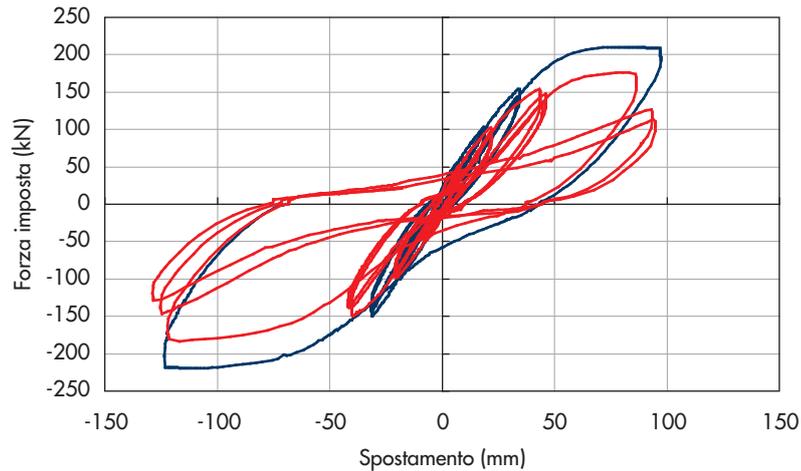
I grafici di spostamento dei nodi n. 2 e n. 3 sono molto simili indicando un comportamento pressoché identico, non influenzato dai calastrelli di collegamento saldati fra i tralicci integrativi. La formazione delle cerniere plastiche inizia a partire da valori simili di spostamento circa 45 mm corrispondenti a "drift" pari a 1.4%. La differenza in termini di massimi spostamenti raggiunti dipende unicamente da come sono state condotte le prove e non è imputabile ad un differente comportamento dei due nodi. I cicli di carico più ampi hanno raggiunto spostamenti relativi interpiano di circa 3.8% per entrambi i nodi. Quindi si può concludere che la mancanza di un collegamento saldato dei due tralicci aggiuntivi

a cavallo del nodo non ha causato né minore resistenza, né minore duttilità del nodo n. 2 rispetto al nodo n. 3.

4.3 Nodo n. 3 e Nodo n. 4

I diversi tralicci integrativi non producono differenze sostanziali nel comportamento dei nodi. Anche se nel caso del nodo n. 3 non sono stati effettuati i successivi cicli in campo plastico, si nota che i due nodi snervano per gli stessi valori di spostamento sia in spinta che in trazione. I cicli intermedi (150 kN) producono spostamenti che differiscono tra i due nodi di circa 10 mm. Il nodo con il traliccio a croce dimostra una rigidità ed una resistenza leggermente minore rispetto a quella del nodo con traliccio a sviluppo solo lineare all'interno delle travi. Sulla base dei dati raccolti si ritiene che la diversa rigidità del nodo con il traliccio a croce sia dovuta al fatto che le barre longitudinali di grosso diametro del pilastro, oltrepassanti il pannello nodale, sono più ravvicinate e conseguentemente l'altezza utile della sezione è inferiore, come anche la zona di calcestruzzo confinato. Infatti la diffe-

Figura 21
Curve carico-spostamento
interpiano del nodo n. 3
(in blu) e del nodo n. 4
(in rosso).



renza in spostamento si palesa soprattutto dopo la prima fase di fessurazione del pannello di nodo. Per il nodo n. 4 lo snervamento avviene per un valore di "drift" pari a circa 1.7% e il massimo valore dello spostamento relativo interpiano raggiunto nell'esperimento è pari a 4.0%. I nodi n. 3 e n. 4, quindi, hanno dimostrato simili livelli di duttilità nel corso dell'esperimento.

4.4 Nodo n. 4 e Nodo n. 5

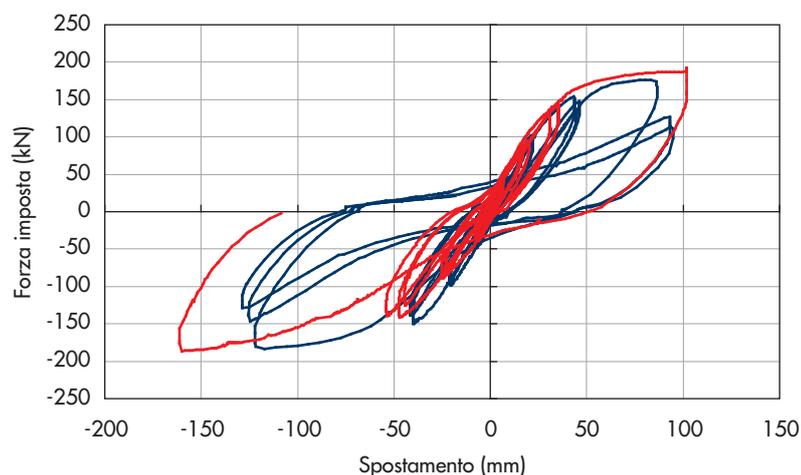
Ambedue i nodi vedono la formazione delle rispettive cerniere plastiche all'incirca allo stesso valore di sollecitazione. Il nodo n. 5 dimostra valori di "drift" pari a 1.3% allo snervamento e pari a 5.0% in corrispondenza del ciclo di carico più ampio in termini di spostamento. Nonostante un comportamento fessurativo marcatamente diverso (Figura 17 e Figura 18), i nodi n. 4 e n. 5 mostrano praticamente lo stesso comportamento in termini di curve carico-spostamento, confermando che, pur in assenza della incamicatura in acciaio del pilastro, la gerarchia delle resistente trave-pilastro del nodo n. 4 è stata rispettata.

