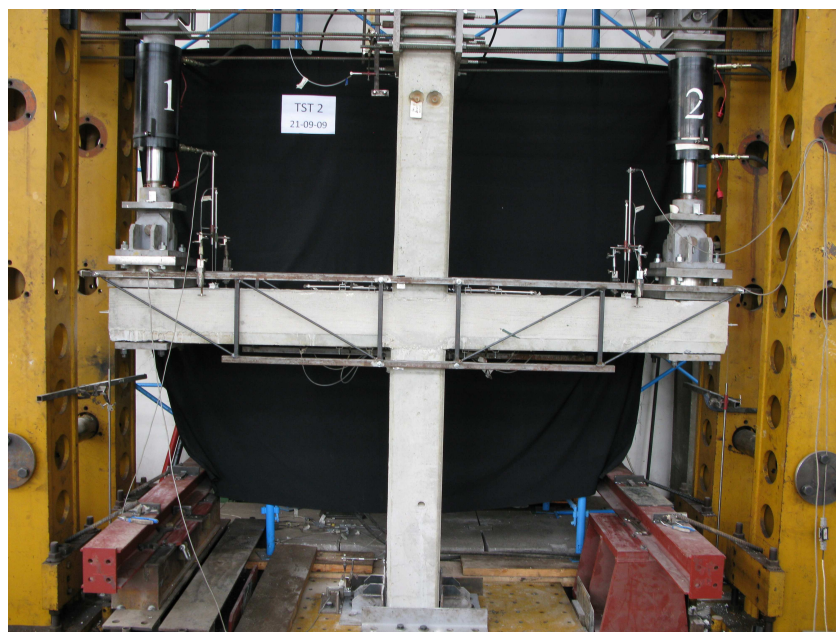




DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE
UNIVERSITÀ DI PISA

**PROVE AL VERO PER LA CARATTERIZZAZIONE DEL COMPORTAMENTO DI
SOTTOINSIEMI STRUTTURALI DI TELAI, COSTITUITI DA NODI
TRAVE-PILASTRO A QUATTRO VIE, REALIZZATI CON ELEMENTI
PREFABBRICATI CON IL SISTEMA K**

**RELAZIONE FINALE
SETTEMBRE 2010**



CONTRATTO STIPULATO TRA:
TOSCANA SOLTRAVI S.R.L. - PISA
E
UNIVERSITÀ DI PISA – DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE
(stipulato in data 12.05.2009)

PROVE AL VERO PER LA CARATTERIZZAZIONE DEL COMPORTAMENTO DI
SOTTOINSIEMI STRUTTURALI DI TELAI, COSTITUITI DA NODI TRAVE-PILASTRO
A QUATTRO VIE, REALIZZATI CON ELEMENTI PREFABBRICATI CON
IL SISTEMA K

RELAZIONE FINALE

Pisa, settembre 2010

Responsabile scientifico:

prof. ing. Maria Luisa Beconcini

Gruppo di lavoro:

prof. ing. Pietro Croce

ing. Paolo Formichi

INDICE

1	INTRODUZIONE	2
2	I CAMPIONI SOTTOPOSTI A PROVA	2
2.1	Criteri di dimensionamento dei campioni	2
2.2	Descrizione dei campioni e dettagli costruttivi.....	3
3	I MATERIALI IMPIEGATI PER IL CONFEZIONAMENTO DEI CAMPIONI.....	11
3.1	Caratteristiche nominali dei materiali	11
3.2	Prove di qualificazione.....	11
4	LE PROVE SUI CAMPIONI	13
4.1	Programma delle prove	13
4.2	Dispositivo di prova	14
4.3	Protocollo di prova.....	20
5	RISULTATI DELLE PROVE SUI CAMPIONI.....	22
5.1	Risultati in termini di diagrammi momento-rotazione.....	23
5.2	Risultati in termini di curve inviluppo dei massimi	33
5.3	Risultati in termini di energia dissipata.....	41
5.4	Modalità di crisi osservate	45
6	CONCLUSIONI	50

1 INTRODUZIONE

Il Sistema K è un sistema di prefabbricazione di strutture intelaiate a nodi rigidi, per edifici in cui gli elementi prefabbricati sono essenzialmente di due tipologie: l'elemento pilastro con sviluppo pari all'interpiano e l'elemento trave, costituito da un fondello che funge da cassero autoportante a perdere ed in cui è inglobata la gabbia di armatura. L'assemblaggio degli elementi prefabbricati per la realizzazione dei telai strutturali avviene tramite un consistente getto in opera, che satura il collegamento a pozzetto fra i pilastri sovrastanti, la zona del nodo travi-pilastri e costituisce il completamento delle travi, nonché la soletta dei solai che si attestano su di esse.

Al fine di verificare le prestazioni del sottoinsieme strutturale di telai in cemento armato, costituito dal nodo trave-pilastro a quattro vie realizzato con elementi prefabbricati secondo il Sistema K prodotti da Toscana Soltravi s.r.l. di Pisa, ed accertare l'affidabilità dell'applicazione dei modelli di calcolo impiegati usualmente nelle verifiche di analoghe strutture gettate in opera, è stata condotta una campagna di prove sperimentali su n. 9 campioni al vero costituiti da nodi trave-pilastro, dei quali n. 5 realizzati con elementi prefabbricati e n. 4 campioni interamente gettati in opera.

La campagna di prove ha avuto lo scopo di determinare il comportamento, per sollecitazioni oligocicliche in campo elasto-plastico dei campioni costituiti da elementi prefabbricati e gettati in opera, per la valutazione della duttilità e la verifica della corretta gerarchia delle resistenze fra gli elementi costituenti il nodo.

Nella presente relazione si riferisce sui risultati della campagna di prove effettuata.

2 I CAMPIONI SOTTOPOSTI A PROVA

2.1 Criteri di dimensionamento dei campioni

La campagna di prove è volta a indagare 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"), così come definita ai sensi della Normativa Tecnica in vigore (DM 14.01.2008, nel seguito NTC 2008).

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, quali parte di telai di edifici per uso residenziale a quattro piani fuori terra, seguendo le prescrizioni delle NTC 2008, assumendo cautelativamente (ai fini delle prove) per il fattore di struttura il valore 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 $\alpha_u/\alpha_1=1.3$. 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 esame.

Più in particolare ciascun campione è costituito da un nodo a quattro vie isolato dal telaio multipiano, e costituito 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 (questa dimensione è stata dettata da motivazioni di carattere tecnico).

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 interamente gettati in opera.

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.

Dei quattro campioni interamente gettati in opera, ve ne sono tre con armatura minima e uno con armatura massima (si veda in proposito la Tabella 1).

2.2 Descrizione dei campioni e dettagli costruttivi

I campioni sono stati realizzati da Toscana Soltravi s.r.l. nello stabilimento di Pisa, secondo le specifiche riportate nel seguito, così come dichiarate dallo stesso Produttore.

I campioni, suddivisi in due serie:

- n. 5 campioni denominati “TST”, realizzati con elementi pilastro e fondelli delle travi prefabbricati, con getto di completamento delle travi e del collegamento secondo il Sistema K;

- n. 4 campioni, denominati “OP”, completamente gettati in opera;

presentano tutti le stesse dimensioni: le travi hanno sezione rettangolare in spessore di solaio, con dimensioni di 240 mm di altezza e 400 mm di larghezza; i pilastri con sezione rettangolare delle dimensioni di 250 x 400 mm; in tutti i campioni, ad eccezione del campione n. 5 di Tabella 1, la trave si innesta sul lato più lungo del pilastro, ovverosia impegnandone il piano debole.

Come accennato più sopra, le armature dei campioni sono di due tipologie, così come indicate nella Tabella 1.

La Figura 1 illustra i campioni della serie prefabbricata TST, unitamente alle sezioni di dettaglio delle travi e dei pilastri, sia per armatura più debole (minima), sia per quella forte (massima). I campioni tipo OP (figura 2) sono stati realizzati in analogia ai campioni TST; la loro costruzione è stata effettuata con getto in verticale e riprese in corrispondenza della trave, come avviene per le strutture reali.

In ordine alla disposizione delle armature delle travi nei campioni gettati in opera, si osserva che per i campioni OP/1 e OP/2, le armature inferiori sono state posizionate con copriferro pari a 4,0 cm, corrispondente alla posizione correntemente adottata nelle realizzazioni in opera, mentre per i campioni OP/3 e OP/4 le armature inferiori delle travi sono state disposte coerentemente con la disposizione delle stesse armature nei campioni prefabbricati, nei quali la presenza del fondello impone il copriferro pari a 6,7 cm.

Tabella 1 - Tipologia dei campioni

N.	Campione	Asse del pilastro	Armatura travi Tipo	Trave 240x400mm			Pilastro 250x400mm		Nodo
				A _{sup}	A _{inf}	Staffe ^(*)	A _{longitudinale}	Staffe ^(*)	
1	TST/1	Debole	Min	4Φ18	4Φ14	Φ8/40	4Φ16+4Φ14	Φ 8/80	2Φ12
2	TST/2	Debole	Min	4Φ18	4Φ14	Φ8/40	4Φ16+4Φ14	Φ 8/80	2Φ12
3	TST/3	Debole	Max	4Φ22	4Φ16	Φ8/40	4Φ22+4Φ16	Φ 8/80	2Φ12
4	TST/4	Debole	Max	4Φ22	4Φ16	Φ8/40	4Φ22+4Φ16	Φ 8/80	2Φ12
5	TST/5	Forte	Max	4Φ22	4Φ16	Φ8/40	4Φ16+4Φ14	Φ 8/80	2Φ12
6	OP/1	Debole	Min	4Φ18	4Φ14	Φ8/40	4Φ16+4Φ14	Φ 8/80	2Φ12
7	OP/2	Debole	Min	4Φ18	4Φ14	Φ8/40	4Φ16+4Φ14	Φ 8/80	2Φ12
8	OP/3	Debole	Min	4Φ18	4Φ14	Φ8/40	4Φ16+4Φ14	Φ 8/80	2Φ12
9	OP/4	Debole	Max	4Φ22	4Φ16	Φ8/40	4Φ22+4Φ16	Φ 8/80	2Φ12

^(*) E' indicato il passo delle staffe comprese all'interno della zona critica delle membrature.

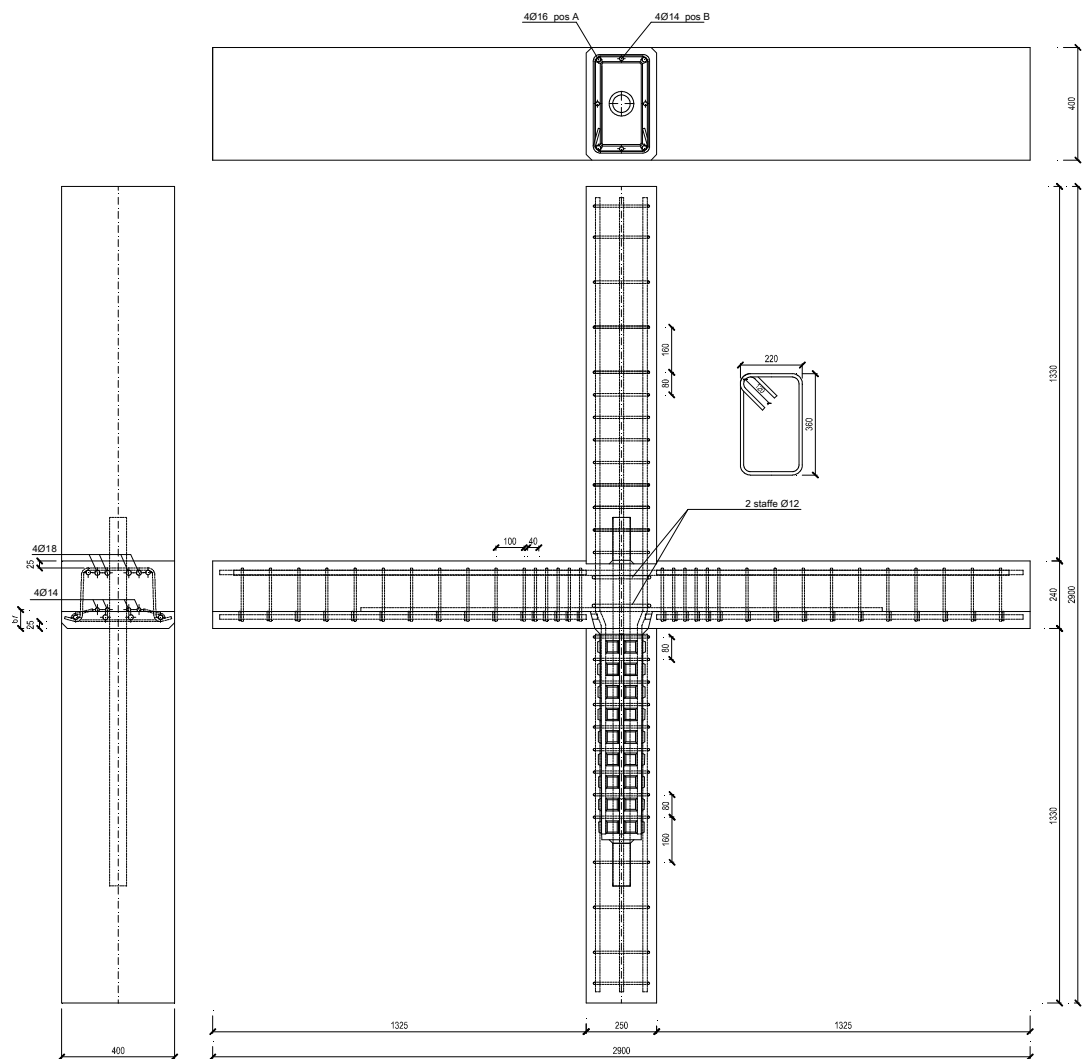
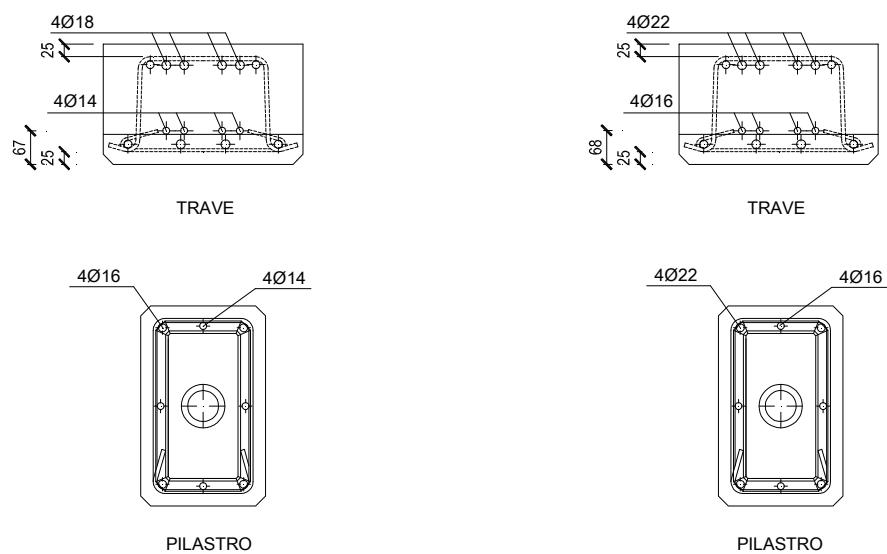


Figura 1a: Schema campione prefabbricato della serie TST con pilastro in asse debole



Campioni TST/1, TST/2

Campioni TST/3, TST/4

Figura 1b: Sezioni correnti della trave e del pilastro - serie TST con pilastro in asse debole

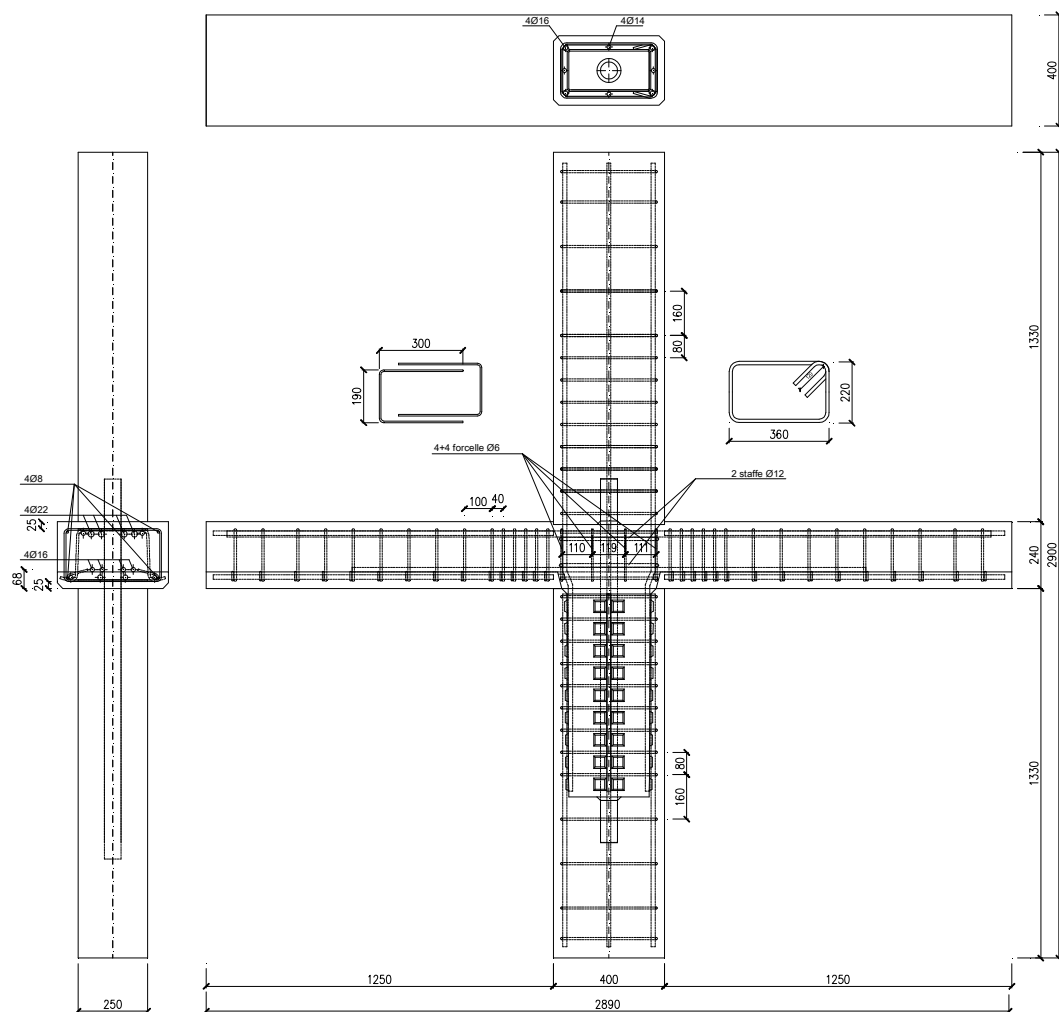


Figura 1c: Schema campione prefabbricato TST/5, con pilastro in asse forte

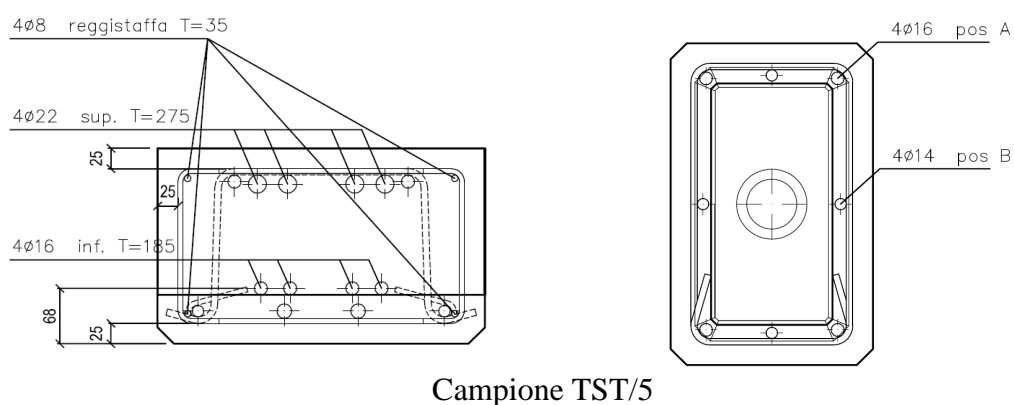


Figura 1d: Sezioni correnti della trave e del pilastro – campione TST/5 con pilastro in asse forte

