

Università degli Studi di Napoli **Federico II**

Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura
Via Claudio, 21
80125 Napoli

EDILINNOVA s.r.l.

***Prove sperimentali su pilastri midollo in
scala reale***

GIUGNO 2014

INDICE

PREMESSA	4
CAMPAGNA SPERIMENTALE	5
<i>DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI COLLEGAMENTO PILASTRO-FONDAZIONE E DEI PROVINI</i>	5
<i>SET-UP DI PROVA</i>	7
DESCRIZIONE PROVINI.....	12
<i>MATERIALI COSTITUENTI I PROVINI</i>	17
PREVISIONE TEORICA CAPACITA' RESISTENTE.....	21
PROVINO TIPO A.....	22
PROVINO TIPO B	24
PROVINO TIPO C	26
RISULTATI SPERIMENTALI.....	28
<i>PROVE MONOTONE</i>	28
PROVINO A2	29
PROVINO B2.....	36
<i>PROVE CICLICHE</i>	43
PROVINO A1	45
PROVINO B1.....	54
PROVINO C.....	63
ANALISI COMPARATIVA DEI RISULTATI SPERIMENTALI	73
<i>PROVE MONOTONE</i>	73
PROVINI A2-B2	73
<i>PROVE CICLICHE</i>	77
PROVINI A1-B1	77
PROVINI A1-C	85
CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	93

PREMESSA

La presente relazione riporta i risultati delle prove condotte presso il Laboratorio del Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura dell'Università di Napoli "Federico II" e delle analisi numeriche mirate alla valutazione delle prestazioni del pilastro denominato "midollo" prodotto dall'azienda EDILINNOVA s.r.l..

In particolare, lo studio vuole indagare le prestazioni del sistema pilastro midollo, sia in termini di capacità resistente che di deformazione, confrontandole con quelle di un pilastro, avente le stesse caratteristiche geometriche e meccaniche, ma senza il sistema "midollo" di rinforzo.

La campagna sperimentale che ne è derivata consiste nell'esecuzione di prove monoassiali cicliche e monotone, sia su provini realizzati seguendo le prescrizioni della normativa attuale (pilastro "tradizionale", provini di tipo A), che su quelli realizzati secondo le indicazioni dell'azienda (pilastro "midollo", provini di tipo B e C).

Le prove cicliche di tipo monoassiale riguardano i provini A1, B1, e C:

- il provino denominato A1 rappresenta quello di controllo;
- il provino denominato B1 rappresenta il provino analogo in termini di geometria e proprietà meccaniche, con in più il sistema midollo;
- il provino denominato C rappresenta il provino analogo in termini di geometria e proprietà meccaniche, con in più il sistema midollo, ma con una minore percentuale di armatura esterna rispetto ai precedenti.

Le prove monotone di tipo monoassiale riguardano i provini A2 e B2

- il provino denominato A2 rappresenta quello di controllo
- il provino denominato B2 rappresenta quello con sistema midollo.

CAMPAGNA SPERIMENTALE

DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI COLLEGAMENTO PILASTRO-FONDAZIONE E DEI PROVINI

Obiettivo della campagna sperimentale, è quello di valutare il comportamento dei pilastri denominati “*midollo*” prodotti dall’azienda EDILINNOVA s.r.l..

La realizzazione del sistema pilastro-fondazione avviene attraverso diverse fasi:

- posa in opera dell’armatura di fondazione e contemporaneo posizionamento dei tubi in PVC, per poter permettere l’inserimento delle barre attraverso le quali avviene il fissaggio dei provini al piastrone di prova, ed il carico degli stessi durante il test;
- inserimento della gabbia di armatura verticale per la colonna, e nel caso di pilastro midollo inserimento della armatura midollo;
- getto della fondazione;
- realizzazione della armatura della colonna, sia quella trasversale a taglio, che quella longitudinale a flessione, necessarie per creare continuità con la fondazione, e realizzazione di doppio registro di armatura, sia per le barre longitudinali che per quelle trasversali per i provini “midollo”
- getto di completamento per la colonna .

I provini hanno una geometria caratterizzata da una fondazione di dimensioni 120x120x60cm e da un pilastro di sezione 30x30cm e altezza 1,80 m, con diverse configurazioni per quanto riguarda sia l’armatura longitudinale che trasversale (**Figura 1**).

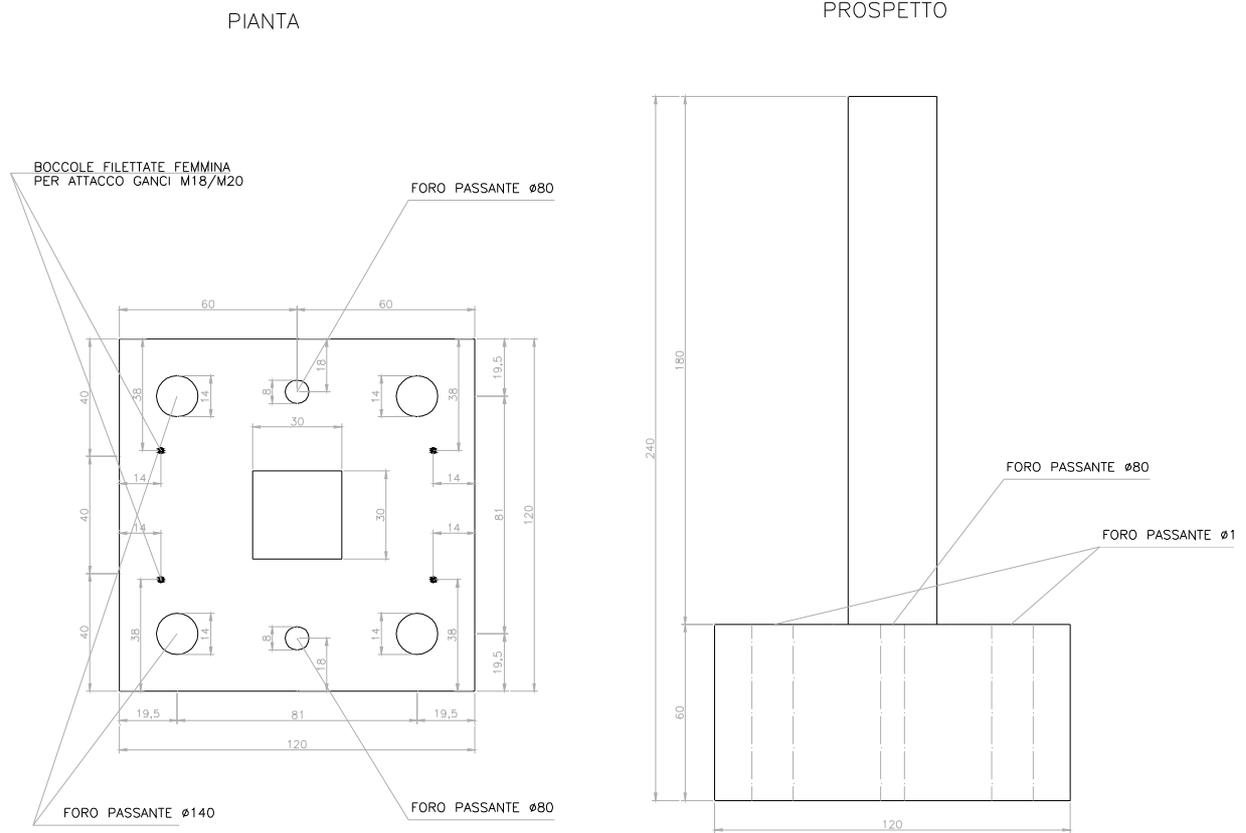


Figura 1– Geometria provino

SET-UP DI PROVA

L'apparecchiatura adottata per l'esecuzione delle prove consiste in una strumentazione di carico e misurazione di spostamenti e deformazioni, ed un'apparecchiatura di vincolo del provino (**Figura 2**).



Figura 2– Set-up di prova

Le prove sono state effettuate mediante l'applicazione simultanea di un carico verticale, mantenuto costante durante il test ($v = N/bhf_{cm} = 0,18$ per entrambe i test, con N sforzo assiale, b e h dimensioni della sezione e f_{cm} resistenza cilindrica media a compressione del calcestruzzo), e di uno spostamento orizzontale monotono o ciclico. In particolare, le forze verticali sono trasmesse al provino mediante l'applicazione di sforzi di trazione, da parte di due martinetti idraulici, su due barre ad alta resistenza a loro volta connesse ad una estremità al plinto di fondazione ed all'altra ad un elemento di contrasto (“cappello”) in acciaio posto

alla sommità del pilastro (**Figura 3 (a)**). La connessione delle barre ad alta resistenza con l'elemento di fondazione avviene attraverso l'utilizzo di cerniere sferiche (**Figura 3 (b)**).



(a)



(b)

Figura 3– Particolari cappello (a) e cerniere (b)

Lo spostamento orizzontale è stato applicato mediante l'utilizzo di un attuatore elettroidraulico, applicato a 1500 mm dalla sezione di interfaccia colonna-elemento di fondazione, caratterizzato da una portata in compressione e in trazione rispettivamente pari a 500kN e a 290kN, e da una corsa in spostamento di ± 250 mm.

Nelle prove cicliche gli spostamenti sono stati applicati in cicli successivi, ciascuno costituito da tre ripetizioni di carico. La storia di carico è riportata in **Tabella 1** e in formato grafico in **Figura 4**.

Tipo di ciclo	Ampiezza segmento ciclo [mm]	N° segmenti per ciclo x N° cicli	Velocità [mm/sec]	Tempo [sec]
I) Ciclo a 6mm	6	4x3=12	0.2	360
II) Ciclo a 12 mm	12	4x3=12	0.2	720
III) Ciclo a 24 mm	24	4x3=12	0.2	1440
IV) Ciclo a 48 mm	48	4x3=12	1.0	576
V) Ciclo a 72 mm	72	4x3=12	1.0	864
VI) Ciclo a 96 mm	96	4x3=12	1.0	1152
VII) Ciclo a 120 mm	120	4x3=12	1.0	1440
VIII) Ciclo a 144 mm	144	4x3=12	1.0	1728
IX) Ciclo a 192 mm	192	4x3=12	1.5	1536
X) Ciclo a 240 mm	240	4x3=12	1.5	1920
			TOT.	11736

Tabella 1 - Storia di carico

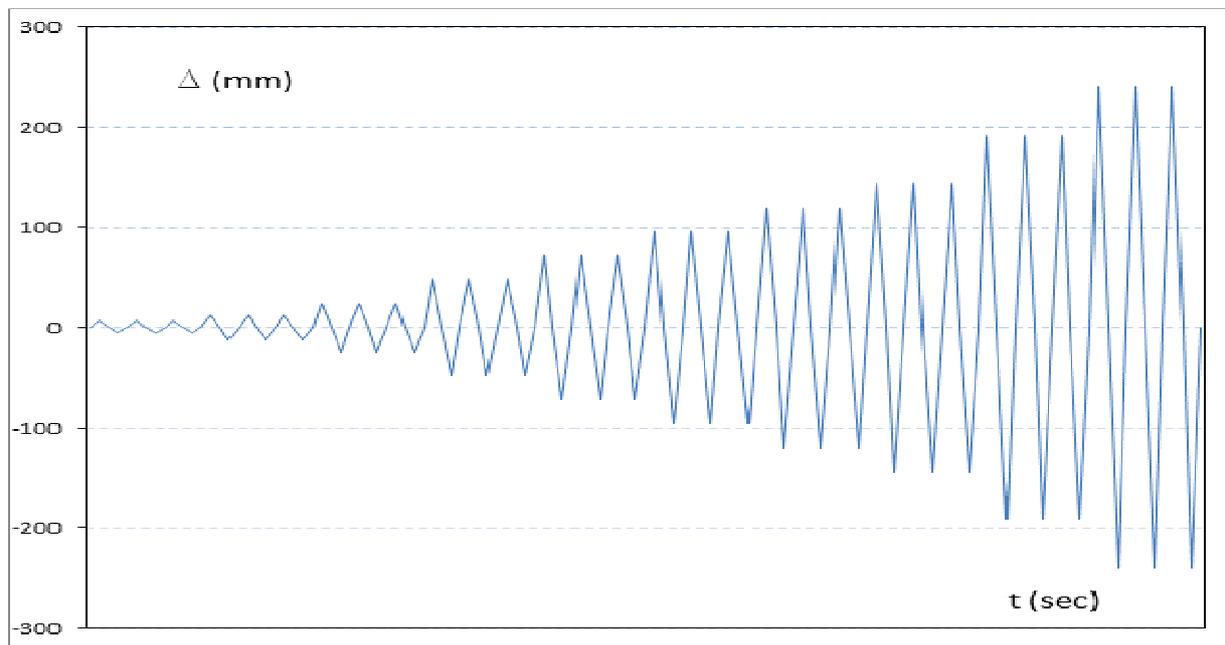


Figura 4 – Storia di carico

Nelle prove monotone gli spostamenti sono stati applicati in modo continuo, con una velocità di 0,05 mm/sec fino al raggiungimento dello standard prefissato.

L'intero sistema è fissato al suolo attraverso quattro barre pretese di acciaio ad alta resistenza, ed è vincolato alla base da un sistema di cassoni in acciaio che ne impediscono le traslazioni orizzontali (**Figura 5**).



Figura 5– Sistema di vincolo

Per ciò che riguarda la strumentazione di acquisizione, essa risulta identica per tutti i provini, ed è costituita da trasduttori *lvdt's*, posti alla base del pilastro (**Figura 6**), per la lettura delle deformazioni; mentre per le letture degli spostamenti orizzontali in corrispondenza della quota dell'attuatore, si sono disposti trasduttori a filo e *lvdt's* (**Figura 7**),

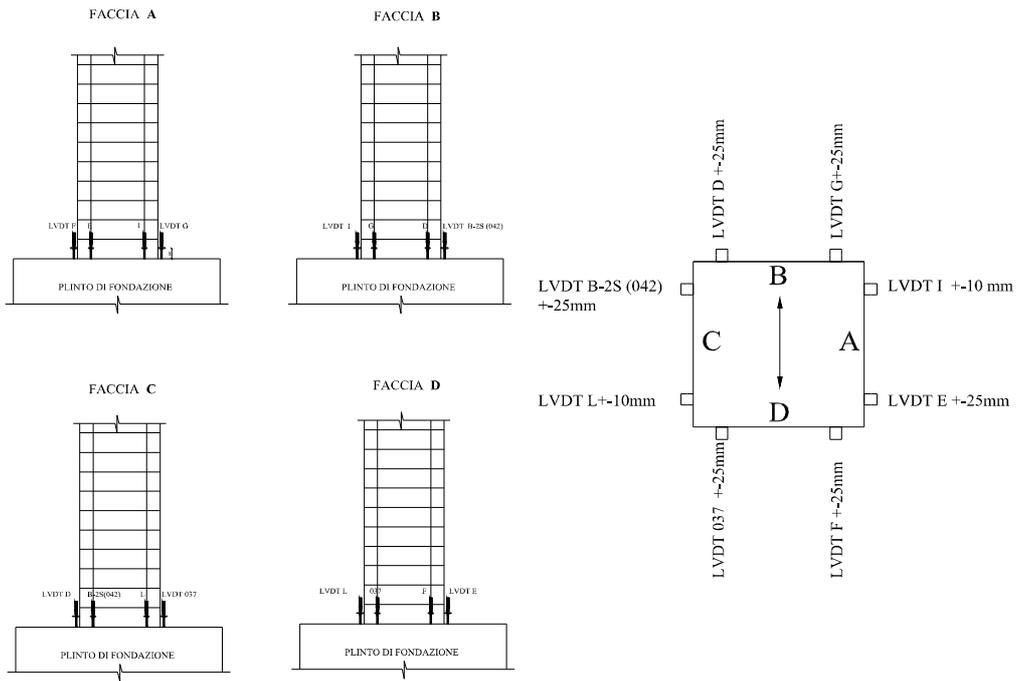


Figura 6 – Disposizione lvdt's base pilastro

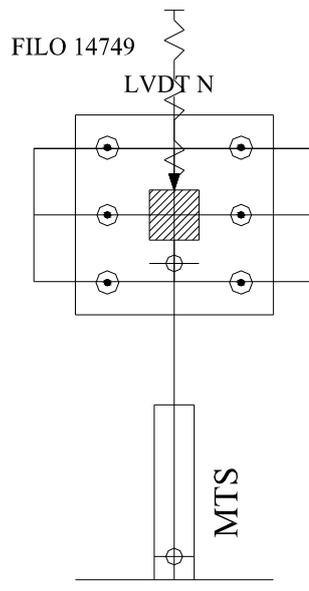


Figura 7 - Disposizione trasduttori a filo su pilastro

DESCRIZIONE PROVINI

Sono stati testati due tipi di provini, denominati *A*, *B* e *C*, di cui uno tradizionale (tipo *A*) e l'altro con sistema "midollo" (tipo *B*), forniti dalla EDILINNOVA s.r.l..

Il provino di *tipo A*, ha una colonna di tipo tradizionale, di sezione 30x30 cm, armato con 4 ϕ 14 longitudinali, disposti agli spigoli della sezione, ancorati nella fondazione per una lunghezza pari a circa lo spessore del plinto, e con piegatura sagomata in testa.

Per quanto riguarda la staffatura, essa è costituita da ϕ 8/15 cm, a maglia quadrata di lato 26 cm, e legature di 6 cm, disposte in modo tale da avere una sezione con copriferro netto di circa 2 cm (**Figura 8**).

Il provino di *tipo B e C*, ha una colonna di sezione 30x30 cm, armato con 4 ϕ 14 longitudinali, disposti agli spigoli della sezione, ancorati nella fondazione e sagomati in testa allo stesso modo del provino precedente.

Oltre all'armatura longitudinale principale, è presente una ulteriore armatura "midollo", costituita da 4 ϕ 16 disposti a loro volta agli spigoli di una staffatura aggiuntiva che determina un nucleo nella sezione.

Per quanto concerne tali armature, esse sono ancorate alla fondazione per una lunghezza pari a circa lo spessore del plinto, e si estendono lungo la colonna, per una altezza di circa 70 cm dallo spiccatto di fondazione.

La staffatura esterna risulta essere costituita da ϕ 8/15 cm, a maglia quadrata di lato 26 cm per tutta la lunghezza della colonna, e legature di 6 cm.

È presente inoltre una staffatura aggiuntiva per il midollo, costituita da ϕ 8/6 cm sempre a maglia quadrata di lato 15 cm e legature di circa 10 cm, estesa per una lunghezza pari a 70 cm dallo spiccatto di fondazione (**Figura 8**).

Pertanto i provini *A* e *B* differiscono soltanto per la presenza del sistema di armatura “midollo” nel provino *B* rispetto al provino *A*.

I provini *A1* e *B1* sono stati testati con prove cicliche di tipo uniassiale, con stesso percorso di carico al fine di avere un confronto diretto tra il provino di controllo *A1*, e quello “midollo” *B1*.

I provini *A2* e *B2* sono stati testati con prove monotone di tipo uniassiale, con stesso percorso di carico al fine di avere un confronto diretto tra il provino di controllo *A2*, e quello “midollo” *B2*.

