

Pisa, 4 Ottobre 2010

SPETT.LE TOSCANA SOLTRAVI S.R.L.  
VIA DI GRANUCCIO, 6  
LOC. OSPEDALETTO  
**56121 PISA**

## **Prove per la caratterizzazione del comportamento sismico dei nodi trave pilastro prodotti dalla Toscana Soltravi S.r.l.**

### **1 PREMESSA**

In relazione all'entrata in vigore delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008) e delle relative Istruzioni, si è reso necessario adeguare i criteri di calcolo delle strutture prefabbricate secondo il sistema K, così come ora perfezionato dalla Toscana Soltravi.

Più in particolare, l'introduzione dei criteri di gerarchia delle resistenze, di cui al capitolo 7 delle NTC, relativo alle costruzioni in zona sismica, e delle conseguenti regole di dettaglio per le zone critiche delle membrature, hanno imposto l'aggiornamento dei criteri progettuali degli elementi prefabbricati, introducendo alcune modifiche, che consentissero il rispetto delle prescrizioni normative, valide sia per le strutture monolitiche gettate in opera, che per le strutture prefabbricate ad esse assimilabili.

I perfezionamenti introdotti riguardano principalmente: la geometria e lo sviluppo della cavità presente nel pilastro prefabbricato per la realizzazione del giunto; la predisposizione di improntature nella superficie interna della cavità al fine di realizzare un giunto "organizzato" e migliorare le condizioni di aderenza tra calcestruzzo della parte prefabbricata del pilastro e calcestruzzo gettato in opera; la modifica dei dettagli di armatura dei pilastri, delle travi e del nodo in accordo con le disposizioni delle NTC 2008.

A questo proposito la nuova classificazione delle connessioni tra le membrature di strutture prefabbricate, con riguardo al loro comportamento in zona sismica, di cui al punto 7.4.5 delle NTC, in accordo all'EC8, propone tre categorie di collegamenti:

- “a) collegamenti situati al di fuori delle previste zone critiche, che quindi non influiscono sulle capacità dissipative della struttura;*
- b) collegamenti situati nelle zone critiche alle estremità degli elementi prefabbricati, ma sovradimensionati in modo tale da spostare la plasticizzazione in zone attigue situate all'interno degli elementi;*
- c) collegamenti situati nelle zone critiche alle estremità degli elementi prefabbricati, dotati delle necessarie caratteristiche in termini di duttilità e di quantità di energia dissipabile.”*

In considerazione della particolare tecnologia di prefabbricazione e di completamento con getti integrativi in opera delle strutture a telaio realizzate con il sistema K, così come

modificato dalla Toscana Soltravi, si intende esaminare se il tipo di collegamento che si realizza tra travi e pilastri è di tipo c).

A tale fine, le norme tecniche prescrivono ulteriormente quanto segue (§ 7.4.5.2.1):

***“Collegamenti tipo c) **Previa dimostrazione analitica che il funzionamento del collegamento è equivalente a quello di uno interamente realizzato in opera e che soddisfi le prescrizioni di cui al § 7.4.4, la struttura è assimilabile ad una di tipo monolitico.*****

*L' idoneità di giunzioni atte a realizzare il meccanismo plastico previsto per le strutture a telaio ed a soddisfare le richieste globali e locali di duttilità ciclica nella misura corrispondente alle CD “A” e “B” può essere desunta da normative di comprovata validità oppure da prove sperimentali in scala reale che includano almeno tre cicli completi di deformazione di ampiezza corrispondente al fattore di struttura  $q$ , effettuate su sottoinsiemi strutturali significativi.”*

In conseguenza di quanto sopra la Toscana Soltravi, oltre ad aver sviluppato con il proprio Ufficio Tecnico e con la supervisione dei sottoscritti le analisi teoriche, volte alla dimostrazione analitica della idoneità delle connessioni a soddisfare i criteri previsti per i collegamenti di tipo c), ha dato corso ad una vasta campagna sperimentale, su campioni al vero di nodi trave-pilastro a quattro vie, volta a dimostrare che la giunzione tipologica trave-pilastro possiede adeguate caratteristiche di duttilità per rientrare nelle condizioni previste.

La campagna sperimentale, condotta presso il Laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa, sotto il diretto controllo dei sottoscritti, si è conclusa nel settembre di quest'anno ed i risultati conseguiti sono descritti nella relazione finale sulle prove condotte, datata settembre 2010, rimessa dal Dipartimento di Ingegneria Civile e cui ci si riferisce per la compiuta descrizione dei dettagli delle prove.

## 2 LA CAMPAGNA SPERIMENTALE

La campagna di prove è volta a dimostrare, ai sensi dell'attuale Normativa sopra richiamata, l'idoneità delle giunzioni trave-pilastro a realizzare il meccanismo plastico previsto per le strutture a telaio ed a soddisfare le richieste globali e locali di duttilità per sollecitazioni cicliche, per strutture in classe di duttilità bassa (CD “B”). Il fattore di struttura è stato cautelativamente assunto (ai fini delle prove) pari al massimo prevedibile per la tipologia a telaio, a pareti accoppiate o miste  $q \sim 4.0$  ( $q_0 = 3.0 \alpha_u / \alpha_1$ ), avendo assunto  $\alpha_u / \alpha_1 = 1.3$ .

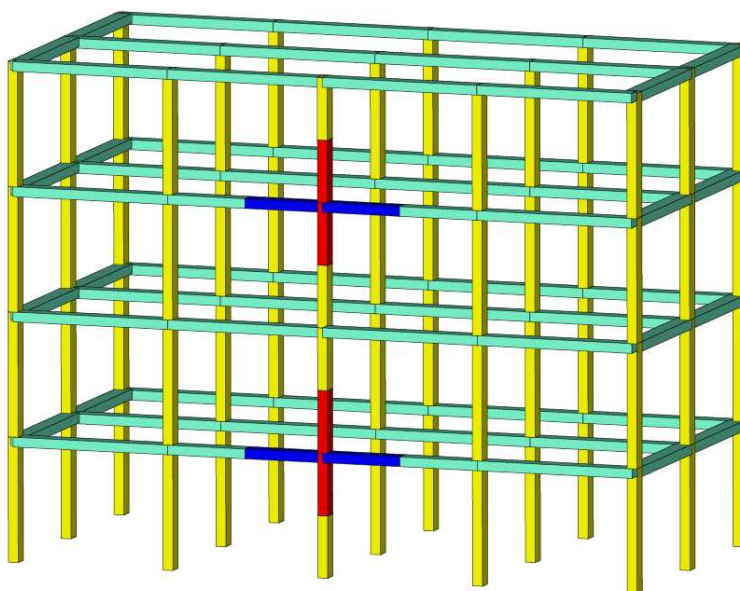
A tal fine, le prove sono state svolte su campioni in scala reale, costituiti dal collegamento travi-pilastri (nodo) e da porzioni significative degli elementi prefabbricati convergenti nel nodo stesso: travi di lunghezza pari a circa la metà della luce tipica e pilastri di altezza pari a metà dell'interpiano tipico. Prove di confronto sono state condotte su campioni analoghi interamente gettati in opera.

I campioni sono stati progettati a cura dell'Ufficio Tecnico della Toscana Soltravi sotto la supervisione dei sottoscritti, quali sottoinsiemi di telai in c.a. rappresentativi degli edifici per uso residenziale realizzati con il sistema costruttivo in esame. Nella figura 1 si riporta una vista del modello tridimensionale utilizzato per lo studio dello stato di sollecitazione e per il dimensionamento dei campioni. Le luci delle travi e dei solai assunti alla base del calcolo sono state scelte tra quelle più ricorrenti nella pratica costruttiva per la tipologia strutturale in studio.