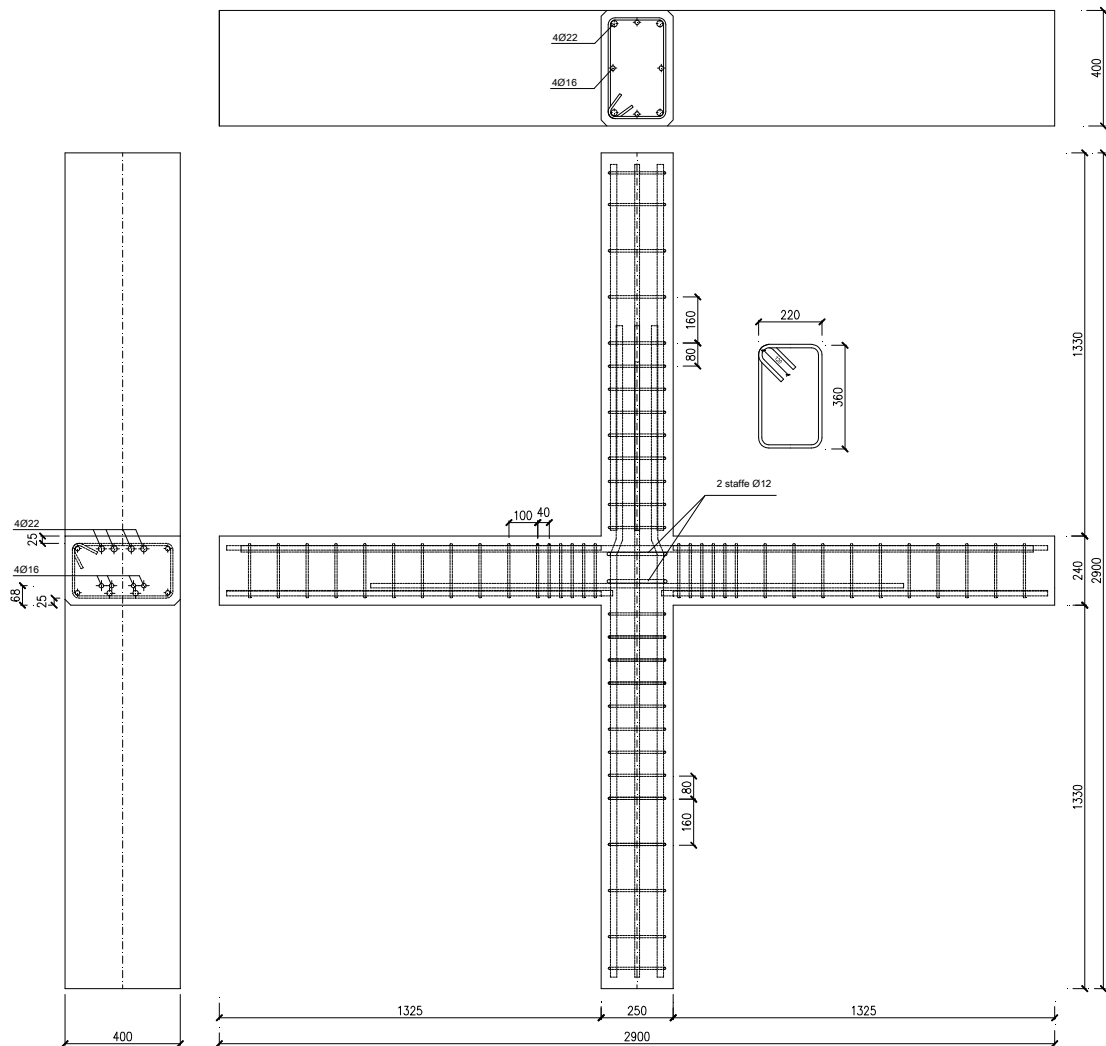
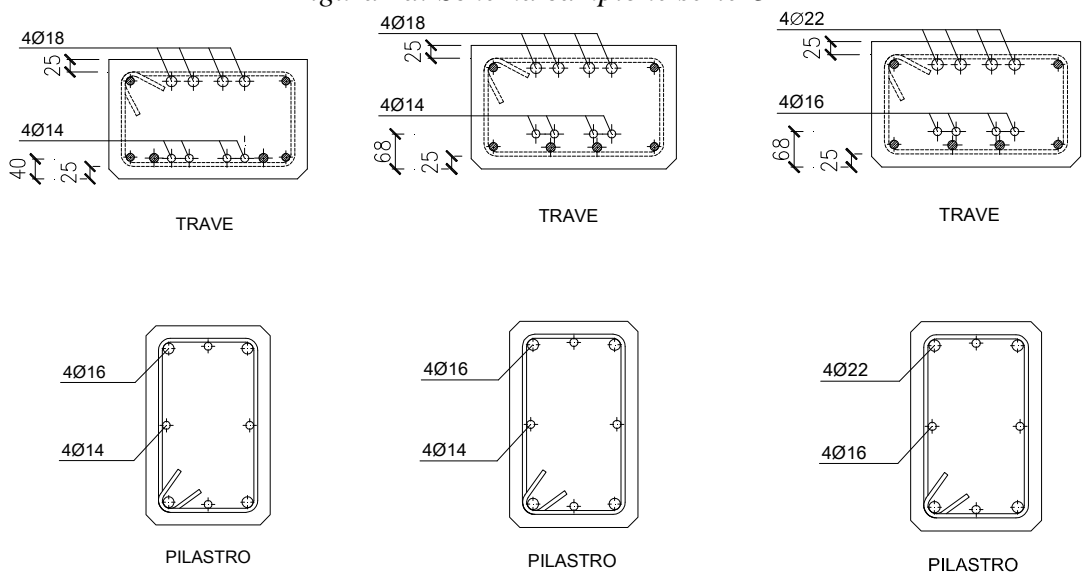


Figura 2a: Schema campione serie OP



Campioni OP/1, OP/2

Campione OP/3

Campione OP/4

Figura 2b: Sezioni correnti della trave e del pilastro – campioni OP/1 - OP/4



Figura 3 - Fondelli prefabbricati delle travi per la realizzazione dei campioni TST



Figura 4 - Un campione prefabbricato TST in fase di realizzazione



Figura 5 - Particolare del nodo di un campione prefabbricato TST



Figura 6 - Campione prefabbricato TST dopo il getto di completamento



Figura 7 - Armatura del pilastro di un campione

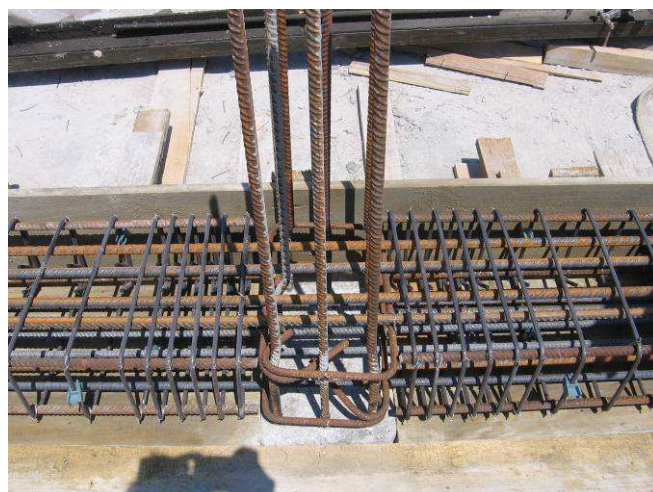


Figura 8 - Fasi di realizzazione di un campione gettato in opera (serie OP)

3 I MATERIALI IMPIEGATI PER IL CONFEZIONAMENTO DEI CAMPIONI

3.1 Caratteristiche nominali dei materiali

I campioni TST sono stati realizzati con elementi pilastro e fondelli trave prefabbricati secondo il Sistema K; per tali elementi il Produttore ha dichiarato l'impiego di calcestruzzo di classe C28/35 e armature in acciaio B450C. In effetti, e come meglio illustrato ai punti che seguono, il calcestruzzo utilizzato per il confezionamento delle parti prefabbricate dei campioni, il cui betonaggio è interno allo stabilimento di prefabbricazione, è risultato avere caratteristiche superiori a quelle dichiarate.

Per il collegamento a pozzetto fra gli elementi prefabbricati ed il getto integrativo delle travi, il Produttore ha dichiarato l'impiego di calcestruzzo di classe C28/35. In questo caso il calcestruzzo, proveniente da centrale di betonaggio esterna allo stabilimento (in analogia a quanto effettivamente accade in fase di montaggio delle strutture), è risultato avere caratteristiche effettivamente prossime alla classe dichiarata.

I campioni tipo OP sono stati realizzati con calcestruzzo classe C28/35 ed armature in acciaio B450C.

Come per i getti di completamento dei campioni prefabbricati, anche per quelli gettati in opera, il calcestruzzo è stato confezionato all'esterno dello stabilimento.

3.2 Prove di qualificazione

I materiali impiegati per la costruzione dei campioni sono stati qualificati mediante prove di laboratorio. Per i calcestruzzi, in particolare, sono stati confezionati provini cubici in fase di getto e sono state prelevate carote dai campioni testati. In generale sono stati prelevati 6 provini cubici per i campioni prefabbricati (2 per i pilastri superiore ed inferiore, 2 per i fondelli delle travi e 2 per il getto di completamento in opera); altrettanti provini sono stati prelevati durante le fasi di getto di ciascun campione in opera (2 per il pilastro inferiore, 2 per la trave e 2 per il pilastro superiore).

Le carote sono state prelevate nel numero di 2 per ciascun campione: una dalla estremità inferiore del pilastro ed una da una delle due estremità della trave, che per i campioni TST ha interessato la parte di calcestruzzo gettato in opera. Le carote, del diametro di mm, hanno lunghezza di 250 mm per i pilastri e 240 mm per le travi; da ciascuna carota sono stati quindi ricavati tre campioni cilindrici con rapporto altezza/diametro all'incirca pari a 1.

Complessivamente sono state condotte 44 prove di qualifica dei calcestruzzi prelevati in occasione dei getti per il confezionamento dei campioni e 54 prove di caratterizzazione degli stessi calcestruzzo, a seguito di prelievi condotti mediante carotaggio dalle membrane sottoposte a prova.

In ordine alle armature impiegate per il confezionamento dei campioni si è proceduto al prelievo di n. 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 dichiarati dal Produttore.

Complessivamente sono state condotte 54 prove di qualifica degli acciai.

Una sintesi dei risultati delle prove è riportata nelle Tabelle 2, 3, 4, mentre i risultati dettagliati di tutte le prove condotte sono riportati in Appendice.

Tabella 2 - Risultati delle prove di trazione e piegamento sulle armature

\varnothing [mm]	Tensione di snervamento [N/mm ²]	Tensione di rottura [N/mm ²]	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

Tabella 3 - Risultati delle prove sui provini cubici di calcestruzzo e sulle carote estratte dai campioni TST

Campione	Posizione	f_c [N/mm ²]	$f_{c,s}$ [N/mm ²]
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

Tabella 4 - Risultati delle prove sui provini cubici di calcestruzzo e sulle carote estratte dai campioni OP

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

4 LE PROVE SUI CAMPIONI

4.1 Programma delle prove

Ai sensi della vigente Normativa Tecnica (DM 14.01.2008, paragrafo 7.4.5), l'idoneità delle strutture prefabbricate, dotate di collegamenti di tipo c), a realizzare il meccanismo plastico previsto per le strutture a telaio e a soddisfare le richieste globali e locali di duttilità ciclica, può essere dimostrata da prove sperimentali che includano almeno tre cicli completi di deformazione di ampiezza corrispondente al fattore di struttura q .

Nel caso in esame, il meccanismo plastico auspicabile prevede la formazione di cerniere plastiche nelle travi, mentre, come accennato più sopra, il fattore di struttura q relativo ad analoghe strutture monolitiche è stato assunto pari al massimo valore che questo può attingere nella progettazione di strutture intelaiate, a pareti accoppiate o miste, pari cioè a 3,9, successivamente arrotondato a 4,0.

Le prove sono state condotte controllando gli spostamenti di due sezioni di riferimento poste in prossimità di ciascuna delle estremità delle travi, secondo lo schema di prova descritto nel seguito ed illustrato in figura 11.

Il programma di prova ha compreso due fasi successive per ciascun campione.

La prima fase ha avuto come scopo l'individuazione del meccanismo di plasticizzazione ed è stata condotta in modo da riprodurre un ciclo completo delle sollecitazioni indotte dalle azioni sismiche orizzontali.

Nella seconda fase, volta a determinare il comportamento ciclico post-elastico, il campione è stato sottoposto ad una storia di spostamento delle sezioni di controllo delle travi con tre cicli di ampiezza crescente dal valore di prima plasticizzazione (rilevato nella

fase 1) fino a tre volte tanto e tre ulteriori cicli di ampiezza costante pari a q volte quella di plasticizzazione iniziale ($q=4,0$).

Le prove condotte sono elencate nella tabella 5, in cui, oltre alla data di esecuzione della prova, sono indicati: il tipo di armatura delle travi, la giacitura dell'asse del pilastro (forte/debole) rispetto al piano del campione, il valore del carico assiale applicato ai pilastri e mantenuto costante in entrambe le fasi di prova, al fine di simulare le effettive condizioni di esercizio del sottoinsieme strutturale.

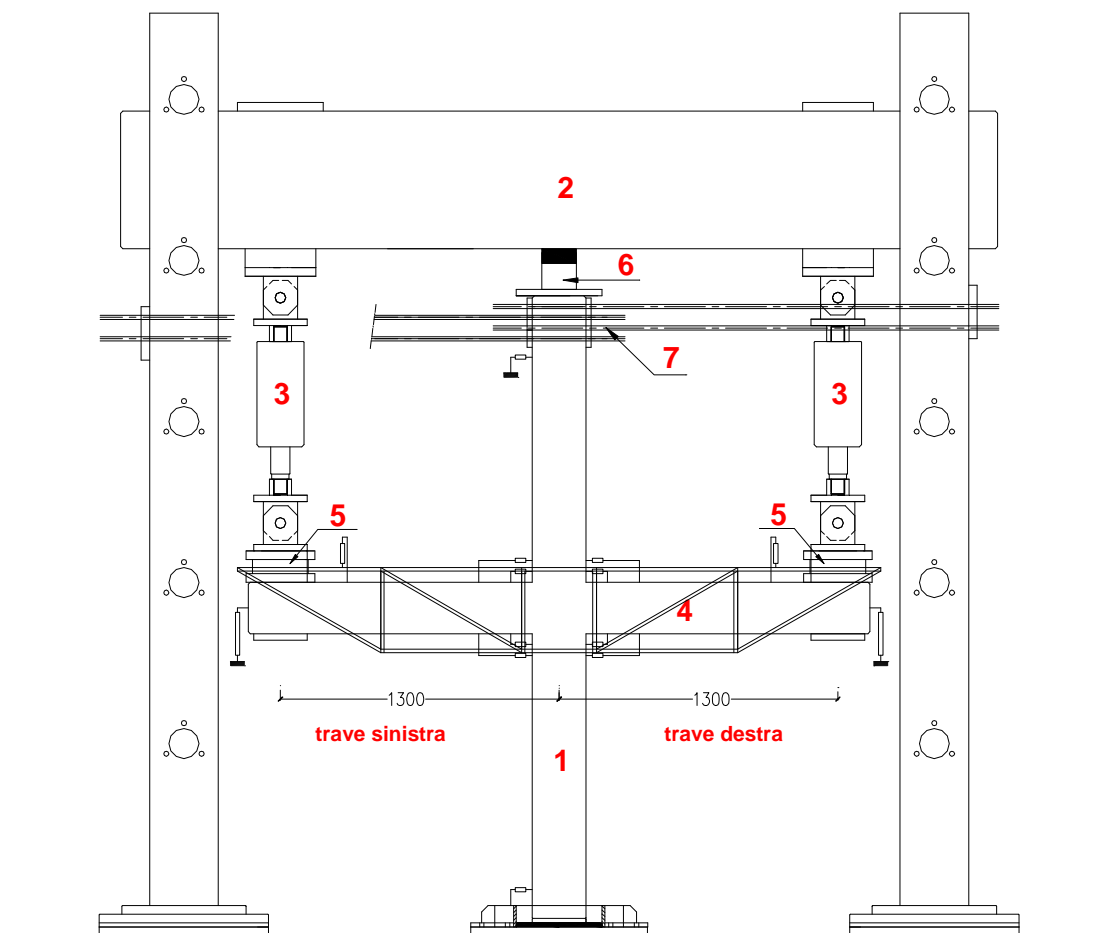
Tabella 5 - Programma delle prove

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

^(*) Armature inferiori delle travi posizionate con copriferro pari a 4,0 cm.

4.2 Dispositivo di prova

Le prove sono state eseguite disponendo ciascun campione all'interno di un telaio di contrasto come illustrato nelle figure 9 e 10, in modo da realizzare lo schema statico riportato nella figura 11.



1. Campione in prova
2. Telaio di contrasto
3. Attuatori oleodinamici a doppio effetto, portata 450kN
4. Telaio di riferimento per trasduttori di spostamento
5. Celle di carico
6. 2 attuatori di portata complessiva 400 kN
7. Vincolo testa del pilastro, 4+4 Barre Dywidag

Figura 9 - Schema del dispositivo di prova



Fig. 10 - Dispositivo di prova

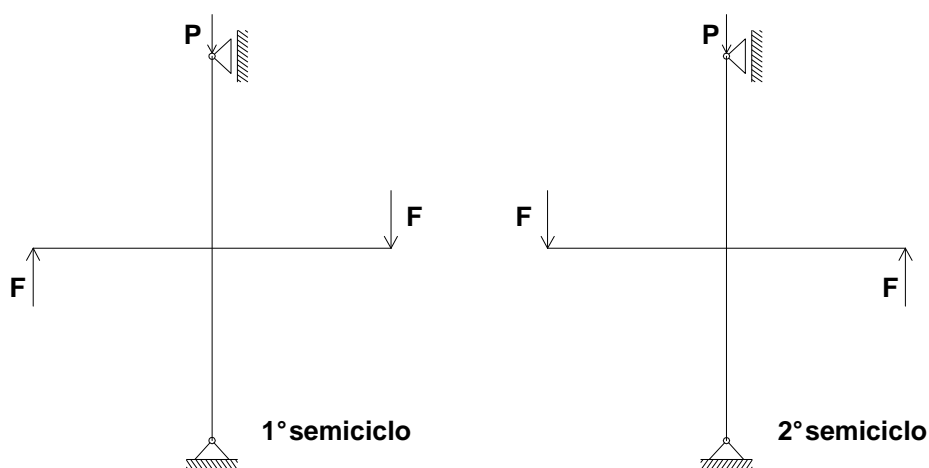


Figura 11 - Schema di vincolo e di carico dei campioni.

Costruttivamente, il vincolo posto alla base del pilastro è realizzato mediante un ritegno in acciaio a “bicchiere”, alla base del quale è stata disposta una piastra metallica di appoggio di larghezza ridotta, così da realizzare una cerniera cilindrica con asse ortogonale al piano del campione. Il vincolo dell'estremità superiore del pilastro è invece realizzato mediante una coppia di piastre in acciaio, vincolata al telaio attraverso otto barre Dywidag pretensionate, in modo da impedire lo spostamento trasversale della sezione. Al pilastro è applicato un carico assiale di compressione mediante una coppia di attuatori idraulici a semplice effetto, di portata complessiva 400 kN, collegati in parallelo e comandati da una pompa manuale.

I carichi ciclici sono applicati alle due estremità delle travi, da due servo-attuatori a doppio effetto, posizionati a distanza di 130 cm dall'asse del pilastro, ciascuno dei quali con portata pari a 400 kN in trazione e 500 kN in compressione. Qui e nel seguito si intende per compressione l'azione esercitata da ciascun attuatore sul campione allorché lo stelo tenda ad uscire dal cilindro; per trazione il caso contrario.

Gli attuatori sono vincolati alla traversa superiore del telaio di contrasto ed al campione attraverso snodi cilindrici, che consentono la rotazione relativa dell'asse dell'attuatore rispetto all'asse della trave nel piano del campione. Il collegamento della estremità mobile dell'attuatore alla trave è di tipo bi-direzionale, risultando possibile la trasmissione di azioni sia di compressione che di trazione (figura 12).

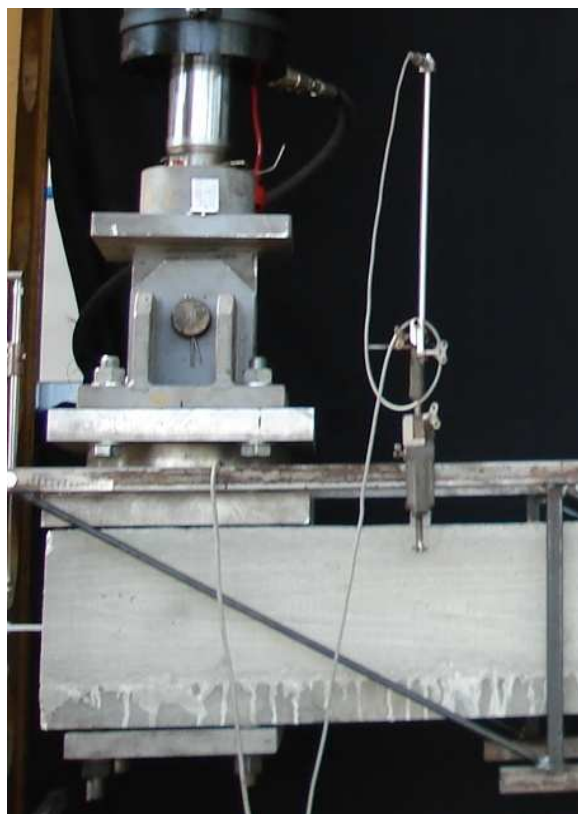


Figura 12 - Collegamento dell'attuatore alla trave

L'alimentazione ed il controllo degli attuatori, per la realizzazione dei cicli descritti al punto successivo, avviene attraverso un sistema dedicato (prodotto dallo Studio AIP di Oggiona S. Stefano - VA), che consente la conduzione di prove in controllo di spostamento, e composto da:

- centrale computerizzata di comando;
- centrale oleodinamica di alimentazione in grado di erogare una pressione di 230 bar;
- servo-distributore a due canali;
- due servo-valvole, ciascuna utilizzata per il controllo di uno dei due attuatori;
- due trasduttori di spostamento LVDT HBM W100, montati sul campione come di seguito specificato, il cui segnale costituisce il “ritorno” che chiude il “loop” di comando delle prove.

Il software installato sulla centrale computerizzata consente la definizione di cicli di spostamento con tipologie d’onda ed ampiezze fissate di volta in volta, che il sistema impone poi al campione attraverso le servo-valvole, le quali adattano la pressione dell’olio nelle camere dei servo-attuatori, in relazione alla differenza tra lo spostamento subito dal punto di controllo sul campione e quello di riferimento del ciclo in esecuzione.