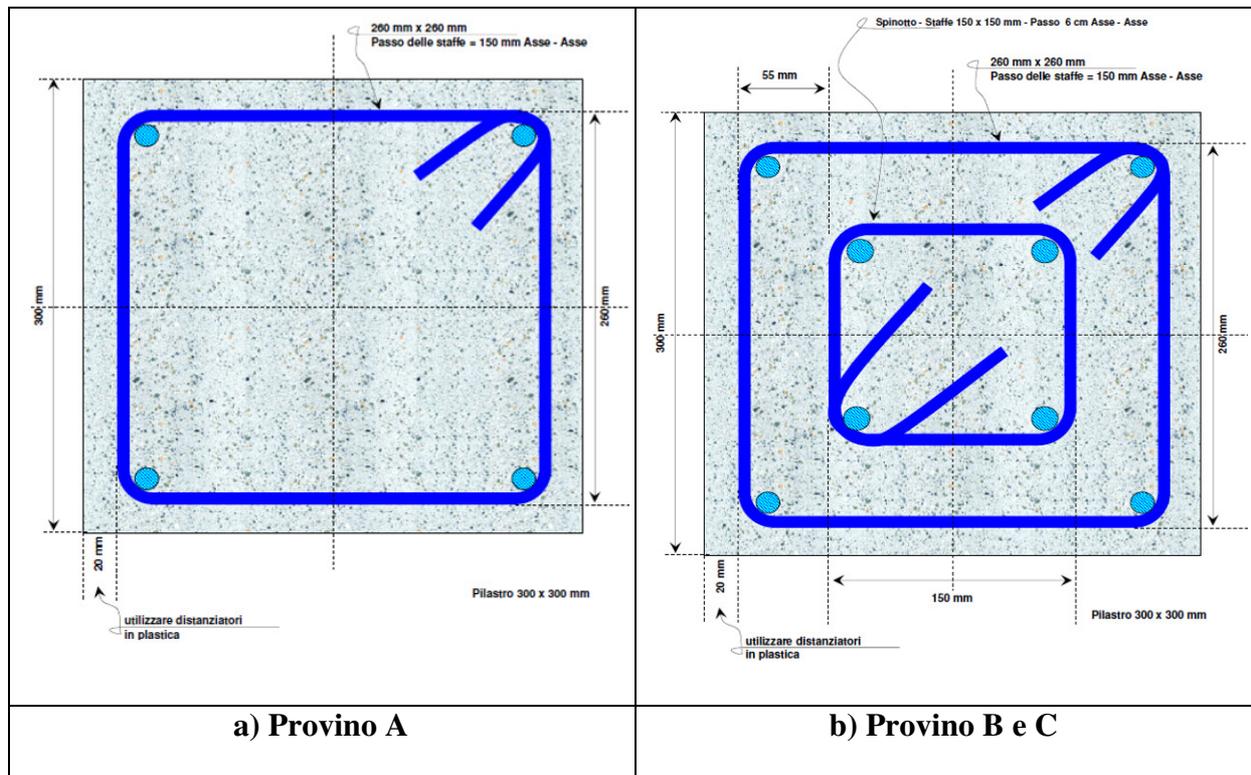


Figura 8 - Armatura sezione provini

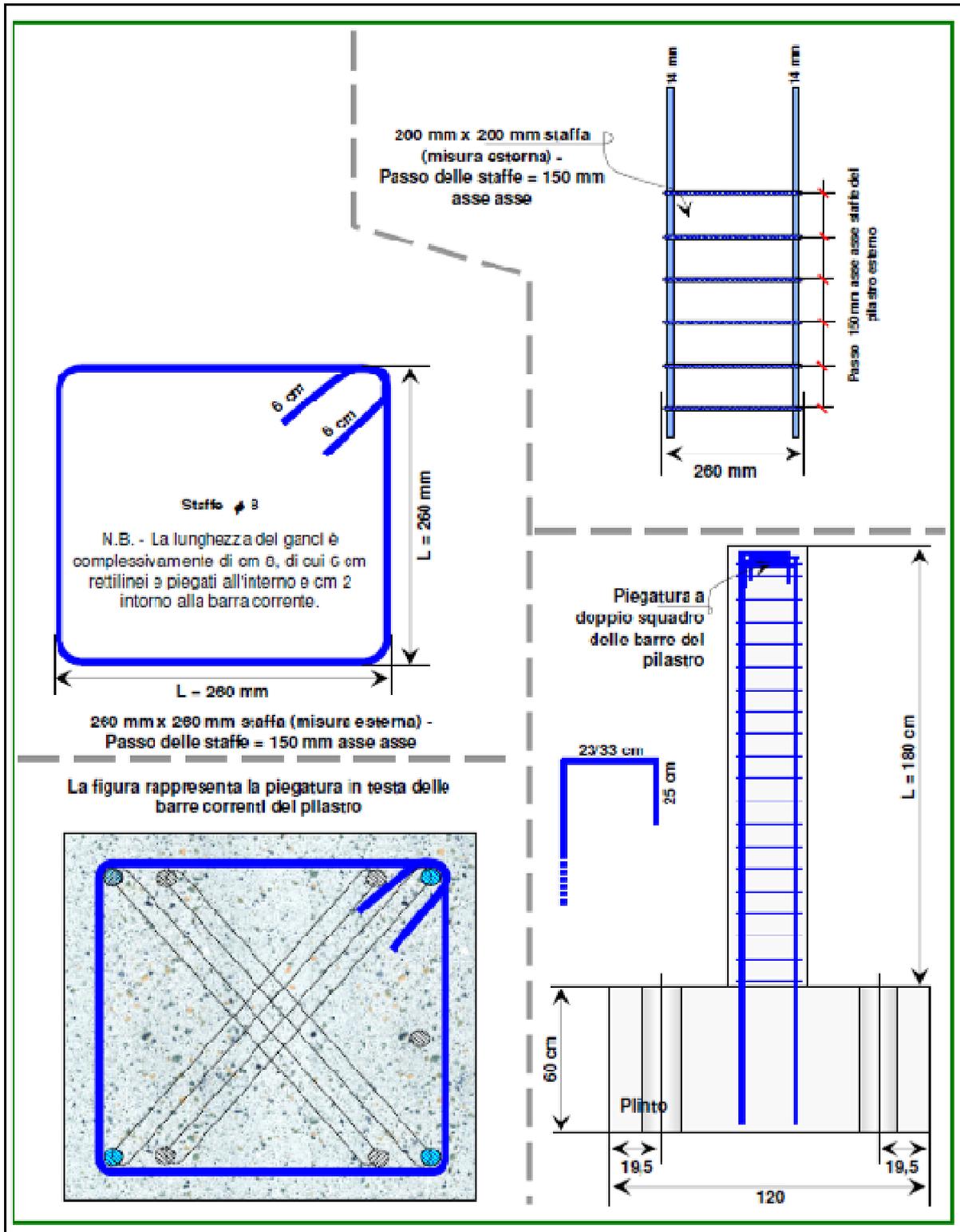


Figura 9 - Particolari armatura provino A

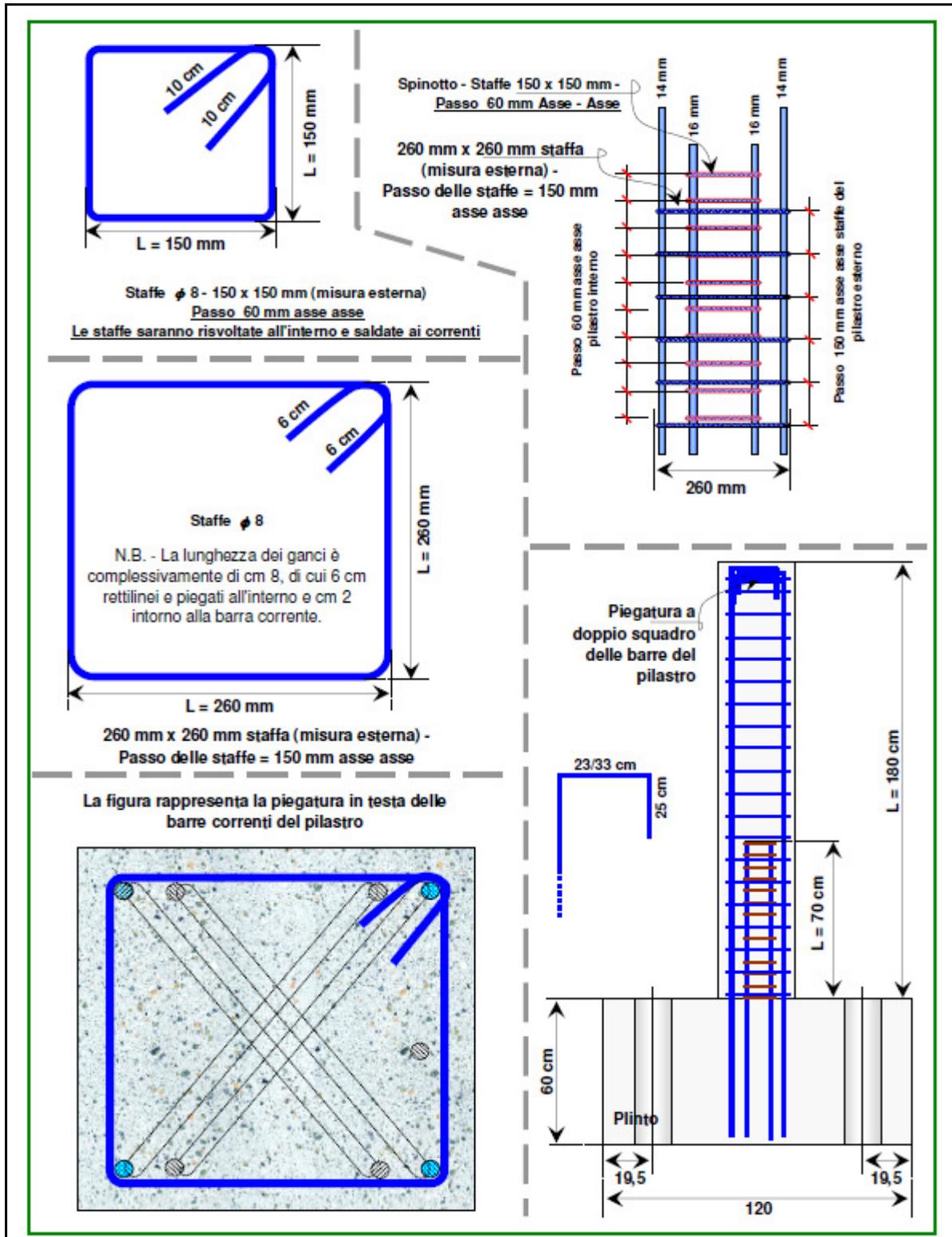


Figura 10-Particolari armatura provino B

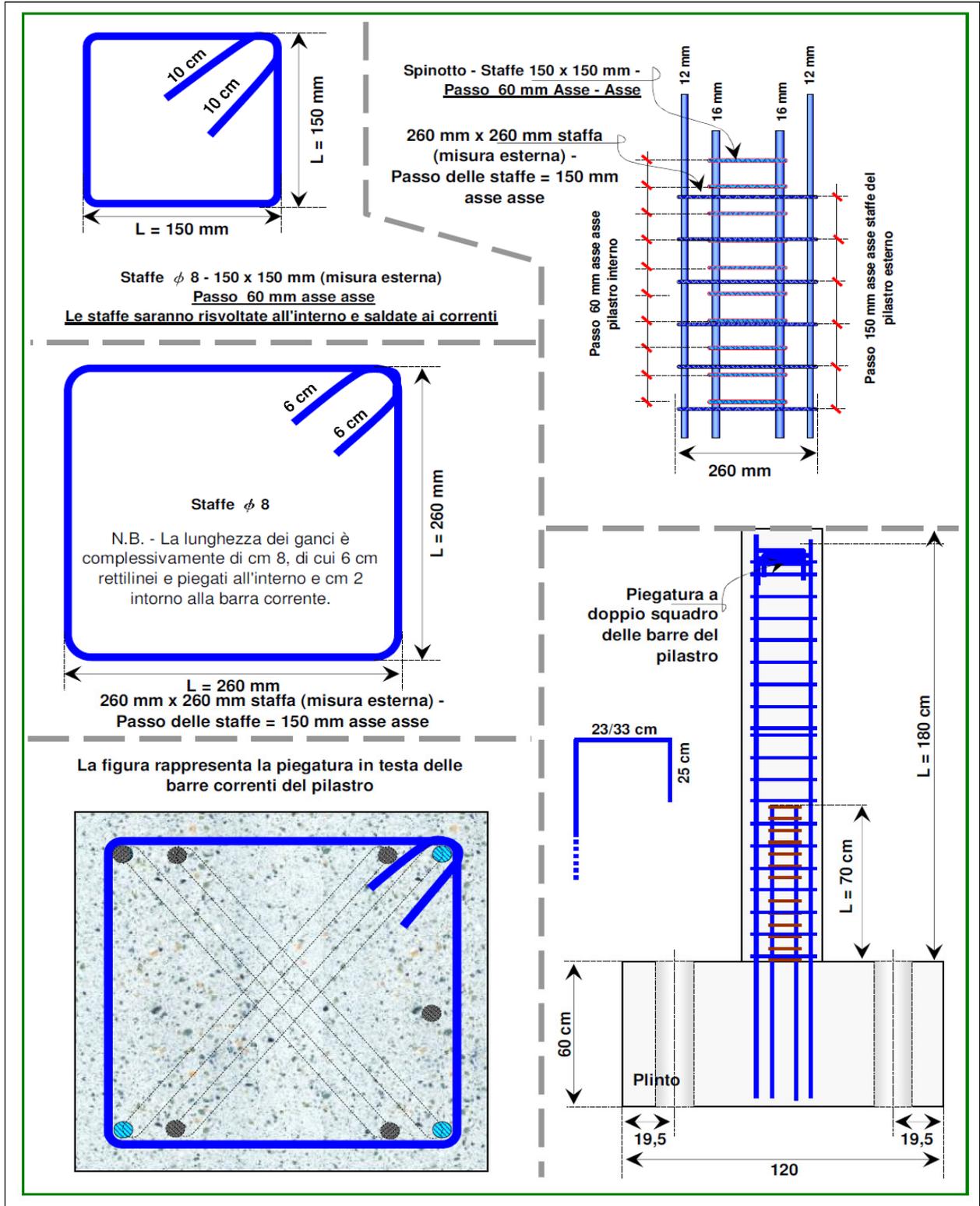


Figura 11-Particolari armatura provino C

MATERIALI COSTITUENTI I PROVINI

I provini da testare sono stati forniti corredati di n° 16 cubetti di calcestruzzo di dimensione 150x150x150 mm, prelevati durante le fasi di getto, e sono relativi a tutta la serie dei cinque sistemi pilastri-fondazione.

I primi otto cubetti sono stati prelevati durante la fase di getto delle fondazioni, ed i restanti, invece, durante la fase di getto dei pilastri.

Tali cubetti sono stati testati in data 23/01/2014; in tabella si riportano i valori di resistenza a seguito delle prove di compressione effettuate.

N°	Diamensioni [mm]	Peso [kg]	Carico [kN]	Rc [N/mm²]	Data
1	150x150x150	8,120	882,40	39,20	23/01/2014
2	150x150x150	7,700	398,10	17,67	23/01/2014
3	150x150x150	8,000	594,40	26,42	23/01/2014
4	150x150x150	8,020	902,80	40,11	23/01/2014
5	150x150x150	8,120	899,80	39,99	23/01/2014
6	150x150x150	7,800	805,00	35,77	23/01/2014
7	150x150x150	7,740	486,00	21,60	23/01/2014
8	150x150x150	7,800	442,20	19,65	23/01/2014
9	150x150x150	7,900	438,70	19,45	23/01/2014
10	150x150x150	8,220	747,00	33,24	23/01/2014
11	150x150x150	8,060	817,60	36,32	23/01/2014
12	150x150x150	8,000	627,20	27,87	23/01/2014
13	150x150x150	7,980	859,80	38,21	23/01/2014
14	150x150x150	8,400	1007,90	44,79	23/01/2014
15	150x150x150	8,240	966,50	42,51	23/01/2014
16	150x150x150	8,060	887,50	39,44	23/01/2014

Tabella 2

Dai risultati ottenuti si sono determinati i valori di resistenza media, e di carico medio, relativi alla colonna, e alla fondazione, e al complesso colonna fondazione.

RES. MEDIA CUBETTI R_{cm} (PILASTRO) [N/mm²]	CAR. MEDIO [kN]
35,23	792,78

Tabella 3 - Carico medio di compressione a rottura (cubetti pilastri)

RES. MEDIA CUBETTI R_{cm} (FONDAZIONE) [N/mm ²]	CAR. MEDIO [kN]
30,05	676,34

Tabella 4 - Carico medio di compressione a rottura (cubetti fondazione)

RES. MEDIA CUBETTI R_{cm} (PILASTRO E FONDAZIONE) [N/mm ²]	CAR. MEDIO [kN]
32,64	734,5

Tabella 5 - Carico medio di compressione a rottura (cubetti pilastri e fondazione)

Si evince che il calcestruzzo utilizzato per i getti dei plinti di fondazione, risulta essere meno performante rispetto a quello dei pilastri. In fase di previsione teorica si sono adottati i valori di resistenza media dedotti dalle prove sui cubetti di calcestruzzo prelevati durante le fasi di getto dei pilastri.

Dai valori delle prove di compressione sui cubetti prelevati durante il getto dei pilastri è emerso che il calcestruzzo ha una resistenza cubica media

$$R_{cm} = 35,23 \text{ Mpa}$$

A cui corrisponde

$$f_{cm} = 0,83 * 35,23 \text{ N/mm}^2 = 29,24 \text{ MPa}$$

Oltre ai cubetti di calcestruzzo, a corredo dei provini, sono stati forniti anche spezzoni di barre di armatura di lunghezza pari a 50 cm ognuno, relativi ai vari diametri utilizzati per la preparazione dei cinque provini.

Di tali armature, si sono testate due barre per ogni diametro disponibile; di seguito si riportano i valori di tensione di snervamento ottenuti a valle delle prove di trazione eseguite ed i grafici tensione - deformazione (**Figura 12 e Figura 13**).

N°	Diametro [mm]	f_y [N/mm ²]	f_{ym} [N/mm ²]	Data prova
1	8	518,50		23/01/2014
2	8	519,42	518,96	23/01/2014
3	12	523,18		23/01/2014
4	12	522,46	522,82	23/01/2014
5	14	545,81		23/01/2014
6	14	548,10	546,96	23/01/2014
7	16	543,96		23/01/2014
8	16	544,14	544,05	23/01/2014

Tabella 6 - Tensione di snervamento barre in acciaio.

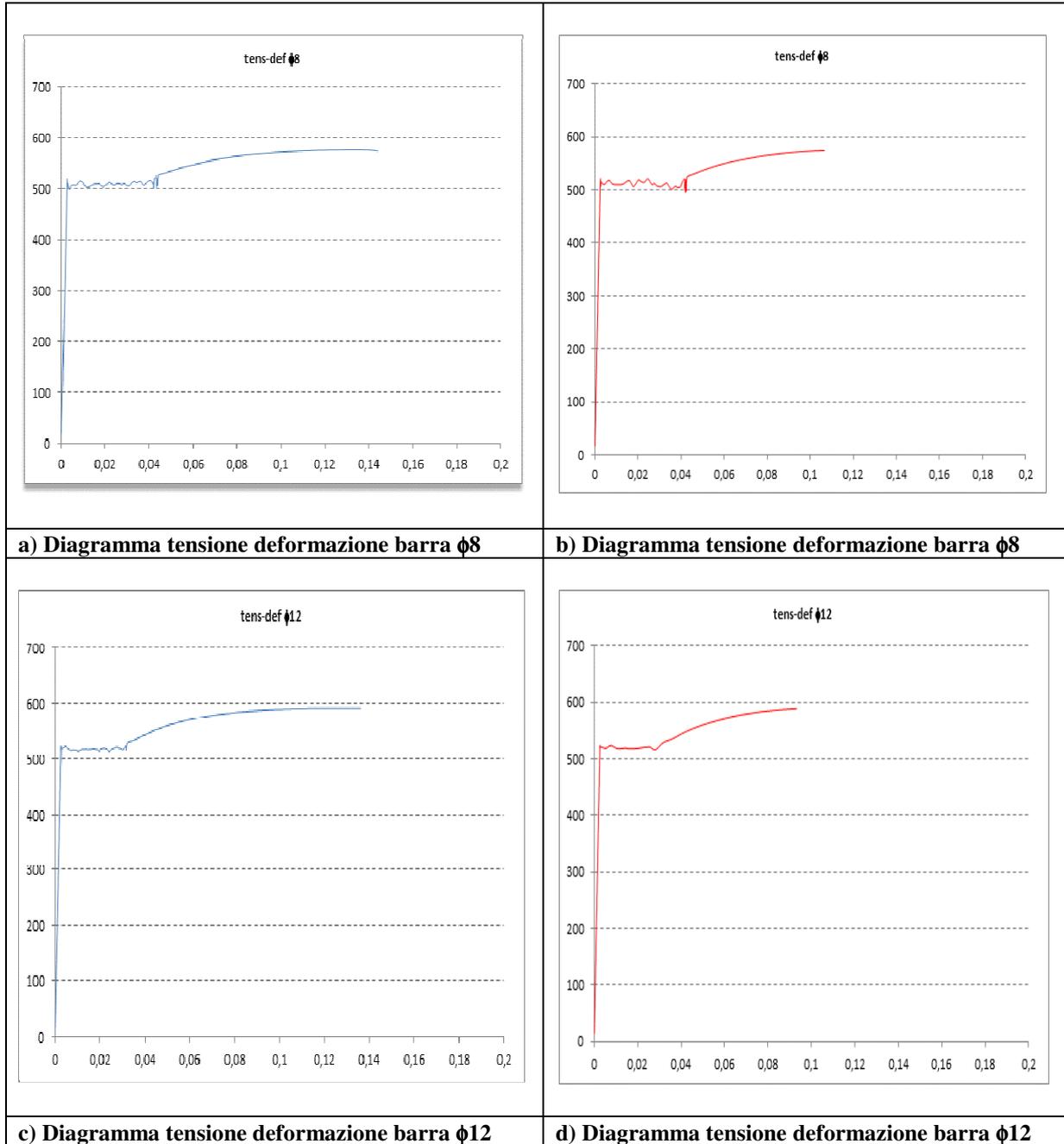


Figura 12 - Diagrammi tensione deformazione barre acciaio

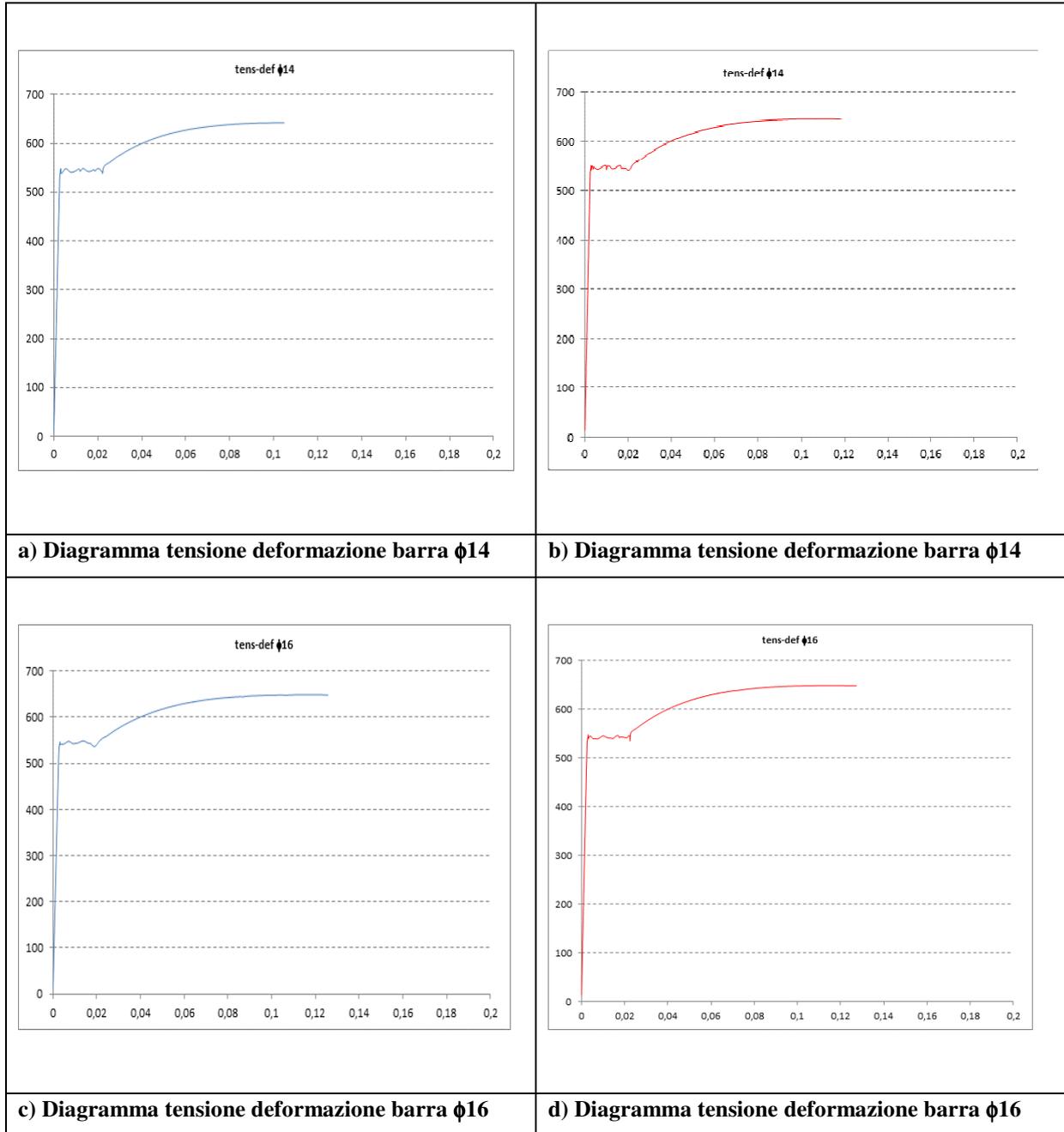


Figura 13 -Diagrammi tensione deformazione barre acciaio

PREVISIONE TEORICA CAPACITA' RESISTENTE

Ai fini del calcolo della capacità resistente del provino si sono adottate per i materiali le proprietà meccaniche ottenute dalle prove sperimentali.

Tenendo conto che il pilastro ha una sezione rettangolare di 30x30 cm, ed armatura longitudinale costituita da 4 ϕ 14 di bordo, si ha:

- calcestruzzo $f_{cm}=0.83*35,23 \text{ N/mm}^2=29,24 \text{ Mpa}$.

- acciaio $f_{ym} = 547 \text{ MPa}$

effettuando un calcolo a rottura, con tutti i coefficienti di sicurezza unitari, e nell'ipotesi di pressoflessione con $\nu=0.18$ si ha:

$$N_{\max} = f_{cm} * b * h = 29,24 \text{ N/mm}^2 * 300 \text{ mm} * 300 \text{ mm} = 2631681 \text{ N} = 2632 \text{ kN}$$

$$N = 0.18 * N_{\max} = 0.18 * 2632 \text{ kN} = 474 \text{ kN} \quad \rightarrow 237 \text{ kN su ogni martinetto.}$$

PROVINO TIPO A

Per il confronto della capacità resistente sperimentale del pilastro, con quella teorica, si riportano di seguito i valori di momento ultimo della sezione, in cui la capacità, è stata valutata sulla base della sezione resistente di seguito riportata (**Figura 14**).

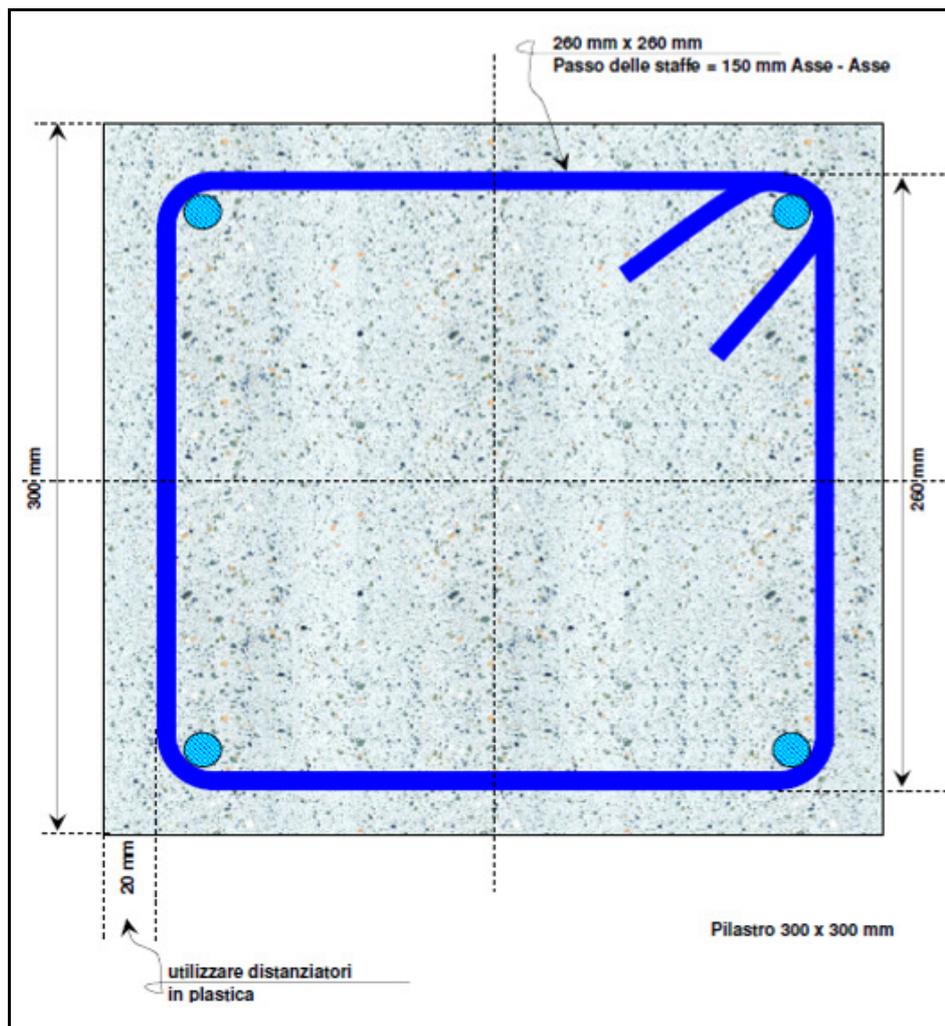


Figura 14-Sezione pilastro A1

Per cui di seguito si riportano i valori relativi ai momenti ultimi di previsione teorica.