Ciascun campione è costituito da un nodo a quattro vie isolato dal telaio multipiano (figure 1 e 2), composto da una porzione di pilastro dei piani inferiore e superiore, di altezza pressoché pari alla metà dell'interpiano (presso il punto di annullamento dei momenti flettenti), e da una porzione di trave con estensione pari a circa 1,5 m per parte.

La sezione trasversale delle travi, del tipo in spessore di solaio, è costante e pari a 40x24 cm. I pilastri hanno anch'essi sezione costante, delle dimensioni di 40x25 cm; in 8 campioni l'asse debole della sezione giace nel piano del nodo.

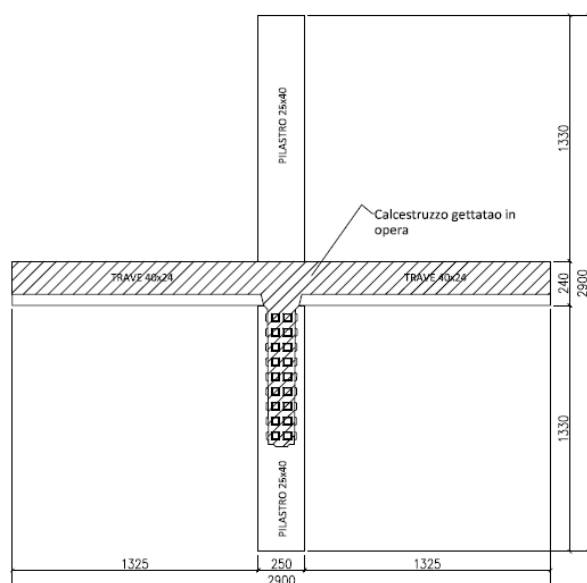
Il progetto dei telai, e quindi dei sottoinsiemi strutturali trave-pilastro da essi estratti, è stato condotto conformemente alle indicazioni delle NTC 2008 e, più in particolare, alle prescrizioni inerenti le regole della gerarchia delle resistenze, sia per i campioni prefabbricati, sia per quelli gettati in opera.



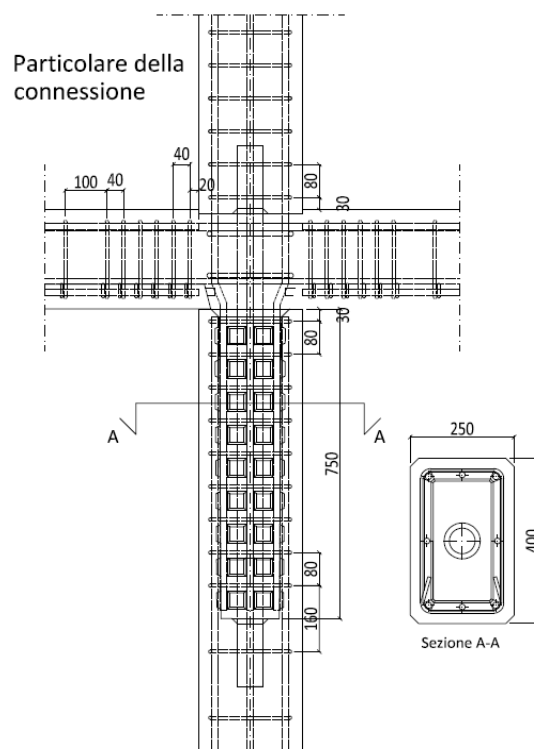
*Figura 1. Vista assonometria del telaio tridimensionale in c.a. dal quale sono stati “estratti” i campioni.*

Complessivamente sono stati sottoposti a prova nove campioni, di cui cinque prefabbricati e quattro in opera.

Dei cinque campioni prefabbricati, due sono caratterizzati dall'armatura minima prevedibile per i pilastri e per le travi, mentre i restanti tre sono invece armati con i livelli massimi di armatura previsti per la pratica progettuale della Toscana Soltravi. Con riferimento al telaio di figura 1, i campioni dotati di armatura massima possono essere individuati tra i nodi trave-pilastro al primo livello del fabbricato, dove le sollecitazioni assiali taglianti e flettenti sui pilastri sono maggiori, mentre i campioni dotati di armatura minima si collocano ai piani superiori, e in particolare al penultimo livello, tenuto conto che la pilastrata dell'ultimo livello non è soggetta alle regole della gerarchia delle resistenze.



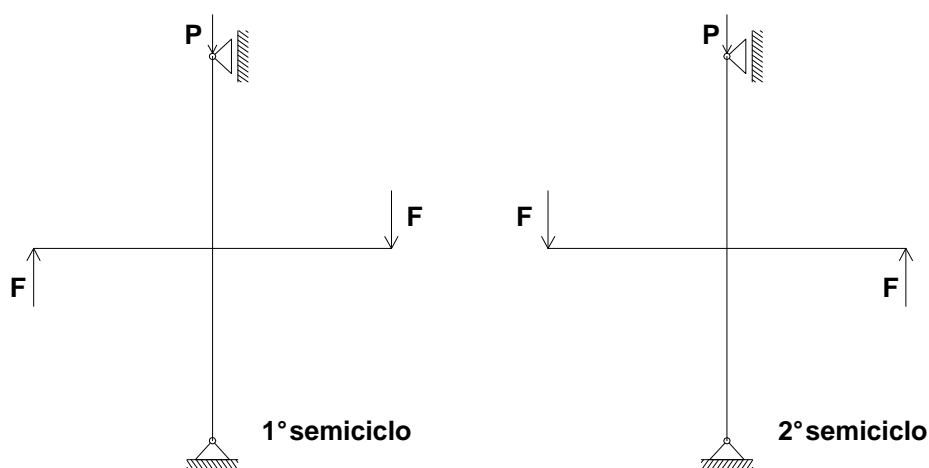
*Vista complessiva del campione*



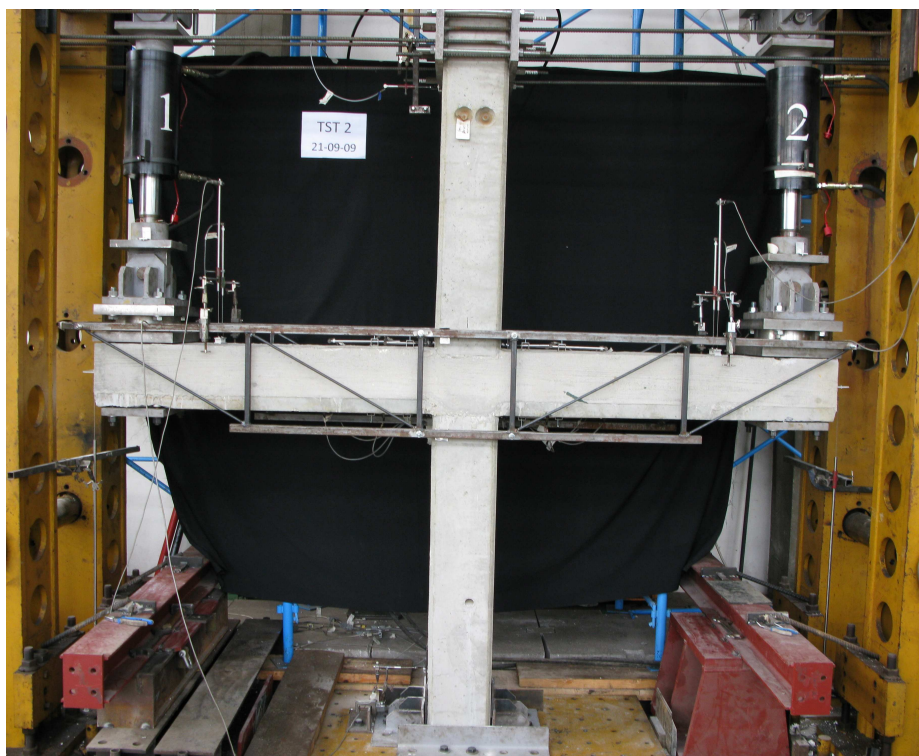
*Particolare della connessione*

*Figura 2. Campione di nodo trave-pilastro tipologico.*

Le prove sono state eseguite con riferimento allo schema statico illustrato nella figura 3. La figura 4 illustra il dispositivo di prova utilizzato, per la cui descrizione di dettaglio si rinvia alla relazione conclusiva sulle prove del Dipartimento di Ingegneria Civile