I due trasduttori di spostamento LVDT di controllo sono stati installati sulle due travi, in prossimità dei servo-attuatori, con una estremità ad esse solidale e l’altra fissata ad un supporto metallico, connesso rigidamente al nodo trave – pilastro (v. figg. 9, 10). Tale dispositivo consente di riferire gli spostamenti registrati dai trasduttori alla sola componente di inflessione della trave rispetto al pilastro, depurandone cioè la quota indotta dalla rotazione del nodo.

Strumentazione di misura

Per la misura delle forze applicate si sono utilizzate due celle di carico HBM con portata 500 kN, interposte fra le teste degli attuatori e l’estradosso delle travi (fig. 12).

Per la misura degli spostamenti si sono impiegati 14 trasduttori di spostamento LVDT del tipo HBM W20, W200, WA50, WA200, con corsa da ± 20 mm a ± 200 mm disposti nelle posizioni indicate nelle figure 13 e 14; specificamente:

- n. 2 trasduttori W200S, W200X, alle estremità delle travi per la misura dello spostamento verticale assoluto delle teste delle travi;
- n. 2 trasduttori WA200S, WA200X, all’estradosso delle travi nei punti di controllo, per la misura dello spostamento verticale relativo delle travi rispetto al nodo;
- n. 2 trasduttori WA50A, W20B, alle estremità dei pilastri per il controllo dello spostamento orizzontale delle teste dei pilastri;

- n. 4 trasduttori *WA200ALS*, *WA200BLS*, *WA200ALX*, *WA200BLX*, disposti alle intersezioni trave-pilastro, per la misura della deformazione delle fibre superiori e inferiori delle travi, su base 250 mm (fig. 14);
- n. 4 trasduttori *WA50ACS*, *WA50BCS*, *WA50ACX*, *WA50BCX*, disposti alle intersezioni trave-pilastro, per la misura della deformazione delle fibre superiori e inferiori delle travi, su base 100 mm (fig. 14).

I segnali forniti dalle celle di carico e dai trasduttori sono stati registrati mediante due centraline di acquisizione dati, HBM MGC Plus e Spider 8, e software Catman 3.1.

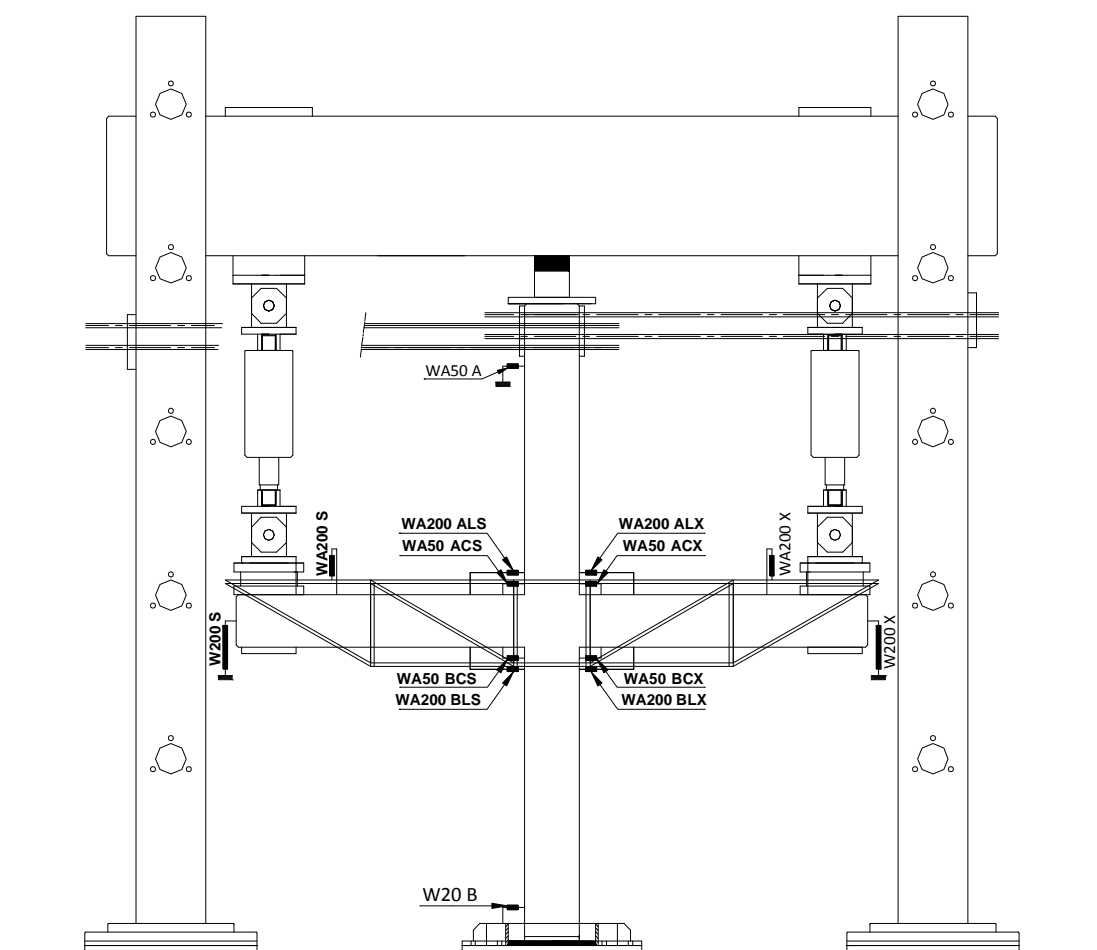


Figura 13 - Disposizione trasduttori di spostamento

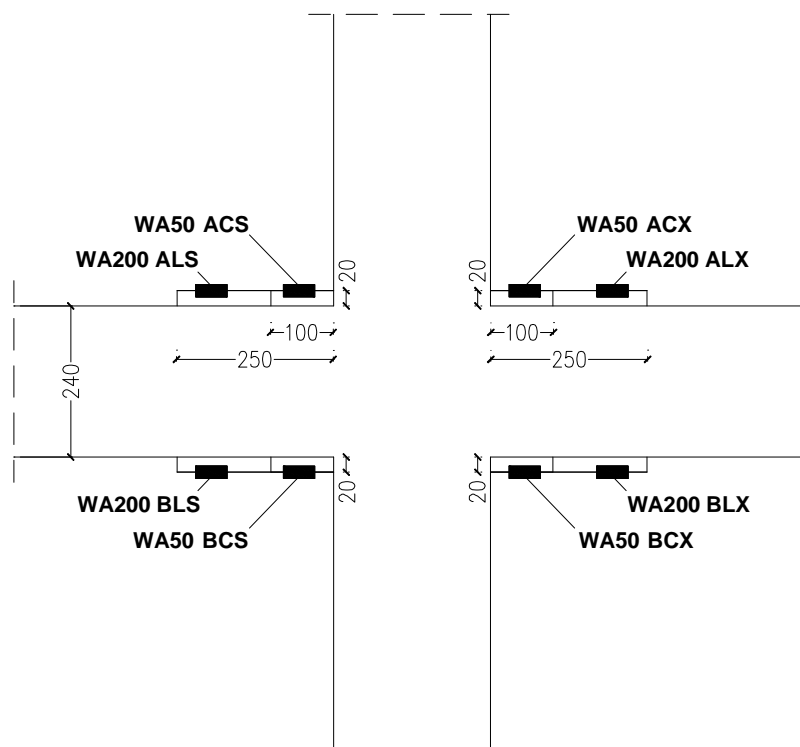


Figura 14 - Disposizione dei trasduttori di spostamento in prossimità del nodo

4.3 Protocollo di prova

I carichi di prova consistono nel carico di compressione assiale applicato al pilastro e nei due carichi ciclici applicati alle estremità delle travi, in modo da realizzare le storie di spostamento dei punti di controllo, illustrati nelle figure 15 e 16 rispettivamente per la prima e per la seconda fase delle prove.

Lo stato delle sollecitazioni taglienti e flettenti indotto negli elementi costituenti il campione, durante ciascun semiciclo di carico, è dettagliatamente descritto nella figura 17.

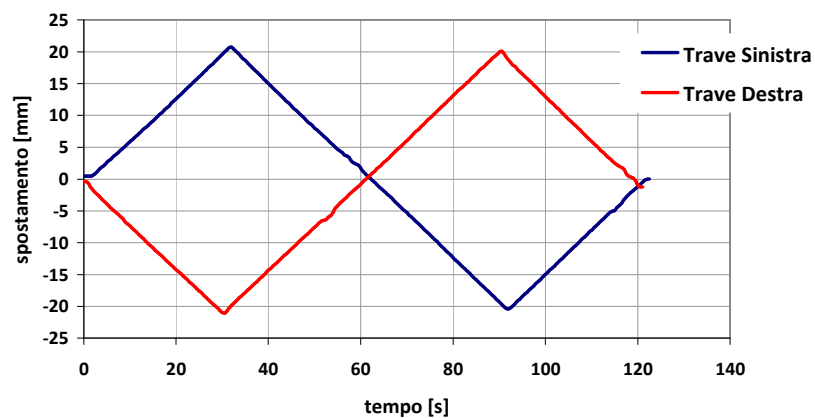


Figura 15 - Storia di spostamenti imposti durante la prima fase della prova

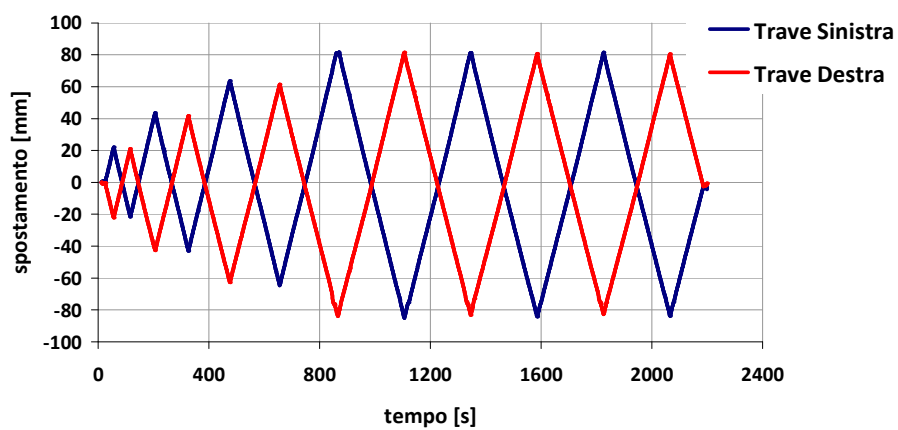


Figura 16 - Storia di spostamenti imposti durante la prova ciclica

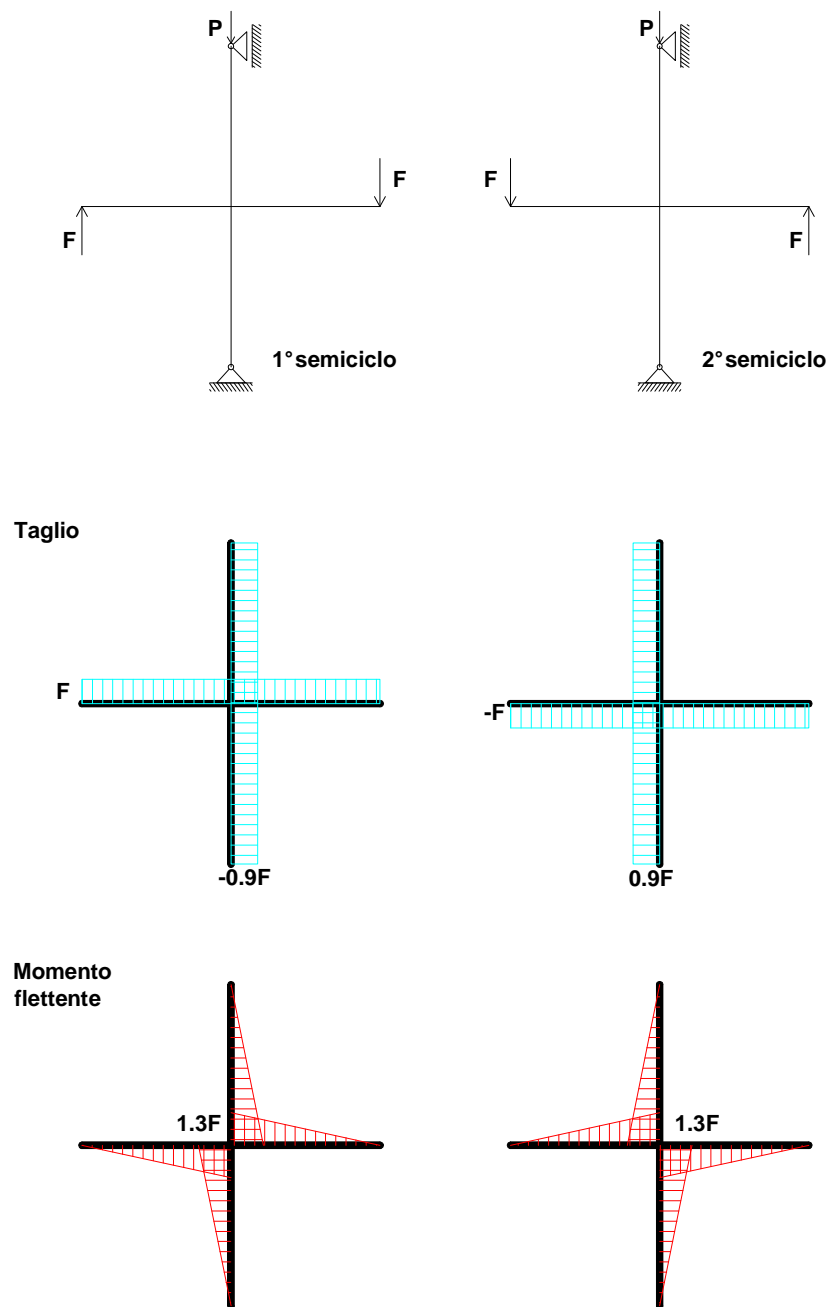


Fig. 17 - Schema di carico e sollecitazioni indotte (T, M)

5 RISULTATI DELLE PROVE SUI CAMPIONI

I dati raccolti durante le prove sono stati elaborati in modo da ricavare elementi sintetici di valutazione delle caratteristiche di comportamento dei campioni, utili per verificare la

rispondenza fra previsioni teoriche ed evidenze sperimentali e per raffrontare il comportamento di campioni prefabbricati e gettati in opera.

In particolare sono stati elaborati:

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

Nel seguito si presentano i risultati delle elaborazioni effettuate, ponendo a confronto i risultati corrispondenti ai campioni prefabbricati e gettati in opera dotati di medesima armatura.

5.1 Risultati in termini di diagrammi momento-rotazione

L'elaborazione dei dati forniti dai trasduttori di spostamento, ACS , BCS , ACX , BCX , posizionati all'intersezione delle travi con il nodo (v. fig. 14), con basi di misura pari a 100 mm, ha permesso di ricavare i valori della rotazione delle sezioni delle travi all'attacco con il nodo, secondo le seguenti espressioni:

$$\text{per la trave sinistra: } \chi = \frac{\Delta(ACS) - \Delta(BCS)}{280mm}$$

$$\text{per la trave destra: } \chi = \frac{\Delta(ACX) - \Delta(BCX)}{280mm}$$

in cui con $\Delta(ACS)$, $\Delta(BCS)$, $\Delta(ACX)$ e $\Delta(BCX)$ si sono indicate le variazioni di lunghezza, in mm, registrate dai trasduttori rispetto alla condizione indeformata di inizio prova.

Nelle figure 18÷26, sono riportati i diagrammi momento-rotazione relativi alla prima fase delle prove (un ciclo completo); nelle figure 27÷35, quelli relativi alle prove cicliche.

Nei diagrammi, nel primo semiciclo la trave di sinistra risulta sollecitata da momenti positivi, mentre la destra da momenti negativi, coerentemente con quanto indicato nelle figg. 15 e 17.

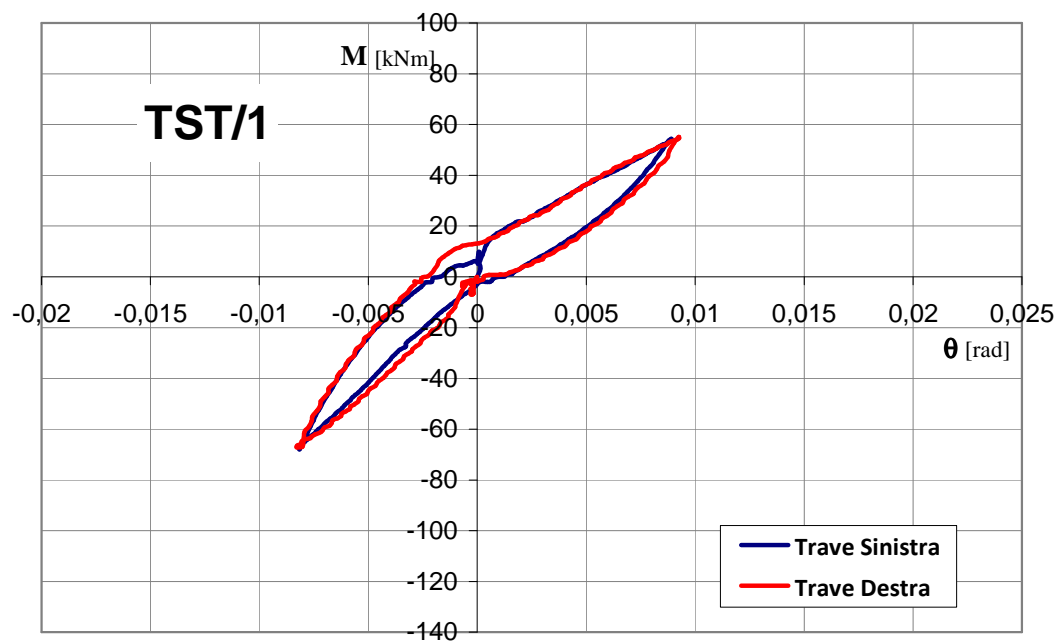


Figura 18 - Prima fase delle prove: diagrammi momento-rotazione per il campione TST/1, armatura minima

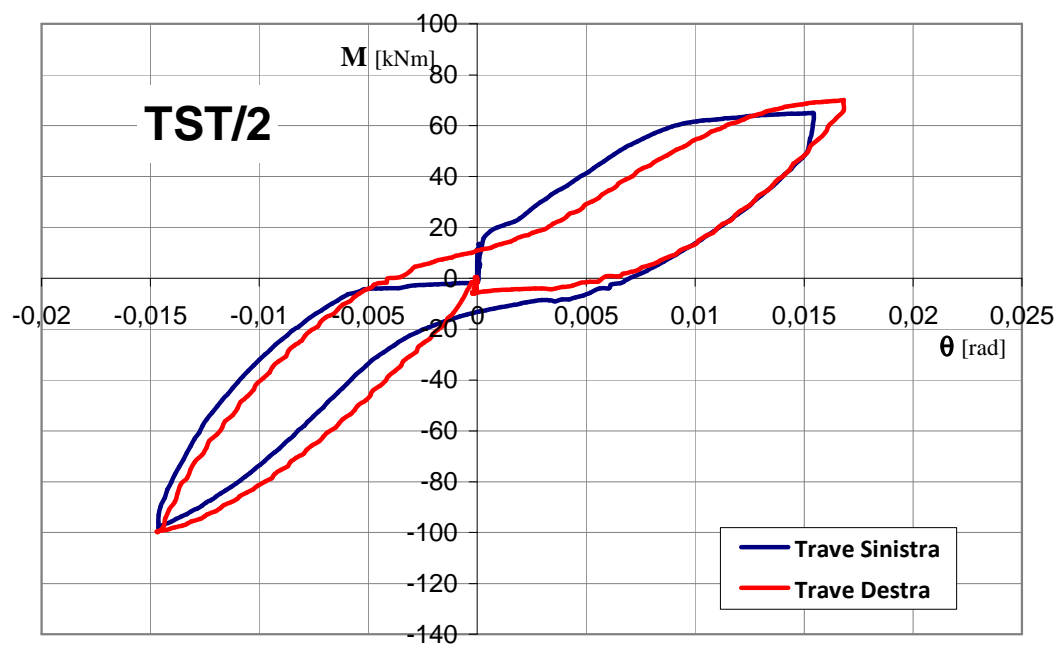


Figura 19 - Prima fase delle prove: diagrammi momento-rotazione per il campione TST/2, armatura minima

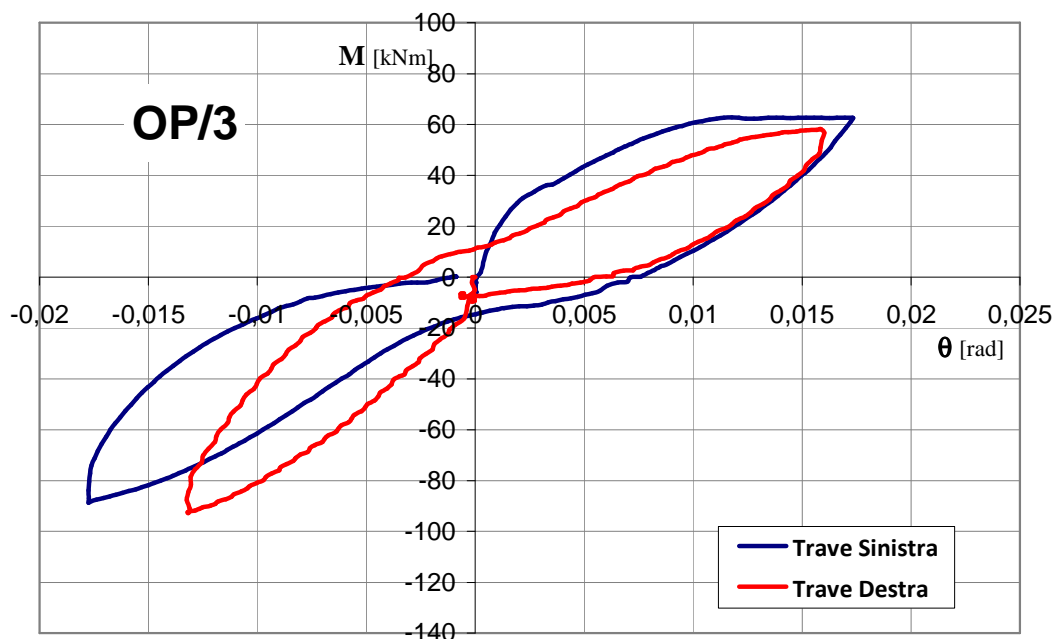


Figura 20 - Prima fase delle prove: diagramma momento-rotazione per il campione OP/3, armatura minima