4.5 Spostamenti relativi interpiano e duttilità

Nel presente paragrafo vengono presentati i principali risultati in termini di spostamenti relativi interpiano e di duttilità ricavati dall'analisi delle curva forza-spostamento per ciascun nodo trave-pilastro.

La Figura 23 mostra gli spostamenti relativi interpiano allo snervamento, caratterizzati quindi da duttilità pari a 1, e gli spostamenti relativi massimi associati al corrispondente livello di duttilità raggiunti dai provini nel corso delle prove. Onde permettere l'individuazione degli stati limite di riferimento, nella stessa Figura 23 sono anche indicati gli spostamenti relativi associati a livelli di prestazioni attese allo stato limite di operatività SLO (1%), allo stato limite di salvaguardia della vita SLV (2%) e di prevenzione del collasso SLC (4%) per telai in c.a. secondo la normativa FEMA 273. Si possono quindi trarre le seguenti considerazioni. Tutti i nodi raggiungono lo snervamento dopo il livello di spostamento relativo atteso per lo stato limite di operatività garantendo così spostamenti irreversibili trascurabili. Lo snervamento di tutti i

Figura 22
Curve carico-spostamento
interpiano del nodo
n. 4 (in rosso) e del nodo
n. 5 (in blu).



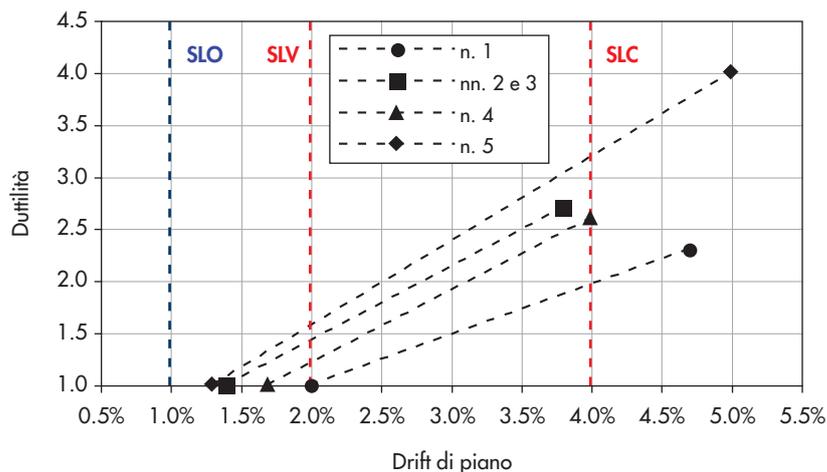


Figura 23
Duttilità e spostamenti relativi interpiano verificatisi allo snervamento e all'ultimo ciclo di carico per ciascun nodo trave-pilastro.

nodì avviene a valore di spostamento relativo inferiori o al massimo uguali alla prestazione attesa per lo stato limite di salvaguardia della vita fornendo così una adeguata duttilità. Infine nel corso degli esperimenti si è imposta una richiesta di spostamento prossima se non superiore alle prestazioni attese per lo stato limite di collasso. Tutti i nodi hanno quindi dimostrato una capacità di duttilità almeno pari a quella tipica dello SLC.

4.6 Considerazioni sullo scorrimento delle barre nella regione nodale

Per concludere vengono espone alcune considerazioni in merito alla rilevanza dello scorrimento delle barre nella regione nodale nel condizionare i risultati sperimentali ottenuti. Infatti l'assenza di significativi scorrimenti delle barre, specie nel caso di nodi trave-pilastro a cui concorrono elementi parzialmente prefabbricati, è essenziale ai fini della garanzia di raggiungimento di una risposta efficiente in termini di capacità di spostamento (Mazzotti et al., 2010). Nella fattispecie dei nodi in struttura mista oggetto di indagine l'impiego di barre lisce di grosso diametro può effettivamente essere causa del fenomeno di scorrimento. Peraltro si evidenzia che il ripristino della continuità delle reticolari in acciaio delle travi attraverso il nodo è stato ottenuto mediante tralicci integrativi della stessa