*Figura 3. Schema di vincolo e di carico dei campioni.*



*Figura 4. Dispositivo di prova.*

Nella tabella 1 è sintetizzato il programma delle prove eseguite e per ciascun campione della serie prefabbricata e gettata in opera, sono indicati:

- l'armatura corrente delle travi e dei pilastri (minima o massima);
- il carico assiale applicato al pilastro durante le prove, variabile tra un valore minimo di 100 kN ed il massimo di 400 kN;
- disposizione dell'asse del pilastro rispetto al piano del campione;
- armatura dei campioni, variabile tra la minima e la massima correntemente utilizzate.

*Tabella 1. Quadro sintetico delle prove eseguite.*

Data della prova	Campione (*)	Armatura delle travi	Asse Pilastro	Carico Assiale N
26/08/09	<b>TST/1</b>	Minima	Debole	400 kN
04/09/09	<b>OP/1</b>	Minima <sup>(**)</sup>	Debole	400 kN
21/09/09	<b>TST/2</b>	Minima	Debole	200 kN
25/09/09	<b>OP/2</b>	Minima <sup>(**)</sup>	Debole	200 kN
29/10/09	<b>OP/3</b>	Minima	Debole	200 kN
19/11/09	<b>TST/3</b>	Massima	Debole	200 kN
08/02/10	<b>TST/4</b>	Massima	Debole	100 kN
29/03/10	<b>TST/5</b>	Massima	Forte	100 kN
09/07/10	<b>OP/4</b>	Massima	Debole	100 kN

(\*) TST = Campione prefabbricato con il sistema K della Toscana Soltravi  
 OP = Campione interamente realizzato con getto in opera.

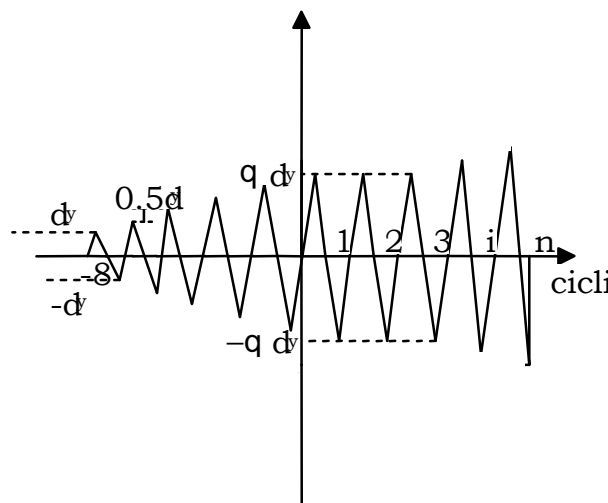
(\*\*) Campioni con armatura al lembo inferiore delle travi in posizione non conforme alla posizione dei corrispondenti campioni prefabbricati.

Durante le prove i carichi  $F$  (figura 3) variano ciclicamente, mentre il carico assiale  $P$  è mantenuto costante.

Le prove sono state condotte controllando gli spostamenti di sezioni significative delle travi rispetto alla sezione di incastro delle travi stesse con il pilastro, in modo da depurare la componente di spostamento dovuta alla rotazione del nodo.

La storia di spostamento è costituita dalle fasi seguenti:

- fase 1: imposizione di spostamenti crescenti in modo monotono nelle due direzioni a ciascuna estremità della trave, fino alla determinazione dello spostamento  $d_y$  corrispondente alla formazione della cerniera plastica nella trave;
- fase 2 (fig. 5): realizzazione di cicli con spostamento massimo di ampiezza via via crescente, fino al raggiungimento dello spostamento  $qd_y$ , essendo  $q$  il fattore di struttura adottato nel calcolo del telaio, in corrispondenza del quale si sono realizzati tre cicli di ampiezza costante; successivo incremento degli spostamenti fino a rottura del campione.



*Figura 5. Storia degli spostamenti applicati ai campioni.*

Durante le prove sono stati acquisiti i segnali forniti da numerosi trasduttori di spostamento e di forza, la cui elaborazione ha consentito di ottenere:

- diagrammi momento-rotazione ( $M-\theta$ ) delle sezioni di incastro delle travi al pilastro;
- diagrammi di involuppo dei massimi delle curve  $M-\theta$  attinti in ciascun ciclo di carico;
- valutazione della energia dissipata in ciascun ciclo di carico.

Nelle figure seguenti sono illustrati, a titolo di esempio, alcuni dei diagrammi relativi alle tre elaborazioni di cui sopra, per il cui dettaglio si rinvia alla relazione conclusiva sulle prove del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa. Più in particolare si presentano i risultati ottenuti per il campione TST/2 della serie prefabbricata e per il corrispondente campione della serie gettata in opera (OP/3).

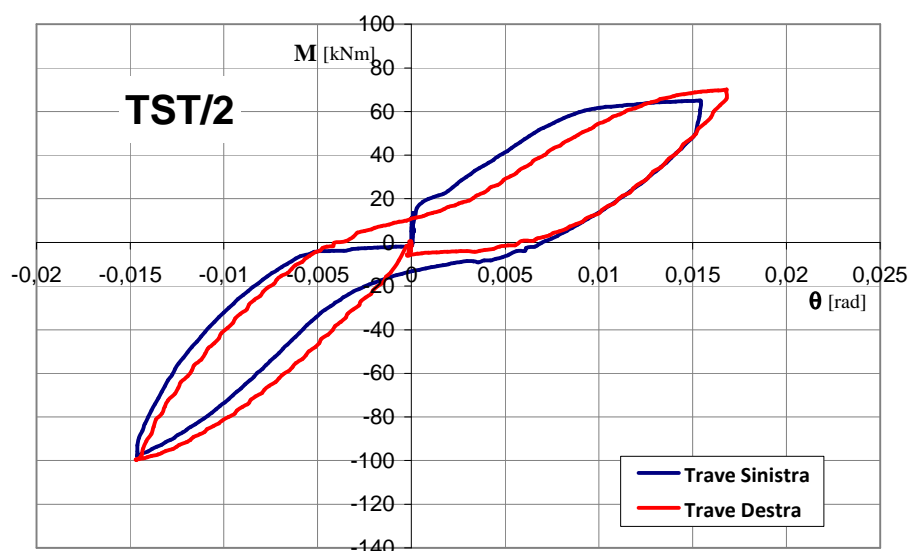


Figura 6. Diagramma M-θ per il campione TST/2 – prima fase di prova.