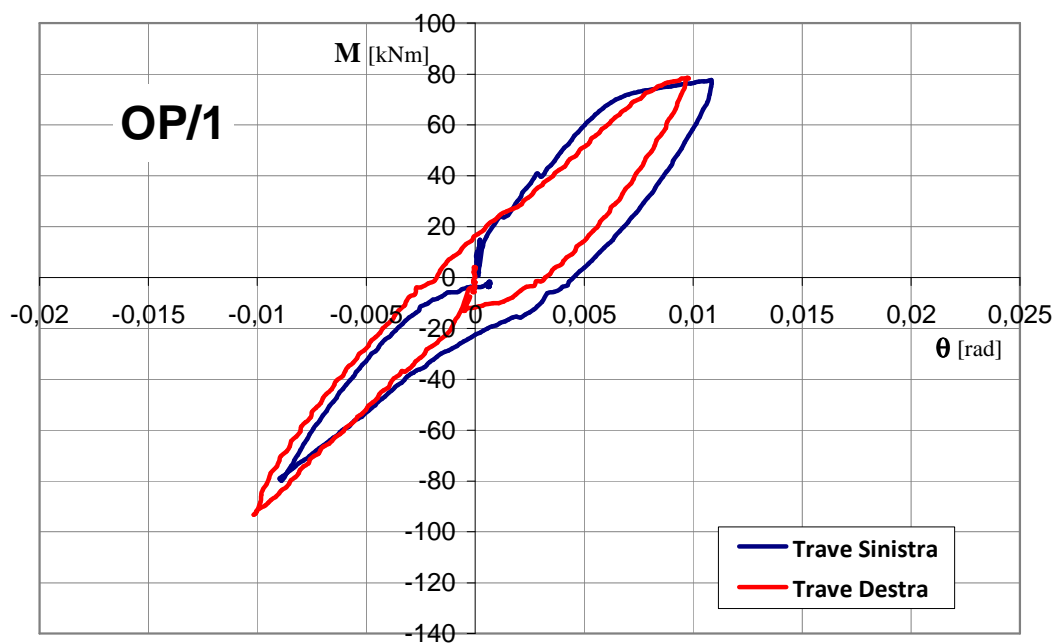


Figura 21 - Prima fase delle prove: diagrammi momento-rotazione per il campione OP/1, armatura minima (copriferro armature inferiori 4,0 cm)

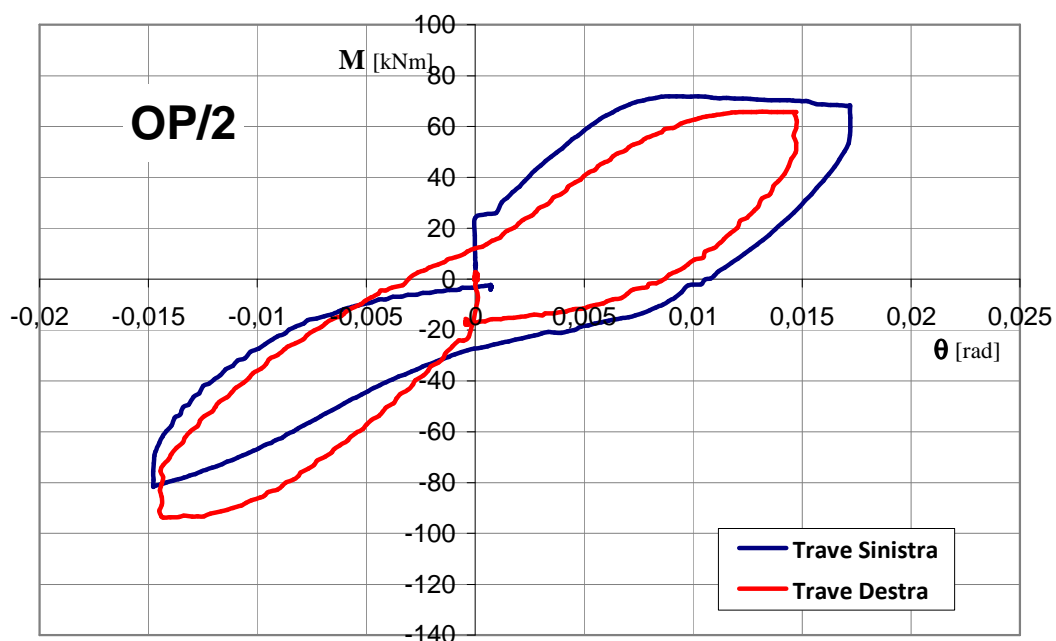


Figura 22 - Prima fase delle prove: diagrammi momento-rotazione per il campione OP/2, armatura minima (copriferro armature inferiori 4,0 cm)

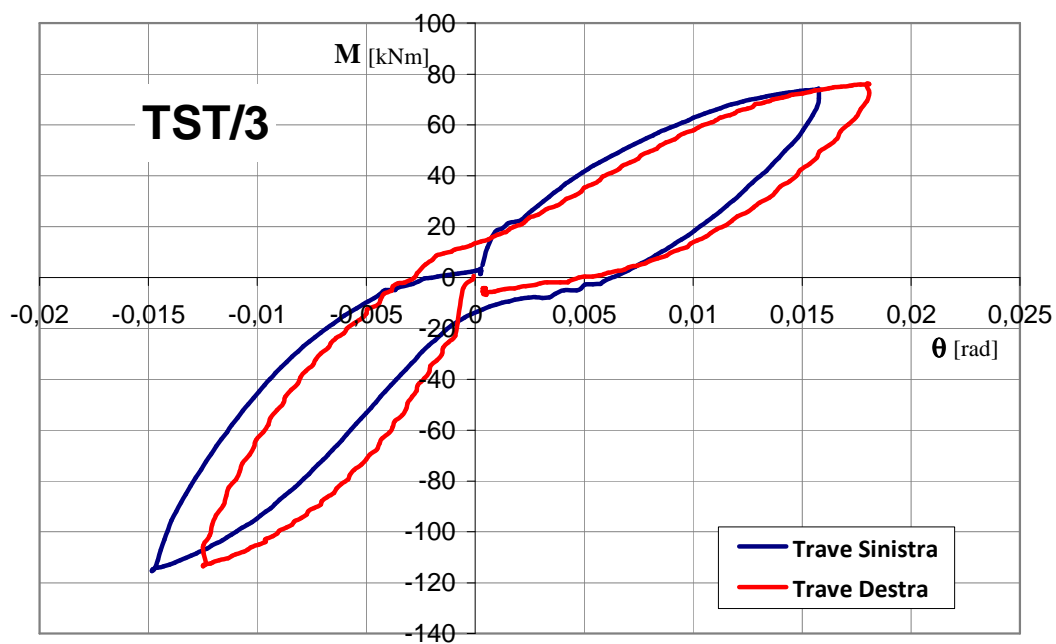


Figura 23 - Prima fase delle prove: diagrammi momento-curvatura per il campione TST/3, armatura massima

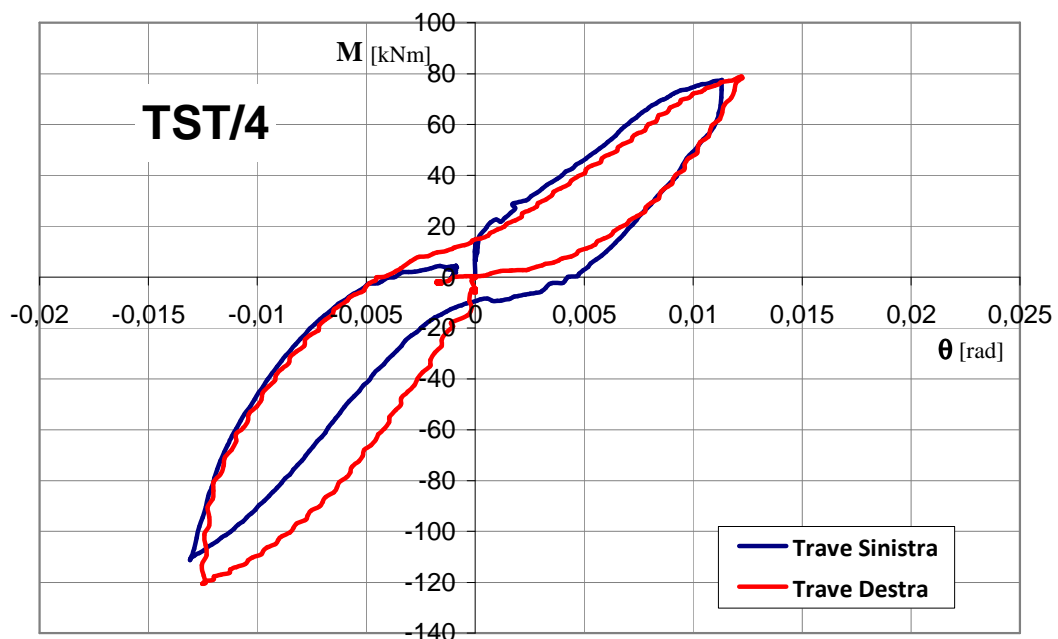


Figura 24 - Prima fase delle prove: diagrammi momento-curvatura per il campione TST/4, armatura massima

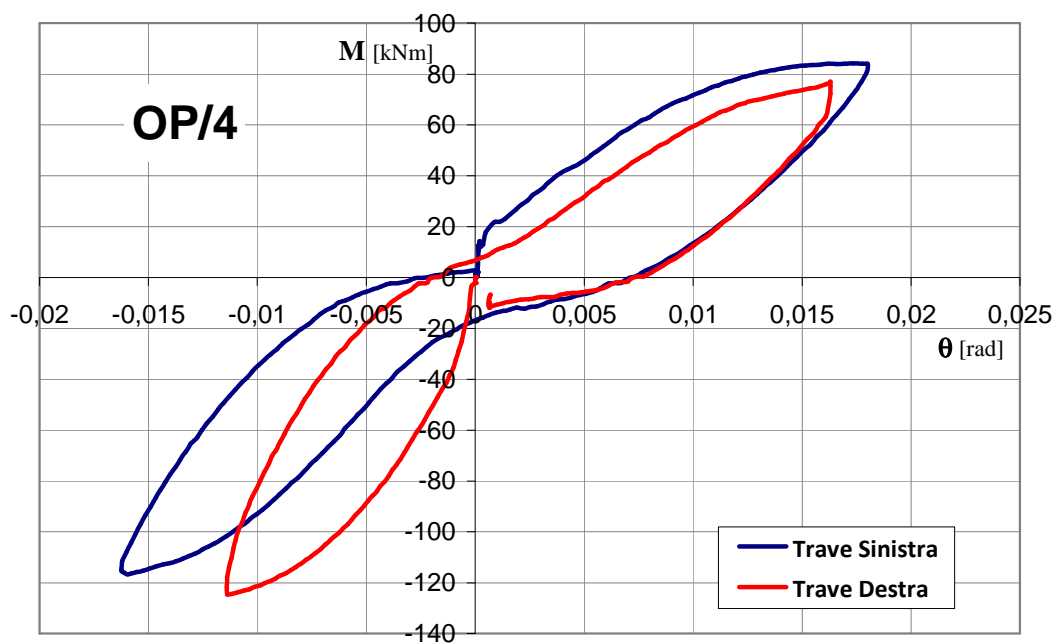


Figura 25 - Prima fase delle prove: diagrammi momento-curvatura per il campione OP/4, armatura massima

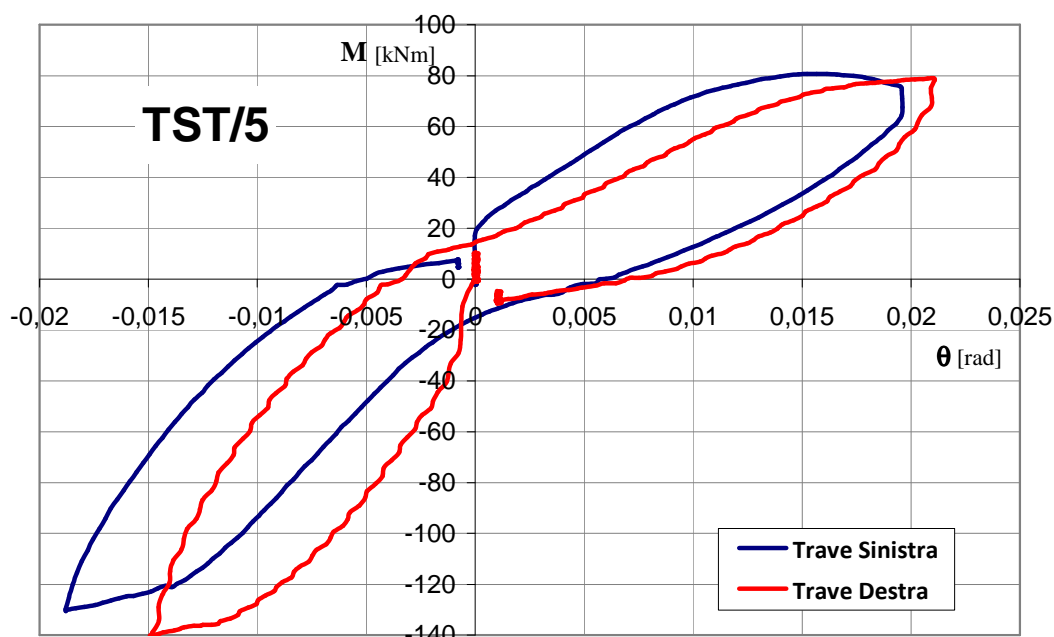


Figura 26 - Prima fase delle prove: diagrammi momento-curvatura per il campione TST/5, armatura massima (pilastro in asse forte)

Si evidenzia che nella prova sul campione TST/1 lo spostamento massimo è stato limitato al valore atteso corrispondente alla plasticizzazione delle travi, di fatto di poco inferiore a quello effettivo, come risultato dalle fasi successive della prova.

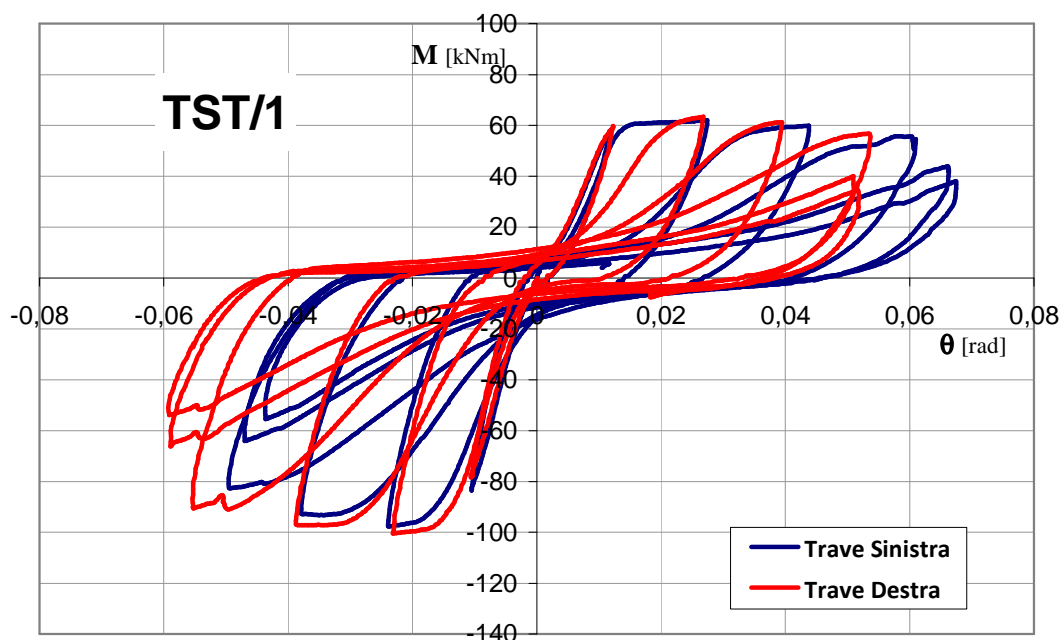


Figura 27 - Prove cicliche: diagrammi momento-curvatura per il campione TST/1, armatura minima

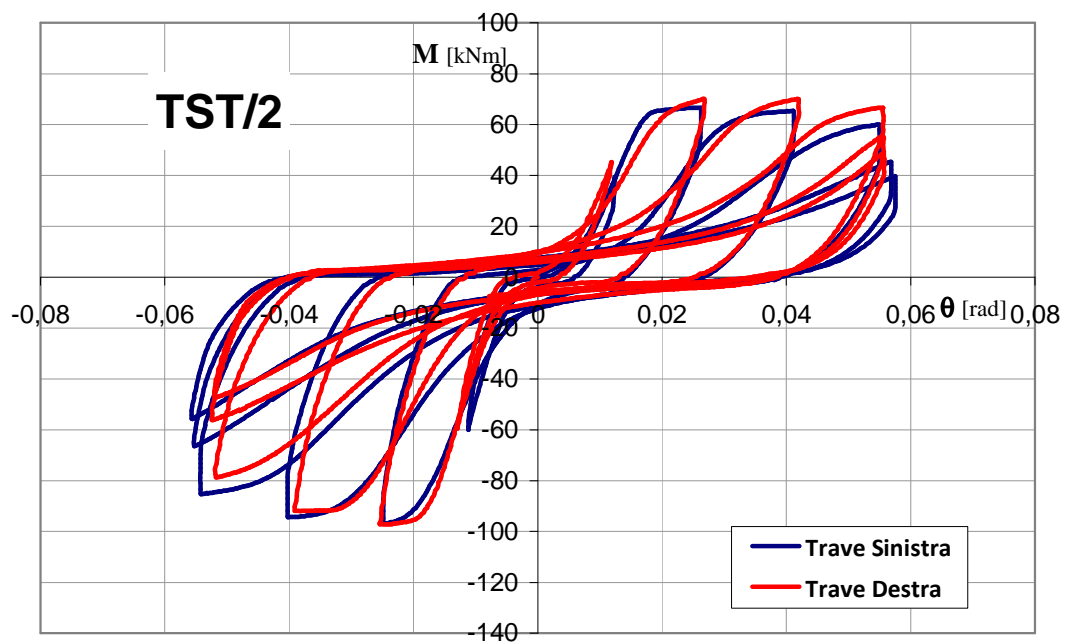


Figura 28 - Prove cicliche: diagrammi momento-curvatura per il campione TST/2, armatura minima

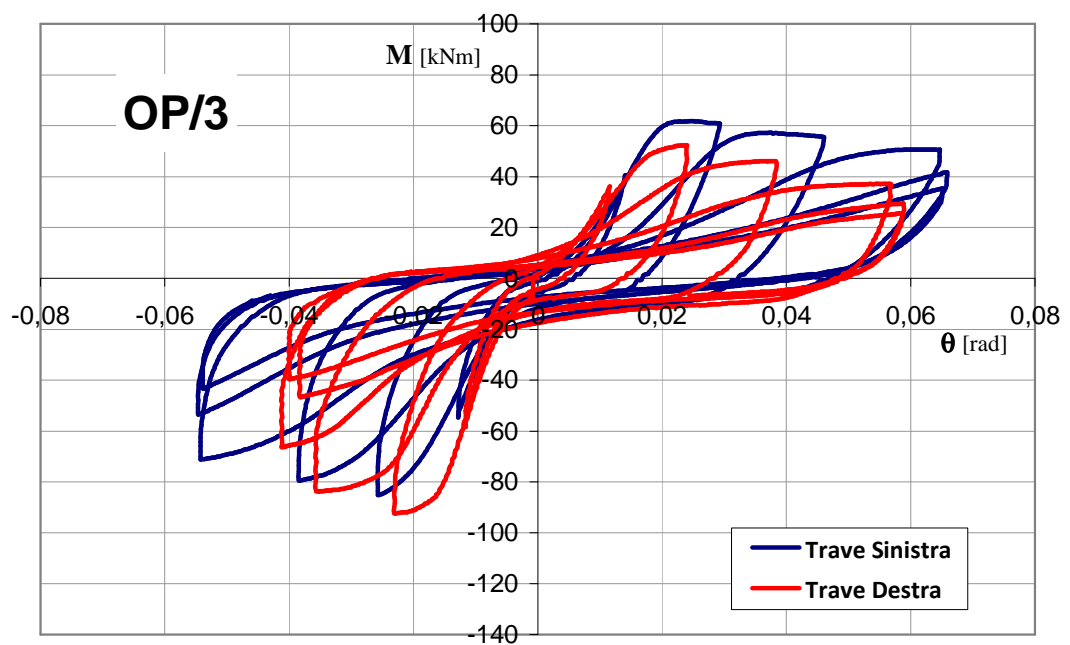


Figura 29 - Prove cicliche: diagrammi momento-curvatura per il campione OP/3, armatura minima