tipologia e non con l'inserimento di tondi sciolti integrativi. Sono di questo tipo gli elementi integrativi lineari dei nodi n. 2 e n. 3 e gli elementi integrativi a croce dei nodi n. 4 e n. 5 che vengono solidarizzati alle travi mediante il getto di calcestruzzo integrativo. Le barre longitudinali di tali tralicci, come descritto nella presentazione dei provini, sono dunque opportunamente saldate alle barre d'anima. In tale configurazione la trasmissione degli sforzi tra le barre di acciaio lisce da carpenteria ed il calcestruzzo avviene per la maggior parte grazie a nodi dei tralicci che, offrendo adeguato ingranamento e contrasto alle bielle compresse di calcestruzzo, costituiscono dei veri e propri efficaci "connettori" di tipo rigido. Si può pertanto affermare che nelle sperimentazioni effettuate i risultati ottenuti non paiono essere influenzati dal fenomeno del bond-slip. Ed in effetti, come si può evincere dalle immagini presentate dalla Figura 14 alla Figura 18, non si sono verificati cospicui distacchi all'interfaccia tra travi e regioni nodali che sono invece tipici dei casi in cui ha luogo lo scorrimento delle barre all'interno dei nodi. Peraltro l'uso di barre lisce di grosso diametro, pur bene ancorate in corrispondenza dei nodi del traliccio, è quasi certamente la causa di un'ampiezza delle singole fessure che risulta generalmente maggiore di quella che si riscontra nel nodo in c.a. normale.

5. Conclusioni

Da quanto esposto nei precedenti capitoli, le seguenti conclusioni possono essere tratte:

- i nodi trave-pilastro in struttura mista di tipo tralicciato hanno dimostrato una resistenza sperimentale uguale alle attese teoriche con una differenza massima relativa pari al $\pm 5\%$, confermando così l'affidabilità di tale

sistema strutturale per la realizzazione di telai sismo-resistenti;

- nel corso delle prove, i quattro i nodi trave-pilastro con travi in struttura mista hanno esibito una duttilità superiore a quella del nodo in c.a. ordinario con una differenza minima di $+13\%$ a favore del nodo n. 4 con traliccio a croce innestato nel pilastro in c.a.

- ordinario e una differenza massima di +70% a favore del nodo n. 5 con traliccio a croce innestato nel pilastro incamiciato;
- tutti i nodi sottoposti all'esperimento hanno raggiunto efficacemente una capacità di spostamento circa uguale alla prestazione attesa per lo stato limite di collasso valutata come spostamento relativo interpiano pari al 4%;
 - sulla base del rilevamento del danno, effettuato per ciascun provino al termine delle prove, si può affermare che il nodo avente traliccio integrativo a croce e pilastro incamiciato, ovvero il nodo n. 5, ha preservato maggiormente l'integrità del pannello di nodo.

Ringraziamenti

Lo studio sperimentale è stato possibile grazie al

supporto economico e logistico di Tecnostrutture Srl che ha anche fornito i campioni di prova.

Bibliografia

- Amadio C., Macorini L., Sorgon S., Suraci G. (2008) - Analisi di un sistema ibrido sismo-resistente costituito da elementi tralicciati in acciaio inglobati nel calcestruzzo, *17° Congresso C.T.E. Roma*, C.T.E., pp. 801-810.
- Amato G., Badalamenti V., Colajanni P., La Mendola L. (2010) - Comportamento ciclico delle connessioni tra travi prefabbricate reticolari miste e pilastri in c.a., *18° Congresso C.T.E. Brescia*, C.T.E., pp. 3-12.
- Mazzotti C., Vincenzi L., Savoia M., Ferrari M. (2010) - Comportamento di nodi trave-colonna di strutture parzialmente prefabbricate, *18° Congresso C.T.E. Brescia*, C.T.E., pp. 255-265.
- Tesser L. (2009) - Composite Steel Truss and Concrete Beams and Beam-Column Joints for Seismic Resistant Frames: Modelling, numerical analysis and experimental verifications, *Tesi di dottorato*, Università degli Studi di Padova, pp. 234.
- Ministero delle Infrastrutture (2008) - Nuove Norme Tecniche per le costruzioni, D.M. 14 gennaio 2008, *Gazzetta Ufficiale* 04 febbraio 2008 n. 29.
- Ministero dei Lavori Pubblici (2009) - Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 - Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008, *Gazzetta Ufficiale* 26/02/2009 n. 47.
- Building Seismic Safety Council (1997) - NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings, Federal Emergency Management Agency 273, Washington D.C., Stati Uniti, pp. 435.