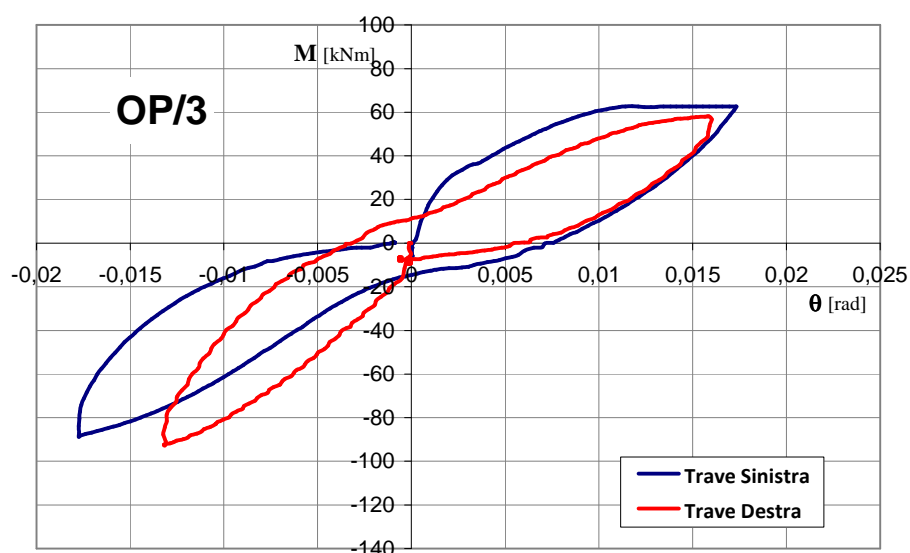


Figura 7. Diagramma M-θ per il campione OP/3 – prima fase di prova.

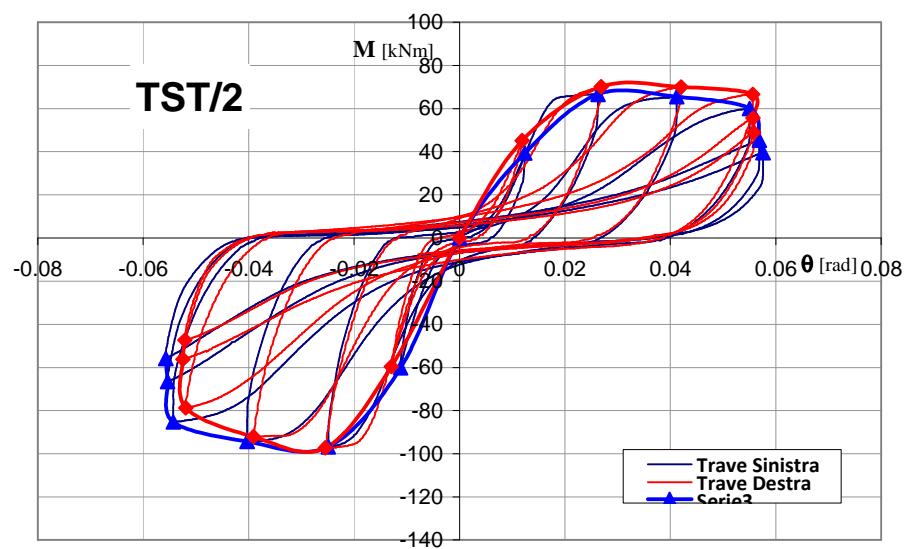


Figura 8. Diagramma M-θ per il campione TST/2 – seconda fase di prova e relativo diagramma inviluppo.

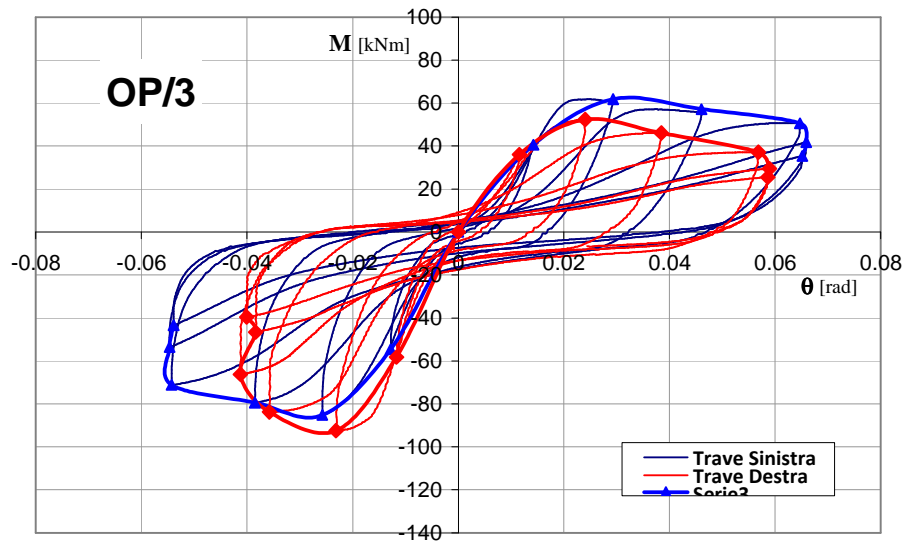
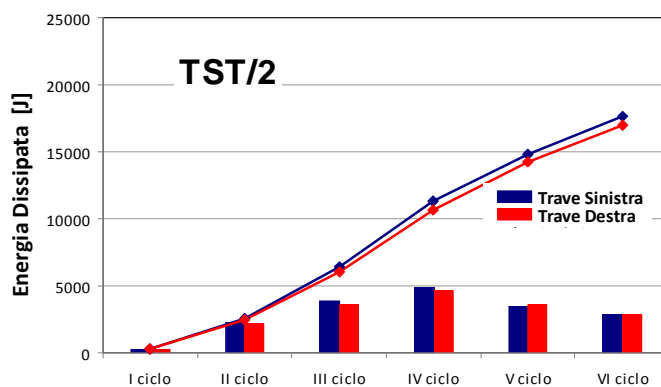
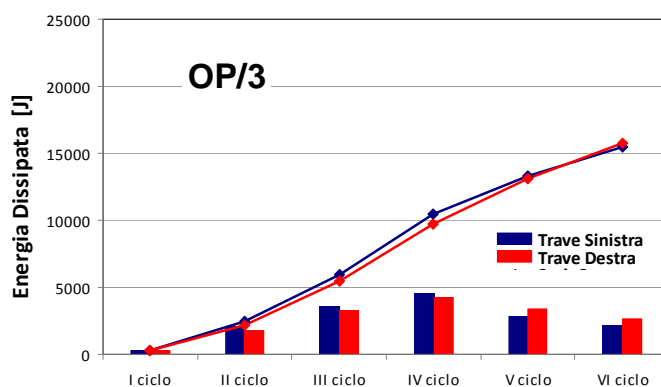


Figura 9. Diagramma  $M-\theta$  per il campione OP/3 – seconda fase di prova e relativo diagramma inviluppo.



TST/2		Energia per ciclo [J]	Energia Totale [J]
Trave sinistra	1° ciclo	304	304
	2° ciclo	2226	2530
	3° ciclo	3887	6417
	4° ciclo	4888	11305
	5° ciclo	3484	14790
	6° ciclo	2851	17640
Trave destra	1° ciclo	294	294
	2° ciclo	2141	2435
	3° ciclo	3617	6052
	4° ciclo	4599	10651
	5° ciclo	3583	14234
	6° ciclo	2783	17017

Figura 10. Energia dissipata per il campione TST/2 – seconda fase di prova.



OP/3		Energia per ciclo [J]	Energia Totale [J]
Trave sinistra	1° ciclo	326	326
	2° ciclo	2080	2406
	3° ciclo	3558	5964
	4° ciclo	4539	10503
	5° ciclo	2844	13346
	6° ciclo	2132	15478
Trave destra	1° ciclo	324	324
	2° ciclo	1821	2145
	3° ciclo	3307	5453
	4° ciclo	4259	9712
	5° ciclo	3377	13089
	6° ciclo	2646	15735

Figura 11. Energia dissipata per il campione OP/3 – seconda fase di prova.