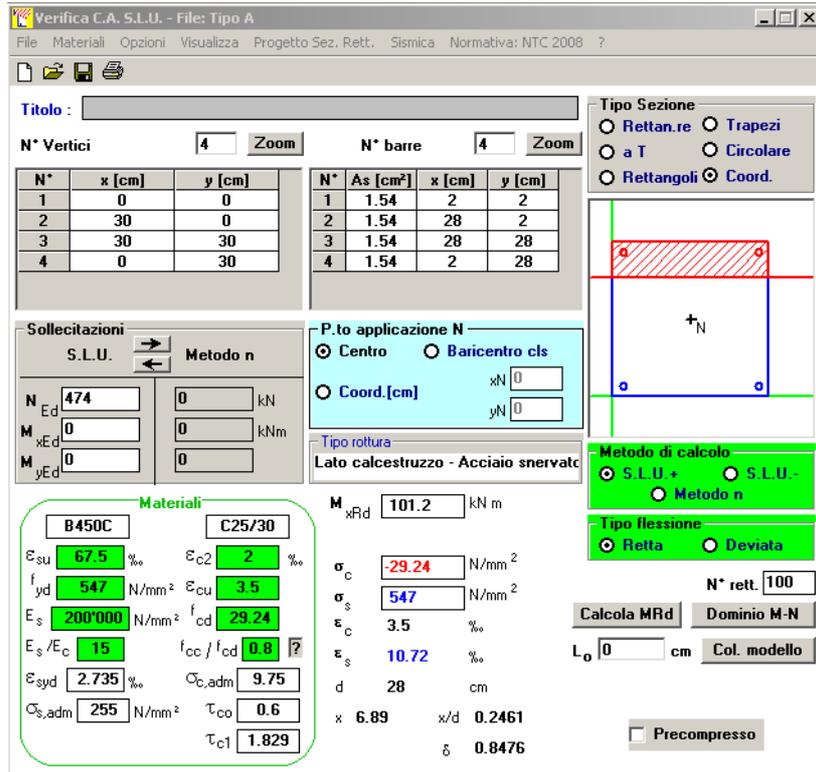


Figura 15 – Calcolo μ (provino-A) con VECASLU

Nella **Tabella 7**, di seguito riportata, sono sintetizzati i valori teorici di momento ultimo e di forza attesa all'attuatore, considerando che quest'ultimo è posizionato ad una quota di 1,50 m dallo spiccatto di fondazione.

Momento ultimo teorico		Forza ultima teorica	
provino A1		provino A1	
M_u^{th} [kNm]	101,20	F_u^{th} [kN]	67,47

Tabella 7 - Capacità resistente pilastro A1

PROVINO TIPO B

Per il confronto della capacità resistente sperimentale del pilastro, con quella teorica, si riportano di seguito i valori di momento ultimo teorici della sezione, in cui la capacità, è stata valutata sulla base della sezione resistente di seguito riportata (**Figura 16**).

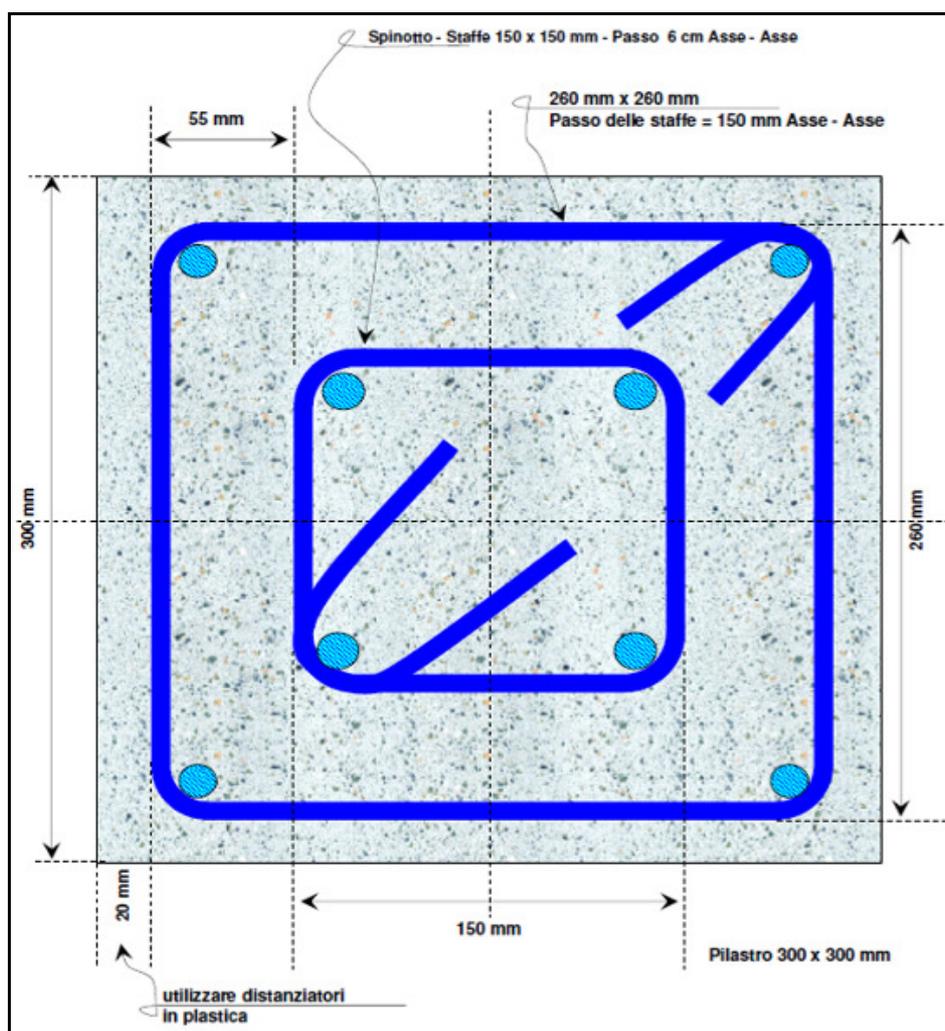


Figura 16 - Sezione pilastro B1

Per cui di seguito si riportano i valori relativi ai momenti ultimi di previsione teorica.

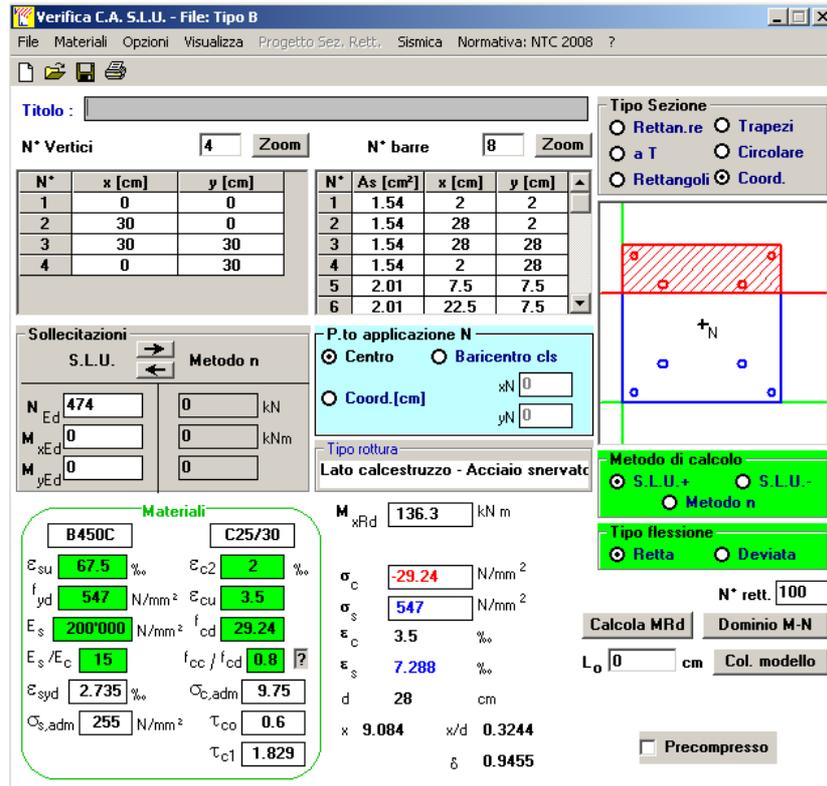


Figura 17 – Calcolo μ_u (provino-B) con VCASLU

Nella **Tabella 8**, di seguito riportata, sono sintetizzati i valori teorici di momento ultimo e di forza attesa all'attuatore, considerando che quest'ultimo è posizionato ad una quota di 1,50 m dallo spiccatto di fondazione.

	Momento ultimo teorico		Forza ultima teorica
	provino B1		provino B1
M_u^{th} [kNm]	136,30	F_u^{th} [kN]	90,87

Tabella 8 - Capacità resistente pilastro B

PROVINO TIPO C

Per il confronto della capacità resistente sperimentale del pilastro, con quella teorica, si riportano di seguito i valori di momento ultimo teorici della sezione, in cui la capacità, è stata valutata sulla base della sezione resistente di seguito riportata (**Figura 18**).

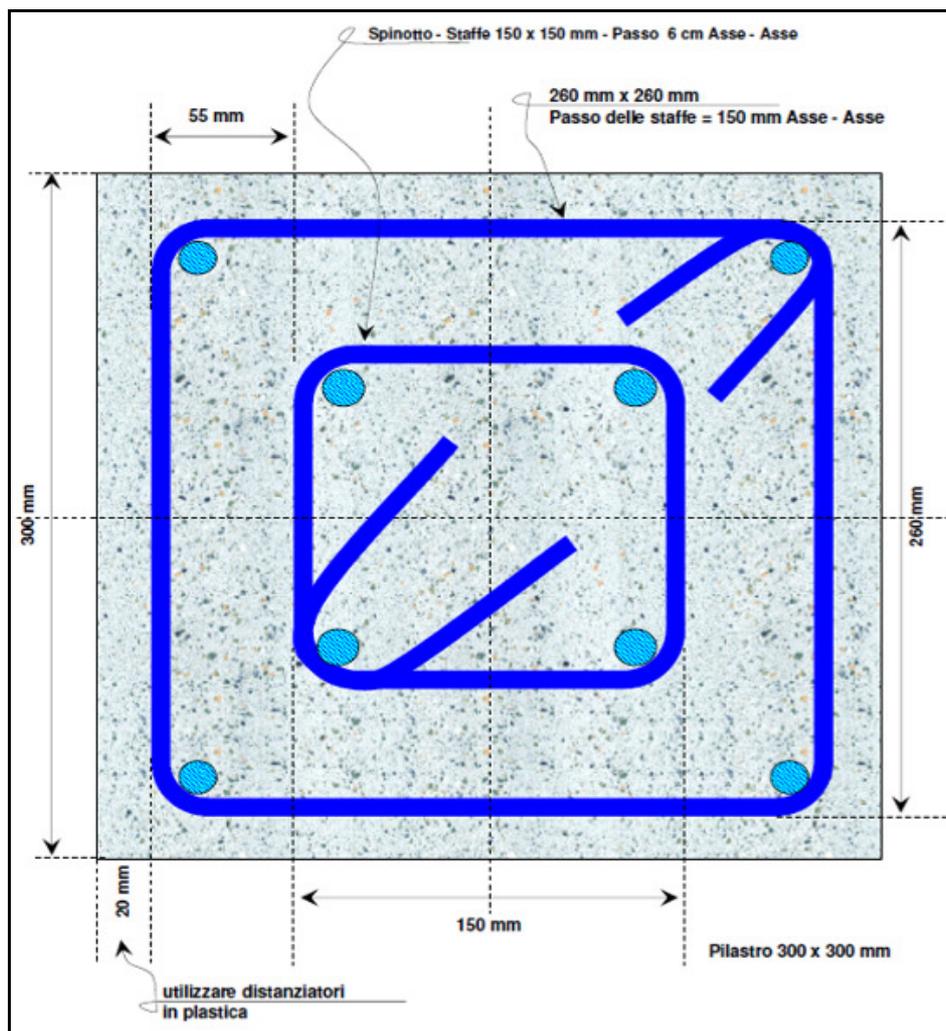


Figura 18 - Sezione pilastro C

Per cui di seguito si riportano i valori relativi ai momenti ultimi di previsione teorica.

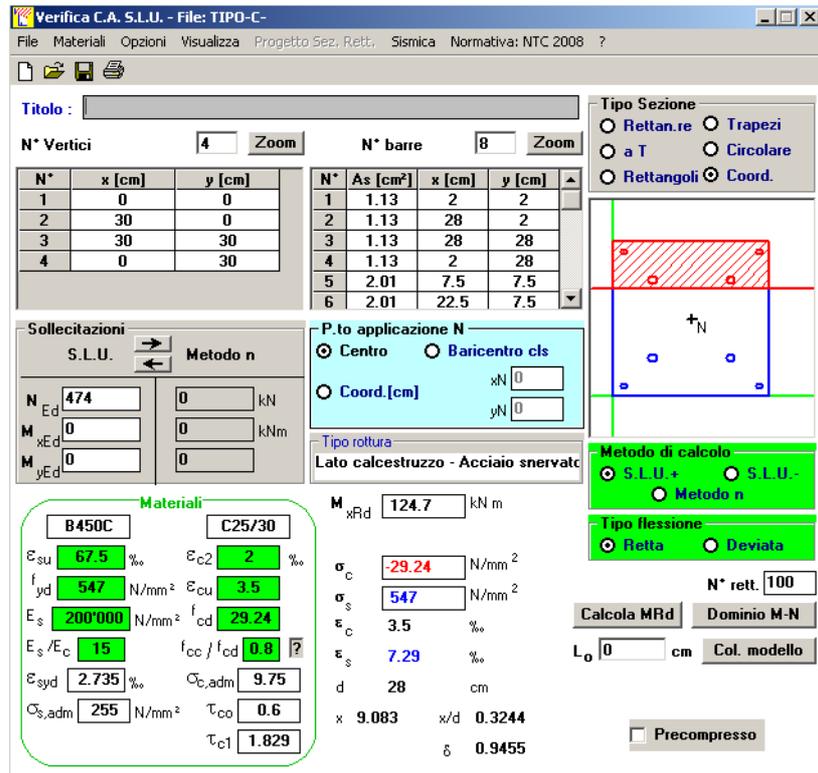


Figura 19 – Calcolo Mu (provino-C) con VCASLU

Nella **Tabella 9**, di seguito riportata, sono sintetizzati i valori teorici di momento ultimo e di forza attesa all'attuatore, considerando che quest'ultimo è posizionato ad una quota di 1,50 m dallo spiccatto di fondazione.

	Momento ultimo teorico		Forza ultima teorica
	provino C		provino C
M_u^{th} [kNm]	124,70	F_u^{th} [kN]	83,13

Tabella 9 - Capacità resistente pilastro B

RISULTATI SPERIMENTALI

PROVE MONOTONE

Si riportano di seguito i risultati sperimentali da cui è possibile valutare le prestazioni in termini sia di capacità resistente che deformativa del provino testato. Per una maggiore efficacia nella descrizione della risposta registrata, i dati acquisiti sono stati elaborati ed esplicitati in una serie di formati grafici che semplificano l'interpretazione del comportamento sperimentale dell'elemento.

Per una migliore comprensione dei grafici riportati di seguito si specifica il significato dei parametri utilizzati:

- F è la forza, espressa in kN, letta dall'attuatore;
- V è il taglio calcolato depurando la forza dall'influenza dell'eccentricità dello sforzo
($V=F-N\cdot\theta$);
- δ è lo spostamento della testa del pilastro;
- $\theta=\delta/L$ è la rotazione della colonna, dove L è la distanza dell'attuatore dalla base del pilastro pari a 1,5m.

Il valore dell'**energia** viene calcolato come l'area sottesa alla curva ***F- θ*** .

PROVINO A2

La curva sperimentale $F-\theta$ è di seguito riportata (**Figura 20**).

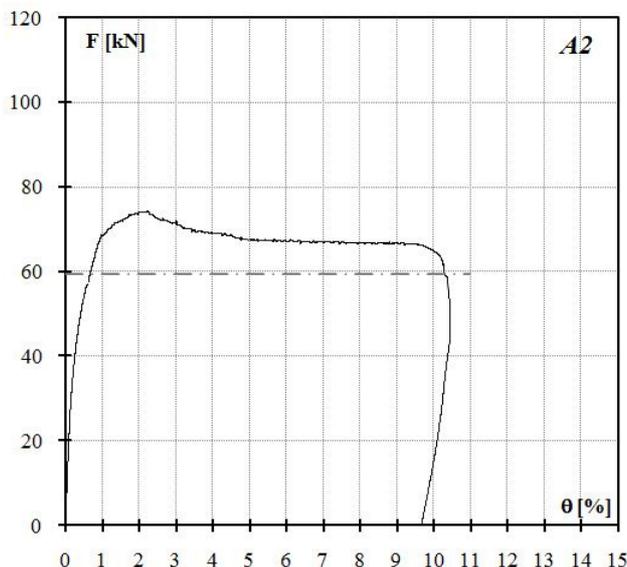


Figura 20 – Pilastro A2, curva sperimentale $F-\theta$

La forza massima, pari a $F_{\max(+)}=74,20\text{kN}$, è stata raggiunta in corrispondenza di uno spostamento di 33,63 mm equivalente a un drift del 2,24 %. (**Figura 20**).

Oltre all'individuazione della forza massima e del rispettivo drift, è stata individuata una *condizione ultima convenzionale* in corrispondenza di un abbattimento della resistenza del 20%. Sono stati determinati la forza ultima ($F_{0,8}$) e il drift corrispondente ($\theta_{0,8F}$). In particolare la forza ultima è risultata pari a $F_{0,8(+)}=59,36\text{kN}$ cui ha corrisposto un drift ultimo del 10,32%.

In **Tabella 10** sono riportati in maniera sintetica i principali risultati sperimentali in termini di forza e drift.

Forze e drift massimi					
F_{\max} [kN]	(+)	+74,20	θ_{\max} [%]	(+)	2,24
Forze e drift ultimi					
$F_{0,8}$ [kN]	(+)	+59,36	$\theta_{0,8}$ [%]	(+)	10,32

Tabella 10 Valori di forze e drift

Dal confronto tra il valore medio sperimentale della forza massima applicata $F_{\text{medio}}^{\text{exp}}$ ed il valore di previsione teorica F_u^{th} , si evince che il provino ha mostrato una resistenza sperimentale maggiore del 10,20% rispetto a quella teorica (**Tabella 11**).

$F_{\text{max}}^{\text{exp}}$	F_u^{th}	SCARTO
74,20 kN	67,47 kN	+9,97%

Tabella 11 - Confronto teorico sperimentale

La curva sperimentale $V-\theta$ è riportata in Figura 21.

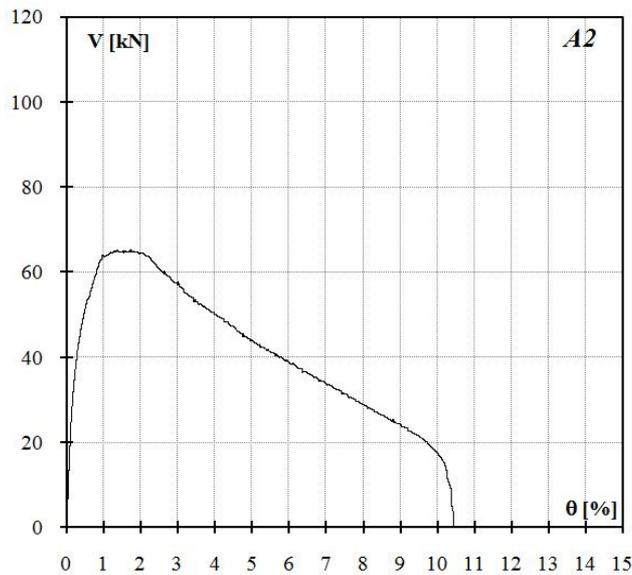


Figura 21 – Curva sperimentale $V-\theta$

Si riporta il grafico relativo all'energia E al variare del *drift* (**Figura 22**): il valore dell'energia viene calcolato come l'area sottesa alla curva $F-\theta$ (**Figura 20**).

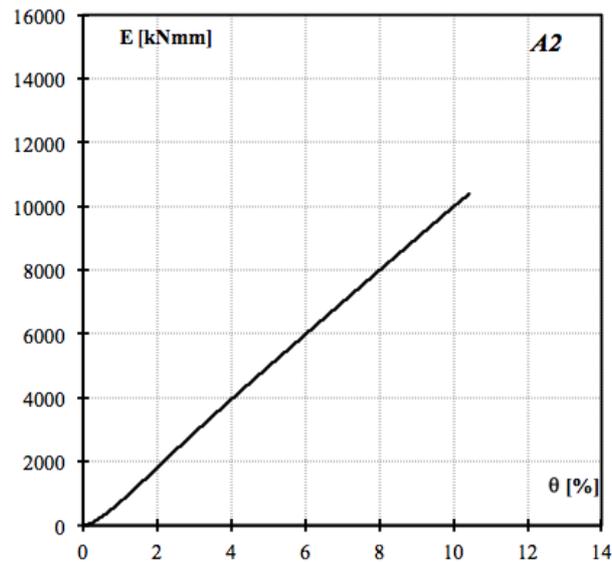


Figura 22 – Curva E- θ

In **Tabella 12** sono riportati in maniera sintetica i risultati relativi all'energia cumulata corrispondente al valore di drift, in particolare in grassetto il valore corrispondente alla fine convenzionale della prova

θ^{Exp} [%]	E [kNmm]
0,10	15
0,50	263
2	1802
4	3943
6	5977
8	7988
10	9978
10,32	10183

Tabella 12 - Energia al variare del drift

Inoltre di seguito si riportano le immagini relative al grado di danneggiamento del provino A2 durante la prova, corrispondente a diversi valori del *drift* (**Figura 24, Figura 25, Figura 26**). Dalla documentazione fotografica e tenendo conto dello schema di prova (**Figura 23**), si evince che:

- **drift 0.1%**: formazione di microfessurazione;
- **drift 0.5%**: formazione di due fessure di ampiezza rilevante;
- **drift 2%**: la fessurazione di tipo flessionale tende a diffondersi lungo il pilastro;
- **drift 4%**: oltre alla fessurazione, si ha la prima rottura di copriferro alla base del pilastro tra la faccia B e D;
- **drift 6%**: la rottura della base della faccia B è evidente, l'espulsione del copriferro alla base del pilastro si verifica anche per la faccia A, su uno spigolo;
- **drift 8%**: danneggiamento estremamente evidente sulla faccia B, il provino risulta ampiamente fessurato, in particolare sulla faccia D, su cui si evidenzia un notevole sollevamento della base del pilastro.
- **drift 10%**: deterioramento della situazione precedente.