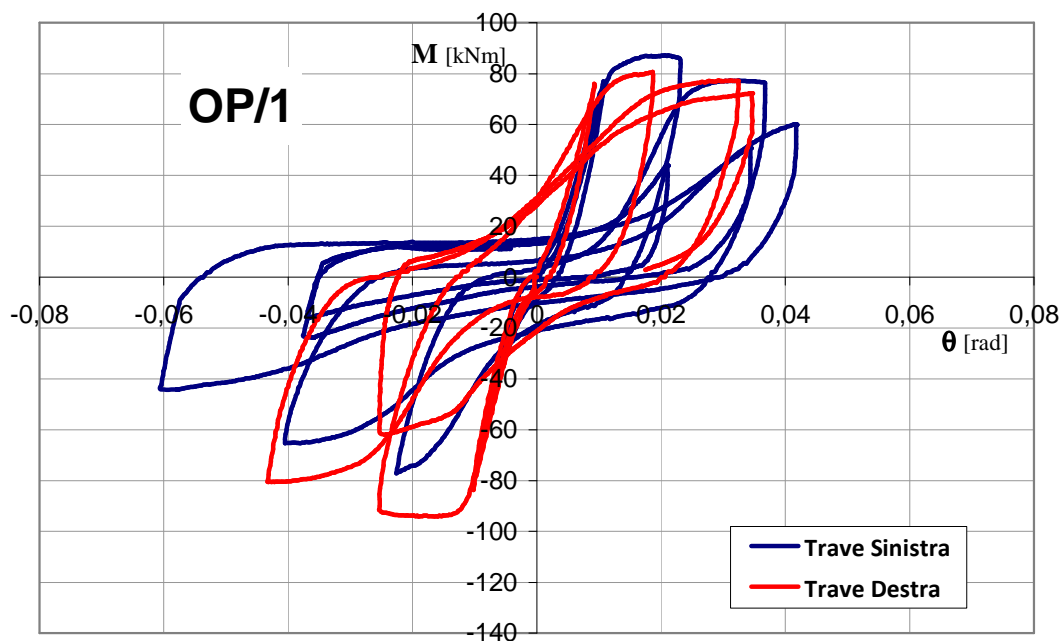


Figura 30 - Prove cicliche: diagrammi momento-curvatura per il campione OP/1¹, armatura minima (copriferro armature inferiori 4,0 cm)

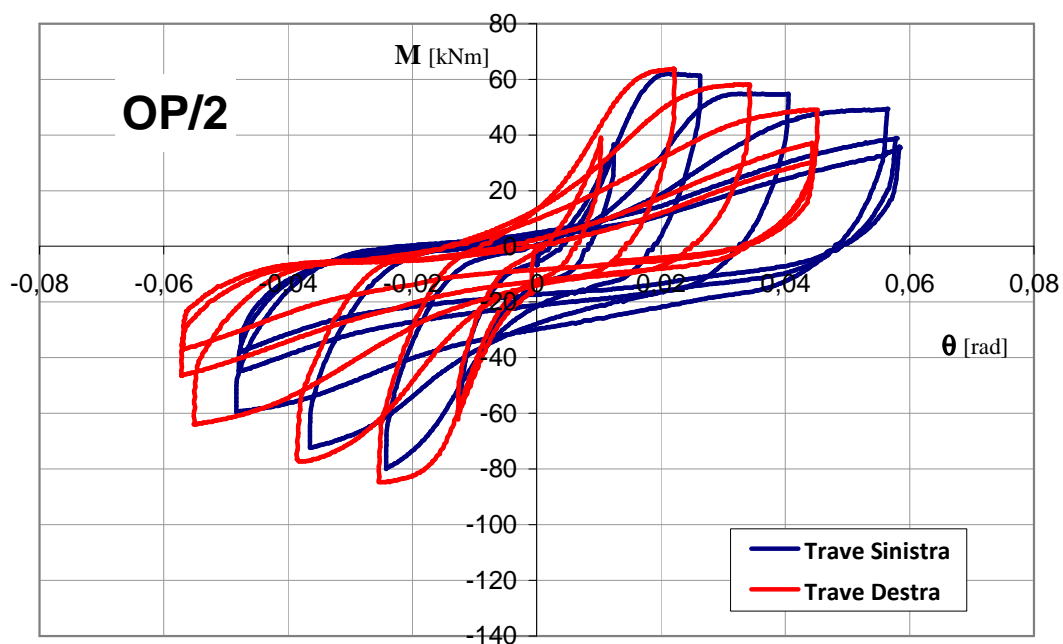


Figura 31 - Prove cicliche: diagrammi momento-curvatura per il campione OP/2, armatura minima (copriferro armature inferiori 4,0 cm)

¹ Si osserva che i diagrammi della prova ciclica del campione OP/1 sono incompleti a causa del distacco dei dispositivi di supporto dei trasduttori di spostamento utilizzati.

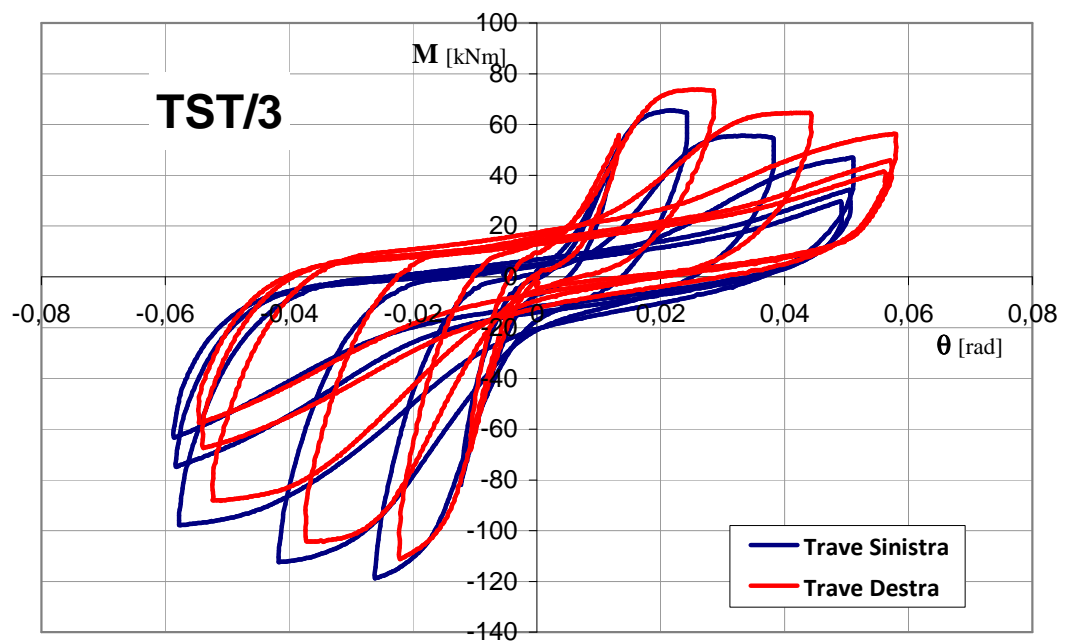


Figura 32 - Prove cicliche: diagrammi momento-curvatura per il campione TST/3, armatura massima

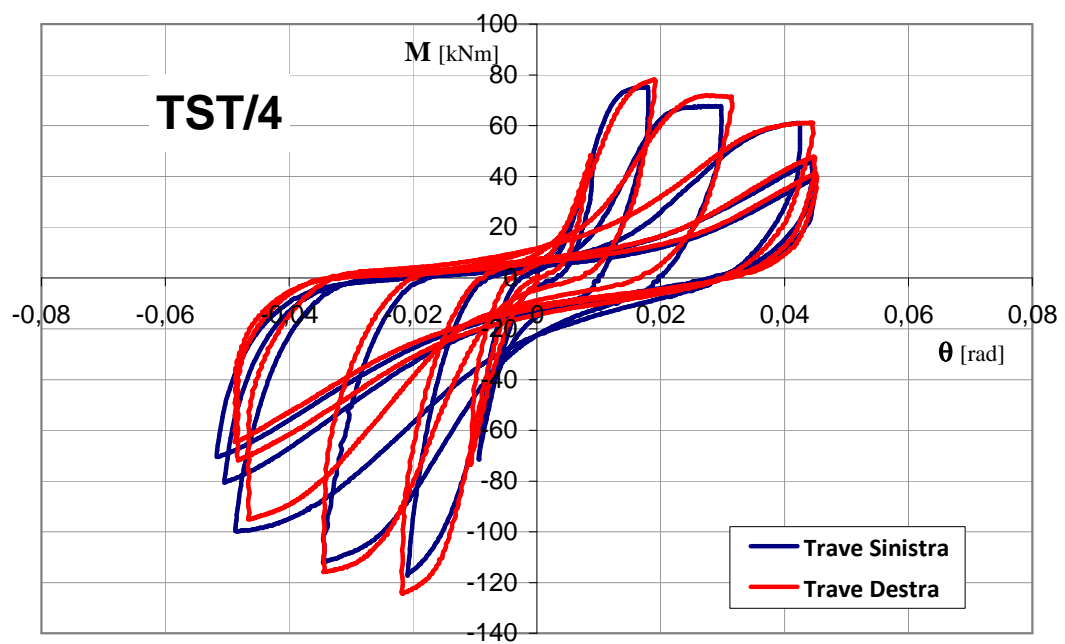


Figura 33 - Prove cicliche: diagrammi momento-curvatura per il campione TST/4, armatura massima

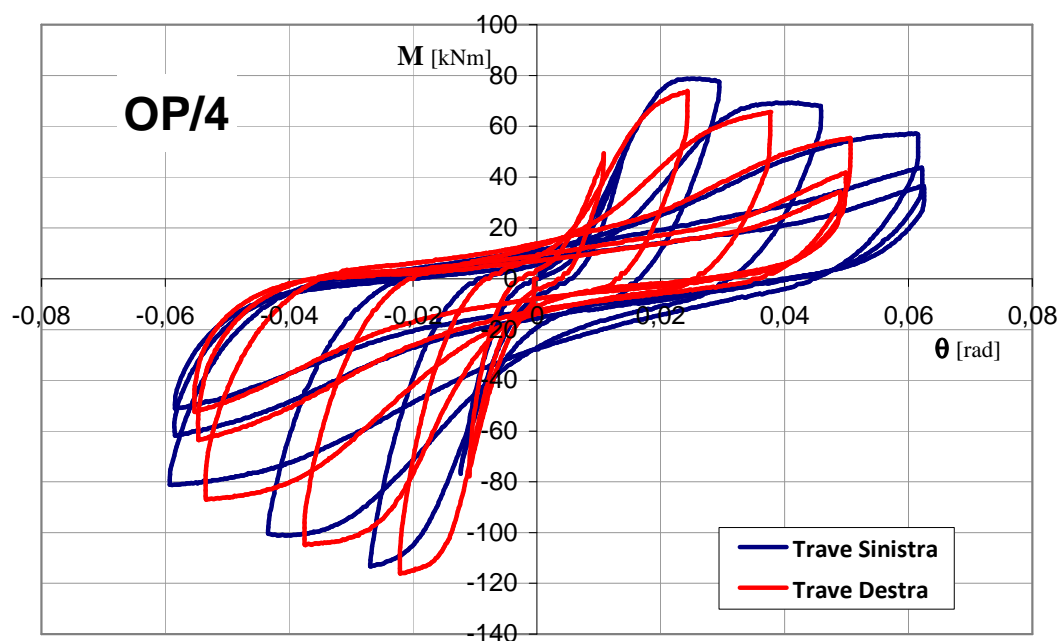


Figura 34 - Prove cicliche: diagrammi momento-curvatura per il campione OP/4, armatura massima

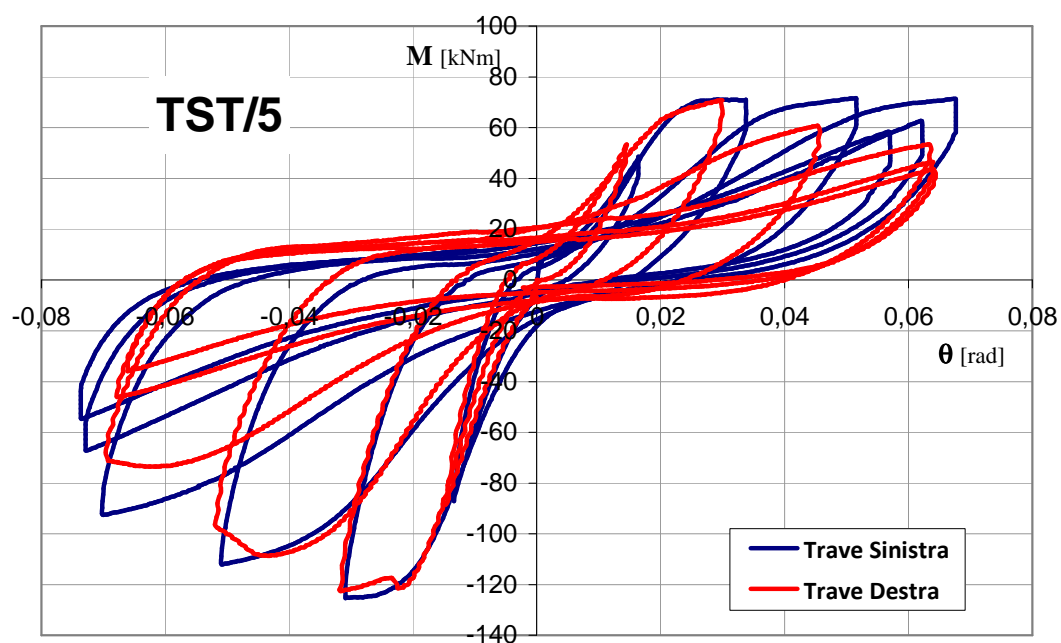
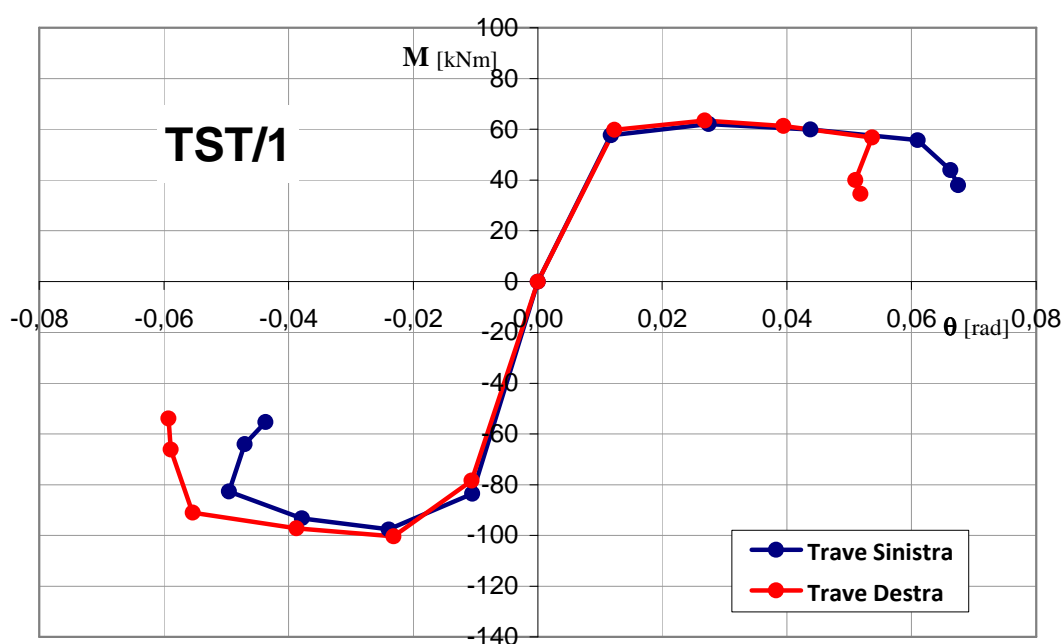


Figura 35 - Prove cicliche: diagrammi momento-curvatura per il campione TST/5, armatura massima (pilastro in asse forte)

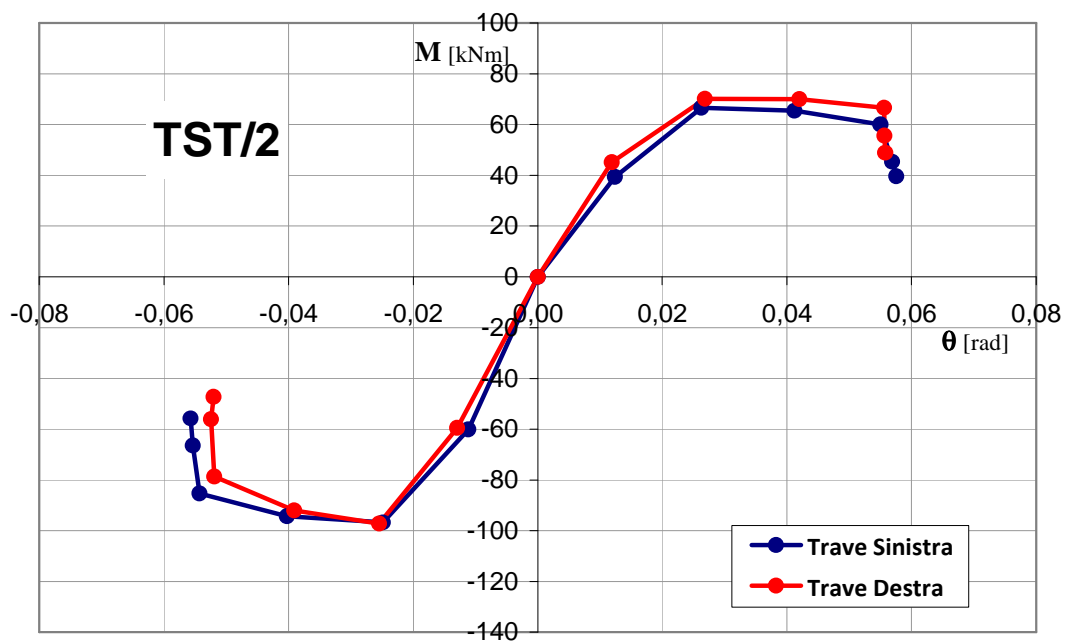
5.2 Risultati in termini di curve involuppo dei massimi

I diagrammi che seguono riportano i valori massimi e minimi attinti in ciascun ciclo della seconda fase di prova, dei momenti flettenti e delle corrispondenti rotazioni, valutati nelle sezioni delle travi all'attacco con i pilastri. Per ciascun diagramma è anche riportata la tabella contenente i valori delle grandezze diagrammate, unitamente al rapporto percentuale tra il valore del momento flettente massimo (o minimo) di ciascun ciclo rispetto al corrispondente valore attinto nel primo ciclo di carico.