La campagna sperimentale è stata completata dalla esecuzione di numerose prove di caratterizzazione meccanica dei materiali impiegati per il confezionamento dei campioni. In particolare sono state condotte 44 prove di qualifica dei calcestruzzi prelevati in occasione dei



getti e 54 prove di caratterizzazione degli stessi calcestruzzi, a seguito di prelievi condotti mediante carotaggio dalle membrature sottoposte a prova.

Per la caratterizzazione meccanica degli acciai impiegati per l'armatura dei campioni sono state sottoposte a prova 18 terne di spezzoni, così da indagare i vari diametri impiegati ( $\varnothing 6$ , 8 e 12 mm per le staffe e  $\varnothing 14$ , 16, 18 e 22 per le armature correnti) suddivisi per i vari lotti di provenienza.

Come si evince dalle tabelle 2 e 3, tratte dalla relazione conclusiva sulle prove del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa, cui si rinvia per gli ulteriori dettagli, la resistenza dei calcestruzzi impiegati per il confezionamento delle parti prefabbricate dei campioni è risultata largamente superiore a quella nominale per la classe C28/35, assunta alla base della progettazione. La resistenza dei calcestruzzi utilizzati per i getti in opera (sia per i campioni completamente gettati in opera, sia per i getti di completamento dei campioni prefabbricati) è anch'essa superiore a quella nominale per la classe di appartenenza del calcestruzzo, ma con scarti decisamente più contenuti rispetto ai calcestruzzi confezionati in stabilimento.

Va detto che la sovrarresistenza dei calcestruzzi delle parti prefabbricate non determina uno scostamento significativo dal modello di calcolo utilizzato, visto che la resistenza delle sezioni di incastro delle travi ai pilastri, è essenzialmente correlata alla resistenza del calcestruzzo del nodo gettato in opera.

Per i pilastri prefabbricati la migliore qualità del calcestruzzo comporta, invece, un effetto benefico ai fini della verifica della disequaglianza relativa alla gerarchia delle resistenze trave-pilastro, di cui al paragrafo successivo.

In ordine alla qualità degli acciai, infine, si rileva che, fatta eccezione per i diametri più piccoli ( $\varnothing 6$  e  $\varnothing 8$  mm) utilizzati per le staffe, tutte le barre di armatura corrente hanno caratteristiche meccaniche superiori a quelle nominali per l'acciaio B450C, e di cui si è tenuto conto nelle analisi.

*Tabella 2 – Valori medi della resistenza a compressione dei calcestruzzi utilizzati per il confezionamento dei campioni*

Campione	Posizione	$f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{c,s}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
TST/1	pref	69,5	70,8
	opera	39,5	46,8
TST/2	pref	59,8	70,5
	opera	43,3	49,5
TST/3	pref	59,1	64,2
	opera	38,8	44,9
TST/4	pref	68,2	53,6
	opera	49,2	41,2
TST/5	pref	72,5	73,9
	opera	51,8	48,6

*Serie prefabbricata*

$f_c$  = resistenza dei provini cubici prelevati in fase di getto dei campioni

$f_{cs}$  = resistenza dei provini cilindrici prelevati mediante carotaggio dai campioni

Campione	Posizione	$f_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{c,s}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
OP/1	pilastri	35,3	42,9
	trave	42,3	52,2
OP/2	pilastri	44,5	52,2
	trave	42,5	44,2
OP/3	pilastri	47,3	49,5
	trave	38,0	44,4
OP/4	pilastri	47,0	45,5
	trave	47,0	42,0

*Serie in opera*

*Tabella 3 – Valori medi delle caratteristiche meccaniche degli acciai utilizzati per il confezionamento dei campioni*

$\varnothing$ [mm]	Tensione di snervamento [N/mm <sup>2</sup> ]	Tensione di rottura [N/mm <sup>2</sup> ]	Agt %
6	415,0	628,2	11,2
8	486,9	594,4	10,0
12	537,6	647,8	10,2
14	536,6	644,4	10,6
16	554,4	653,1	10,1
18	542,5	639,9	11,2
20	540,6	676,0	10,4
22	544,3	650,4	10,3

Per poter valutare compiutamente le prestazioni dei campioni in termini di resistenza delle sezioni delle travi e dei pilastri, nonché per la verifica delle condizioni imposte dalle regole di gerarchia delle resistenze trave-pilastro, si sono valutate, come descritto al paragrafo successivo, le sollecitazioni resistenti delle membrature, riferendo le analisi sia ai valori di progetto della resistenza dei materiali utilizzati, sia a quelli effettivi rilevati per i campioni, come sopra descritto.

### 3 VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI RESISTENZA DEI CAMPIONI

Si sono valutati i momenti resistenti delle travi e dei pilastri secondo le seguenti modalità, tenendo presente che la geometria delle sezioni e la disposizione delle armature dei campioni corrispondono con buona approssimazione (nei limiti delle correnti tolleranze di costruzione) a quelle nominali previste:

- **Momenti resistenti di calcolo nominali**, valutati secondo le NTC 2008, per la verifica delle condizioni imposte dalle regole di gerarchia delle resistenze per le strutture “CD B”:

resistenza dei materiali: calcestruzzo C28/35, acciaio B450C

coefficienti parziali  $\gamma_C=1,5$ ,  $\gamma_S=1,15$

$\alpha_{cc}=1,0$

- **Momenti resistenti attesi** per il confronto con i dati sperimentali:

resistenze medie dei materiali ricavati dalle prove di qualificazione (dati ottenuti dalla compressione delle carote)

coefficienti parziali  $\gamma_C=1,0$ ,  $\gamma_S=1,0$

$\alpha_{cc}=1,0$

Nella tabella seguente sono riepilogati i valori delle caratteristiche resistenti, valutate come sopra, per le travi e per i pilastri di ciascun campione, tenendo conto della sollecitazione assiale presente sui pilastri.

Successivamente, si è verificato il rispetto della gerarchia delle resistenze per strutture “CD B” per il nodo trave-pilastro secondo il punto 7.4.4.2.1 delle NTC 2008, confrontando le resistenze nominali di travi e pilastri, assumendo  $\gamma_{Rd} = 1.10$ .

Più in particolare nella tabella 4, per ciascun campione, sono indicati:

- momenti resistenti di calcolo nominali per le travi (momento positivo e negativo) e per il pilastro, valutati per le sezioni delle zone critiche di ciascun elemento;
- il valore del rapporto  $\eta = \sum M_{C,Rd} / \gamma_{Rd} \cdot \sum M_{b,Rd}$ , che deve risultare maggiore o uguale a 1,0.
- momenti resistenti attesi per le travi (momento positivo e negativo) e per il pilastro, valutati come in precedenza.