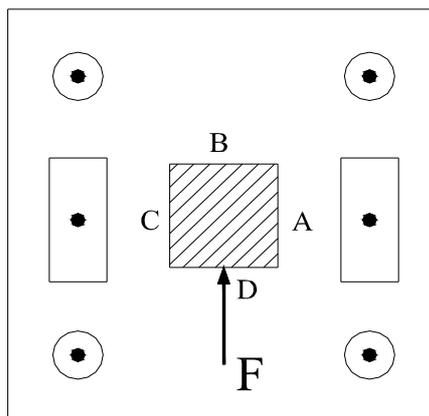
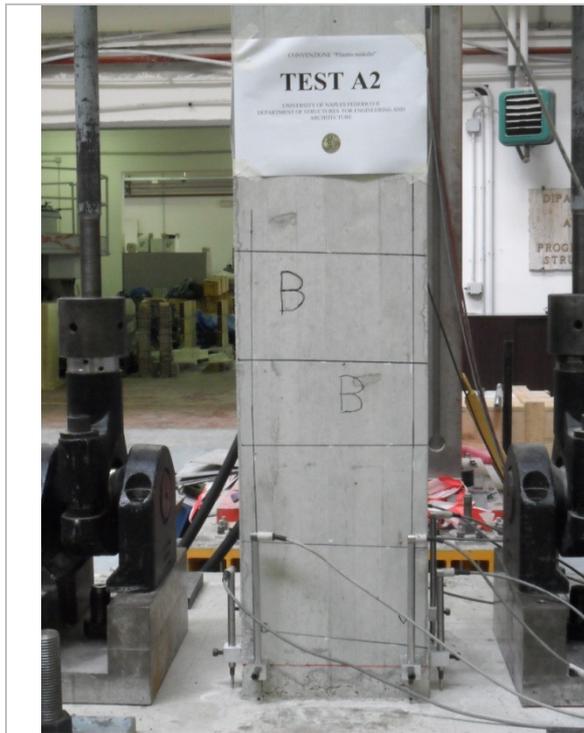


Figura 23 – Schema di prova



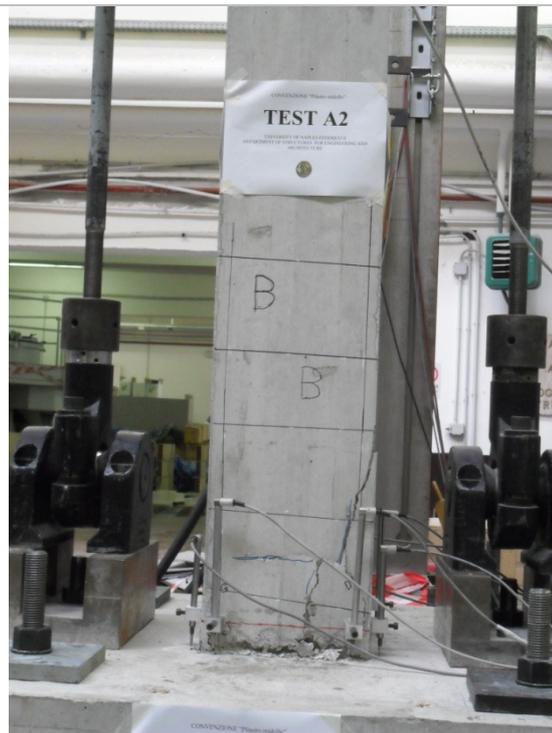
a) Prova al 0.1 % di drift



b) Prova al 0.5 % di drift



a) Prova al 2 % di drift



b) Prova al 4 % di drift

Figura 24 – Foto prova ai vari valori di drift



a) Prova al 6 % di drift



b) Prova al 6 % di drift



c) Prova al 8 % di drift



d) Prova al 8 % di drift

Figura 25 – Foto prova ai vari valori di drift

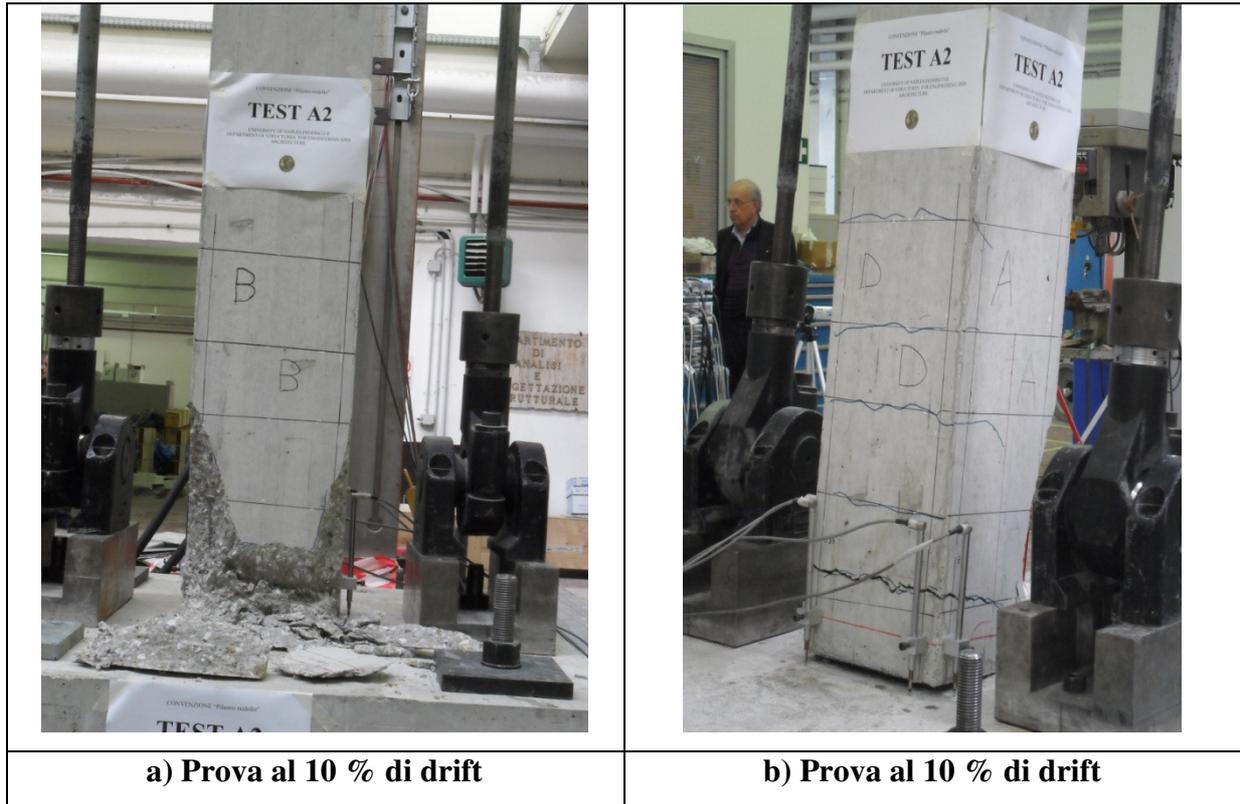


Figura 26 – Foto prova ai vari valori di drift

PROVINO B2

La curva sperimentale $F-\theta$ è di seguito riportata (**Figura 27**).

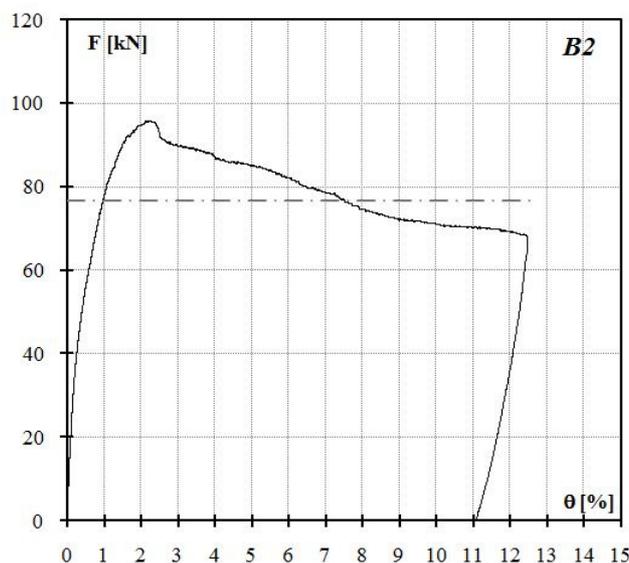


Figura 27 – Curva sperimentale $F-\theta$

La forza massima, pari a $F_{\max}=95,80$ kN, è stata raggiunta in corrispondenza di uno spostamento di 34,84 mm equivalente a un drift del 2,19 %.

Oltre all'individuazione della forza massima e del rispettivo drift, è stata individuata una *condizione ultima convenzionale* in corrispondenza di un abbattimento della resistenza del 20%. Sono stati determinati la forza ultima ($F_{0,8}$) e il drift corrispondente ($\theta_{0,8F}$). In particolare la forza ultima è risultata pari a $F_{0,8}= 76,64$ kN con corrispondente drift ultimo del 7,52%. (**Figura 27**).

In Tabella 13 sono riportati in maniera sintetica i principali risultati sperimentali in termini di forza e drift.

Forze e drift massimi					
F_{\max} [kN]	(+)	95,80	θ_{\max} [%]	(+)	2,24
Forze e drift ultimi					
$F_{0,8}$ [kN]	(+)	76,64	$\theta_{0,8}$ [%]	(+)	7,52

Tabella 13 Valori di forze e drift

Dal confronto tra il valore sperimentale della forza massima applicata F_{\max}^{exp} ed il valore di previsione teorica F_u^{th} , ne scaturisce un incremento del 5% (**Tabella 14**).

F_{\max}^{exp}	F_u^{th}	SCARTO
95,80 kN	90,87 kN	+5,43%

Tabella 14 Confronto teorico sperimentale

La curva sperimentale $V-\theta$ è riportata in **Figura 28**.

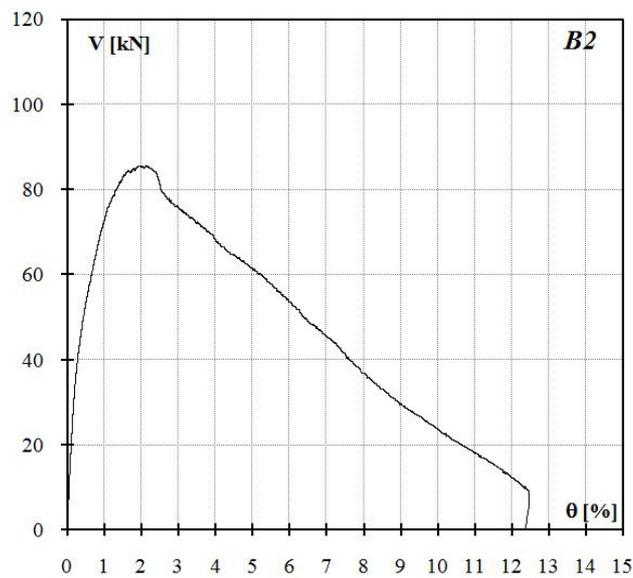


Figura 28 – Curva sperimentale $V-\theta$

Si riporta il grafico relativo all'energia E al variare del *drift* (Figura 29).

Il valore dell'energia viene calcolato come l'area sottesa alla curva $F-\theta$ (Figura 27).

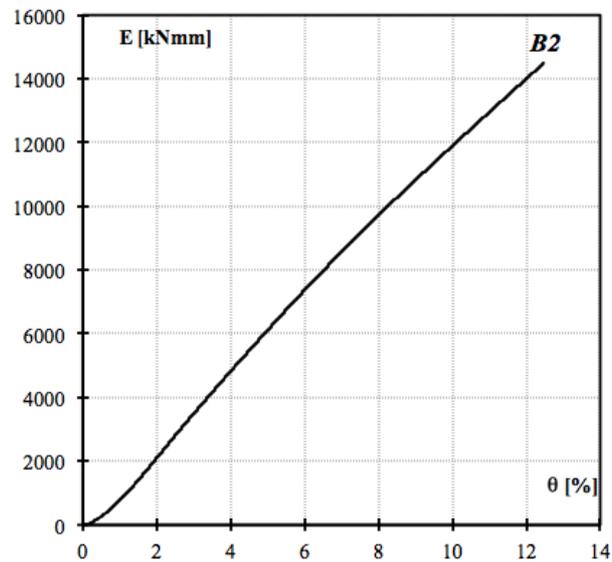


Figura 29 – Curva E- θ

In **Tabella 15** sono riportati in maniera sintetica i risultati relativi all'energia cumulata corrispondente al valore di drift, in grassetto è evidenziato il valore relativo alla fine convenzionale della prova.

θ [%]	E [kNmm]
0,10	15
0,50	263
2	2092
4	4819
6	7364
7,52	9173
8	9719
10	11894
12	14001

Tabella 15 Energia al variare del drift

Inoltre di seguito si riportano le immagini relative al grado di danneggiamento del provino *B2* durante la prova, corrispondente a diversi valori del *drift* (**Figura 31, Figura 32, Figura 33**). Dalla documentazione fotografica, tenendo conto dello schema di prova (**Figura 30**) si evince che:

- **drift 0.1%**: formazione di microfessurazione;
- **drift 0.5%**: formazione di microfessurazione;
- **drift 2%**: fessure di ampiezza significativa, che si aprono quasi contemporaneamente e tendono ad diffondersi lungo il pilastro;
- **drift 4%**: la fessurazione diviene più marcata e diffusa lungo il pilastro;
- **drift 6%**: si ha la rottura del copriferro alla base del pilastro, sulla faccia B, che risulta gravemente danneggiata;
- **drift 8%**: il provino presenta fessure notevoli e si evidenzia un sollevamento importante della faccia D.
- **drift 10%**: il provino presenta fessure notevoli, sulla faccia B affiorano le armature.
- **drift 12%**: il provino presenta una situazione degenerata rispetto alla precedente.

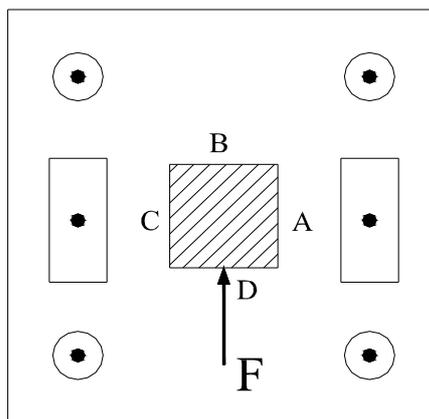


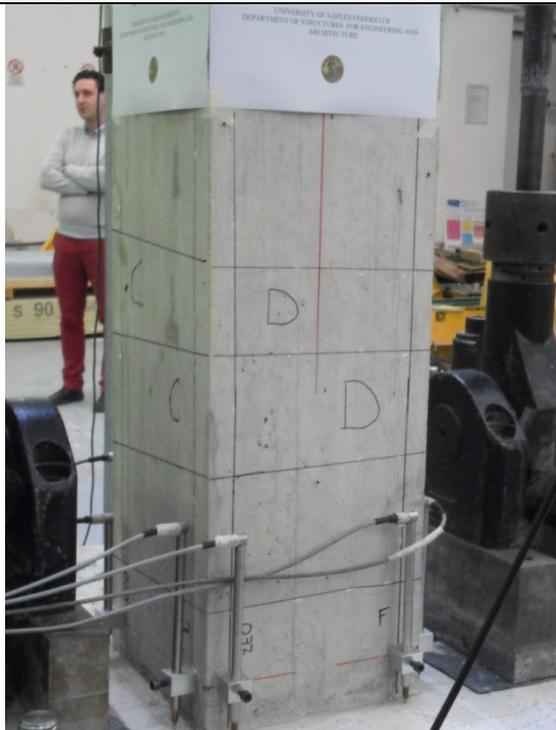
Figura 30 – Schema di prova



Prova al 0.1 % di drift



Prova al 0.5 % di drift



Prova al 2 % di drift



Prova al 4 % di drift

Figura 31 – Foto prova ai vari valori di drift



a) Prova al 6 % di drift



b) Prova al 6 % di drift



a) Prova al 8 % di drift



b) Prova al 8 % di drift

Figura 32 – Foto prova ai vari valori di drift



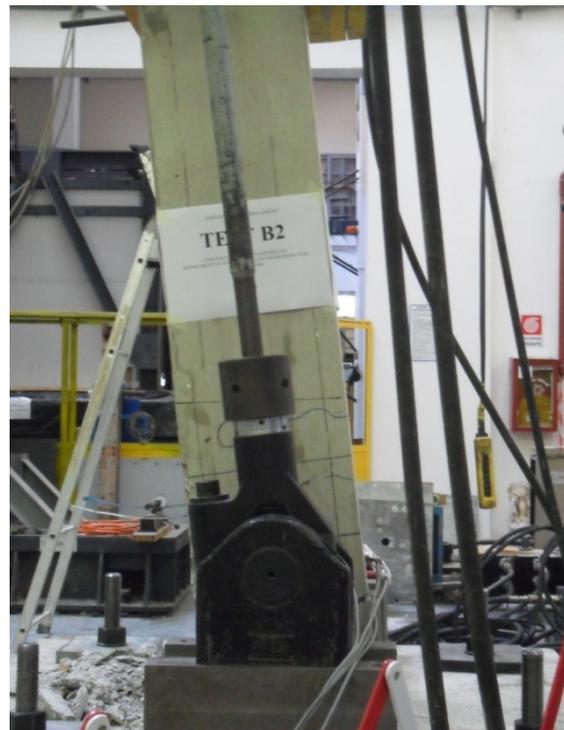
a) Prova al 10 % di drift



b) Prova al 10 % di drift



a) Prova al 12 % di drift



b) Prova al 12 % di drift

Figura 33 – Foto prova ai vari valori di drift

PROVE CICLICHE

Si riportano di seguito i risultati sperimentali da cui è possibile valutare le prestazioni in termini sia di **capacità resistente** che **deformativa** del provino testato. Per una maggiore efficacia nella descrizione della risposta registrata, i dati acquisiti sono stati elaborati ed esplicitati in una serie di formati grafici che semplificano l'interpretazione del comportamento sperimentale dell'elemento.

Per una migliore comprensione dei grafici riportati di seguito si specifica il significato dei parametri utilizzati:

- F è la forza, espressa in kN, letta dall'attuatore;
- V è il taglio calcolato depurando la forza dall'influenza dell'eccentricità dello sforzo
($V=F-N\cdot\theta$);
- δ è lo spostamento della testa del pilastro;
- $\theta=\delta/L$ è la rotazione della colonna, dove L è la distanza dell'attuatore dalla base del pilastro pari a 1,5m.

Al fine di valutare la **rigidezza** dell'elemento all'aumentare dello spostamento imposto si riportano i diagrammi dell'andamento della rigidezza secante K al variare del *drift*. Tale valore di rigidezza è stato calcolato come la pendenza della retta congiungente i punti di picco di ciascuna ripetizione di ogni ciclo di carico, ed è stata adimensionalizzata rispetto al valore di rigidezza flessionale corrispondente allo schema di trave incastrata caricata con forza concentrata ad un estremo.

$$K_{\text{flex}}=(3EI)/L^3$$

$$E= \text{modulo elastico}= 22000 (R_{\text{cm}})^{0,3};$$

I= inerzia della sezione reagente $= (B \cdot H^3) / 12$;

L= lunghezza (L=1500 mm altezza applicazione forza dallo spiccato di fondazione).

Il valore dell'**energia** viene calcolato come l'area sottesa alla curva **F- θ** , mentre il valore cumulato di essa, è ottenuto come somma progressiva delle energie relative ad ogni ripetizione per ogni ciclo

PROVINO A1

La curva sperimentale $F-\theta$ è di seguito riportata (**Figura 34**).

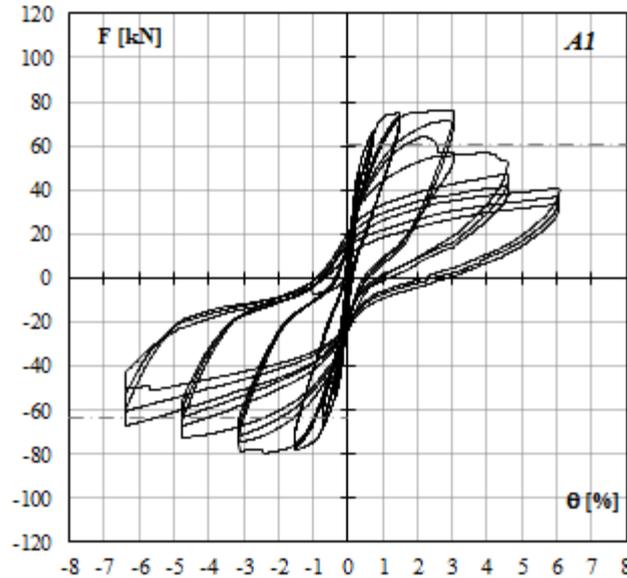


Figura 34– Pilastro A1, curva sperimentale $F-\theta$

Per spostamenti positivi la forza massima, pari a $F_{\max(+)}=76,08\text{kN}$, è stata raggiunta in corrispondenza di uno spostamento di 38,02 mm equivalente a un drift del 2,53 %.

Per spostamenti negativi la forza massima, pari a $F_{\max(-)}= -79,44\text{kN}$, è stata attinta in corrispondenza di uno spostamento di -35,56 mm pari a un drift del -2,37% (**Figura 34**).

Oltre all'individuazione della forza massima e dei rispettivi drift, è stata individuata una *condizione ultima convenzionale* in corrispondenza di un abbattimento della resistenza del 20%. Sono stati determinati la forza ultima ($F_{0,8}$) e i drift corrispondenti ($\theta_{0,8F}$). In particolare, la forza ultima è risultata pari, per spostamenti positivi, a $F_{0,8(+)}= 60,86\text{kN}$. Per spostamenti negativi si è avuto $F_{0,8(-)}= -63,55\text{kN}$, attinta in corrispondenza di un drift del -4,04% (**Figura 34**). In **Tabella 16** sono riportati in maniera sintetica i principali risultati sperimentali in termini di forza e drift.

Forze e drift massimi					
F_{\max} [kN]	(+)	+76,08	θ_{\max} [%]	(+)	2,53
	(-)	-79,44		(-)	2,37

Forze e drift ultimi					
$F_{0,8}$ [kN]	(+)	+60,86	$\theta_{0,8}$ [%]	(+)	n.a.
	(-)	-63,55		(-)	6,37

Tabella 16 Valori di forze e drift

Dal confronto tra il valore medio sperimentale della forza massima applicata $F_{\text{medio}}^{\text{exp}}$, (ottenuto dalla media dei massimi positivi e negativi), ed il valore di previsione teorica F_u^{th} , si evince che il provino ha mostrato una resistenza sperimentale maggiore del 15,25% rispetto a quella teorica (Tabella 17) .

$F_{\text{medio}}^{\text{exp}}$	F_u^{th}	SCARTO
77,76 kN	67,47 kN	+15,25%

Tabella 17 - Confronto teorico sperimentale

Si riporta di seguito il grafico (Figura 35) degli involuipi relativi ad ogni ripetizione. Dal confronto della curva di involuppo relativa alla prima ripetizione di ciascun ciclo con quelle relative alle successive ripetizione è possibile dedurre il decadimento di capacità resistente indotto dall'azione ciclica, dai grafici si evince che tale effetto è più marcato nelle fasi post picco.

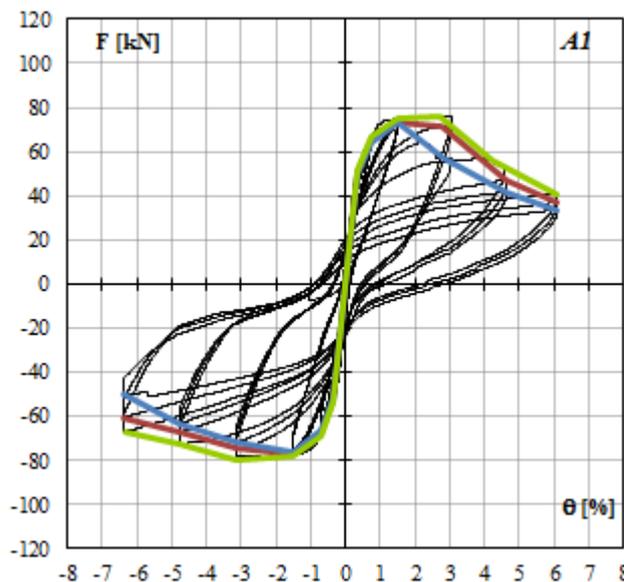


Figura 35 – Curva sperimentale con involuipi $F-\theta$

La curva sperimentale $V-\theta$ è riportata in **Figura 36**.

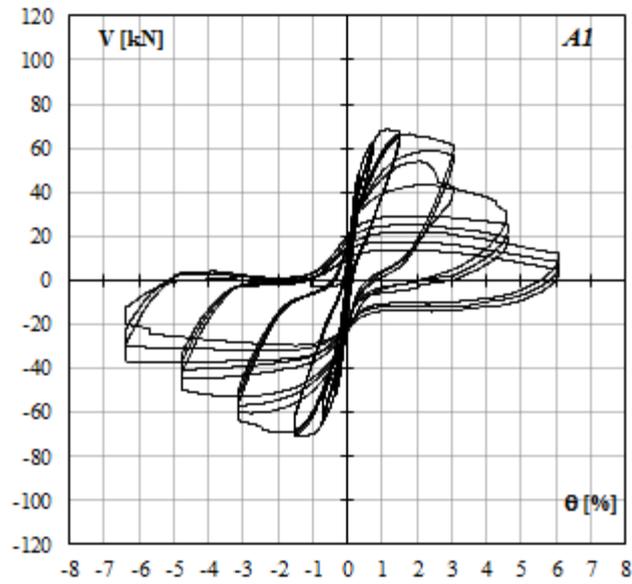


Figura 36– Curva sperimentale $V-\theta$

Di seguito si riporta l'involuppo $F-\delta$ (**Figura 37**).

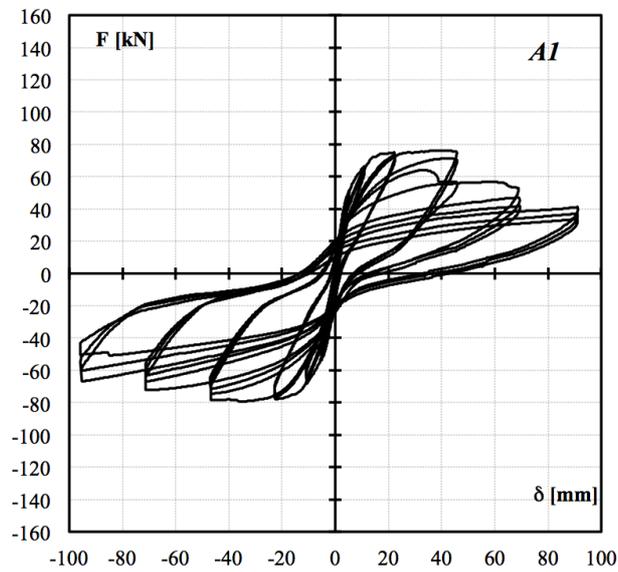


Figura 37– Curva sperimentale $F-\delta$

In **Figura 38** è riportato il grafico relativo alla rigidezza al variare del drift.