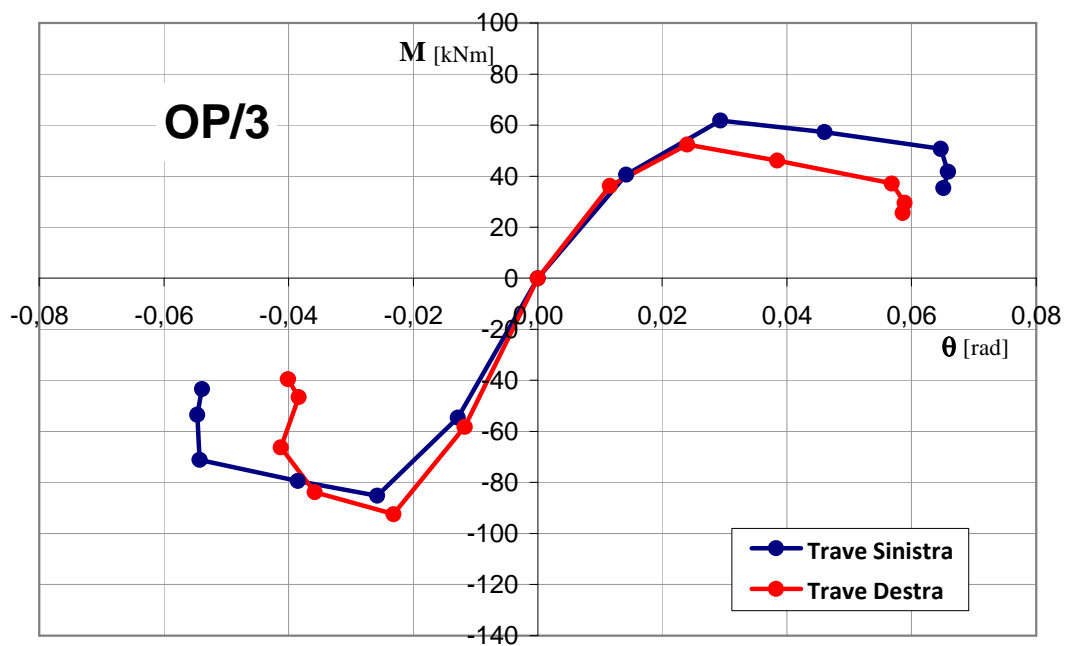
TST/1		Massimi			Minimi		
		θ [rad*10 ⁻²]	M [kN m]	% rif 1° ciclo	θ [rad*10 ⁻²]	M [kN m]	% rif 1° ciclo
Trave sinistra	1° ciclo	1,18	58	100%	-1,05	-84	100%
	2° ciclo	2,74	62	108%	-2,39	-98	117%
	3° ciclo	4,38	60	104%	-3,79	-93	112%
	4° ciclo	6,10	56	97%	-4,96	-83	99%
	5° ciclo	6,63	44	76%	-4,70	-64	77%
	6° ciclo	6,75	38	66%	-4,37	-55	66%
Trave destra	1° ciclo	1,23	60	100%	-1,06	-78	100%
	2° ciclo	2,68	63	106%	-2,32	-100	128%
	3° ciclo	3,95	61	103%	-3,87	-97	124%
	4° ciclo	5,37	57	95%	-5,54	-91	116%
	5° ciclo	5,10	40	67%	-5,89	-66	84%
	6° ciclo	5,18	35	58%	-5,93	-54	69%

Figura 36 - Prove cicliche: curve involuppo dei massimi per il campione TST/1, armatura minima



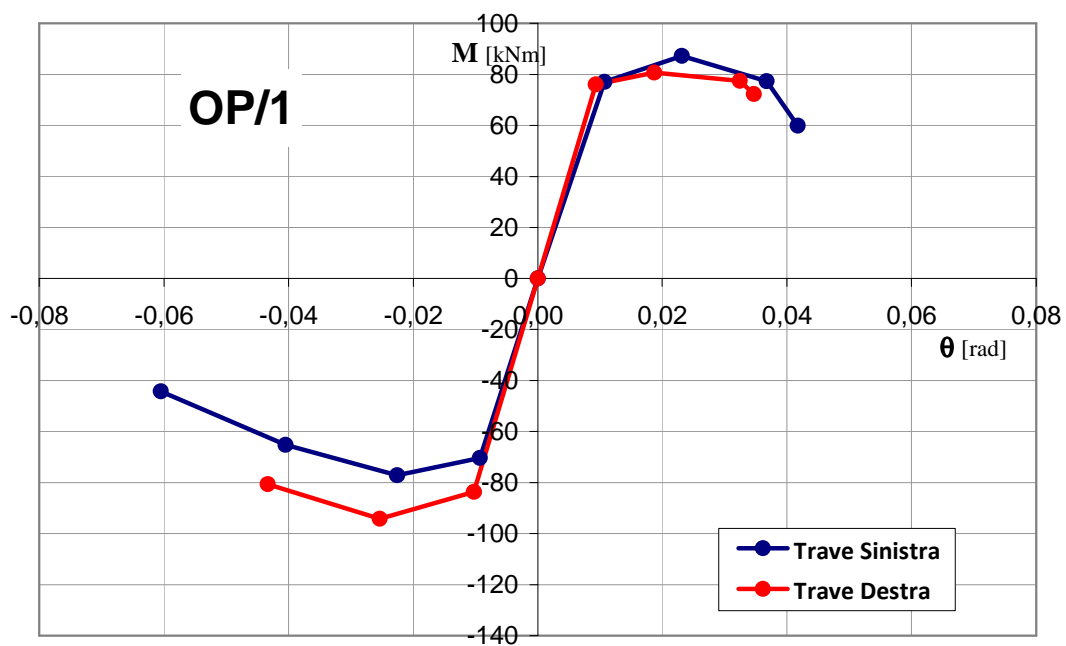
TST/2		Massimi			Minimi		
		θ [rad*10 ⁻²]	M [kN m]	% rif 1° ciclo	θ [rad*10 ⁻²]	M [kN m]	% rif 1° ciclo
Trave sinistra	1° ciclo	1,24	39	100%	-1,12	-60	100%
	2° ciclo	2,63	67	169%	-2,49	-97	161%
	3° ciclo	4,12	65	166%	-4,03	-94	157%
	4° ciclo	5,50	60	153%	-5,43	-85	142%
	5° ciclo	5,69	45	115%	-5,53	-67	111%
	6° ciclo	5,76	40	101%	-5,57	-56	93%
Trave destra	1° ciclo	1,19	45	100%	-1,29	-60	100%
	2° ciclo	2,69	70	155%	-2,54	-97	163%
	3° ciclo	4,20	70	155%	-3,91	-92	155%
	4° ciclo	5,56	67	148%	-5,19	-79	132%
	5° ciclo	5,57	56	123%	-5,25	-56	94%
	6° ciclo	5,58	49	108%	-5,21	-47	79%

Figura 37 - Prove cicliche: curve involucro dei massimi per il campione TST/2, armatura minima



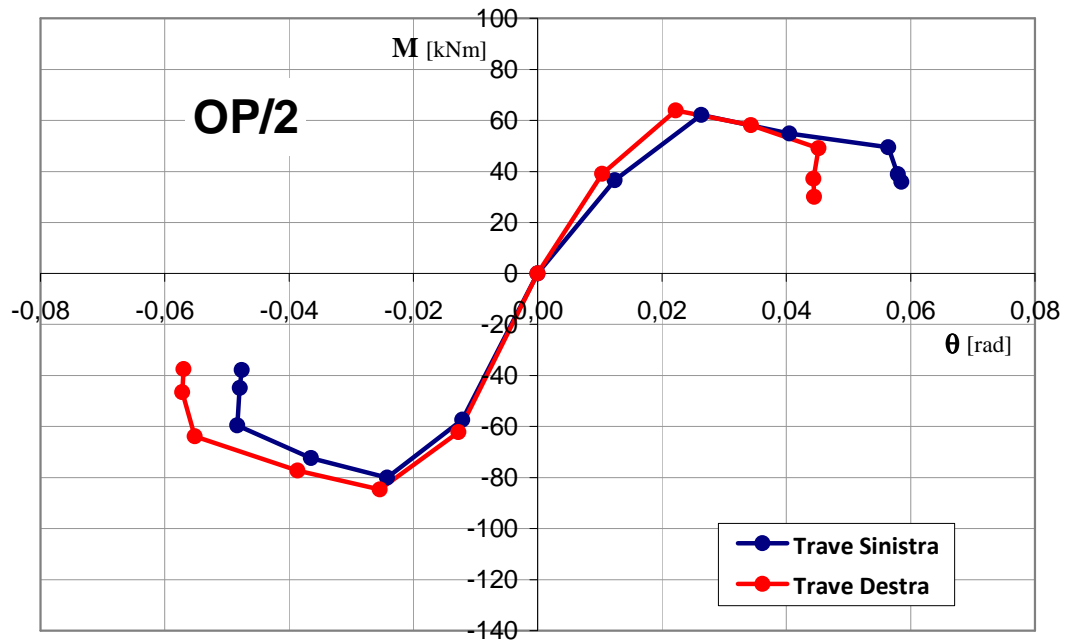
OP/3		Massimi			Minimi		
		θ [rad*10 ⁻²]	M [kN m]	% rif 1° ciclo	θ [rad*10 ⁻²]	M [kN m]	% rif 1° ciclo
Trave sinistra	1° ciclo	1,42	41	100%	-1,28	-55	100%
	2° ciclo	2,93	62	152%	-2,57	-85	156%
	3° ciclo	4,61	57	141%	-3,85	-79	145%
	4° ciclo	6,47	51	125%	-5,43	-71	130%
	5° ciclo	6,59	42	103%	-5,47	-54	98%
	6° ciclo	6,51	35	87%	-5,39	-43	79%
Trave destra	1° ciclo	1,16	36	100%	-1,17	-58	100%
	2° ciclo	2,40	52	145%	-2,31	-92	159%
	3° ciclo	3,84	46	128%	-3,58	-84	144%
	4° ciclo	5,68	37	103%	-4,13	-66	114%
	5° ciclo	5,89	29	82%	-3,84	-47	80%
	6° ciclo	5,86	25	71%	-4,01	-40	68%

Figura 38 - Prove cicliche: curve involucro dei massimi per il campione OP/3, armatura minima



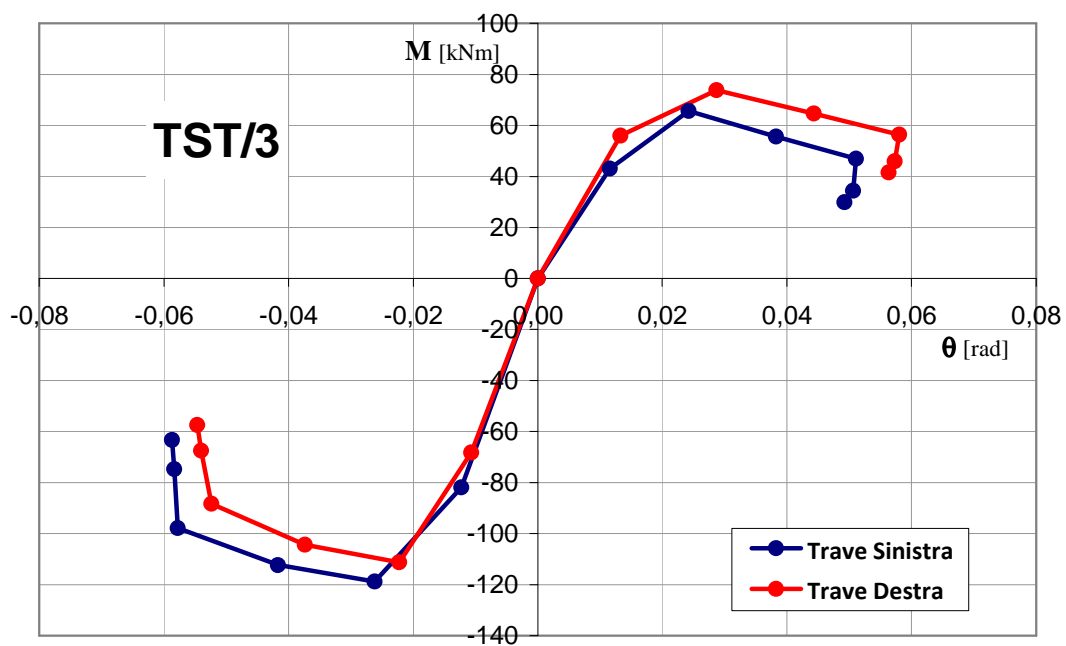
OP/1		Massimi			Minimi		
		θ [rad*10 ⁻²]	M [kN m]	% rif 1° ciclo	θ [rad*10 ⁻²]	M [kN m]	% rif 1° ciclo
Trave sinistra	1° ciclo	1,07	77	100%	-0,93	-70	100%
	2° ciclo	2,31	87	113%	-2,26	-77	110%
	3° ciclo	3,68	77	100%	-4,05	-65	93%
	4° ciclo	4,18	60	78%	-6,05	-44	63%
	5° ciclo	-	-	-	-	-	-
	6° ciclo	-	-	-	-	-	-
Trave destra	1° ciclo	0,93	76	100%	-1,02	-84	100%
	2° ciclo	1,87	81	106%	-2,53	-94	113%
	3° ciclo	3,24	77	102%	-4,33	-81	96%
	4° ciclo	3,47	72	95%	-	-	-
	5° ciclo	-	-	-	-	-	-
	6° ciclo	-	-	-	-	-	-

Figura 39 - Prove cicliche: curve involucro dei massimi per il campione OP/1, armatura minima (copriferro armature inferiori 4,0 cm) (v. nota fig. 30)



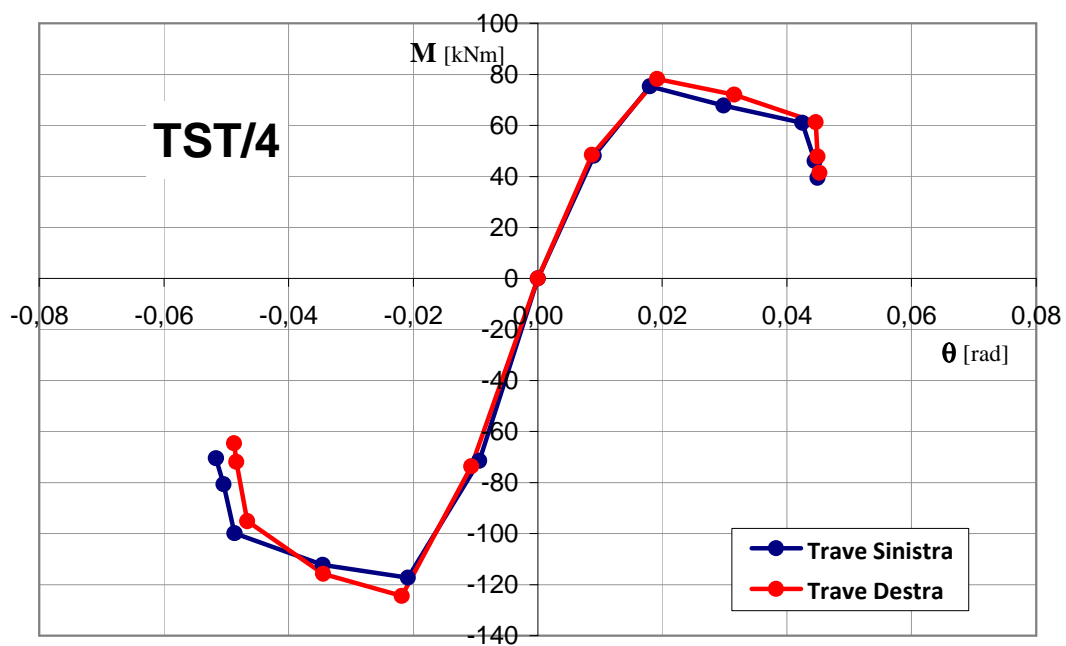
OP/2		Massimi			Minimi		
		θ [rad*10 ⁻²]	M [kN m]	% rif 1° ciclo	θ [rad*10 ⁻²]	M [kN m]	% rif 1° ciclo
Trave sinistra	1° ciclo	1,24	37	100%	-1,21	-57	100%
	2° ciclo	2,63	62	170%	-2,42	-80	140%
	3° ciclo	4,05	55	150%	-3,65	-72	126%
	4° ciclo	5,64	49	135%	-4,83	-60	104%
	5° ciclo	5,79	39	106%	-4,79	-45	78%
	6° ciclo	5,85	36	98%	-4,76	-38	66%
Trave destra	1° ciclo	1,04	39	100%	-1,27	-62	100%
	2° ciclo	2,22	64	164%	-2,54	-85	136%
	3° ciclo	3,43	58	149%	-3,86	-77	124%
	4° ciclo	4,52	49	126%	-5,52	-64	103%
	5° ciclo	4,44	37	95%	-5,72	-47	75%
	6° ciclo	4,45	30	77%	-5,70	-37	60%

Figura 40 - Prove cicliche: curve involuipo dei massimi per il campione OP/2, armatura minima (copriferro armature inferiori 4,0 cm)



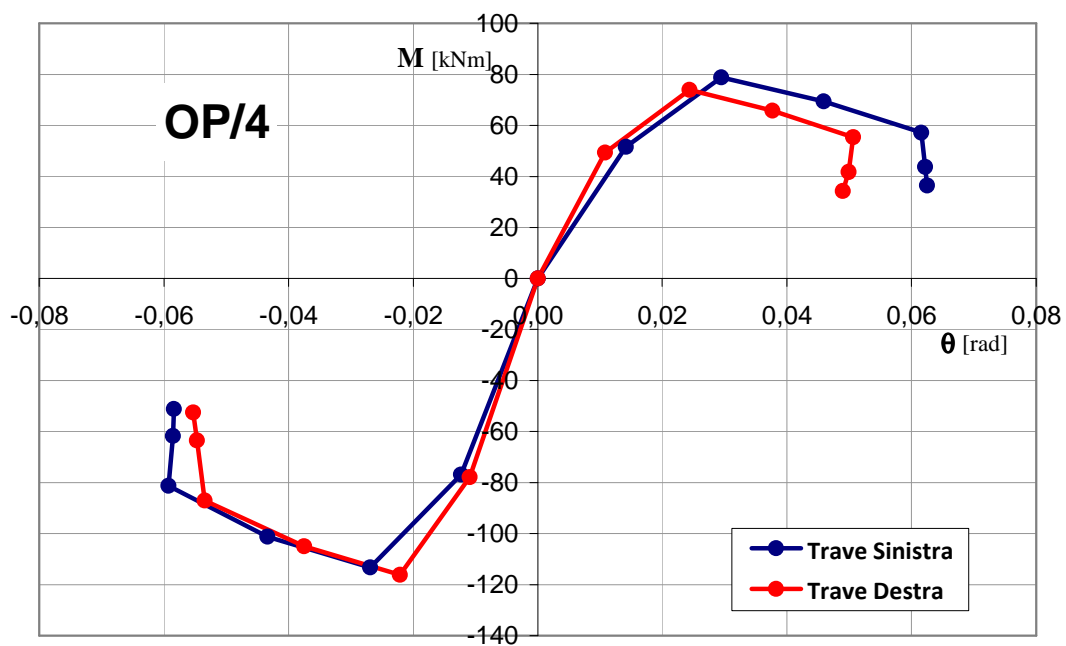
TST/3		Massimi			Minimi		
		θ [rad*10 ⁻²]	M [kN m]	% rif 1° ciclo	θ [rad*10 ⁻²]	M [kN m]	% rif 1° ciclo
Trave sinistra	1° ciclo	1,16	43	100%	-1,23	-82	100%
	2° ciclo	2,43	66	152%	-2,62	-119	145%
	3° ciclo	3,83	56	129%	-4,17	-112	137%
	4° ciclo	5,11	47	109%	-5,78	-98	120%
	5° ciclo	5,07	34	80%	-5,83	-75	91%
	6° ciclo	4,92	30	69%	-5,87	-63	77%
Trave destra	1° ciclo	1,33	56	100%	-1,07	-68	100%
	2° ciclo	2,87	74	132%	-2,22	-111	163%
	3° ciclo	4,43	65	116%	-3,74	-104	153%
	4° ciclo	5,80	56	101%	-5,24	-88	129%
	5° ciclo	5,73	46	82%	-5,40	-67	99%
	6° ciclo	5,63	41	74%	-5,46	-57	84%

Figura 41 - Prove cicliche: curve involucro dei massimi per il campione TST/3, armatura massima



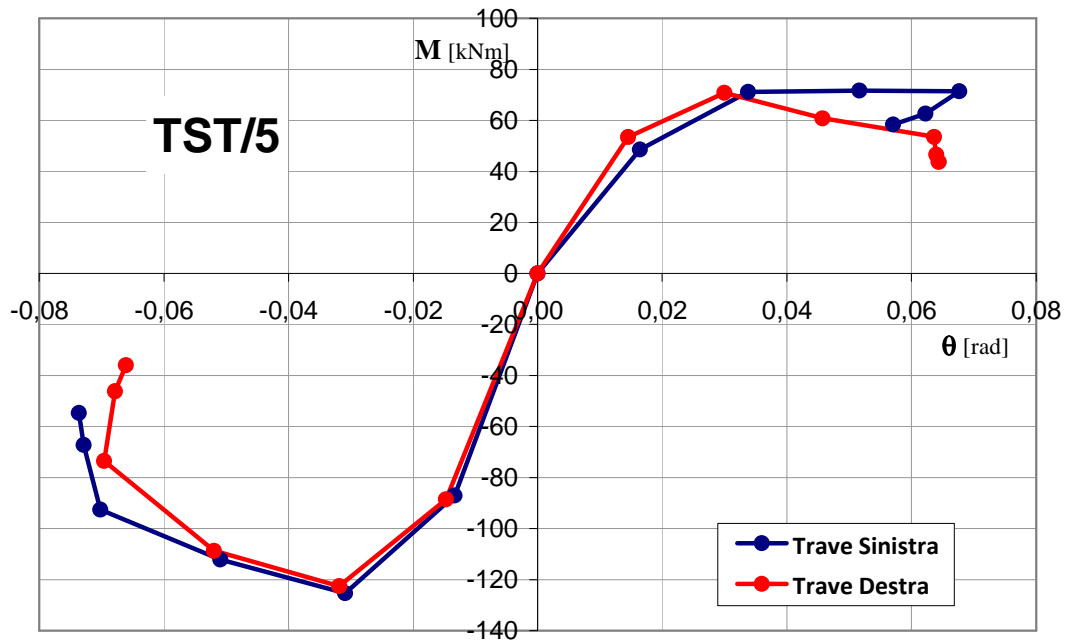
TST/4		Massimi			Minimi		
		θ [rad*10 ⁻²]	M [kN m]	% rif 1° ciclo	θ [rad*10 ⁻²]	M [kN m]	% rif 1° ciclo
Trave sinistra	1° ciclo	0,90	48	100%	-0,94	-71	100%
	2° ciclo	1,80	75	156%	-2,09	-117	164%
	3° ciclo	2,98	68	141%	-3,45	-112	157%
	4° ciclo	4,25	61	127%	-4,87	-100	140%
	5° ciclo	4,45	46	96%	-5,04	-81	113%
	6° ciclo	4,49	39	82%	-5,17	-71	99%
Trave destra	1° ciclo	0,87	48	100%	-1,07	-74	100%
	2° ciclo	1,92	78	161%	-2,18	-124	169%
	3° ciclo	3,15	72	149%	-3,45	-116	157%
	4° ciclo	4,46	61	126%	-4,66	-95	129%
	5° ciclo	4,49	48	99%	-4,84	-72	98%
	6° ciclo	4,52	41	85%	-4,88	-65	88%

Figura 42 - Prove cicliche: curve involucro dei massimi per il campione TST/4, armatura massima



OP/4		Massimi			Minimi		
		θ [rad*10 ⁻²]	M [kN m]	% rif 1° ciclo	θ [rad*10 ⁻²]	M [kN m]	% rif 1° ciclo
Trave sinistra	1° ciclo	1,42	51	100%	-1,23	-77	100%
	2° ciclo	2,95	79	153%	-2,69	-113	147%
	3° ciclo	4,59	69	135%	-4,34	-101	132%
	4° ciclo	6,16	57	111%	-5,93	-81	106%
	5° ciclo	6,22	44	85%	-5,85	-62	80%
	6° ciclo	6,25	36	71%	-5,84	-51	67%
Trave destra	1° ciclo	1,08	49	100%	-1,09	-78	100%
	2° ciclo	2,44	74	150%	-2,21	-116	149%
	3° ciclo	3,77	66	133%	-3,75	-105	135%
	4° ciclo	5,06	55	112%	-5,35	-87	112%
	5° ciclo	4,99	42	85%	-5,47	-64	82%
	6° ciclo	4,90	34	69%	-5,53	-53	67%