Tabella 4 – Caratteristiche di sollecitazione resistenti dei campioni (pressoflessione)

Campione	Resistenze nominali [kNm]			$\eta$	Resistenze attese <sup>1</sup> [kNm]		
	$M_{b,Rd}^{(+)}$	$M_{b,Rd}^{(-)}$	$M_{C,Rd}$		$M_{b,R}^{(+)}$	$M_{b,R}^{(-)}$	$M_{C,R}$
TST/1	38.2	-67.8	78.5	1.3	56.8	-95.7	108.9
TST/2	38.2	-67.8	67.0	1.1	57.5	-97.1	93.6
TST/3	47.9	-93.3	94.2	1.2	70.0	-129.3	129.9
TST/4	47.9	-93.3	87.0	1.1	69.0	-127.0	120.9
TST/5	47.9	-93.3	158.8	2.0	71.0	-131.6	219.6
OP/1	44.8	-70.5	78.5	1.2	66.9	-98.1	110.6
OP/2	44.8	-70.5	67.0	1.1	65.0	-95.4	91.9
OP/3	38.2	-67.8	67.0	1.1	56.3	-94.6	92.2
OP/4	47.9	-93.3	87.0	1.1	69.2	-127.5	121.3

## 4 DISCUSSIONE E CONFRONTO DEI RISULTATI

Nel seguito si discutono criticamente i risultati ottenuti dalla sperimentazione, ponendo a confronto i valori delle sollecitazioni resistenti registrate per le travi dei campioni con i corrispondenti valori teorici attesi. Si illustrano poi i diagrammi involucro nel piano  $M-\theta$  dei cicli di carico eseguiti nella seconda fase di ciascuna prova, ponendo a confronto i risultati ottenuti per i campioni dotati della stessa geometria ed armatura, realizzati in soluzione prefabbricata e gettata in opera. Per gli stessi gruppi di campioni si pongono, infine, a confronto i valori della energia dissipata durante ciascun ciclo di prova.

Preliminarmente alla discussione di dettaglio dei risultati, è utile sottolineare, come già evidenziato nella relazione conclusiva sulle prove del Laboratorio Ufficiale, che in tutti i campioni le modalità di collasso osservate hanno confermato le attese teoriche in ordine al rispetto della gerarchia delle resistenze, nonché alla disponibilità di duttilità locale dei nodi in ugual misura per la serie prefabbricata e in opera.

Più in particolare:

- si è sistematicamente registrata la plasticizzazione delle sezioni di incastro delle travi al filo con il pilastro;
- durante l'applicazione dei carichi ciclici si è osservato il progressivo danneggiamento della zona delle travi interessata dalle cerniere plastiche e del nodo;
- tutte le prove sono state protratte fino alla esecuzione dei tre cicli di ampiezza costante e pari a  $q=4,0$  volte la deformazione corrispondente alla prima plasticizzazione, così come prescritto al punto § 7.4.5.2.1 delle NTC 2008;
- nelle zone critiche dei pilastri non si sono manifestati fenomeni di danneggiamento.

<sup>1</sup> Dall'esame dei campioni dopo le prove si è registrata una differenza pressoché costante nel valore del copriferro delle barre superiori, rispetto agli schemi di progetto, che è risultato più ampio di circa 10 mm. Tale differenza è stata tenuta in conto nelle analisi condotte.

#### 4.1 Confronto dei massimi valori delle sollecitazioni sperimentali con i corrispondenti valori teorici attesi a rottura

Nella tabella seguente sono riportati:

- i valori delle caratteristiche flessionali resistenti attese sulla base delle resistenze effettive dei materiali  $M_{b,R}^{(+)}$  e  $M_{b,R}^{(-)}$ , tratti dalla precedente tabella 4;
- i valori delle caratteristiche flessionali resistenti registrate sperimentalmente per le sezioni di incastro delle travi destra e sinistra ai pilastri,  $M_{b,R,dx}^{(+)}$ ,  $M_{b,R,dx}^{(-)}$ ,  $M_{b,R,sx}^{(+)}$ ,  $M_{b,R,sx}^{(-)}$ ;
- i rapporti tra le corrispondenti caratteristiche di sollecitazione rilevate sperimentalmente ed attese.

Come si evince dai dati in tabella, per tutti i campioni vi è buona corrispondenza tra le attese teoriche e i risultati della sperimentazione in termini di resistenza flessionale delle travi. Da ciò si conclude che la disposizione delle armature attraverso il nodo, ed il particolare sistema di collegamento per i campioni prefabbricati, non affligge la resistenza delle sezioni di incastro delle travi al pilastro, rispetto al modello di calcolo. A ciò si aggiungano le considerazioni espresse più sopra in ordine al comportamento delle sezioni critiche dei pilastri, nelle quali non si sono verificati plasticizzazioni o danneggiamenti evidenti. Si conclude che il modello di calcolo adottato sia per i campioni in soluzione gettata in opera sia per quelli in soluzione prefabbricata è in ben grado di descrivere compiutamente la localizzazione delle plasticizzazioni nel nodo trave-colonna ed i valori delle sollecitazioni resistenti.

*Tabella 5 – Confronto tra le caratteristiche di sollecitazione resistenti attese e sperimentali delle travi*

Campione	Resistenze attese [kNm]		Resistenze sperimentali [kNm]						Rapporto	
							Valori medi			
	M <sub>b,R</sub> <sup>(+)</sup>	M <sub>b,R</sub> <sup>(-)</sup>	M <sub>b,R,dx</sub> <sup>(+)</sup>	M <sub>b,R,dx</sub> <sup>(-)</sup>	M <sub>b,R,sx</sub> <sup>(+)</sup>	M <sub>b,R,sx</sub> <sup>(-)</sup>	M <sub>b,R,sp</sub> <sup>(+)</sup>	M <sub>b,R,sp</sub> <sup>(-)</sup>	M <sub>b,R,sp</sub> <sup>(+)</sup> / M <sub>b,R</sub> <sup>(+)</sup>	M <sub>b,R,sp</sub> <sup>(-)</sup> / M <sub>b,R</sub> <sup>(-)</sup>
TST/1	57	-96	63	-100	62	-98	62.5	-99	<b>1.10</b>	<b>1.03</b>
TST/2	58	-97	70	-97	67	-97	68.5	-97	<b>1.19</b>	<b>1.00</b>
TST/3	70	-129	74	-111	66	-119	70	-115	<b>1.00</b>	<b>0.89</b>
TST/4	69	-127	78	-124	75	-117	76.5	-120.5	<b>1.11</b>	<b>0.95</b>
TST/5	71	-132	71	-123	71	-125	71	-124	<b>1.00</b>	<b>0.94</b>
OP/1	73	-98	81	-94	87	-77	84	-85.5	<b>1.15</b>	<b>0.87</b>
OP/2	71	-95	64	-85	62	-80	63	-82.5	<b>0.89</b>	<b>0.86</b>
OP/3	56	-95	52	-92	62	-85	57	-88.5	<b>1.01</b>	<b>0.94</b>
OP/4	69	-128	74	-116	79	-113	76.5	-114.5	<b>1.11</b>	<b>0.90</b>

Ad ulteriore commento della tabella 5 si osserva che in generale vi è una lieve sovraresistenza flessionale delle sezioni, rispetto ai valori attesi, per sollecitazioni di segno positivo, mentre si registra una lieve riduzione della resistenza per sollecitazioni di segno negativo sempre rispetto alle attese teoriche.

Il valore medio del rapporto tra resistenza flessionale rilevata sperimentalmente per sollecitazioni di segno positivo vale 1.08 per la serie prefabbricata e 1.04 per quella gettata in opera. Lo stesso valor medio calcolato per le sollecitazioni di segno negativo vale 0.96 per la serie prefabbricata e 0.89 per quella getta in opera. Non si registrano quindi significative differenze nel comportamento, ai fini della resistenza delle travi, tra i due gruppi di campioni.

#### 4.2 Curve involucro $M-\theta$ dei cicli, confronto tra campioni prefabbricati ed in opera

Nel seguito si pongono a confronto i risultati ottenuti per le due serie di campioni dotati della stessa geometria ed armatura. Nei diagrammi delle figure 12 e 13, sono riportate le curve di involucro dei massimi e minimi momenti flettenti attinti in ciascun ciclo della seconda fase di prova e delle corrispondenti rotazioni, ponendo a confronto i risultati ottenuti per i campioni TST/1, TST/2 e OP/3, con armatura minima e TST/3, TST/4 e OP/4, con armatura massima. Dall'esame dei diagrammi si conclude che il comportamento dei campioni prefabbricati è sostanzialmente sovrapponibile a quello dei corrispondenti campioni interamente gettati in opera, sia in termini di resistenza massima, come già evidenziato in precedenza, sia in termini di degrado della resistenza con l'evolvere dei cicli.