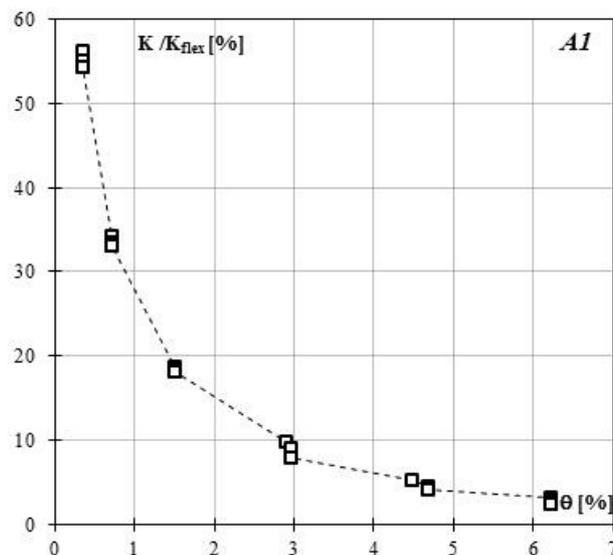


Figura 38– Curva k/k_{flex} - θ

Tabella 18 sono riportati in maniera sintetica i risultati relativi alla rigidezza corrispondente al valore di drift

Rigidezza e drift			
Ciclo	Ripetizione	θ^{Exp} [%]	K/K_{flex} [%]
I	I-1	0.34	56.31
	I-2	0.34	55.02
	I-3	0.34	54.38
II	II-1	0.72	34.18
	II-2	0.73	33.43
	II-3	0.73	33.03
III	III-1	1.50	18.66
	III-2	1.50	18.35
	III-3	1.51	18.13
IV	IV-1	2.91	9.79
	IV-2	2.96	9.02
	IV-3	2.96	7.93
V	V-1	4.47	5.26
	V-2	4.68	4.45
	V-3	4.68	4.10
VI	VI-1	6.21	3.18
	VI-2	6.21	2.87
	VI-3	6.61	2.48

Tabella 18 Rigidezza al variare del drift

Si riporta il grafico relativo all'energia cumulata E al variare del drift (**Figura 39**).

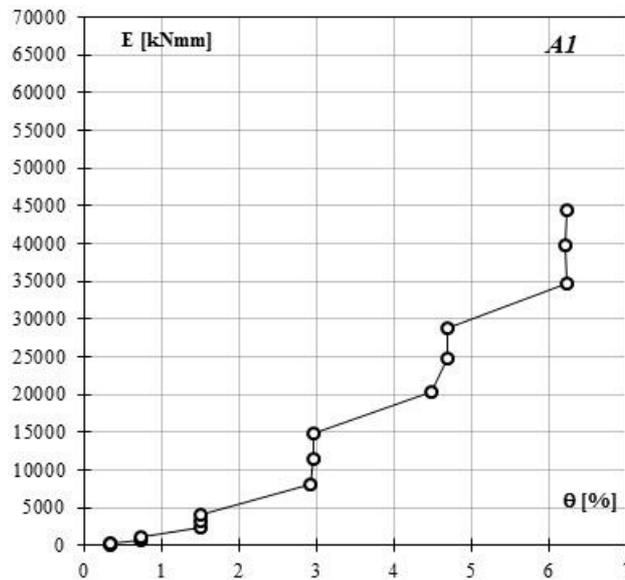


Figura 39– Curva E- θ

In **Tabella 19** sono riportati in maniera sintetica i risultati relativi all'energia cumulata corrispondente a ciascun valore di drift .

Energia e drift			
Ciclo	Ripetizione	θ^{Exp} [%]	E [kNmm]
I	I-1	0,34	124
	I-2	0,34	218
	I-3	0,34	305
II	II-1	0,72	610
	II-2	0,73	823
	II-3	0,73	1017
III	III-1	1,50	2283
	III-2	1,50	3236
	III-3	1,51	4107
IV	IV-1	2,91	8048
	IV-2	2,96	11555
	IV-3	2,96	14773
V	V-1	4,47	20409
	V-2	4,68	24763
	V-3	4,68	28750
VI	VI-1	6,21	34625
	VI-2	6,21	39774
	VI-3	6,61	44373

Tabella 19 Energia al variare del drift

In **Tabella 20**, sono riportati i valori relativi agli spostamenti residui corrispondenti al valore di forza nullo, per ogni ciclo per tutte le ripetizioni, relativamente agli spostamenti positivi e negativi.

Spostamenti residui			
Ciclo	Ripetizione	$-\delta^{Exp}$ [mm]	$+\delta^{Exp}$ [mm]
I (6mm)	I-1	-0,30	+0,76
	I-2	-0,25	+0,48
	I-3	-0,25	+0,53
II (12mm)	II-1	-0,59	+0,92
	II-2	-0,45	+0,76
	II-3	-0,49	+0,72
III (24mm)	III-1	-1,70	+2,12
	III-2	-1,53	+1,48
	III-3	-1,35	+1,37
IV (48mm)	IV-1	-4,86	+6,78
	IV-2	-4,61	+8,80
	IV-3	-5,96	+8,25
V (72mm)	V-1	-13,57	+14,21
	V-2	-11,15	+12,65
	V-3	-10,96	+17,25
VI (96mm)	VI-1	-13,21	+32,85
	VI-2	-10,15	+36,49
	VI-3	-10,63	+42,45

Tabella 20 Spostamenti residui

Inoltre di seguito si riportano le immagini relative al grado di danneggiamento del provino A1 durante la prova, corrispondente a diversi valori del drift (**Figura 41, Figura 42, Figura 43**).

Dalla documentazione fotografica, tenendo conto dello schema di prova (**Figura 40**), e mettendo a confronto le due facce opposte, ortogonali al carico si evince che:

- **drift 0,4%**: formazione di microfessurazione;
- **drift 0,8%**: formazione di fessure;
- **drift 1,6%**: la fessurazione di tipo flessionale tende a diffondersi lungo il pilastro;
- **drift 3,2%**: oltre alla fessurazione, si ha la prima rottura di copriferro alla base del pilastro su una faccia D;
- **drift 4,8%**: la rottura del copriferro alla base del pilastro si verifica anche per la faccia B, su uno spigolo;
- **drift 6,4%**: il provino risulta fessurato, e con espulsione dei copriferri sulle due facce B e D.

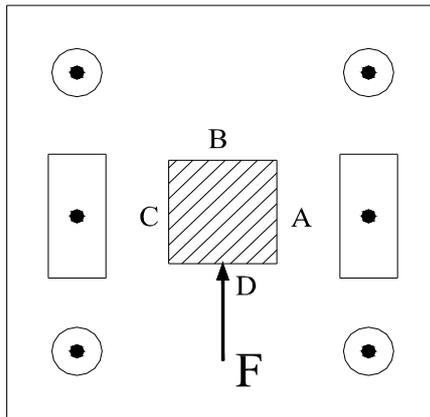


Figura 40 – Schema di prova

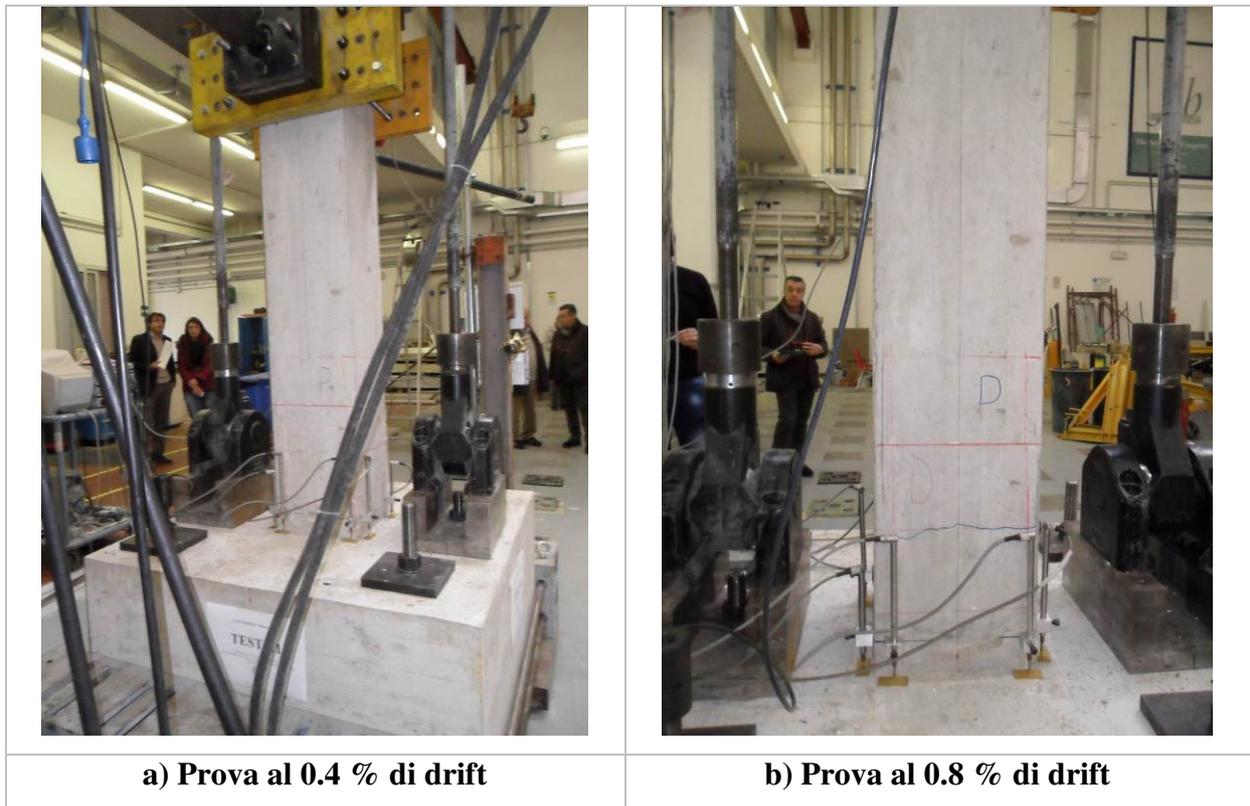


Figura 41 – Foto prova ai vari valori di drift

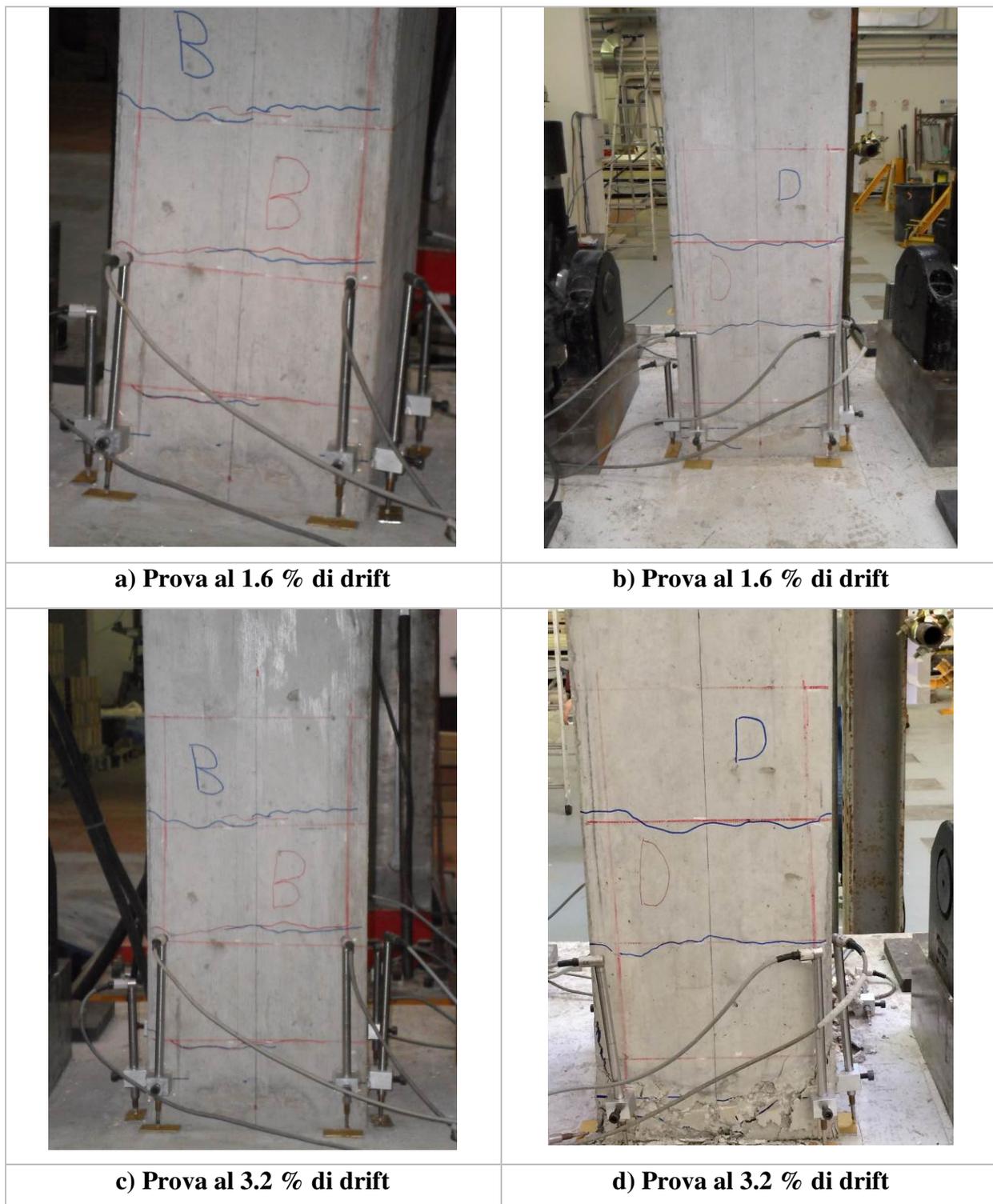


Figura 42 – Foto prova ai vari valori di drift

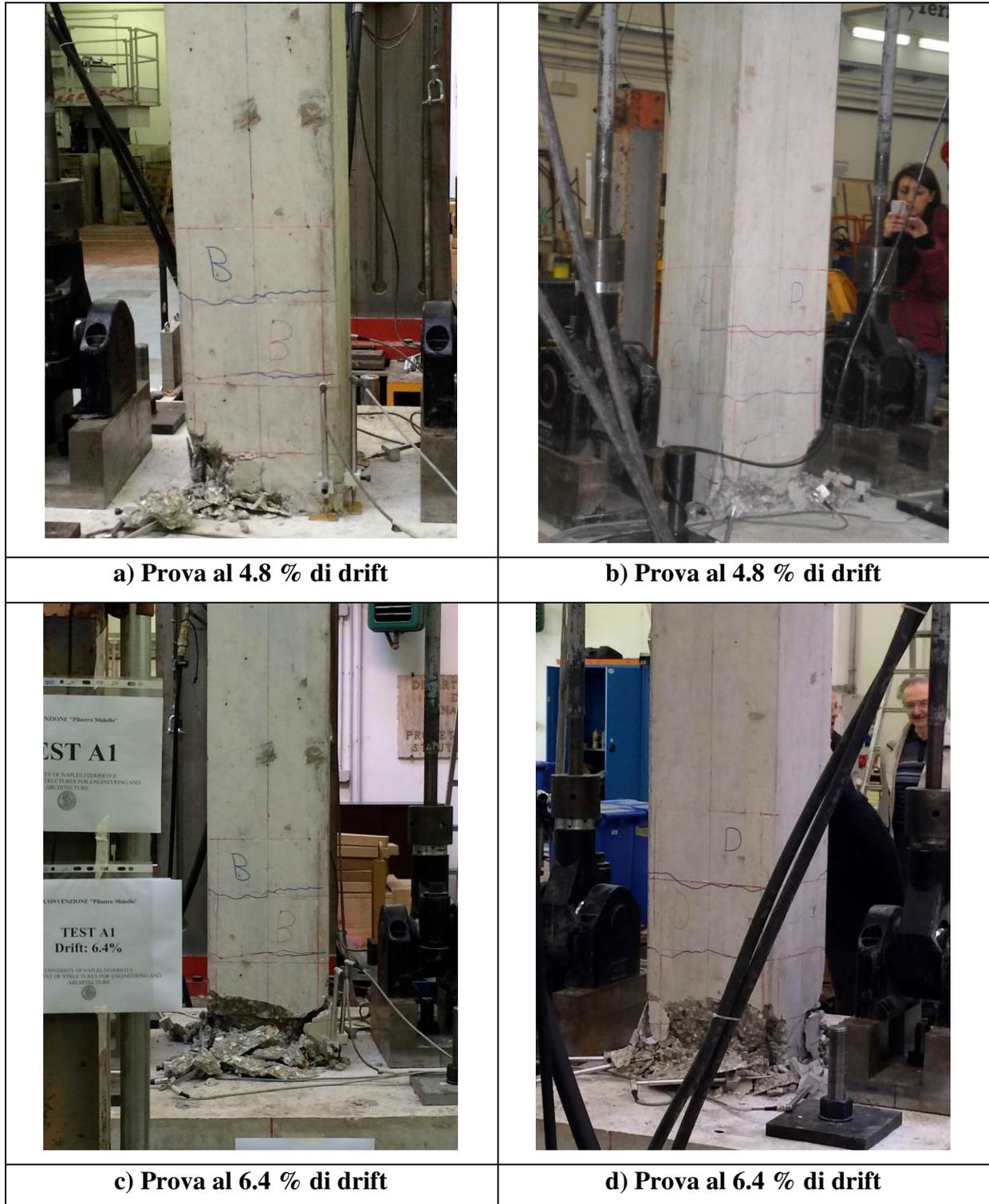


Figura 43– Foto prova ai vari valori di drift

PROVINO B1

La curva sperimentale $F-\theta$ è di seguito riportata (**Figura 44**).

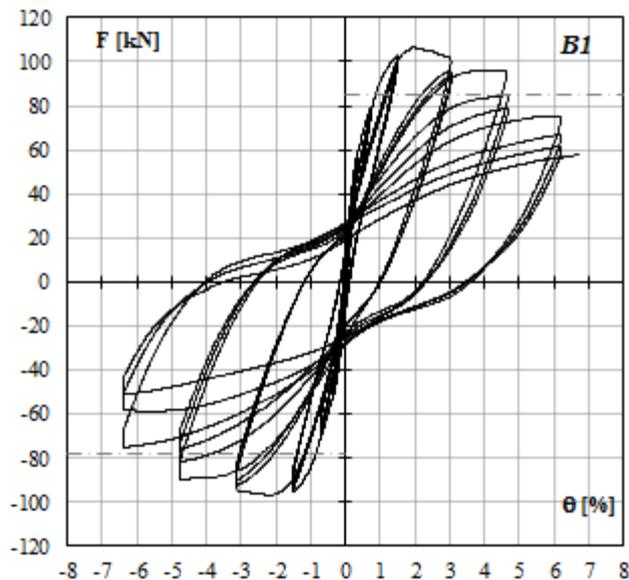


Figura 44 – Curva sperimentale $F-\theta$

Per spostamenti positivi la forza massima, pari a $F_{\max(+)}=106,66\text{kN}$, è stata raggiunta in corrispondenza di uno spostamento di 29,91 mm equivalente a un drift del 1,99 %.

Per spostamenti negativi la forza massima, pari a $F_{\max(-)}= -97,0\text{kN}$, è stata attinta in corrispondenza di uno spostamento di -33,39 mm pari a un drift del -2,23% (**Figura 44**).

Oltre all'individuazione della forza massima e dei rispettivi drift, è stata individuata una *condizione ultima convenzionale* in corrispondenza di un abbattimento della resistenza del 20%. Sono stati determinati la forza ultima ($F_{0,8}$) e i drift corrispondenti ($\theta_{0,8F}$). In particolare la forza ultima è risultata pari, per spostamenti positivi, a $F_{0,8(+)}= 85,33\text{kN}$ cui ha corrisposto un drift ultimo del 4,51%. Per spostamenti negativi si ha che $F_{0,8(-)}= -77,60\text{kN}$ attinta in corrispondenza di un drift del -4,76% (**Figura 44**). In **Tabella 21** sono riportati in maniera sintetica i principali risultati sperimentali in termini di forza e drift.

Forze e drift massimi					
F_{max} [kN]	(+)	+106,66	θ_{max} [%]	(+)	1,99
	(-)	-97,00		(-)	2,23
Forze e drift ultimi					
F_{0,8} [kN]	(+)	+85,33	θ_{0,8} [%]	(+)	4,51
	(-)	-77,60		(-)	4,76

Tabella 21 Valori di forze e drift

Dal confronto tra il valore medio sperimentale della forza massima applicata $F_{\text{medio}}^{\text{exp}}$ (ottenuto dalla media dei massimi positivi e negativi), ed il valore di previsione teorica F_u^{th} , ne scaturisce un incremento del 12,06% (**Tabella 22**).

F_{medio}^{exp}	F_uth	SCARTO
101,83 kN	90,87 kN	+12,06%

Tabella 22 Confronto teorico sperimentale

Si riporta di seguito il grafico (**Figura 45**) degli involuipi relativi ad ogni ripetizione. Dal confronto della curva di involuppo relativa alla prima ripetizione di ciascun ciclo con quelle relative alle successive ripetizione si evince che il decadimento della capacità resistente, risulta avere l' andamento atteso che diventa maggiore passando dalla prima alla terza ripetizione di ogni ciclo.

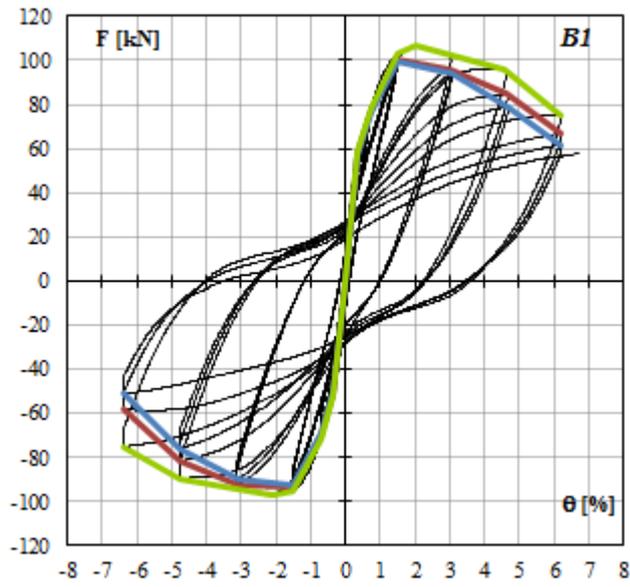


Figura 45 – Curva sperimentale con involucri $F-\theta$

La curva sperimentale $V-\theta$ è riportata in Figura 46.

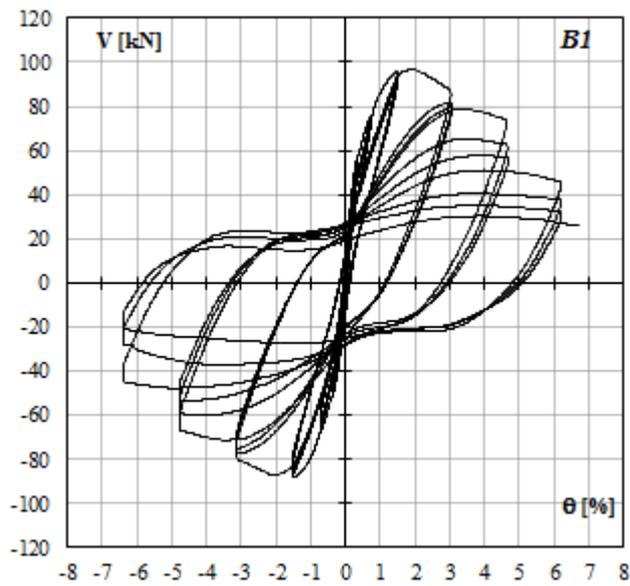


Figura 46 – Curva sperimentale $V-\theta$

Di seguito si riporta l'involuppo F- δ . (**Figura 47**).

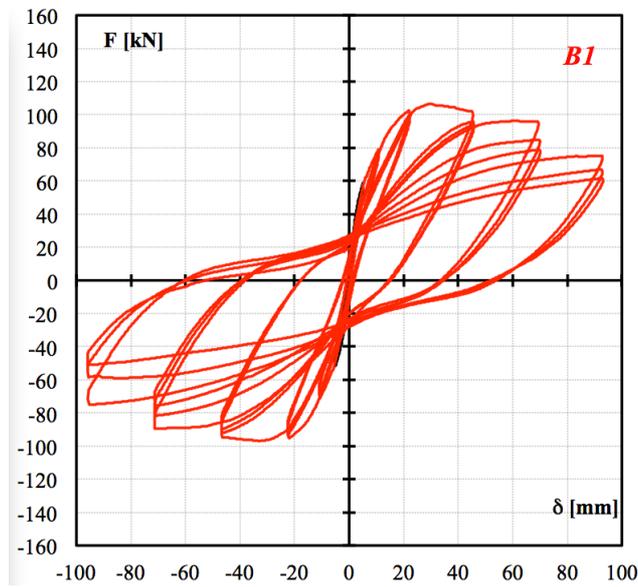


Figura 47 – Curva sperimentale F - δ

In **Figura 48** è riportato il grafico relativo alla rigidezza al variare del drift.

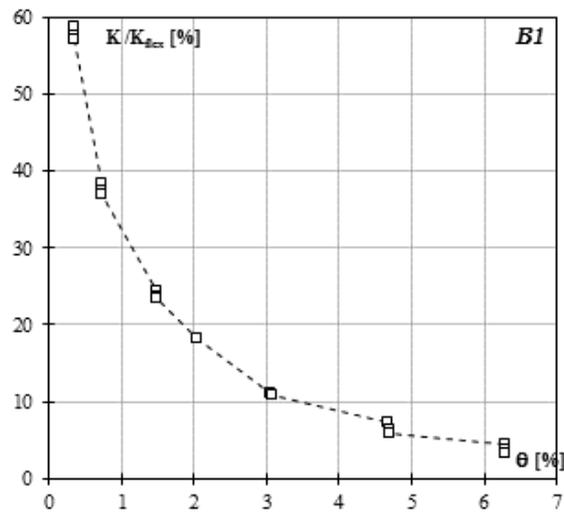


Figura 48 – Curva k/k_{flex} - θ

In **Tabella 23** sono riportati in maniera sintetica i risultati relativi alla rigidezza corrispondente al valore di drift. Si evidenzia in grassetto il valore relativo alla fine convenzionale della prova, considerando la crisi contemporanea nel ciclo positivo e negativo.