Figura 43 - Prove cicliche: curve inviluppo dei massimi per il campione OP/4, armatura massima

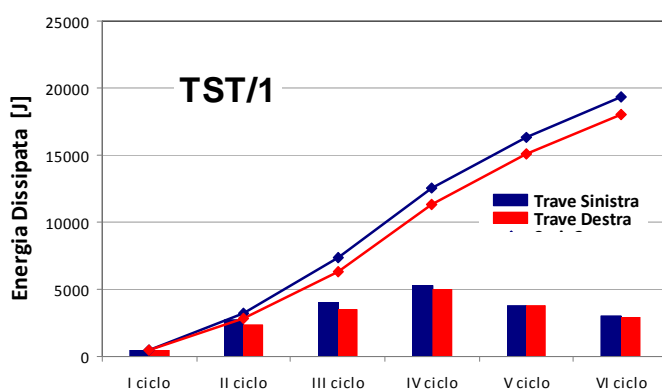


TST/5		Massimi			Minimi		
		θ [rad*10 ⁻²]	M [kN m]	% rif 1° ciclo	θ [rad*10 ⁻²]	M [kN m]	% rif 1° ciclo
Trave sinistra	1° ciclo	1,64	49	100%	-1,33	-87	100%
	2° ciclo	3,38	71	146%	-3,09	-125	144%
	3° ciclo	5,16	72	148%	-5,10	-112	129%
	4° ciclo	6,77	71	147%	-7,02	-93	106%
	5° ciclo	6,22	63	129%	-7,29	-67	77%
	6° ciclo	5,71	58	120%	-7,36	-55	63%
Trave destra	1° ciclo	1,45	53	100%	-1,47	-89	100%
	2° ciclo	3,00	71	133%	-3,19	-123	138%
	3° ciclo	4,57	61	114%	-5,20	-109	123%
	4° ciclo	6,36	53	100%	-6,96	-74	83%
	5° ciclo	6,40	47	87%	-6,79	-46	52%
	6° ciclo	6,44	44	82%	-6,61	-36	41%

Figura 44 - Prove cicliche: curve involucro dei massimi per il campione TST/5, armatura massima (pilastro in asse forte)

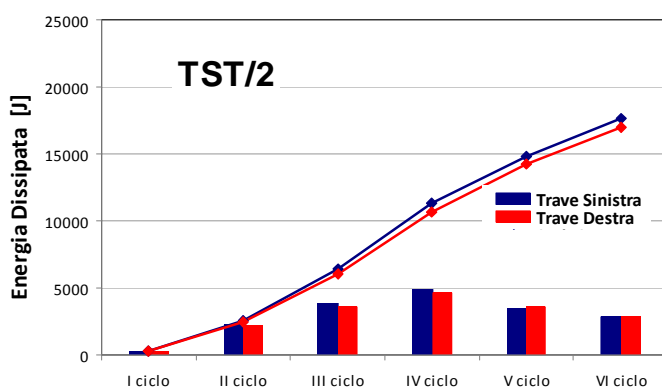
5.3 Risultati in termini di energia dissipata

Dai dati delle prove, in termini di carichi applicati a ciascuna trave e spostamenti, relativi ai nodi, delle sezioni di applicazione dei carichi medesimi, si è valutata l'energia dissipata in ciascun ciclo della seconda fase di prova. I diagrammi riportati nelle figg. 45÷53 illustrano la variazione dell'energia di ciclo per le due travi di ciascun campione e l'energia cumulativa dissipata durante la prova.



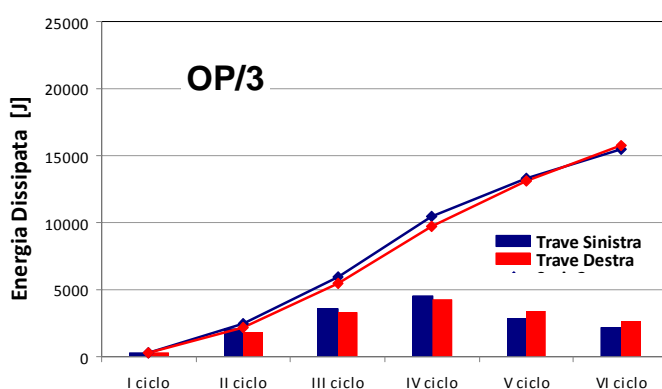
TST/1		Energia per ciclo [J]	Energia Totale [J]
Trave sinistra	1° ciclo	481	481
	2° ciclo	2766	3247
	3° ciclo	4089	7336
	4° ciclo	5242	12579
	5° ciclo	3734	16313
	6° ciclo	3027	19340
Trave destra	1° ciclo	482	482
	2° ciclo	2328	2811
	3° ciclo	3527	6338
	4° ciclo	5029	11367
	5° ciclo	3736	15102
	6° ciclo	2923	18025

Figura 45 - Prove cicliche: energia dissipata per ciclo e cumulativa per il campione TST/1, armatura minima



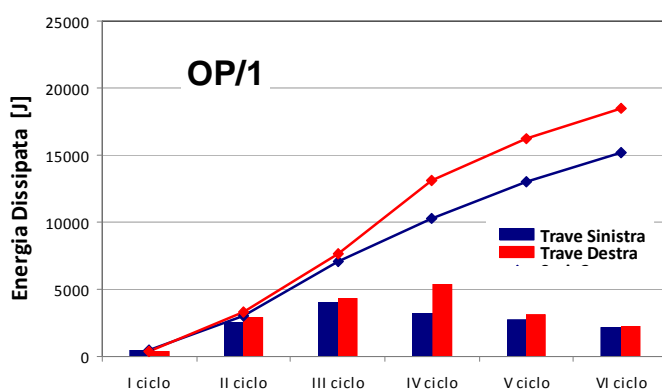
TST/2		Energia per ciclo [J]	Energia Totale [J]
Trave sinistra	1° ciclo	304	304
	2° ciclo	2226	2530
	3° ciclo	3887	6417
	4° ciclo	4888	11305
	5° ciclo	3484	14790
	6° ciclo	2851	17640
Trave destra	1° ciclo	294	294
	2° ciclo	2141	2435
	3° ciclo	3617	6052
	4° ciclo	4599	10651
	5° ciclo	3583	14234
	6° ciclo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

Figura 46 - Prove cicliche: energia dissipata per ciclo e cumulativa per il campione TST/2, armatura minima



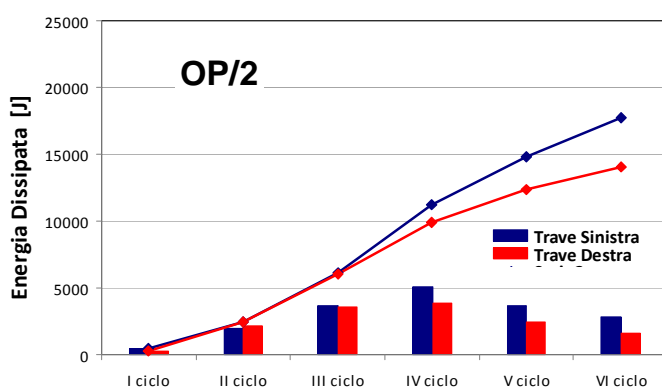
OP/3		Energia per ciclo [J]	Energia Totale [J]
Trave sinistra	1° ciclo	326	326
	2° ciclo	2080	2406
	3° ciclo	3558	5964
	4° ciclo	4539	10503
	5° ciclo	2844	13346
	6° ciclo	2132	15478
Trave destra	1° ciclo	324	324
	2° ciclo	1821	2145
	3° ciclo	3307	5453
	4° ciclo	4259	9712
	5° ciclo	3377	13089
	6° ciclo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

Figura 47 - Prove cicliche: energia dissipata per ciclo e cumulativa per il campione OP/3, armatura minima



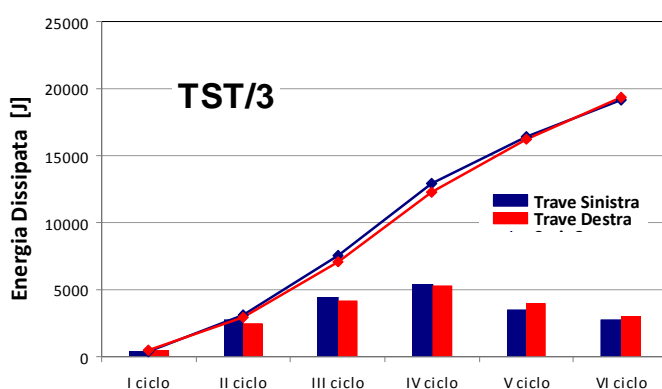
OP/1		Energia per ciclo [J]	Energia Totale [J]
Trave sinistra	1° ciclo	469	469
	2° ciclo	2516	2985
	3° ciclo	4052	7037
	4° ciclo	3236	10273
	5° ciclo	2737	13010
	6° ciclo	2145	15155
Trave destra	1° ciclo	400	400
	2° ciclo	2911	3311
	3° ciclo	4370	7681
	4° ciclo	5386	13067
	5° ciclo	3118	16185
	6° ciclo	2261	18446

Figura 48 - Prove cicliche: energia dissipata per ciclo e cumulativa per il campione OP/1, armatura minima (coprifermo armature inferiori 4,0 cm)



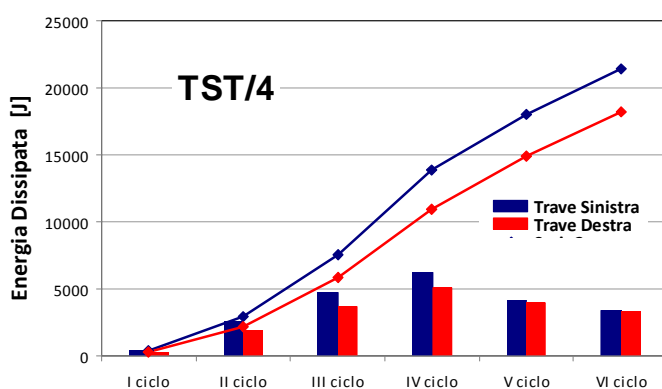
OP/2		Energia per ciclo [J]	Energia Totale [J]
Trave sinistra	1° ciclo	442	442
	2° ciclo	2011	2453
	3° ciclo	3642	6094
	4° ciclo	5102	11196
	5° ciclo	3659	14855
	6° ciclo	2869	17725
Trave destra	1° ciclo	320	320
	2° ciclo	2176	2496
	3° ciclo	3556	6052
	4° ciclo	3884	9937
	5° ciclo	2458	12395
	6° ciclo	1624	14019

Figura 49 - Prove cicliche: energia dissipata per ciclo e cumulativa per il campione OP/2, armatura minima (coprifermo armature inferiori 4,0 cm)



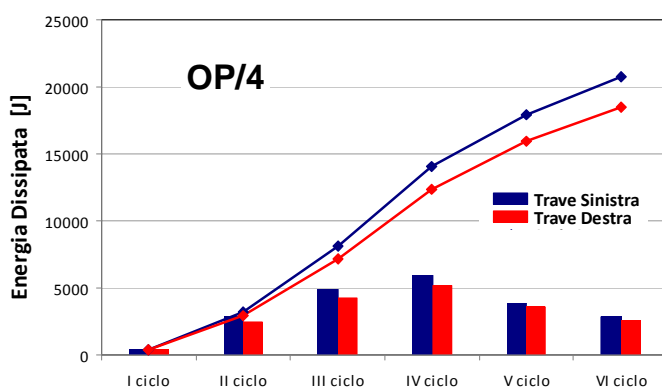
TST/3		Energia per ciclo [J]	Energia Totale [J]
Trave sinistra	1° ciclo	424	424
	2° ciclo	2700	3124
	3° ciclo	4449	7573
	4° ciclo	5351	12923
	5° ciclo	3493	16416
	6° ciclo	2702	19118
Trave destra	1° ciclo	455	455
	2° ciclo	2473	2929
	3° ciclo	4121	7050
	4° ciclo	5255	12305
	5° ciclo	3966	16271
	6° ciclo	3033	19304

Figura 50 - Prove cicliche: energia dissipata per ciclo e cumulativa per il campione TST/3, armatura massima



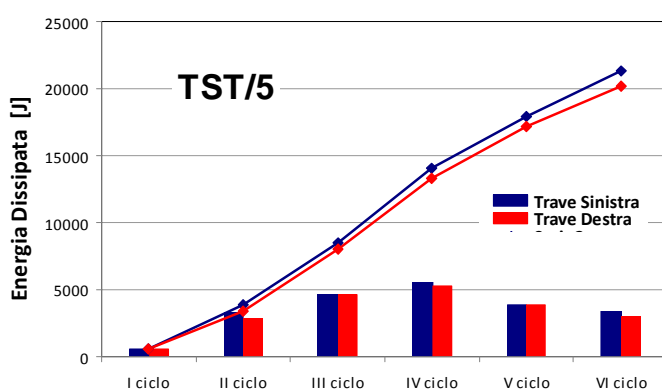
TST/4		Energia per ciclo [J]	Energia Totale [J]
Trave sinistra	1° ciclo	355	355
	2° ciclo	2539	2894
	3° ciclo	4695	7588
	4° ciclo	6238	13826
	5° ciclo	4148	17975
	6° ciclo	3436	21411
Trave destra	1° ciclo	240	240
	2° ciclo	1924	2164
	3° ciclo	3719	5883
	4° ciclo	5064	10947
	5° ciclo	3968	14915
	6° ciclo	3276	18191

Figura 51 - Prove cicliche: energia dissipata per ciclo e cumulativa per il campione TST/4, armatura massima



OP/4		Energia per ciclo [J]	Energia Totale [J]
Trave sinistra	1° ciclo	402	402
	2° ciclo	2832	3234
	3° ciclo	4885	8119
	4° ciclo	5910	14030
	5° ciclo	3863	17893
	6° ciclo	2873	20766
Trave destra	1° ciclo	416	416
	2° ciclo	2497	2913
	3° ciclo	4215	7128
	4° ciclo	5219	12347
	5° ciclo	3592	15939
	6° ciclo	2560	18499

Figura 52 - Prove cicliche: energia dissipata per ciclo e cumulativa per il campione OP/4, armatura massima



TST/5		Energia per ciclo [J]	Energia Totale [J]
Trave sinistra	1° ciclo	577	577
	2° ciclo	3306	3883
	3° ciclo	4635	8518
	4° ciclo	5555	14073
	5° ciclo	3849	17921
	6° ciclo	3383	21304
Trave destra	1° ciclo	540	540
	2° ciclo	2819	3359
	3° ciclo	4645	8004
	4° ciclo	5277	13281
	5° ciclo	3843	17124
	6° ciclo	3050	20174

Figura 53 - Prove cicliche: energia dissipata per ciclo e cumulativa per il campione TST/5, armatura massima (pilastro in asse forte)

5.4 Modalità di crisi osservate

Nelle seguenti figure 54÷57 sono riportate le immagini più rappresentative delle varie fasi di prova, per alcuni dei campioni testati.

Più in particolare, nelle figure 54 e 55 è illustrato il dettaglio del nodo del campione TST/4 al termine del primo e del secondo semiciclo della prima fase di prova.

Nella figura 56 sono riportate alcune viste del nodo del campione TST/3, che ne evidenziano il danneggiamento al progredire dei cicli della seconda fase della prova.

Nella figura 57, infine, sono raccolte le immagini dei nodi al termine delle prove cicliche.

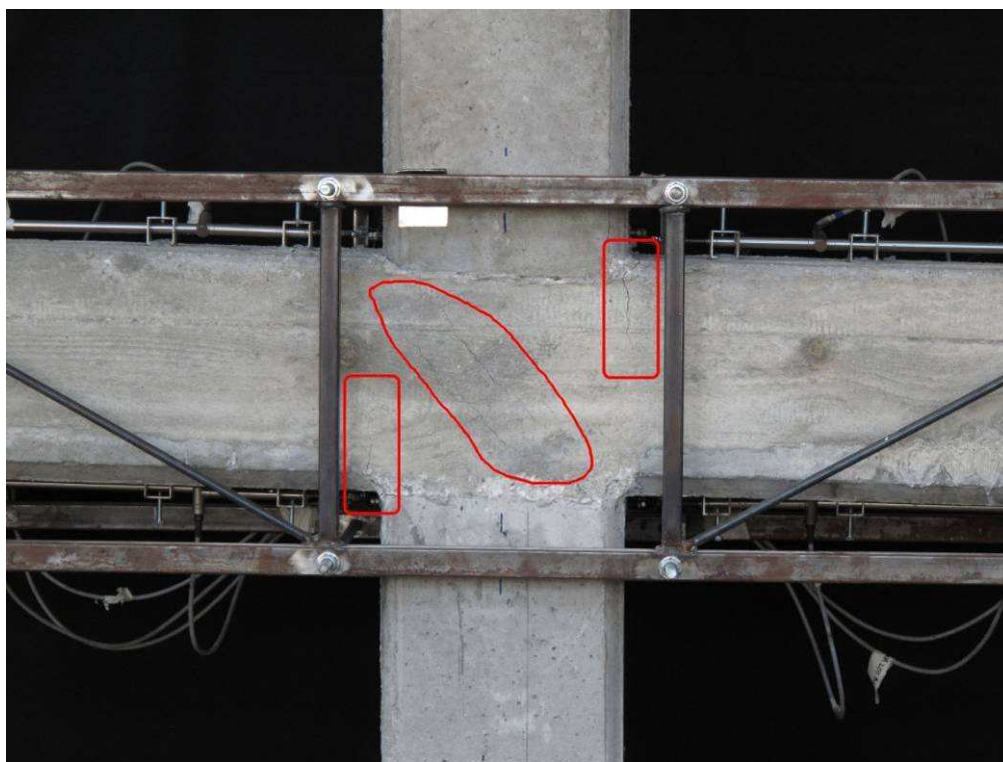


Figura 54 - Campione TST/4 – Particolare del nodo al termine del primo semiciclo della prima fase di prova.

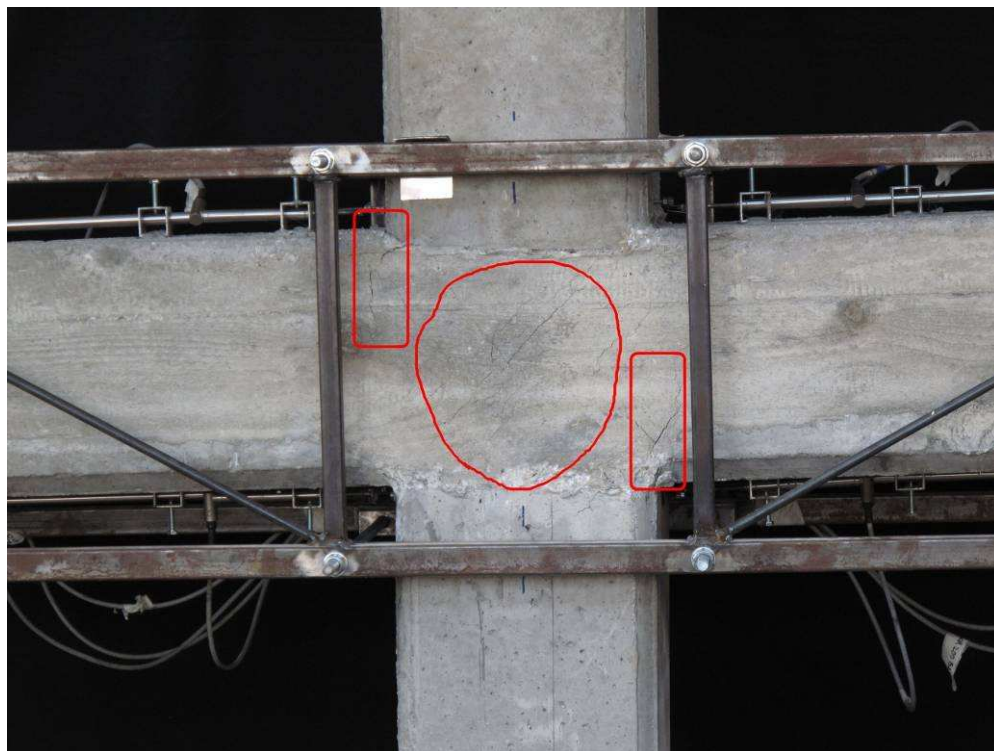


Figura 55 - Campione TST/4 – Particolare del nodo al termine del secondo semiciclo della prima fase di prova.