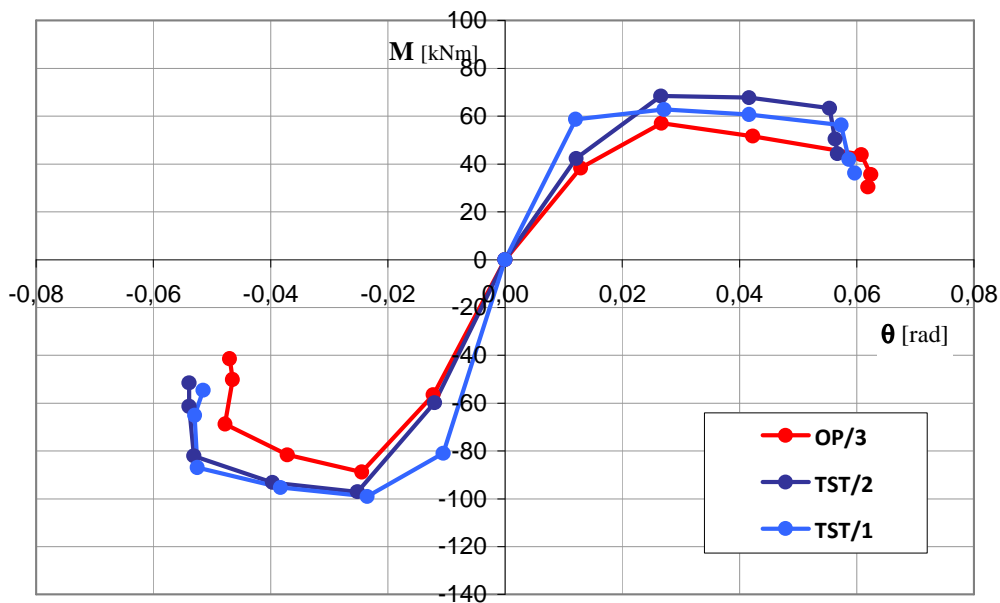


Figura 12 – Confronto delle curve involucro dei massimi per i campioni TST/1, TST/2 e OP/3 (armatura minima)

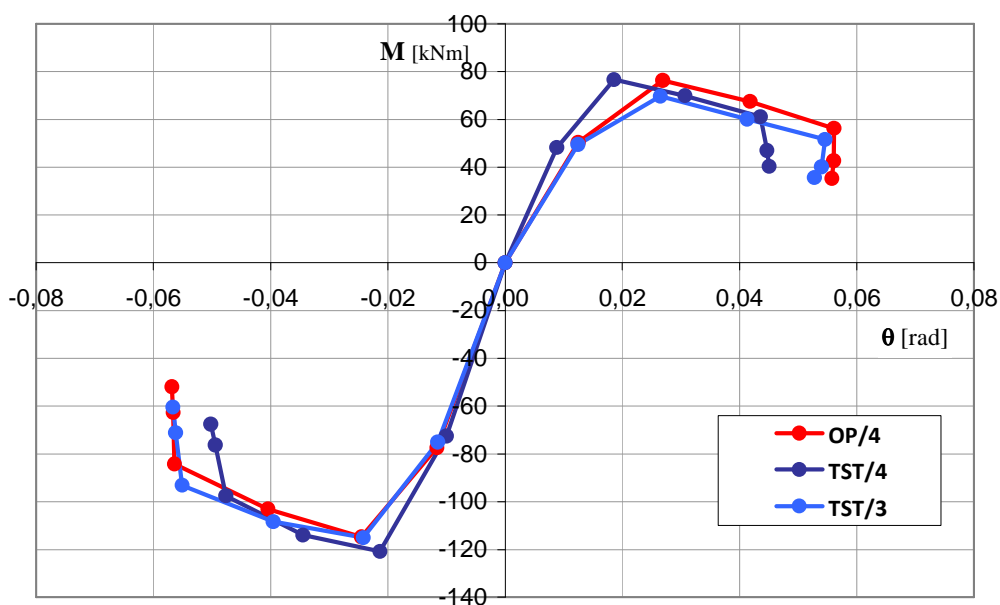


Figura 13 – Confronto delle curve involucro dei massimi per i campioni TST/3, TST/4 e OP/4 (armatura massima)

### 4.3 Confronti energetici

I diagrammi delle figure 14 e 15, nelle quali l'istogramma illustra la variazione dell'energia dissipata in ciascun ciclo di carico della seconda fase (vd. Fig. 5) delle prove e il grafico in linea continua illustra l'andamento della energia totale dissipata, confermano le previsioni attese in ordine all'evoluzione del degrado. In particolare, l'energia aumenta progressivamente nei primi quattro cicli, caratterizzati da deformazioni imposte crescenti, per diminuire negli ultimi tre, a deformazione imposta costante.

La variazione di energia dissipata in una successione di cicli a deformazione costante, è un diretto indicatore del degrado ciclico; nella tabella 6, sono indicati i valori di energia dissipata in totale dalle due travi di ciascun campione, durante il 4° ed il 6° ciclo (rispettivamente primo e terzo tra quelli a deformazione costante), nonché la riduzione in termini percentuali.

Si osserva che per le due serie di campioni con armatura minima (TST/1, TST/2 e OP/3) e massima (TST/3, TST/4 e OP/4), la riduzione dell'energia dissipata in termini percentuali, è inferiore per i campioni prefabbricati rispetto a quelli gettati in opera.

In aggiunta a quanto sopra, come evidenziato nei grafici delle figure 14 e 15, si osserva che la capacità dissipativa totale è pressoché uguale per i campioni che hanno identica armatura, siano essi prefabbricati o gettati in opera.

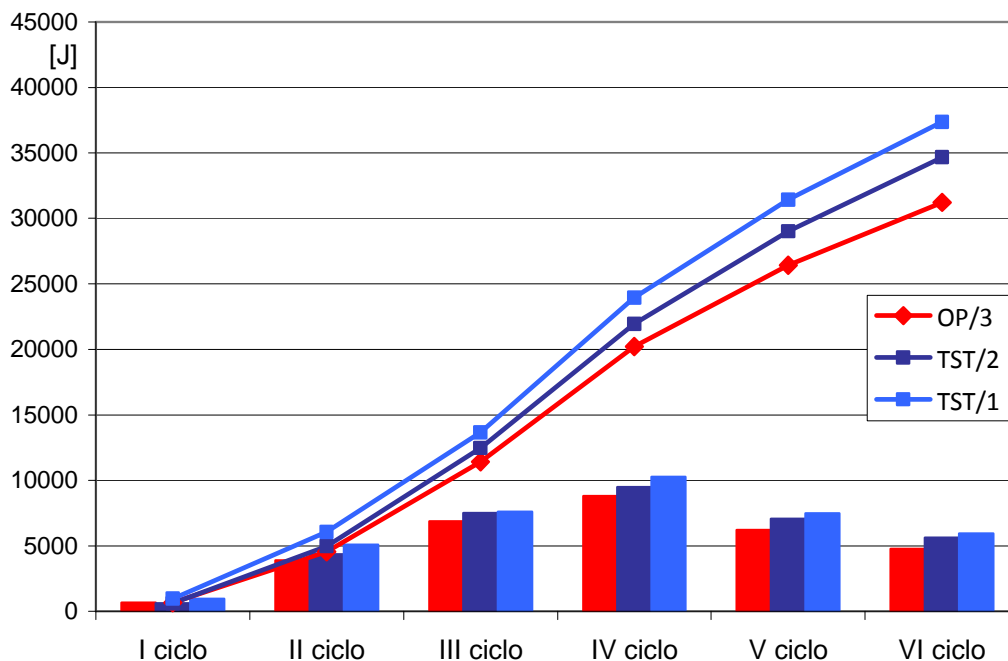


Figura 14 – Confronto dell'energia dissipata in totale nelle due travi per i campioni TST/1, TST/2 e OP/3 (armatura minima)