Rigidezza e drift			
Ciclo	Ripetizione	θ [%]	K/K_{flex} [%]
I	I-1	0,34	58.79
	I-2	0,34	57.60
	I-3	0,34	57.08
II	II-1	0,72	38.29
	II-2	0,72	37.41
	II-3	0,72	37.03
III	III-1	1,49	24.32
	III-2	1,49	23.79
	III-3	1,49	23.45
IV	IV-1	2,03	18.32
	IV-2	3,06	11.21
	IV-3	3,07	10.96
V	V-1	4,66	7.28
	V-2	4,70	6.49
	V-3	4,71	6.02
VI	VI-1	6,28	4.38
	VI-2	6,28	3.66
	VI-3	6,29	3.29

Tabella 23 Rigidezza al variare del drift

Si riporta il grafico relativo all'energia cumulata E al variare del drift (**Figura 49**).

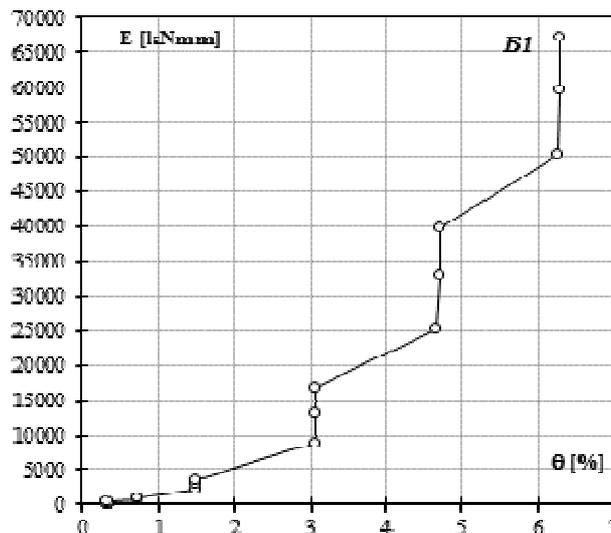


Figura 49 – Curva E- θ

In **Tabella 24** sono riportati in maniera sintetica i risultati relativi all'energia cumulata corrispondente al valore di drift. Si evidenzia in grassetto il valore relativo alla fine convenzionale della prova, considerando la crisi contemporanea nel ciclo positivo e negativo

Energia e drift			
Ciclo	Ripetizione	θ [%]	E [kNmm]
I	I-1	0,34	120
	I-2	0,34	209
	I-3	0,34	293
II	II-1	0,72	598
	II-2	0,72	811
	II-3	0,72	1004
III	III-1	1,49	2167
	III-2	1,49	2957
	III-3	1,49	3663
IV	IV-1	3,08	8947
	IV-2	3,06	12921
	IV-3	3,07	16664
V	V-1	4,66	25213
	V-2	4,70	32902
	V-3	4,71	39852
VI	VI-1	6,28	50341
	VI-2	6,28	59540
	VI-3	6,29	67319

Tabella 24 Energia al variare del drift

In **Tabella 25**, sono riportati i valori relativi agli spostamenti residui corrispondenti al valore di forza nullo, per ogni ciclo e per tutte le ripetizioni, relativamente agli spostamenti positivi e negativi. Si evidenzia in grassetto il valore relativo alla fine convenzionale della prova, considerando la crisi contemporanea nel ciclo positivo e negativo.

Spostamenti residui			
Ciclo	Ripetizione	$-\delta^{Exp}$ [mm]	$+\delta^{Exp}$ [mm]
I (6mm)	I-1	-0,59	0,46
	I-2	-0,56	0,27
	I-3	-0,56	0,26
II (12mm)	II-1	-0,95	0,60
	II-2	-0,86	0,37
	II-3	-0,81	0,34
III (24mm)	III-1	-2,54	1,83
	III-2	-2,35	1,25
	III-3	-2,15	1,12
IV (48mm)	IV-1	-17,74	14,56
	IV-2	-17,89	15,22
	IV-3	-17,88	15,10
V (72mm)	V-1	-38,14	33,58
	V-2	-39,35	34,69
	V-3	-39,34	34,55
VI (96mm)	VI-1	-60,65	53,97
	VI-2	-59,45	52,55
	VI-3	-52,72	51,82

Tabella 25 Spostamenti residui

Inoltre di seguito si riportano le immagini relative al grado di danneggiamento del provino *B1* durante la prova, corrispondente a diversi valori del *drift* (**Figura 51, Figura 52**). Dalla documentazione fotografica, tenendo conto dello schema di prova (**Figura 50**), e mettendo a confronto le due facce opposte, ortogonali al carico si evince che:

- **drift 0,4%**: formazione di microfessurazione;
- **drift 0,8%**: formazione di microfessurazione;
- **drift 1,6%**: iniziano a formarsi le prime fessure di ampiezza significative, che tendono a diffondersi lungo il pilastro;
- **drift 3,2%**: la fessurazione diviene più marcata e diffusa lungo il pilastro;
- **drift 4,8%**: si ha la rottura del copriferro alla base del pilastro, che si verifica prima sulla faccia B, e poi su quella D;
- **drift 6,4%**: il provino risulta fessurato, e con espulsione dei copriferri sulle due facce B e D.

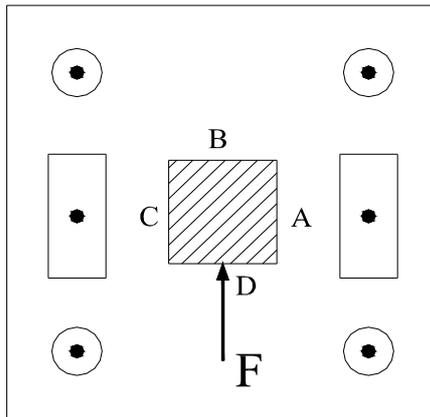


Figura 50 – Schema di prova

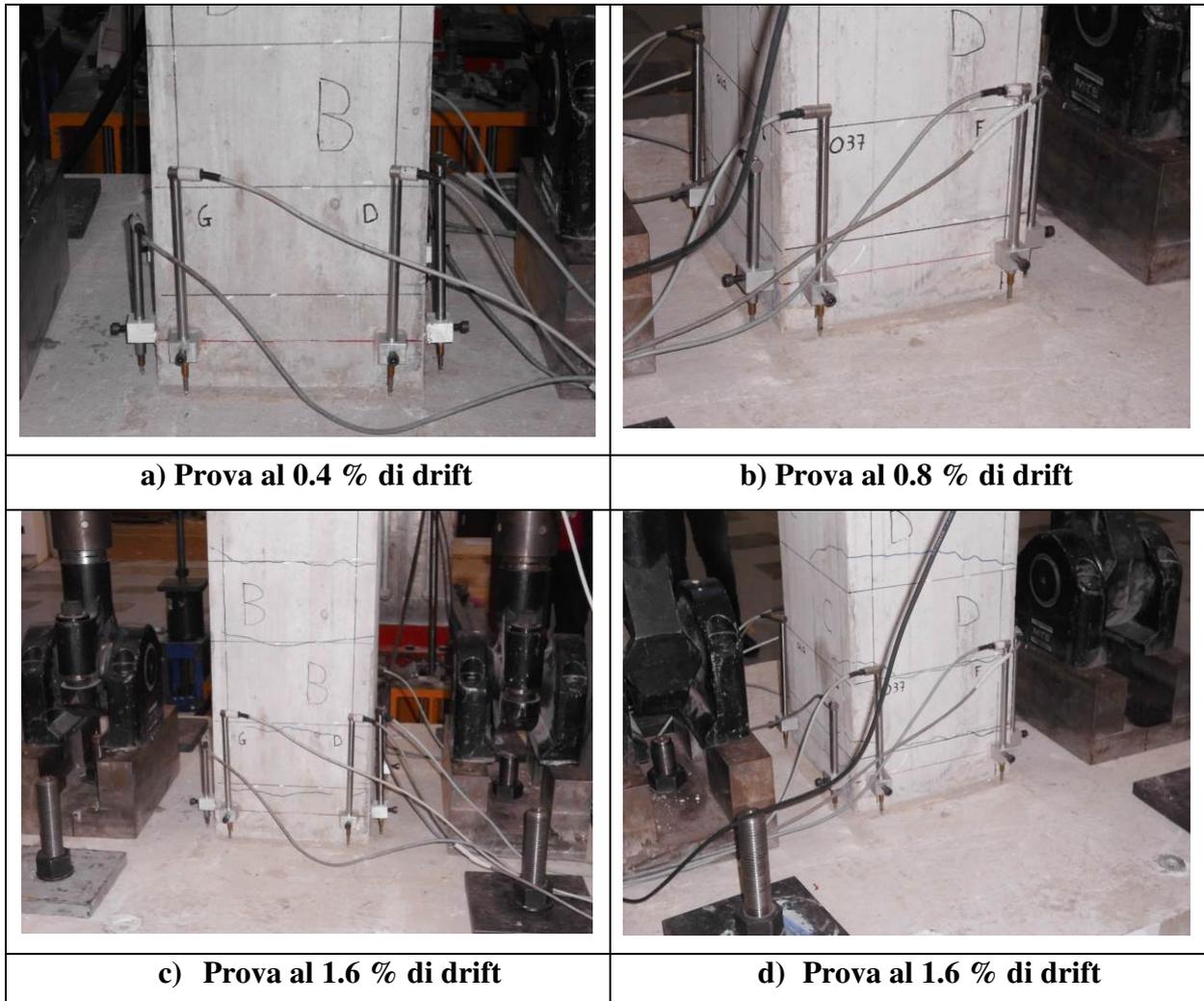


Figura 51 – Foto prova ai vari valori di drift



c) Prova al 3.2 % di drift



d) Prova al 3.2 % di drift



a) Prova al 4.8 % di drift



b) Prova al 4.8 % di drift



c) Prova al 6.4 % di drift



d) Prova al 6.4 % di drift

Figura 52– Foto prova ai vari valori di drift

PROVINO C

La curva sperimentale $F-\theta$ è di seguito riportata (**Figura 53**).

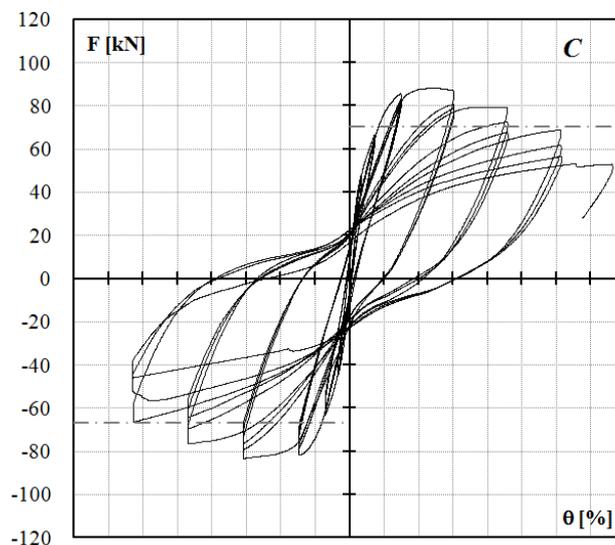


Figura 53 – Curva sperimentale $F-\theta$

Per spostamenti positivi la forza massima, pari a $F_{\max(+)}=88,14$ kN, è stata raggiunta in corrispondenza di uno spostamento di 37,99 mm equivalente a un drift del 2,53 %.

Per spostamenti negativi la forza massima, pari a $F_{\max(-)}= -83,46$ kN, è stata attinta in corrispondenza di uno spostamento di -46,10 mm pari a un drift del -3,07% (**Figura 44**).

Oltre all'individuazione della forza massima e dei rispettivi drift, è stata individuata una *condizione ultima convenzionale* in corrispondenza di un abbattimento della resistenza del 20%. Sono stati determinati la forza ultima ($F_{0,8}$) e i drift corrispondenti ($\theta_{0,8F}$). In particolare la forza ultima è risultata pari, per spostamenti positivi, a $F_{0,8(+)}= 70,51$ kN cui ha corrisposto un drift ultimo del 5,49%. Per spostamenti negativi si ha che $F_{0,8(-)}= -66,77$ kN attinta in corrispondenza di un drift del -6,27% (**Figura 53**). In **Tabella 26** sono riportati in maniera sintetica i principali risultati sperimentali in termini di forza e drift.

Forze e drift massimi					
F_{\max} [kN]	(+)	+88,14	θ_{\max} [%]	(+)	2,53
	(-)	-83,46		(-)	3,07
Forze e drift ultimi					
$F_{0,8}$ [kN]	(+)	+70,51	$\theta_{0,8}$ [%]	(+)	4,59
	(-)	-66,77		(-)	-6,27

Tabella 26 Valori di forze e drift

Dal confronto tra il valore medio sperimentale della forza massima applicata $F_{\text{medio}}^{\text{exp}}$ (ottenuto dalla media dei massimi positivi e negativi), ed il valore di previsione teorica F_u^{th} , ne scaturisce un incremento del 3,21% (Tabella 27).

$F_{\text{medio}}^{\text{exp}}$	F_u^{th}	SCARTO
85,80 kN	83,13 kN	+3,21%

Tabella 27 Confronto teorico sperimentale

Si riporta di seguito il grafico (Figura 54) degli involucri relativi ad ogni ripetizione. Dal confronto della curva di involuppo relativa alla prima ripetizione di ciascun ciclo con quelle relative alle successive ripetizione si evince che il decadimento della capacità resistente, risulta avere l' andamento atteso che diventa maggiore passando dalla prima alla terza ripetizione di ogni ciclo.

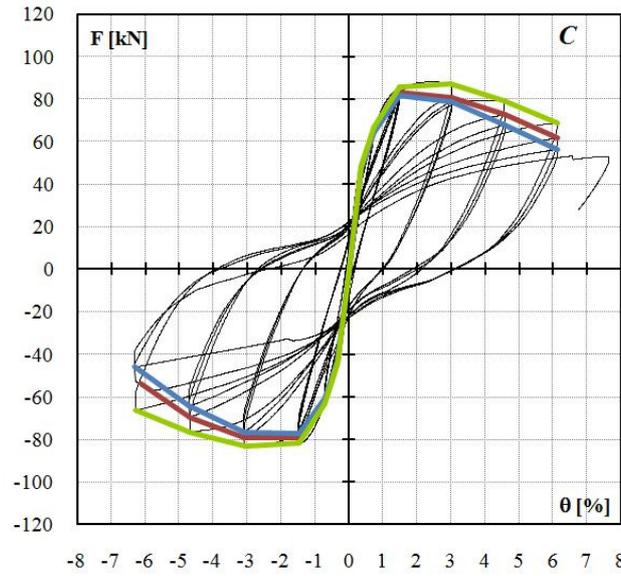


Figura 54 – Curva sperimentale con involucri $F-\theta$

La curva sperimentale $V-\theta$ è riportata in Figura 55.

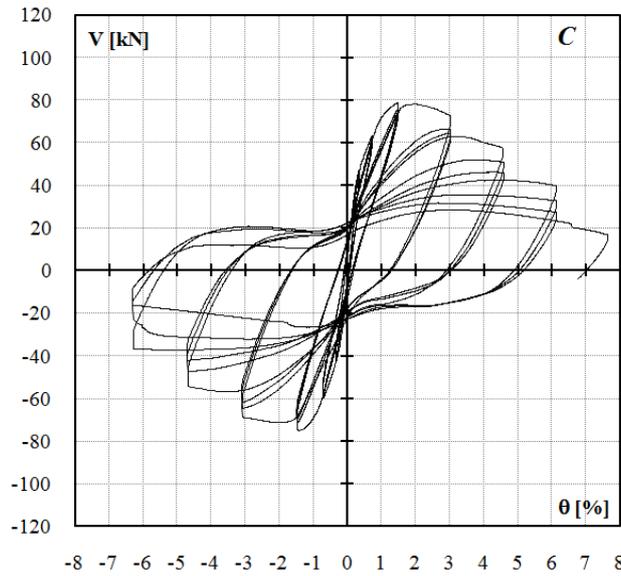


Figura 55 – Curva sperimentale $V-\theta$

Di seguito il grafico relativo alla curva sperimentale $F-\delta$ (Figura 56).

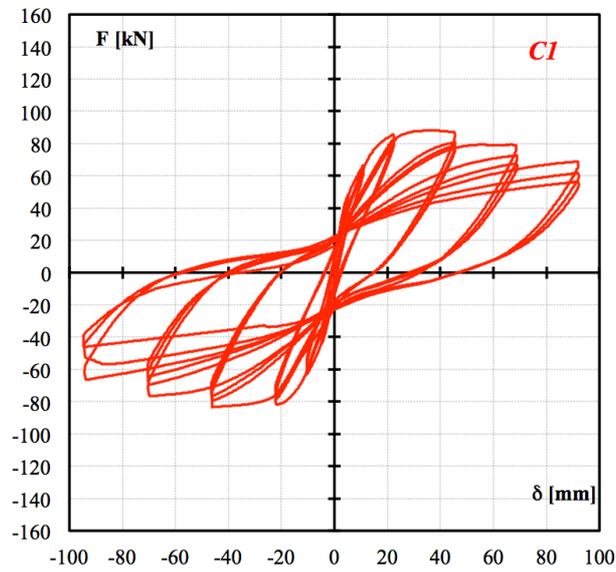


Figura 56 – Curva sperimentale $F-\delta$

In Figura 57 è riportato il grafico relativo alla rigidezza al variare del drift.

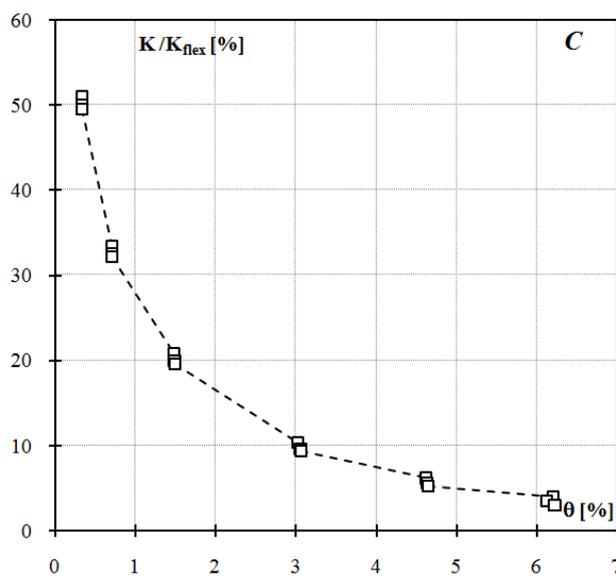


Figura 57 – Curva $k/k_{flex}-\theta$

In **Tabella 28** sono riportati in maniera sintetica i risultati relativi alla rigidezza corrispondente al valore di drift . Si evidenzia in grassetto il valore relativo alla fine convenzionale della prova, considerando la crisi contemporanea nel ciclo positivo e negativo

Rigidezza e drift			
Ciclo	Ripetizione	θ [%]	K/K_{flex} [%]
I	I-1	0.33	50.93
	I-2	0.33	50.02
	I-3	0.33	49.46
II	II-1	0.71	33.44
	II-2	0.71	32.59
	II-3	0.71	32.17
III	III-1	1.48	20.76
	III-2	1.49	19.96
	III-3	1.49	19.55
IV	IV-1	3.02	10.33
	IV-2	3.06	9.58
	IV-3	3.06	9.31
V	V-1	4.62	6.16
	V-2	4.63	5.62
	V-3	4.64	5.21
VI	VI-1	6.20	3.99
	VI-2	6.13	3.46
	VI-3	6.22	3.02

Tabella 28 Rigidezza al variare del drift

Si riporta il grafico relativo all'energia cumulata E al variare del drift (**Figura 58**).

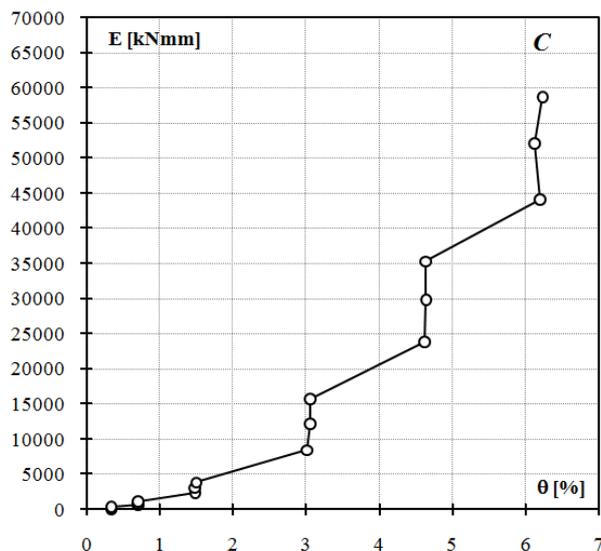


Figura 58 – Curva E- θ

In **Tabella 29** sono riportati in maniera sintetica i risultati relativi all'energia cumulata corrispondente al valore di drift. Si evidenzia in grassetto il valore relativo alla fine convenzionale della prova, considerando la crisi contemporanea nel ciclo positivo e negativo.

Energia e drift			
Ciclo	Ripetizione	θ [%]	E [kNmm]
I	I-1	0.33	127
	I-2	0.33	229
	I-3	0.33	324
II	II-1	0.71	655
	II-2	0.71	900
	II-3	0.71	1126
III	III-1	1.48	2334
	III-2	1.49	3166
	III-3	1.49	3920
IV	IV-1	3.02	8528
	IV-2	3.06	12190
	IV-3	3.06	15648
V	V-1	4.62	22833
	V-2	4.63	28899
	V-3	4.64	34504
VI	VI-1	6.20	43162
	VI-2	6.13	51257
	VI-3	6.22	57900

Tabella 29 Energia al variare del drift

In **Tabella 30**, sono riportati i valori relativi agli spostamenti residui corrispondenti al valore di forza nullo, per ogni ciclo e per tutte le ripetizioni, relativamente agli spostamenti positivi e negativi. Si evidenzia in grassetto il valore relativo alla fine convenzionale della prova, considerando la crisi contemporanea nel ciclo positivo e negativo

Spostamenti residui			
Ciclo	Ripetizione	$-\delta^{\text{Exp}}$ [mm]	$+\delta^{\text{Exp}}$ [mm]
I (6mm)	I-1	-0.76	+0,78
	I-2	-0.72	+0,56
	I-3	-0.72	+0,53
II (12mm)	II-1	-1.37	+1,05
	II-2	-1.29	+0,79
	II-3	-1.29	+0,75
III (24mm)	III-1	-3.87	+2,61
	III-2	-3.66	+2,02
	III-3	-3.54	+1,98
IV (48mm)	IV-1	-20.35	+14,68
	IV-2	-20.59	+15,07
	IV-3	-20.38	+15,06
V (72mm)	V-1	-40.46	+32,20
	V-2	-39.27	+30,47
	V-3	-38.67	+28,22
VI (96mm)	VI-1	-58.54	+47,01
	VI-2	-57.03	+46,62
	VI-3	-36.11	+46,66

Tabella 30 Spostamenti residui

Inoltre di seguito si riportano le immagini relative al grado di danneggiamento del provino *BI* durante la prova, corrispondente a diversi valori del *drift* (Figura 60, Figura 61, Figura 62). Dalla documentazione fotografica, tenendo conto dello schema di prova (**Figura 59**), e mettendo a confronto le due facce opposte, ortogonali al carico si evince che:

- **drift 0.4%**: formazione di microfessurazione;
- **drift 0.8** iniziano a formarsi le prime fessure di ampiezza significative, che tendono a diffondersi lungo il pilastro;
- **drift 1,6%**: la fessurazione diviene più marcata e diffusa lungo il pilastro;
- **drift 3,2%**: si ha la rottura del copriferro alla base del pilastro, che si verifica prima sulle facce B e D;

- **drift 4,8%**: il provino risulta fessurato, e con espulsione dei copriferri sulle due face B e D;
- **drift 6,4%**: degenerazione del quadro fessurativo precedente.