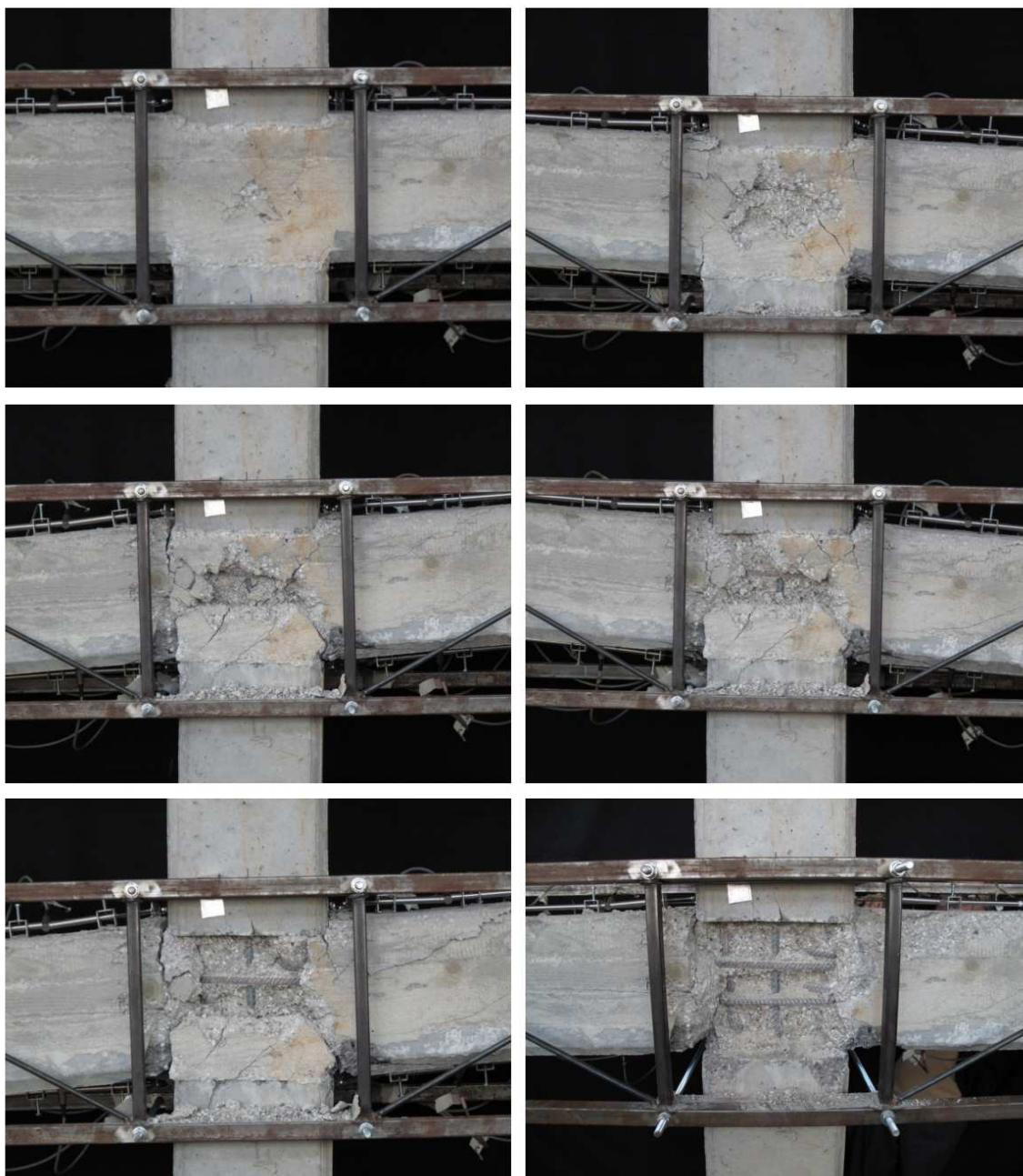


Figura 56 - Campione TST/3 – Particolare del nodo ripreso durante la seconda fase di prova, sotto carichi ciclici: progressivo danneggiamento del nodo.



TST/1



TST/2



OP/3



OP/1



OP/2



TST/3



TST/4



OP/4



TST/5

Figura 57 – Particolari dei nodi al termine delle prove

Dall'esame delle immagini sopra riportate, nonché dei diagrammi relativi alle curve momento – rotazione registrate per le sezioni di incastro delle travi ai pilastri, si osserva che per tutti i campioni la successione dei fenomeni di degrado è stata caratterizzata dalle fasi seguenti:

- plasticizzazione delle sezioni di incastro delle travi al filo con il pilastro, al termine della prima fase di prova (fatta eccezione per il campione TST/1, come più sopra accennato);
- nelle fasi successive, durante l'applicazione dei carichi ciclici, progressivo danneggiamento della zona delle travi interessata dalle cerniere plastiche e del nodo;
- tutte le prove sono state protratte fino alla esecuzione del terzo dei cicli previsti di ampiezza costante pari a $q=4,0$ volte la deformazione corrispondente alla prima plasticizzazione.

In tutti i campioni nelle zone critiche dei pilastri non si sono manifestati fenomeni di danneggiamento, a conferma del rispetto dei previsti meccanismi di collasso, caratterizzati da sovra resistenza dei pilastri rispetto alle travi.

6 CONCLUSIONI

Al fine di verificare le prestazioni del sottoinsieme strutturale di telai in cemento armato, costituito dal nodo trave-pilastro a quattro vie realizzato con elementi prefabbricati secondo il Sistema K prodotti da Toscana Soltravi s.r.l. di Pisa, ed accertare l'affidabilità dell'applicazione dei modelli di calcolo impiegati usualmente nelle verifiche di analoghe strutture gettate in opera, è stata condotta una campagna di prove sperimentali su n. 9 campioni al vero costituiti da nodi trave-pilastro, dei quali n. 5 realizzati con elementi prefabbricati e n. 4 campioni interamente gettati in opera.

Le prove sono consistite in due fasi successive: nella prima fase si sono imposti spostamenti alle sezioni di estremità delle travi tali da indurre la formazione di cerniere plastiche nelle sezioni di attacco delle travi ai pilastri; nella seconda fase i campioni sono stati sottoposti a cicli di spostamenti di ampiezza crescente fino al valore pari a $q=3,5$ volte quello di prima plasticizzazione, ed ulteriori tre cicli di ampiezza costante e pari a $q=4,0$.

I risultati delle prove, dettagliatamente illustrati in precedenza sono stati elaborati in termini di:

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

In tutti i campioni provati la crisi è intervenuta per plasticizzazione delle sezioni di incastro delle travi al pilastro, e la seconda fase (ciclica) delle prove è stata protratta fino alla esecuzione del terzo dei cicli previsti di ampiezza costante pari a $q=4,0$ volte la deformazione corrispondente alla prima plasticizzazione, così come previsto dalle vigenti

Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008, paragrafo 7.4.5). In nessun caso il danneggiamento ha riguardato le zone critiche dei pilastri.

Il Responsabile scientifico
prof. ing. Maria Luisa Beconcini

Il Direttore del Dipartimento
prof. ing. Massimo Dringoli

APPENDICE

Risultati delle prove di TRAZIONE (UNI EN 15630-1:2004) eseguite su n° cinquanta-quattro provini ricavati dalle barre di acciaio B450C utilizzate per la confezione dei campioni

N°	Contrassegno	Marchio	Ø [mm]	Sezione [mm ²]	Carico di snervamento [kN]	Carico di rottura [kN]	Tensione di snervamento [N/mm ²]	Tensione di rottura [N/mm ²]	Agt %	Esito prova di piegamento
1	DDT 833 29/04/09	V. Fig.1	6,10	29,21	12,75	17,65	436,5	604,3	10,9	P
2		"	6,10	29,23	11,77	18,63	402,6	637,5	10,7	P
3		"	6,08	28,99	11,77	18,63	405,9	642,7	12,0	P
4	DDT 833 29/04/09	V. Fig.2	8,11	51,64	24,52	30,40	474,8	588,7	10,0	P
5		"	8,11	51,63	25,50	31,38	493,8	607,8	9,7	P
6		"	8,12	51,82	25,50	30,40	492,1	586,7	10,3	P
7	BU 3407 31/03/09	V. Fig.3	11,87	110,75	58,84	73,55	531,3	664,1	8,1	P
8		"	11,84	110,18	57,86	72,57	525,2	658,7	9,1	P
9		"	11,84	110,01	58,84	72,57	534,8	659,6	12,6	P
10	BU 3661 10/04/09	"	13,83	150,29	79,43	98,07	528,5	652,5	11,0	P
11		"	13,81	149,82	78,45	96,11	523,6	641,5	8,8	P
12		"	13,82	150,10	76,49	97,09	509,6	646,8	9,7	P
13	BU 3661 10/04/09	"	15,78	195,55	104,93	124,54	536,6	636,9	11,5	P
14		"	15,78	195,55	103,95	124,54	531,6	636,9	10,4	P
15		"	15,61	191,44	107,87	124,54	563,5	650,6	10,5	P
16	BU 3661 10/04/09	"	17,78	248,35	136,31	158,87	548,9	639,7	10,4	P
17		"	17,72	246,74	130,43	154,95	528,6	628,0	10,5	P
18		"	17,78	248,33	136,31	159,85	548,9	643,7	11,3	P
19	BU 3661 10/04/09	"	19,79	307,50	163,77	200,06	532,6	650,6	9,1	P
20		"	19,79	307,46	163,77	201,04	532,7	653,9	10,8	P
21		"	19,79	307,59	163,77	243,20	532,4	790,7	10,9	P
22	BU 10431 10/11/08	"	21,93	377,86	204,96	243,20	542,4	643,6	9,4	P
23		"	21,93	377,67	203,98	239,28	540,1	633,6	8,7	P
24		"	21,93	377,60	200,06	239,28	529,8	633,7	8,7	P

N°	Contras- segno	Marchio	Ø [mm]	Sezione [mm ²]	Carico di snerva- mento [kN]	Carico di rottura [kN]	Tensione di snerva- mento [N/mm ²]	Tensione di rottura [N/mm ²]	Agt %	Esito prova di piega- mento
25	BU5693	V. Fig. 3	11,82	109,73	56,88	68,25	518,4	622,0	10,1	P
26		"	11,80	109,36	58,25	69,43	532,7	634,9	11,0	P
27		"	11,80	109,36	58,06	67,47	530,9	617,0	9,9	P
28	BU5607	"	13,87	151,09	82,77	97,28	547,8	643,8	10,9	P
29		"	13,89	151,53	83,94	97,67	554,0	644,6	15,2	P
30		"	13,86	150,87	82,77	97,28	548,6	644,8	10,1	P
31	BU6205	"	15,77	195,32	110,82	130,43	567,4	667,8	10,0	P
32		"	15,77	195,32	113,76	132,39	582,4	677,8	10,2	P
33		"	15,78	195,57	110,82	131,41	566,6	671,9	8,6	P
34	BU2183	"	17,76	247,73	134,35	158,87	542,3	641,3	11,0	P
35		"	17,76	247,73	133,37	158,87	538,4	641,3	8,6	P
36		"	17,75	247,45	132,39	157,89	535,0	638,1	11,0	P
37	BU6414	"	11,80	109,36	60,02	71,78	548,8	656,4	10,2	P
38		"	11,78	109,07	61,59	72,18	564,6	661,7	10,2	P
39		"	11,81	109,46	60,41	71,78	551,9	655,8	10,3	P
40	BU6678	"	13,84	150,40	81,20	96,50	539,9	641,6	10,4	P
41		"	13,84	150,35	81,20	96,50	540,1	641,8	10,7	P
42		"	13,84	150,35	80,81	96,50	537,5	641,8	8,4	P
43	BU6033	"	15,74	194,49	106,70	125,92	548,6	647,4	9,6	P
44		"	15,77	195,22	106,70	125,53	546,5	643,0	10,7	P
45		"	15,74	194,49	106,30	125,53	546,6	645,4	9,0	P
46	BU3661	"	17,70	246,12	134,55	158,08	546,7	642,3	12,4	P
47		"	17,69	245,88	134,15	157,69	545,6	641,3	11,7	P
48		"	17,68	245,63	134,55	158,08	547,8	643,6	14,3	P
49	BU6678	"	19,64	302,91	166,71	199,07	550,4	657,2	9,7	P
50		"	19,60	301,81	166,71	199,07	552,4	659,6	12,2	P
51		"	19,71	305,02	165,73	196,53	543,4	644,3	9,8	P
52	BU7045	"	21,65	368,12	202,02	244,19	548,8	663,3	13,4	P
53		"	21,65	368,12	203,98	245,17	554,1	666,0	10,7	P
54		"	21,67	368,79	203,00	244,19	550,4	662,1	10,9	P

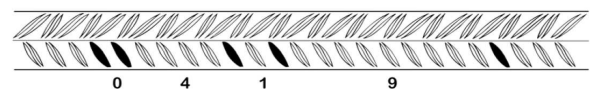
Fig. 1 LA VENETA RETI S.P.A.



Fig. 2 TRAFILERIE NAVE SpA



Fig. 3 FERRIERA VALSABBIA SpA



Risultati delle prove di COMPRESSIONE (UNI EN 12390-3:2003) eseguite su n° ventidue provini di conglomerato cementizio ricavati in fase di getto dei campioni tipo TST prefabbricati

N°	Massa (1) [kg]	Dimensioni			A_c (a x b) [cm ²]	Carico di rottura		Data di prelievo (5)	Posizione di prelievo (5)
		a [cm]	b [cm]	h [cm]		F [kN]	f_c [N/mm ²]		
1	8,00	15,0	14,7	14,8	220,50	1500	68,0	23/06/09	TST/1 pref
2	7,82	15,0	14,7	14,8	220,50	1565	71,0		
3	7,70	15,1	15,0	14,9	226,50	875	38,5	29/06/09	TST/1 opera
4	7,68	15,0	15,0	14,9	225,00	915	40,5		
5	7,75	15,0	15,0	14,8	225,00	1250	55,5	08/06/09	TST/2 pref
6	7,86	15,0	15,0	14,9	225,00	1440	64,0		
7	7,74	15,0	15,0	14,8	225,00	960	42,5	09/06/09	TST/2 opera
8	7,80	15,0	15,0	14,9	225,00	990	44,0		
9	8,10	15,0	15,1	14,8	226,50	1310	58,0	29/09/09	TST/3 trave pref
10	8,06	15,0	15,1	14,8	226,50	1330	58,5		
11	8,08	15,0	15,1	14,8	226,50	1370	60,5	30/09/09	TST/3 pil. pref.
12	8,08	15,0	15,1	14,8	226,50	1350	59,5		
13	7,74	15,0	15,0	14,8	225,00	880	39,0	07/10/09	TST/3 opera
14	7,80	15,0	15,0	14,8	225,00	870	38,5		
15	7,98	15,0	15,0	14,8	225,00	1650	73,5	16/12/09	TST/5 pref
16	8,02	15,1	15,0	14,8	226,50	1615	71,5		
17	7,74	15,1	15,0	14,9	226,50	1145	50,5	22/12/09	TST/5 opera
18	7,78	14,9	15,1	14,8	224,99	1190	53,0		
19	7,90	15,0	15,0	14,9	225,00	1530	68,0	12/10/09	TST/4 pref
20	8,00	15,0	15,0	14,9	225,00	1540	68,4		
21	7,72	15,0	15,0	14,8	225,00	1055	46,9	14/10/09	TST/4 opera
22	7,76	15,0	15,0	14,8	225,00	1160	51,6		

Risultati delle prove di COMPRESSIONE (UNI EN 12390-3:2003) eseguite su n° ventidue provini di conglomerato cementizio ricavati in fase di getto dei campioni tipo OP interamente gettati in opera

N°	Massa (1) [kg]	Dimensioni			A_c (a x b) [cm ²]	Carico di rottura		Data di prelievo (5)	Posizione di prelievo (5)
		a [cm]	b [cm]	h [cm]		F [kN]	f_c [N/mm ²]		
1	7,50	14,9	14,9	14,6	222,01	745	33,5	23/07/09	OP/1 pil inferiore
2	7,46	14,8	15,0	14,5	222,00	725	32,5		
3	7,58	14,9	15,0	14,6	223,50	955	42,5	24/07/09	OP/1 trave
4	7,64	15,1	15,0	14,6	226,50	950	42,0		
5	7,60	15,0	14,9	14,6	223,50	835	37,5	28/07/09	OP/1 pil superiore
6	7,60	15,0	14,9	14,7	223,50	840	37,5		
7	7,86	15,0	15,0	14,8	225,00	955	42,5	30/07/09	OP/2 trave
8	7,70	15,0	14,9	14,6	223,50	945	42,5		
9	7,64	15,0	14,9	14,6	223,50	980	44,0	31/07/09	OP/2 pil superiore
10	7,74	15,0	14,9	14,7	223,50	1005	45,0		
11	8,00	15,0	15,1	14,8	226,50	1235	54,5	28/09/09	OP/3 pil- inferiore
12	7,88	15,0	15,1	14,8	226,50	1180	52,0		
13	7,80	15,0	15,0	14,8	225,00	860	38,0	30/09/09	OP/3 travi
14	7,82	15,0	15,0	14,8	225,00	860	38,0		
15	7,88	15,0	15,0	14,8	225,00	935	41,5	02/10/09	OP/3 pil superiore
16	7,88	15,0	15,0	14,8	225,00	920	41,0		
17	7,76	15,0	15,0	14,8	225,00	1055	47,0	22/04/10	OP/4 pil- inferiore
18	7,78	15,0	15,0	14,8	225,00	1080	48,0		
19	7,68	15,0	15,0	14,8	225,00	1100	49,0	26/04/10	OP/4 travi
20	7,82	15,0	15,0	14,8	225,00	1010	45,0		
21	7,56	15,0	15,0	14,8	225,00	1020	45,5	20/04/10	OP/4 pil superiore
22	7,70	15,0	15,0	14,8	225,00	1070	47,5		

Risultati delle prove di COMPRESSIONE (UNI EN 12390-3:2003) eseguite su n° trenta provini di conglomerato cementizio prelevati mediante carotaggio dai campioni tipo TST prefabbricati

Contras- segno provino	Massa (1) [kg]	Dimensioni		h/d	A_c [$\pi (d/2)^2$] [cm ²]	Carico di rottura	
		d [cm]	h [cm]			F [kN]	$f_{c,s}$ [N/mm ²]
TST1-P	0,40	5,93	5,87	0,99	27,62	203	73,5
	0,37	5,93	5,65	0,95	27,62	160	57,9
	0,34	5,93	5,33	0,90	27,62	224	81,1
TST1-T	0,36	5,93	5,63	0,95	27,62	127	46,0
	0,37	5,93	5,73	0,97	27,62	135	48,9
	0,38	5,93	5,92	1,00	27,62	126	45,6
TST2-P	0,37	5,93	5,75	0,97	27,62	203	73,5
	0,36	5,93	5,53	0,93	27,62	190	68,8
	0,38	5,93	5,94	1,00	27,62	191	69,2
TST2-T	0,37	5,93	5,94	1,00	27,62	125	45,3
	0,36	5,93	5,74	0,97	27,62	149	53,9
	0,37	5,93	5,79	0,98	27,62	136	49,2
TST3-P	0,39	5,93	5,96	1,01	27,62	176	63,7
	0,38	5,93	5,86	0,99	27,62	177	64,1
	0,38	5,93	5,95	1,00	27,62	179	64,8
TST3-T	0,36	5,93	5,73	0,97	27,62	123	44,5
	0,37	5,93	5,93	1,00	27,62	123	44,5
	0,40	5,93	6,27	1,06	27,62	126	45,6
TST4-P	0,41	5,93	6,34	1,07	27,62	148	53,6
	0,37	5,93	5,78	0,97	27,62	174	63,0
	0,39	5,93	6,10	1,03	27,62	122	44,2
TST4-T	0,36	5,93	5,95	1,00	27,62	88	31,9
	0,37	5,93	6,05	1,02	27,62	129	46,7
	0,37	5,93	6,00	1,01	27,62	124	44,9
TST5-P	0,35	5,93	5,52	0,93	27,62	198	71,7
	0,35	5,93	5,46	0,92	27,62	203	73,5
	0,39	5,93	5,96	1,01	27,62	211	76,4
TST5-T	0,38	5,93	6,03	1,02	27,62	134	48,5
	0,38	5,93	5,98	1,01	27,62	162	58,7
	0,38	5,93	6,04	1,02	27,62	107	38,7

Risultati delle prove di COMPRESSIONE (UNI EN 12390-3:2003) eseguite su n° ventiquattro provini di conglomerato cementizio prelevati mediante carotaggio dai campioni tipo OP interamente gettati in opera

Contrassegno provino	Massa (1) [kg]	Dimensioni		h/d	A_c [$\pi(d/2)^2$] [cm ²]	Carico di rottura	
		d [cm]	h [cm]			F [kN]	$f_{c,s}$ [N/mm ²]
OP1-P	0,36	5,93	5,45	0,92	27,62	112	40,6
	0,34	5,93	5,61	0,95	27,62	113	40,9
	0,33	5,93	5,82	0,98	27,62	131	47,4
OP1-T	0,36	5,93	5,85	0,99	27,62	139	50,3
	0,34	5,93	5,56	0,94	27,62	155	56,1
	0,36	5,93	5,88	0,99	27,62	139	50,3
OP2-P	0,36	5,93	5,82	0,98	27,62	139	50,3
	0,35	5,93	5,70	0,96	27,62	154	55,8
	0,34	5,93	5,70	0,96	27,62	140	50,7
OP2-T	0,36	5,93	5,80	0,98	27,62	133	48,2
	0,36	5,93	5,90	0,99	27,62	120	43,4
	0,38	5,93	6,00	1,01	27,62	113	40,9
OP3-P	0,36	5,93	5,90	0,99	27,62	119	43,1
	0,37	5,93	5,96	1,01	27,62	151	54,7
	0,38	5,93	6,00	1,01	27,62	140	50,7
OP3-T	0,37	5,93	5,80	0,98	27,62	131	47,4
	0,38	5,93	6,03	1,02	27,62	133	48,2
	0,36	5,93	5,66	0,95	27,62	104	37,7
OP4-P	0,37	5,93	5,92	1,00	27,62	121	43,8
	0,38	5,93	6,02	1,02	27,62	138	50,0
	0,37	5,93	5,98	1,01	27,62	118	42,7
OP4-T	0,35	5,93	5,63	0,95	27,62	127	46,0
	0,35	5,93	5,61	0,95	27,62	90	32,6
	0,37	5,93	6,00	1,01	27,62	131	47,4