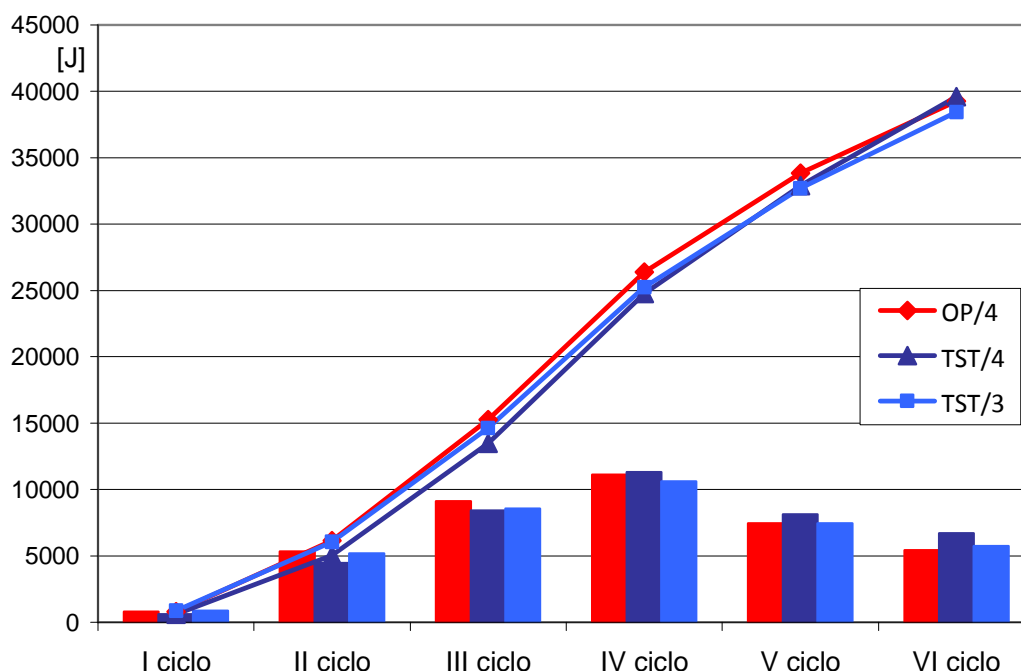


Figura 15 – Confronto dell'energia dissipata in totale nelle due travi per i campioni TST/3, TST/4 e OP/4 (armatura massima)

Tabella 6 – Energia dissipata al IV e VI ciclo della seconda fase di prova

	Energia IV ciclo [kJ]	Energia VI ciclo [kJ]	riduzione %
TST/1	8.77	5.95	32
TST/2	9.49	5.63	41
OP/3	8.80	4.78	46
TST/3	10.61	5.74	46
TST/4	11.30	6.71	41
OP/4	11.13	5.43	51
TST/5	10.83	6.43	41
OP/1	8.62	4.41	49
OP/2	8.99	4.49	50

## 5 CONCLUSIONI

L'entrata in vigore delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008) e delle relative Istruzioni, ha reso necessario adeguare i criteri di calcolo delle strutture prefabbricate secondo il sistema K, prodotte dalla Toscana Soltravi.

In considerazione della particolare tecnologia di prefabbricazione, che prevede il completamento con getti integrativi in opera delle strutture a telaio, per la realizzazione di connessioni collocate all'interno delle zone critiche dei pilastri e delle travi, si è condotta una apposita campagna sperimentale presso il Laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa, volta a esaminare se il tipo di collegamento trave-pilastro che si realizza con questa tecnologia è di tipo c), così come definito al punto 7.4.5 delle NTC 2008:

*c) collegamenti situati nelle zone critiche alle estremità degli elementi prefabbricati, dotati delle necessarie caratteristiche in termini di duttilità e di quantità di energia dissipabile."*

La classificazione dei collegamenti in categoria c), che consente di assimilare la struttura ad una di tipo monolitico, è possibile a seguito di valutazioni analitiche o da prove condotte su sottoinsiemi strutturali significativi in scala reale *“che includano almeno tre cicli completi di deformazione di ampiezza corrispondente al fattore di struttura  $q$ ”*.

A completamento delle analisi teoriche, basate sulle indicazioni delle NTC 2008 ed integrate da quelle contenute nelle parti degli Eurocodici specifiche per queste tipologie strutturali, svolte dall'Ufficio Tecnico della Toscana Soltravi sotto la supervisione dei sottoscritti, si sono condotte 9 prove su altrettanti campioni al vero di nodi trave-pilastro a quattro vie, dei quali 5 realizzati in soluzione prefabbricata – sistema K, e 4, di raffronto, realizzati in soluzione tradizionale completamente gettata in opera.

I risultati della sperimentazione, compiutamente descritti nella relazione conclusiva sulle prove, rimessa dal Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa, consentono di trarre le seguenti conclusioni:

1. le modalità di crisi osservate per tutti i campioni riflettono i criteri di calcolo adottati, e in particolare quelli relativi alla gerarchia delle resistenze trave-pilastro. In tutti i campioni si sono formate cerniere plastiche nelle travi in prossimità delle sezioni di incastro ai pilastri, senza che questi manifestassero plasticizzazioni o segni di degrado;
2. tutte le prove sono state protratte fino al completamento dei tre cicli di ampiezza pari al fattore di struttura impiegato per il progetto dei campioni, cautelativamente assunto pari a  $q = 4.0$ , così come previsto dalle NTC 2008;
3. i valori dei momenti resistenti delle travi sono risultati, sia per i campioni prefabbricati, sia per quelli gettati in opera, sostanzialmente coincidenti i corrispondenti valori attesi, valutati con riferimento alle effettive proprietà dei materiali utilizzati per il confezionamento dei campioni stessi;
4. dal confronto dei diagrammi momento rotazione delle sezioni di incastro delle travi ai pilastri relativo ai due gruppi di nodi con identica geometria ed armatura, si conclude che il comportamento dei campioni prefabbricati è sostanzialmente sovrapponibile a quello dei corrispondenti campioni interamente gettati in opera, sia in termini di resistenza massima, sia in termini di degrado della resistenza con l'evolvere dei cicli;
5. il confronto dei risultati condotto in termini energetici per gli stessi gruppi di campioni di cui al punto precedente, evidenzia comportamenti del tutto sovrapponibili per i campioni prefabbricati e per quelli in opera, con valori della riduzione dell'energia dissipata in termini percentuali al progredire dei cicli inferiore per i primi rispetto ai secondi.

Alla luce di tutto quanto sopra, si può quindi concludere che le strutture prefabbricate secondo il sistema K, prodotte dalla Toscana Soltravi, sono dotate delle caratteristiche di duttilità previste dalle NTC 2008 e dall'Eurocodice 8, tali da poter classificare il collegamento delle parti prefabbricate del tipo c), ciò che consente di assimilare i telai realizzati con il sistema K a telai monolitici, realizzati in soluzione tradizionale gettata in opera.

Prof. Ing. Luca SANPAOLESI

Ing. Paolo FORMICHI