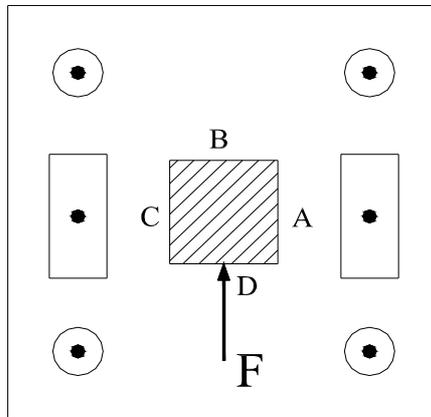


Figura 59 – Schema di prova

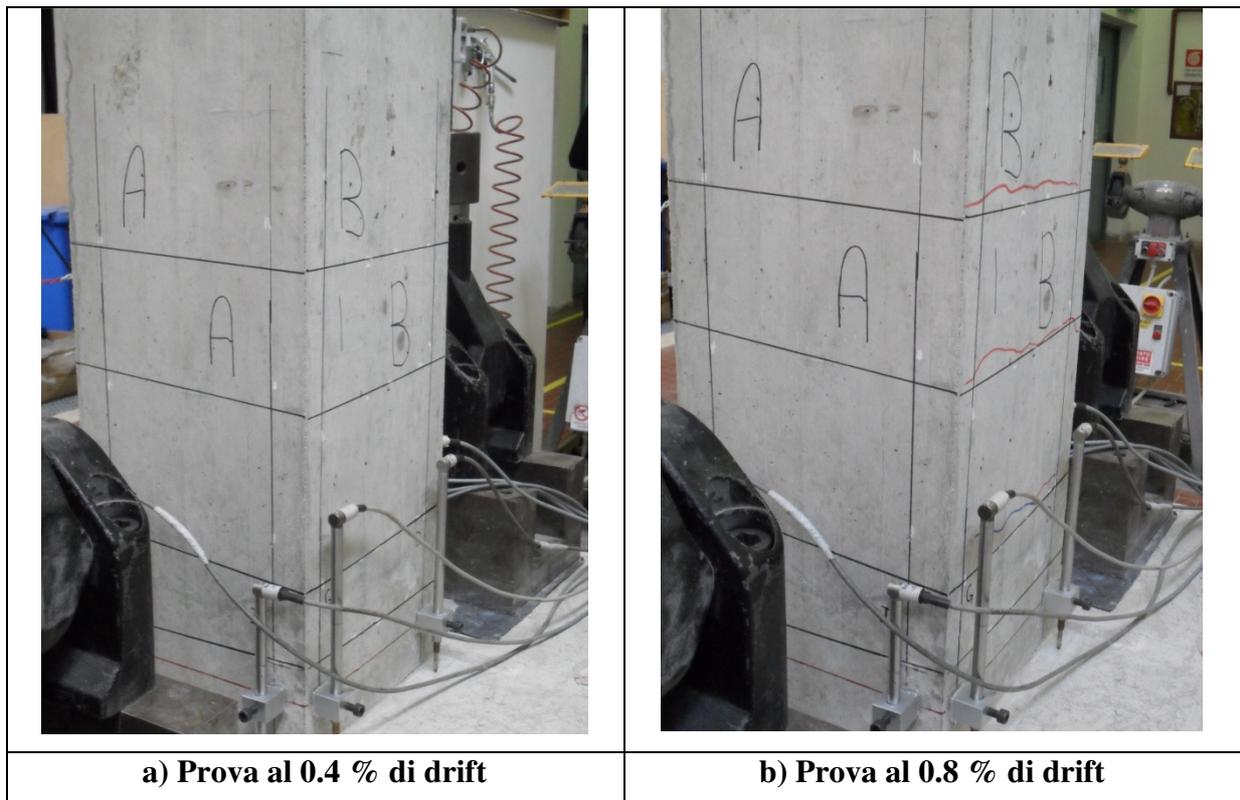


Figura 60– Foto prova ai vari valori di drift

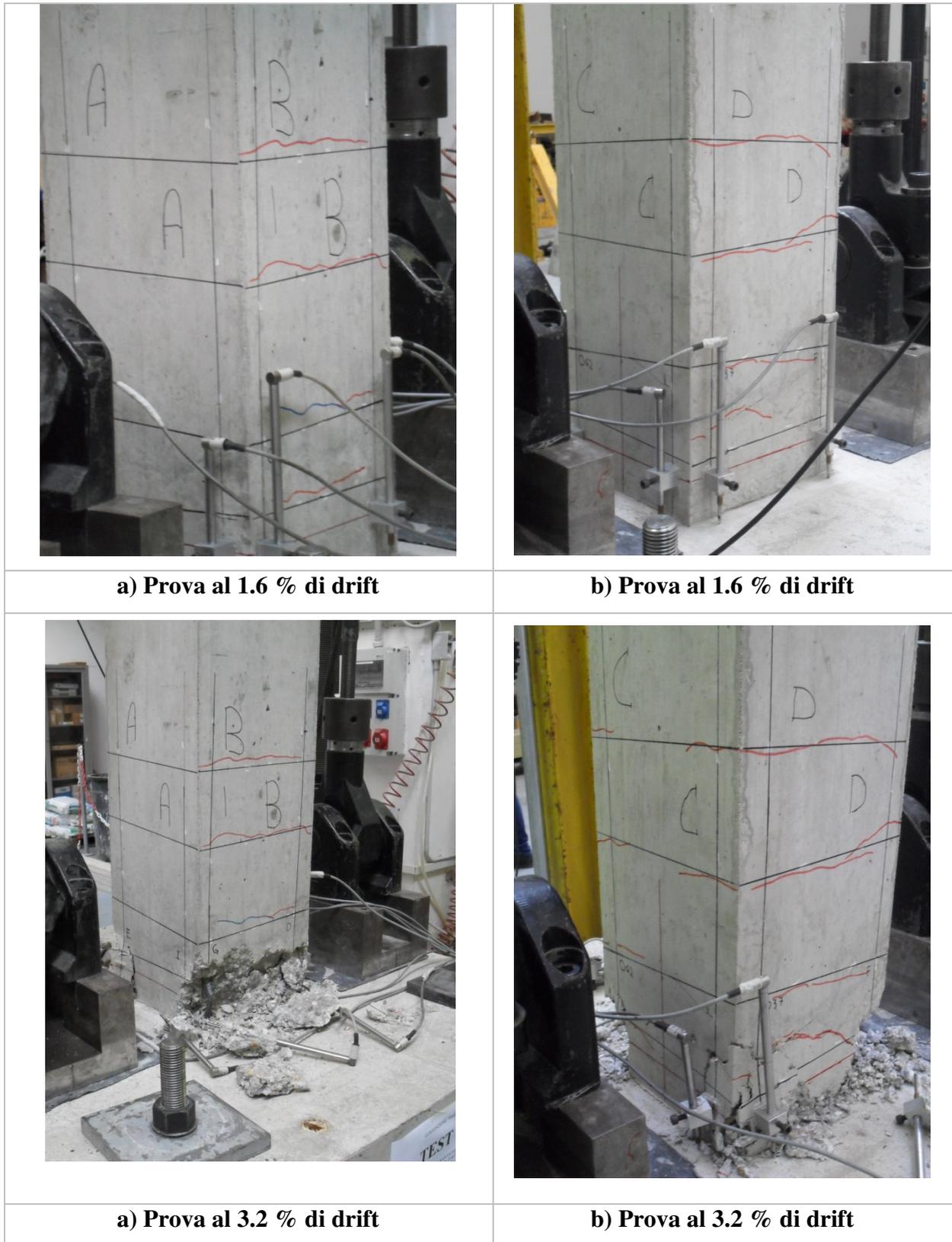


Figura 61– Foto prova ai vari valori di drift

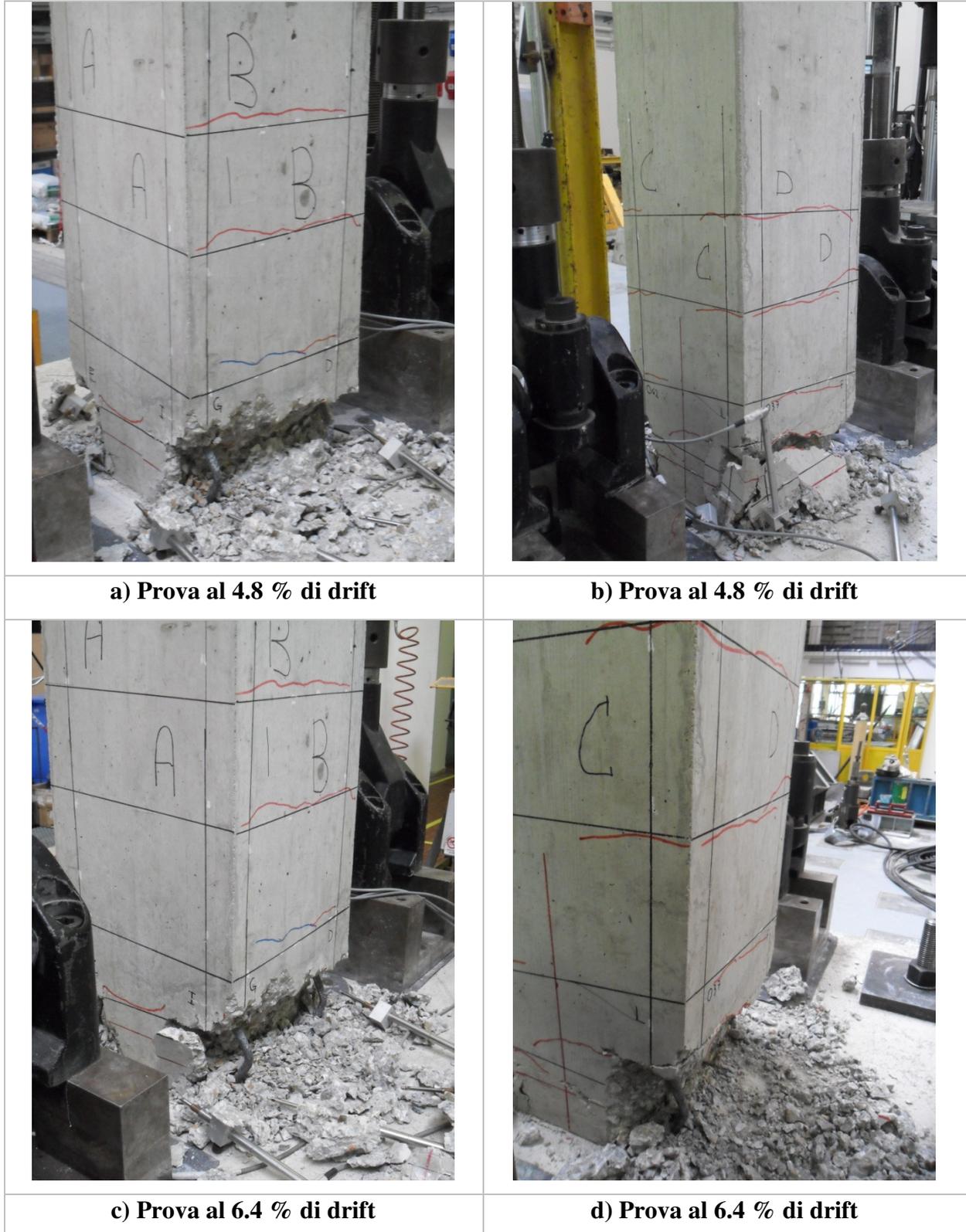


Figura 62– Foto prova ai vari valori di drift

ANALISI COMPARATIVA DEI RISULTATI SPERIMENTALI

PROVE MONOTONE

PROVINI A2-B2

In **Figura 63**, si riportano le curve $F-\theta$, relative al pilastro A2 e B2, mentre in **Tabella 31** e **Tabella 32**, si riportano i valori numerici di forza e drift massimi e ultimi nonché le differenze percentuali tra i valori riscontrati sul provino B2 (pilastro midollo) rispetto al provino A2 (pilastro di controllo).

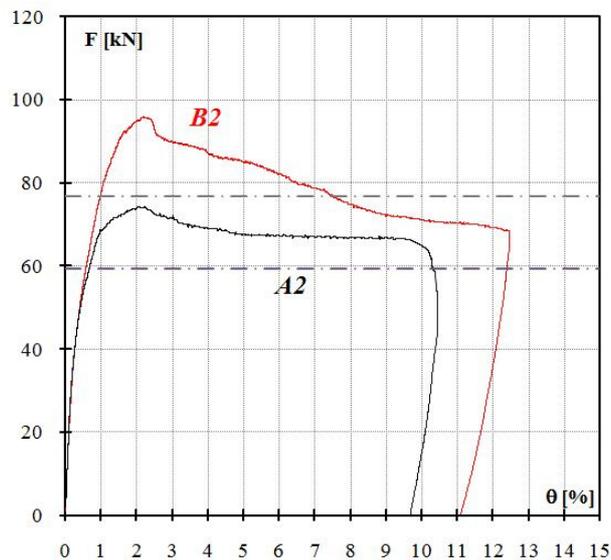


Figura 63 – Confronto A2-B2, curva sperimentale $F-\theta$

Forze A2		Forze B2		$\Delta F = (F_B - F_A) / F_A$	
F_{max} [kN]	74,20	F_{max} [kN]	95,80	ΔF_{max} [%]	+29,11

Tabella 31-Confronto valori forze

Drift A2		Drift B2		$\Delta \theta = (\theta_B - \theta_A) / \theta_A$	
θ_{max} [%]	2,24	θ_{max} [%]	2,19	$\Delta \theta_{max}$ [%]	-2,23%
Drift _{Ultimi} -A2		Drift _{Ultimi} -B2		$\Delta \theta = (\theta_B - \theta_A) / \theta_A$	
$\theta_{0,8max}$ [%]	10,32	$\theta_{0,8max}$ [%]	7,52	$\Delta \theta_{max}$ [%]	-27,13%

Tabella 32-Confronto valori drift

Di seguito(**Figura 64**) si riporta il grafico di confronto delle energie relative, mentre Tabella 33 sono riportati i valori numerici, in particolare si evidenzia in grassetto il valore relativo al drift ultimo.

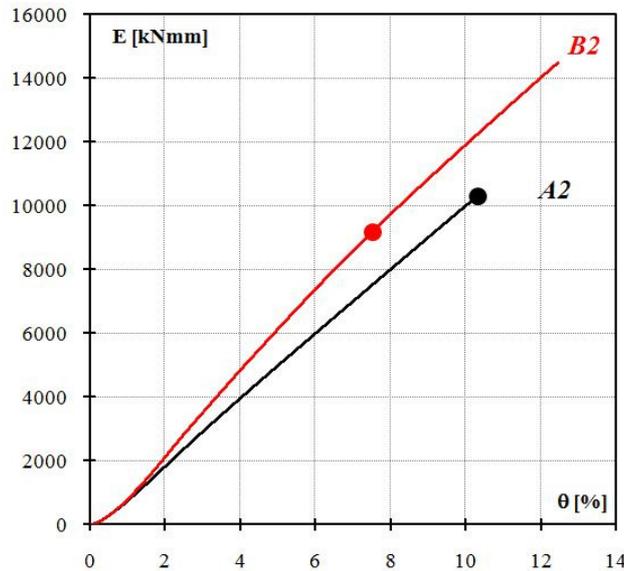


Figura 64 – Confronto A2-B2, curva E- θ

Drift	Energia-A2	Energia-B2	$\Delta E = (E_B - E_A) / E_A$
θ_{th} [%]	E [kNmm]	E [kNmm]	ΔE [%]
0,10	15	15	0
0,50	263	263	0
2,00	1802	2092	16
4,00	3943	4819	22
6,00	5977	7364	23
7,52	7507	9173	23
8,00	7988	9719	22
10,00	9978	11894	19
10,32	10183	12233	20
12,00	n.a.	13997	n.a.

Tabella 33 Confronto energia al variare del drift

A seguito delle prove effettuate sul pilastro cosiddetto "midollo" (pilastro B2) e sul pilastro di controllo (A2), caratterizzati dagli stessi parametri geometrici e meccanici (armatura

longitudinale e trasversale) a meno della presenza del sistema di rinforzo "midollo", è emerso che:

- In accordo con quanto previsto da un punto di vista teorico il pilastro B2 (midollo) ha mostrato una capacità in termini di resistenza circa il 29% maggiore di quella del pilastro di controllo (A2); da un punto di vista teorico tale differenza è risultata pari a circa il 35% (**Figura 63, Tabella 31**).
- il drift corrispondente all'attingimento della massima resistenza è risultato essere nel caso di pilastro midollo inferiore a quello del pilastro di controllo di un fattore pari a circa il 2,23%; da tale dato sperimentale emerge, pertanto che il pilastro midollo è risultato più rigido rispetto al pilastro di controllo (**Tabella 32**); per quanto concerne il drift ultimo, si è registrato un decremento di capacità ultima nel caso di pilastro midollo pari al 27,13%.
- in termini energetici, dal confronto tra il comportamento sperimentale dei due provini è emerso che il pilastro midollo è stato caratterizzato da una uguale dissipazione energetica iniziale, mentre nel complesso ha mostrato una maggiore dissipazione energetica (**Tabella 33**) a parità di drift, mentre a parità di condizione ultima il pilastro tradizionale ha dissipato il 36% in più rispetto al pilastro midollo.
- per quanto concerne il quadro fessurativo, nel pilastro tradizionale si è verificata una prima fessurazione in un momento precedente rispetto al pilastro midollo, ed anche una precedente espulsione del copriferro.

Successivamente i due provini hanno mostrato un livello di danneggiamento simile nella parte corticale. Si segnala, tuttavia, che una volta rimossa la parte corticale danneggiata, la zona centrale, ovvero il nucleo del pilastro del pilastro B, è apparsa del tutto integra.

	A2	B2
Prova al 10 % di drift		
Provini scarnificati		

Figura 65– Foto confronti

PROVE CICLICHE

PROVINI A1-B1

In **Figura 66**, si riportano le curve $F-\theta$, relative al pilastro A1 e B1, mentre in **Tabella 34** e **Tabella 35**, si riportano i valori numerici di forza e drift massimi e ultimi nonché le differenze percentuali tra i valori riscontrati sul provino B1 (pilastro midollo) rispetto al provino A1 (pilastro di controllo).

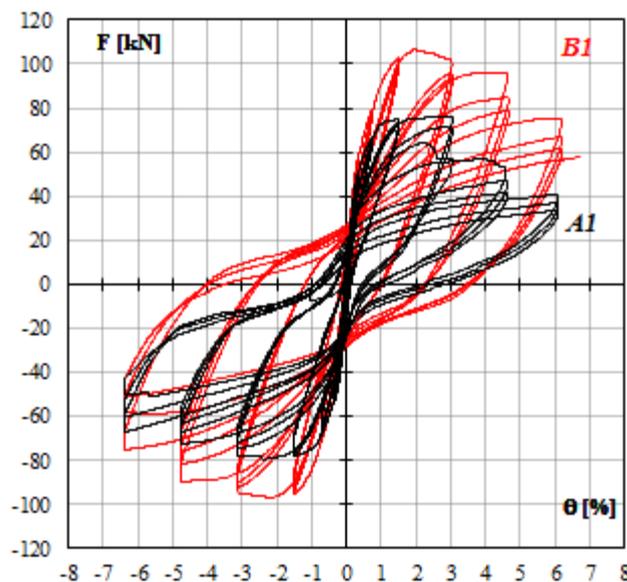


Figura 66 – Confronto A1-B1, curva sperimentale $F-\theta$

Forze A1		Forze B1		$\Delta F = (F_B - F_A) / F_A$	
F_{\max} [kN]	+76,08	F_{\max} [kN]	+106,66	ΔF_{\max} [%]	+40,19
F_{\max} [kN]	-79,44	F_{\max} [kN]	-97,00	ΔF_{\max} [%]	+22,10
$F_{\text{medio}}^{\text{exp}}$ [kN]	77,76	$F_{\text{medio}}^{\text{exp}}$ [kN]	101,83	$\Delta F_{\text{medio}}^{\text{exp}}$ [%]	+30,95

Tabella 34-Confronto valori forze

Drift A1		Drift B1		$\Delta \theta = (\theta_B - \theta_A) / \theta_A$	
θ_{\max} [%]	+2,53	θ_{\max} [%]	+1,99	$\Delta \theta_{\max}$ [%]	-21,34%
θ_{\max} [%]	-2,37	θ_{\max} [%]	-2,23	$\Delta \theta_{\max}$ [%]	-5,91%
θ_{medio} [%]	2,45	θ_{medio} [%]	2,11	$\Delta \theta_{\text{medio}}$ [%]	-13,88%
Drift _{Ultimi} -A1		Drift _{Ultimi} -B1		$\Delta \theta = (\theta_B - \theta_A) / \theta_A$	
$\theta_{0,8\max}$ [%]	n.a.	$\theta_{0,8\max}$ [%]	4,51	$\Delta \theta_{\max}$ [%]	n.a.
$\theta_{0,8\max}$ [%]	6,37	$\theta_{0,8\max}$ [%]	-4,76	$\Delta \theta_{\max}$ [%]	-25,27%
$\theta_{0,8\text{medio}}$ [%]	n.a.	$\theta_{0,8\text{medio}}$ [%]	4,64	$\Delta \theta_{\text{medio}}$ [%]	n.a.

Tabella 35-Confronto valori drift

In **Figura 67** si riporta inoltre il confronto tra le curve di involucro relative alle tre ripetizioni di carico.

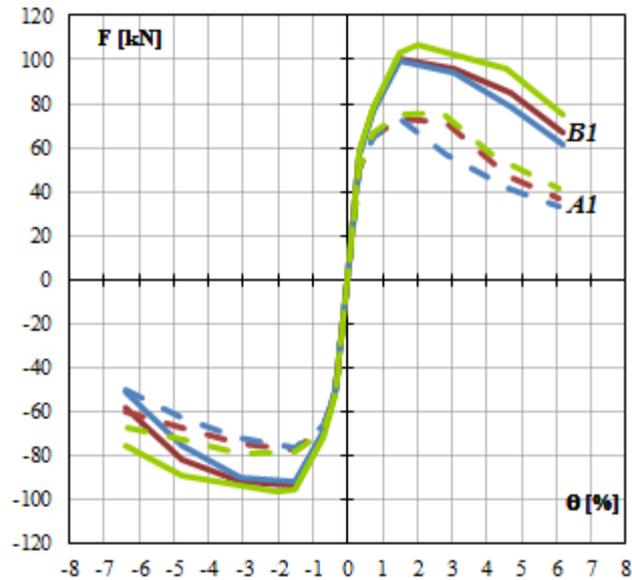


Figura 67 – Confronto A1-B1, curva sperimentale con involucri $F-\theta$

In **Figura 68** si riporta in via comparativa l'andamento delle rigidezze all'aumentare del drift.

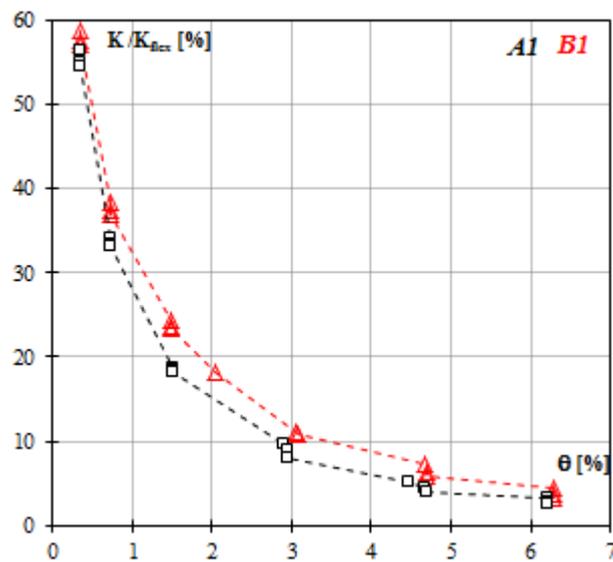


Figura 68 – Confronto A1-B1, curva $k/k_{flex}-\theta$

In **Tabella 36** si evidenzia il confronto tra le rigidzze del provino A1 e B1, evidenziando in grassetto il valore relativo alla fine convenzionale della prova.

Rigidzza e drift		Rigidzza-A1		Rigidzza-B1	$\Delta K=(K_B-K_A)/K_A$
Ciclo	Ripetizione	θ_{th} [%]	K/K_{flex} [%]	K/K_{flex} [%]	$\Delta(K/K_{flex})$ [%]
I	I-1	0,4	56.31	58.79	+5,36
	I-2	0,4	55.02	57.60	+5,45
	I-3	0,4	54.38	57.08	+5,56
II	II-1	0,8	34.18	38.29	+11,76
	II-2	0,8	33.43	37.41	+12,12
	II-3	0,8	33.03	37.03	+12,12
III	III-1	1,6	18.66	24.32	+26,31
	III-2	1,6	18.35	23.79	+33,33
	III-3	1,6	18.13	23.45	+27,78
IV	IV-1	3,2	9.79	18.32	+80,00
	IV-2	3,2	9.02	11.21	+22,22
	IV-3	3,2	7.93	10.96	+37,50
V	V-1	4,8	5.26	7.28	+40,00
	V-2	4,8	4.45	6.49	+50,00
	V-3	4,8	4.10	6.02	+50,00
VI	VI-1	6,4	3.18	4.38	+33,33
	VI-2	6,4	2.87	3.66	+33,33
	VI-3	6,4	2.48	3.29	+50,00

Tabella 36 Confronto rigidzza al variare del drift

Di seguito(Figura 69) si riporta il grafico di confronto delle energie cumulate relative ai vari cicli . In **Tabella 37** si riportano i valori numerici, evidenziando in grassetto il valore relativo alla fine convenzionale della prova, considerando la crisi contemporanea del ciclo positivo e negativo.

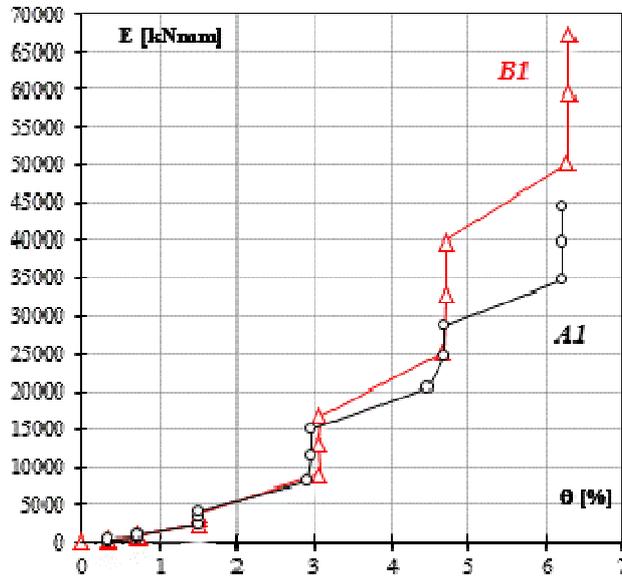


Figura 69 – Confronto A1-B1, curva E-θ

Rigidzza e drift		Energia-A1		Energia-B1	$\Delta E=(E_B-E_A)/E_A$
Ciclo	Ripetizione	θ_{th} [%]	E [kNmm]	E [kNmm]	ΔE [%]
I	I-1	0,4	124	120	-3,33
	I-2	0,4	218	209	-4,13
	I-3	0,4	305	293	-3,93
II	II-1	0,8	610	598	-1,97
	II-2	0,8	823	811	-1,45
	II-3	0,8	1017	1004	-1,28
III	III-1	1,6	2283	2167	-5,08
	III-2	1,6	3236	2957	-8,62
	III-3	1,6	4107	3663	-10,81
IV	IV-1	3,2	8048	8947	+11,17
	IV-2	3,2	11555	12921	+6,37
	IV-3	3,2	14773	16664	+12,80
V	V-1	4,8	20409	25213	+23,54
	V-2	4,8	24763	32902	+32,87
	V-3	4,8	28750	39852	+38,62
VI	VI-1	6,4	34625	50341	+45,39
	VI-2	6,4	39774	59540	+49,69
	VI-3	6,4	44373	67319	+51,71

Tabella 37 Confronto energia al variare del drift

In **Tabella 38** sono indicati gli spostamenti residui relativi ai pilastri A1 e B1.

Analisi comparativa dei risultati sperimentale: Prove cicliche
Provino A1-B1

Ciclo	Ripetizione	Provino-A1	Provino-B1	$\Delta\Delta=(\Delta_B-\Delta_A)/\Delta_A$	
		$+\delta^{Exp}$ [mm]	$+\delta^{Exp}$ [mm]	$(+)\Delta$ [%]	
I	I-1	0,76	0,46	-38.86	
	I-2	0,48	0,27	-44.07	
	I-3	0,53	0,26	-51.30	
II	II-1	0,92	0,60	-34.91	
	II-2	0,76	0,37	-51.09	
	II-3	0,72	0,34	-52.68	
III	III-1	2,12	1,83	-13.79	
	III-2	1,48	1,25	-15.58	
	III-3	1,37	1,12	-18.60	
IV	IV-1	6,78	14,56	114.73	
	IV-2	8,80	15,22	72.95	
	IV-3	8,25	15,10	82.98	
V	V-1	14,21	33,58	136.30	
	V-2	12,65	34,69	174.25	
	V-3	17,25	34,55	100.28	
VI	VI-1	32,85	53,97	64.29	
	VI-2	36,49	52,55	44.00	
	VI-3	42,45	51,82	22.08	

Ciclo	Ripetizione	Provino-A1	Provino-B1	$\Delta\Delta=(\Delta_B-\Delta_A)/\Delta_A$	
		$-\delta^{Exp}[\text{mm}]$	$-\delta^{Exp}[\text{mm}]$	$(-\Delta) [\%]$	
I	I-1	-0,30	-0.59	96.18	
	I-2	-0,25	-0.56	123.02	
	I-3	-0,25	-0.56	123.02	
II	II-1	-0,59	-0.95	61.00	
	II-2	-0,45	-0.86	90.44	
	II-3	-0,49	-0.81	64.36	
III	III-1	-1,70	-2.54	49.41	
	III-2	-1,53	-2.35	53.87	
	III-3	-1,35	-2.15	59.09	
IV	IV-1	-4,86	-17.74	265.00	
	IV-2	-4,61	-17.89	288.15	
	IV-3	-5,96	-17.88	200.06	
V	V-1	-13,57	-38.14	181.07	
	V-2	-11,15	-39.35	252.91	
	V-3	-10,96	-39.34	258.93	
VI	VI-1	-13,21	-60.65	359.13	
	VI-2	-10,15	-59.45	485.74	
	VI-3	-10,63	-52.72	395.96	

Tabella 38 - Confronto tra gli spostamenti residui

A seguito delle prove effettuate sul pilastro cosiddetto "midollo" (pilastro B1) e sul pilastro di controllo (A1), caratterizzati dagli stessi parametri geometrici e meccanici (armatura longitudinale e trasversale) a meno della presenza del sistema di rinforzo "midollo", è emerso che:

- In accordo con quanto previsto da un punto di vista teorico il pilastro B1 (midollo) ha mostrato una capacità in termini di resistenza circa il 31% maggiore di quella del pilastro di controllo (A1); da un punto di vista teorico tale differenza è risultata pari a circa il 35% (**Figura 66**)
- il drift corrispondente all'attingimento della massima resistenza è risultato essere nel caso di pilastro midollo inferiore a quello del pilastro di controllo di un fattore pari a circa il 14%; da tale dato sperimentale emerge, pertanto che il pilastro midollo è risultato più rigido rispetto al pilastro di controllo (**Tabella 35**)
- per quanto concerne il drift ultimo, si è registrato un decremento di capacità ultima nel caso di pilastro midollo pari al 26%. Si segnala tuttavia, che tale valore è stato determinato solo con riferimento ai dati registrati in fase di tiro (azioni negative, vedi **Tabella 35**) in quanto in fase di spinta il pilastro convenzionale è stato affetto da un prematuro decadimento delle prestazioni;
- in tutti i cicli di carico il pilastro midollo è risultato più rigido del pilastro di controllo. In particolare, la rigidezza del pilastro midollo è risultata superiore a quella del pilastro di controllo di un fattore mediamente pari a circa il 5% nel primo ciclo di carico e con un andamento crescente fino al quarto ciclo di carico (**Tabella 36**)
- in termini energetici, dal confronto tra il comportamento sperimentale dei due provini è emerso che il pilastro midollo è stato caratterizzato da una minore dissipazione energetica nei primi tre cicli, mentre nel complesso ha mostrato una maggiore dissipazione energetica nei cicli successivi (**Tabella 37**).
- per quanto concerne il quadro fessurativo, la presenza del sistema midollo ha ridotto l'entità delle fessure nei primi cicli di prova, mentre dopo aver raggiunto il picco di carico i due provini hanno mostrato un eguale livello di danneggiamento nella parte corticale. Si segnala, tuttavia, che una volta rimossa la parte corticale danneggiata, la zona centrale, ovvero il nucleo del pilastro del pilastro B, è apparsa del tutto integra.

	A1	B1
Prova al 4.8 % di drift		
Prova al 4.8 % di drift		

PROVINI A1-C

In **Figura 70**, si riportano le curve $F-\theta$, relative al pilastro A1 e C, mentre in **Tabella 39** e **Tabella 40**, si riportano i valori numerici di forza e drift massimi e ultimi nonché le differenze percentuali tra i valori riscontrati sul provino C (pilastro midollo) rispetto al provino A1 (pilastro di controllo).

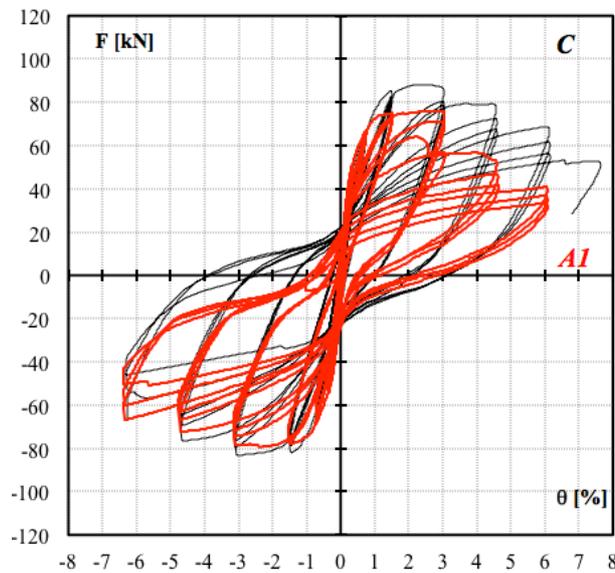


Figura 70 – Confronto A1-C, curva sperimentale $F-\theta$

Forze_{max} A1		Forze_{max} C		$\Delta F=(F_C-F_A)/F_A$	
F_{max} [kN]	+76,08	F_{max} [kN]	+88,14	ΔF_{max} [%]	+15,85
F_{max} [kN]	-79,44	F_{max} [kN]	-83,46	ΔF_{max} [%]	+5,06
F_{medio}^{exp} [kN]	77,76	F_{medio}^{exp} [kN]	85,80	ΔF_{medio}^{exp} [%]	+10,34

Tabella 39-Confronto valori forze

Drift_{max} A1		Drift_{max} C		$\Delta\theta=(\theta_C-\theta_A)/\theta_A$	
θ_{max} [%]	+2,53	θ_{max} [%]	+2,53	$\Delta\theta_{max}$ [%]	0
θ_{max} [%]	-2,37	θ_{max} [%]	- 3,07	$\Delta\theta_{max}$ [%]	29,54
θ_{medio} [%]	2,45	θ_{medio} [%]	2,80	$\Delta\theta_{medio}$ [%]	14,29
Drift_{Ultimi}-A1		Drift_{Ultimi}-C		$\Delta\theta=(\theta_C-\theta_A)/\theta_A$	
$\theta_{0,8max}$ [%]	-	$\theta_{0,8max}$ [%]	4,59	$\Delta\theta_{max}$ [%]	-
$\theta_{0,8max}$ [%]	-6,37	$\theta_{0,8max}$ [%]	-6,27	$\Delta\theta_{max}$ [%]	-1,51
$\theta_{0,8medio}$ [%]	-	$\theta_{0,8medio}$ [%]	5,43	$\Delta\theta_{medio}$ [%]	-

Tabella 40-Confronto valori drift

In **Figura 71** si riporta inoltra il confronto tra le curve di involucro relative alle tre ripetizioni di carico.

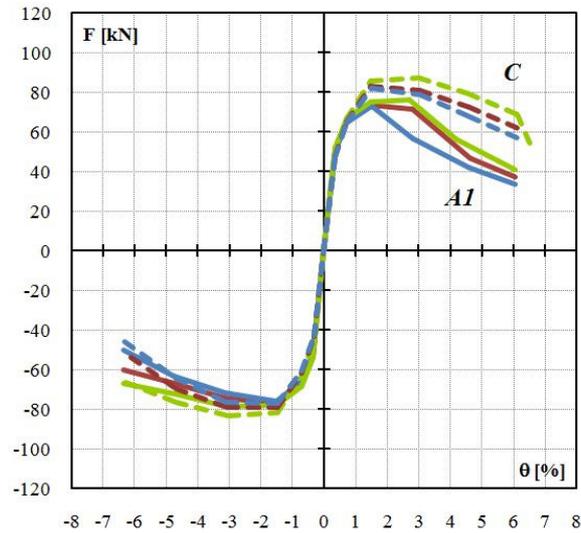


Figura 71 – Confronto A1-C, curva sperimentale con involuপি $F-\theta$

In **Figura 72** si riporta in via comparativa l'andamento delle rigidezze all'aumentare del drift.

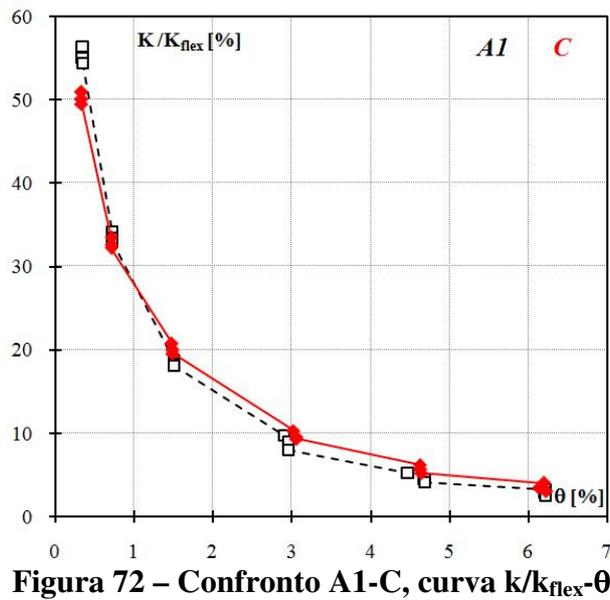


Figura 72 – Confronto A1-C, curva $k/k_{flex}-\theta$

In **Tabella 41** si evidenzia il confronto tra le rigidzze del provino A1 e C. Si riportano in grassetto i valori relativi alla fine convenzionale della prova.

Rigidezza e drift		Rigidezza-A1		Rigidezza-C	$\Delta K=(K_C-K_A)/K_A$
Ciclo	Ripetizione	θ_{th} [%]	K/K_{flex} [%]	K/K_{flex} [%]	$\Delta(K/K_{flex})$ [%]
I	I-1	0,4	56.31	50.93	-9.56
	I-2	0,4	55.02	50.02	-9.09
	I-3	0,4	54.38	49.46	-9.04
II	II-1	0,8	34.18	33.44	-2.18
	II-2	0,8	33.43	32.59	-2.51
	II-3	0,8	33.03	32.17	-2.61
III	III-1	1,6	18.66	20.76	11.24
	III-2	1,6	18.35	19.96	8.76
	III-3	1,6	18.13	19.55	7.85
IV	IV-1	3,2	9.79	10.33	5.54
	IV-2	3,2	9.02	9.58	6.19
	IV-3	3,2	7.93	9.31	17.38
V	V-1	4,8	5.26	6.16	17.18
	V-2	4,8	4.45	5.62	26.30
	V-3	4,8	4.10	5.21	27.07
VI	VI-1	6,4	3.18	3.99	25.47
	VI-2	6,4	2.87	3.46	20.56
	VI-3	6,4	2.48	3.02	21.77

Tabella 41 Confronto rigidezza al variare del drift

Di seguito(Figura 73) si riporta il grafico di confronto delle energie cumulate relative ai vari cicli , da cui si evince che per ogni ripetizione il pilastro midollo, dopo una fase iniziale in cui dissipa meno energia di quello tradizionale, dal terzo ciclo in poi dissipa più energia. Tale trend è suffragato anche dai valori numerici riportati in **Tabella 42**.

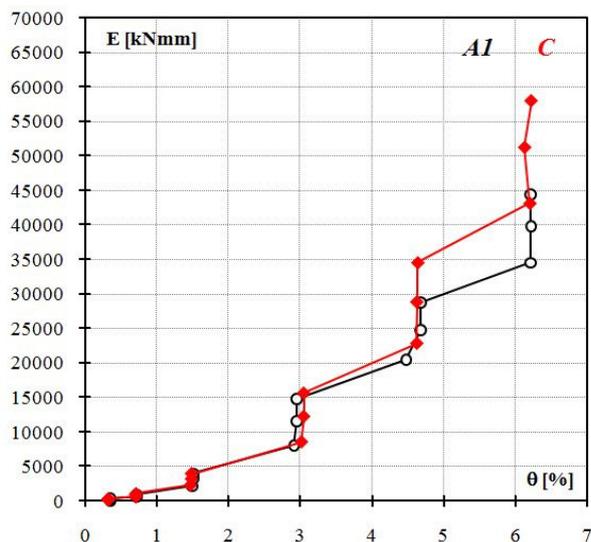


Figura 73 – Confronto A1-C, curva E- θ

Rigidzza e drift		Energia-A1		Energia-C	$\Delta E=(E_C-E_A)/E_A$
Ciclo	Ripetizione	θ_{th} [%]	E [kNmm]	E [kNmm]	ΔE [%]
I	I-1	0,4	124	127	2.05
	I-2	0,4	218	229	4.84
	I-3	0,4	305	324	6.17
II	II-1	0,8	610	655	7.36
	II-2	0,8	823	900	9.35
	II-3	0,8	1017	1126	10.71
III	III-1	1,6	2283	2334	2.22
	III-2	1,6	3236	3166	-2.16
	III-3	1,6	4107	3920	-4.54
IV	IV-1	3,2	8048	8528	5.97
	IV-2	3,2	11555	12190	5.50
	IV-3	3,2	14773	15648	5.92
V	V-1	4,8	20409	22833	11.88
	V-2	4,8	24763	28899	16.70
	V-3	4,8	28750	34504	20.01
VI	VI-1	6,4	34625	43162	24.66
	VI-2	6,4	39774	51257	28.87
	VI-3	6,4	44373	57900	30.48

Tabella 42 - Confronto energia al variare del drift

In **Tabella 43** sono indicati gli spostamenti residui relativi ai pilastri A1 e C

*Analisi comparativa dei risultati sperimentale: Prove cicliche
Provino A1-C*

Ciclo	Ripetizione	Provino-A1	Provino-C1	$\Delta\Delta=(\Delta_C-\Delta_A)/\Delta_A$	
		$+\delta^{Exp}$ [mm]	$+\delta^{Exp}$ [mm]	(+)Δ [%]	
I	I-1	0,76	0.78	3.25	
	I-2	0,48	0.56	16.16	
	I-3	0,53	0.53	-0.64	
II	II-1	0,92	1.05	14.48	
	II-2	0,76	0.80	4.61	
	II-3	0,72	0.75	4.69	
III	III-1	2,12	2.61	23.22	
	III-2	1,48	2.02	36.74	
	III-3	1,37	1.98	44.70	
IV	IV-1	6,78	14.68	116.56	
	IV-2	8,80	15.07	71.31	
	IV-3	8,25	15.06	82.60	
V	V-1	14,21	32.20	126.63	
	V-2	12,65	30.47	140.87	
	V-3	17,25	28.22	63.59	
VI	VI-1	32,85	47.01	43.11	
	VI-2	36,49	46.62	27.76	
	VI-3	42,45	46.66	9.92	

Analisi comparativa dei risultati sperimentale: Prove cicliche
Provini A1-C

Ciclo	Ripetizione	Provino-A1	Provino-C1	$\Delta\Delta=(\Delta_C-\Delta_A)/\Delta_A$	
		$-\delta^{Exp}[\text{mm}]$	$-\delta^{Exp}[\text{mm}]$	$(-\Delta) [\%]$	
I	I-1	-0,30	-0.76	154.69	
	I-2	-0,25	-0.72	189.11	
	I-3	-0,25	-0.72	189.11	
II	II-1	-0,59	-1.37	132.76	
	II-2	-0,45	-1.29	186.81	
	II-3	-0,49	-1.29	163.40	
III	III-1	-1,70	-3.87	127.76	
	III-2	-1,53	-3.66	138.90	
	III-3	-1,35	-3.54	162.34	
IV	IV-1	-4,86	-20.35	318.75	
	IV-2	-4,61	-20.59	346.61	
	IV-3	-5,96	-20.38	241.98	
V	V-1	-13,57	-40.46	198.19	
	V-2	-11,15	-39.27	252.17	
	V-3	-10,96	-38.67	252.81	
VI	VI-1	-13,21	-58.54	343.18	
	VI-2	-10,15	-57.03	461.84	
	VI-3	-10,63	-36.11	239.67	

Tabella 43 - Confronto tra gli spostamenti residui

A seguito delle prove effettuate sul pilastro "tradizionale" (pilastro A1) e sul pilastro di "midollo" (pilastro C), caratterizzati dagli stessi parametri geometrici è emerso che:

- In accordo con quanto previsto da un punto di vista teorico il pilastro C ha mostrato una capacità in termini di resistenza circa il 16% di quella del pilastro A1; (**Figura 66**)
- il drift corrispondente all'attingimento della massima resistenza è risultato essere nel caso di pilastro C inferiore a quello del pilastro A1 di un fattore pari a circa il 14,29%; da tale dato sperimentale emerge, pertanto che il pilastro midollo è risultato più rigido rispetto al pilastro di controllo (**Tabella 40**).
- per quanto concerne il drift ultimo, si è registrato un decremento di capacità ultima nel caso di pilastro midollo pari al 2%.
- Nei primi due cicli di carico il pilastro midollo C è risultato meno rigido del pilastro tradizionale di un fattore variabile. Nei cicli di carico successivi il pilastro midollo è risultato più rigido del pilastro di tradizionale, in particolare, la rigidezza del pilastro midollo è risultata superiore a quella del pilastro di controllo di un fattore variabile;
- in termini energetici, dal confronto tra il comportamento sperimentale dei due provini è emerso che il pilastro C è stato caratterizzato da una maggiore dissipazione energetica rispetto al pilastro tradizionale (**Tabella 37**). Tuttavia in condizioni ultime il pilastro midollo risulta aver dissipato meno energia rispetto al pilastro tradizionale.
- per quanto concerne il quadro fessurativo, la presenza del sistema midollo ha ridotto l'entità delle fessure nei primi cicli di prova, mentre dopo aver raggiunto il picco di carico i due provini hanno mostrato un eguale livello di danneggiamento nella parte corticale. Si segnala, tuttavia, che una volta rimossa la parte corticale danneggiata, la zona centrale, ovvero il nucleo del pilastro del pilastro C, è apparsa del tutto integra.

	A1	C
Prova al 4.8 % di drift		
Provini scarnificati		

Figura 74 – Foto provini A1-C

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La campagna sperimentale è stata articolata in due gruppi di prove, monotone e cicliche. Le prove sono state eseguite su pilastri armati con sistema “tradizionale” e con sistema “midollo” (tipo B e tipo C):

- *Pilastro tipo “A”*: sezione – 30x30 cm
armatura longitudinale esterna - $4\Phi 14$
armatura trasversale esterna - $\Phi 8/150\text{mm}$
- *Pilastro tipo “B”*: sezione – 30x30 cm
armatura longitudinale esterna - $4\Phi 14$
armatura trasversale esterna - $\Phi 8/150\text{mm}$
armatura "midollo" longitudinale interna - $4\Phi 16$
armatura "midollo" trasversale interna - $\Phi 8/60\text{mm}$
- *Pilastro tipo “C”*: sezione – 30x30 cm
armatura longitudinale esterna - $4\Phi 12$
armatura trasversale esterna - $\Phi 8/150\text{mm}$
armatura "midollo" longitudinale interna - $4\Phi 16$
armatura "midollo" trasversale interna - $\Phi 8/60\text{mm}$

A valle dello svolgimento delle prove, sono stati elaborati i risultati forniti per ottenere grafici e tabelle riepilogative al fine di confrontare le caratteristiche meccaniche del pilastro armato con sistema “tradizionale” e del pilastro “midollo”.

Dall’attività sperimentale è emerso che sia il pilastro tradizionale che il pilastro midollo hanno mostrato in ogni caso una resistenza superiore a quella teorica prevista. Inoltre è emerso che, a parità di armatura perimetrale, il pilastro realizzato con “sistema midollo” è risultato, in conformità alle previsioni teoriche, più resistente rispetto al pilastro progettato con armatura tradizionale. I risultati sperimentali hanno mostrato che nel caso di pilastro midollo tipo B l’incremento di resistenza percentuale rispetto al pilastro tradizionale è risultato pari a circa il 29% nel caso di azione monotona e circa il 37% in caso di azione ciclica.

Ciò mostra che il sistema midollo è risultato, in termini resistenti, meno affetto dal degrado indotto dalle azioni cicliche. Tuttavia, in termini di rotazione ultima il pilastro armato con sistema midollo ha mostrato valori leggermente inferiori rispetto al pilastro tradizionale. Ciò implica che, seppur a parità di drift (spostamento orizzontale diviso luce di taglio) il pilastro midollo ha mostrato una maggiore dissipazione energetica rispetto a quello tradizionale, in condizioni di rottura convenzionale (degrado di resistenza pari al 20% rispetto alla forza massima, ovvero in corrispondenza della rotazione ultima) si è registrata una minore dissipazione energetica globale (nell'ordine del 10%). I pilastri armati con sistema midollo hanno mostrato in ogni caso una maggiore rigidità rispetto al pilastro armato con sistema tradizionale.

L'analisi dell'ampiezza della fessura alla base del pilastro ha mostrato che l'apertura della fessura è risultata essere più marcata nel caso del pilastro tradizionale; questa evidenza è stata confermata anche dai risultati sperimentali in termini di rotazione di base. Infatti, il contributo della rotazione di base alla rotazione globale è risultato nel caso di pilastro midollo inferiore rispetto a quello riscontrato nel caso di pilastro armato con sistema tradizionale.

Alla luce dei risultati sperimentali è, pertanto, emerso che rilevanti potenzialità del sistema midollo sono legate alla possibilità di ridurre il danneggiamento del “cuore” del pilastro e l'ampiezza delle fessure di base. La riduzione di danneggiamento nella porzione interna del pilastro potrebbe apportare significativi benefici in caso di necessità di effettuare interventi di ripristino a valle di danni indotti da azioni sismiche.