



Laboratorio Ufficiale Prove Materiali e Strutture



Convenzione DICEA UNIVPM - TCS s.r.l.

Report tecnico

“Verifica sperimentale del comportamento meccanico di pannelli sandwich in calcestruzzo armato e polistirene”

Il Responsabile scientifico

Prof. Michele Serpilli

Il Direttore di Dipartimento

Prof. Maurizio Brocchini



INDICE

1. Oggetto della convenzione.....	3
2. Specifiche dei pannelli testati	3
3. Tipologie di prove eseguite e normative di riferimento.....	6
4. Prove di compressione diagonale (pannelli 1100mm x 1100mm)	6
5. Prove di compressione centrata (pannelli 1100mm x 1100mm)	13
6. Prove di compressione eccentrica (pannelli 1100mm x 1100mm)	21
7. Prove di precompressione e taglio (pannelli 1100mm x 1100mm)	31
8. Prove di compressione centrata (pannelli 1100mm x 3000mm)	38
9. Prove di compressione eccentrica (pannelli 1100mm x 3000mm)	46

1. Oggetto della Convenzione

La convenzione stipulata tra L'Università Politecnica delle Marche, e per essa il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Architettura (DICEA) e la Ditta TCS s.r.l., ha previsto la caratterizzazione del comportamento meccanico di pannelli sandwich in calcestruzzo armato e polistirene di produzione della Ditta TCS s.r.l., attraverso una campagna sperimentale presso il Laboratorio Prove Materiali e Strutture della Sezione Strutture del Dipartimento DICEA. In particolare, si è studiato il comportamento dei singoli pannelli soggetti ad azioni statiche di compressione e taglio. Di seguito verranno riportate le specifiche tecniche dei pannelli sandwich sottoposti ad indagine.

2. Specifiche tecniche dei pannelli testati

Le prove effettuate in laboratorio sono state eseguite su due tipologie di pannelli sandwich, uno di forma quadrata avente dimensioni $h=1100$ mm, $w=1100$ mm, uno di forma rettangolare avente dimensioni $h=3000$ mm e $w=1100$ mm; essi presentano le medesime caratteristiche costruttive:

- Pannello Sandwich 1100 mm x 1100 mm: costituito da una lastra in polistirene espanso (EPS) di spessore pari a 140 mm, pareti esterne realizzate in betoncino dello spessore di 50 mm, armate con rete elettrosaldata $\phi 5$ 20/20 e con l'aggiunta di forchette $\phi 8/15$ nella zona inferiore e superiore; lo spessore totale è pari a 240 mm;
- Pannello Sandwich 1100 mm x 3000 mm: costituito da una lastra in polistirene espanso (EPS) di spessore pari a 140 mm, pareti esterne realizzate in betoncino dello spessore di 50 mm, armate con rete elettrosaldata $\phi 5$ 20/20 e con l'aggiunta di forchette $\phi 8/15$ nella zona inferiore e superiore; lo spessore totale è pari a 240 mm;

Per i pannelli sottoposti a compressione diagonale è stata aggiunta un'armatura di frettaggio con rete $\phi 5$ 20/20, in corrispondenza degli spigoli del provino sottoposti a compressione, utile a confinare la zona di getto pieno in calcestruzzo.

Inoltre, si precisa che i provini sottoposti alle restanti prove di compressione e taglio, sono provvisti di cordolatura superiore ed inferiore in cemento armato, al fine di facilitare le operazioni di trasporto, applicazione e distribuzione del carico.

In figura 2.1 e 2.2, si riportano le schede tecniche dei pannelli sopra descritti.

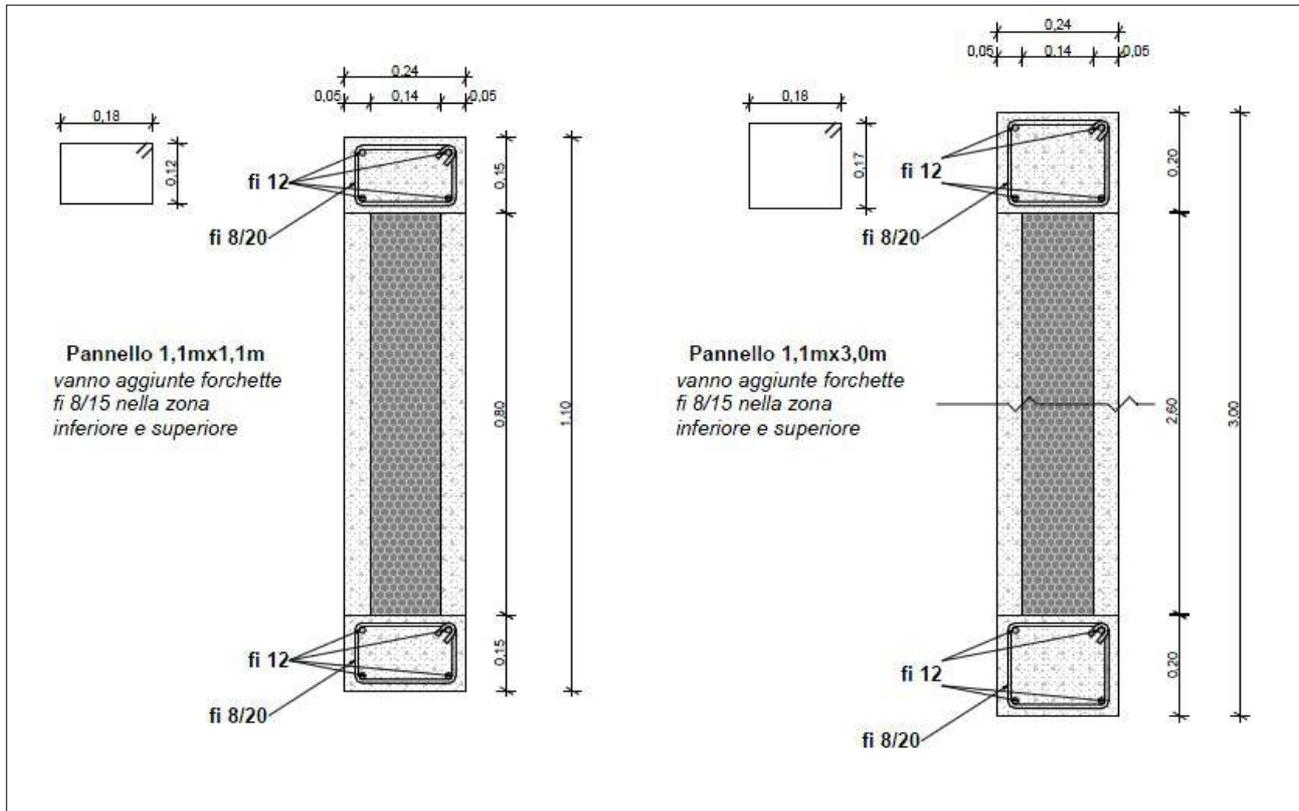


Figura 2.1 Scheda tecnica dei pannelli sandwich

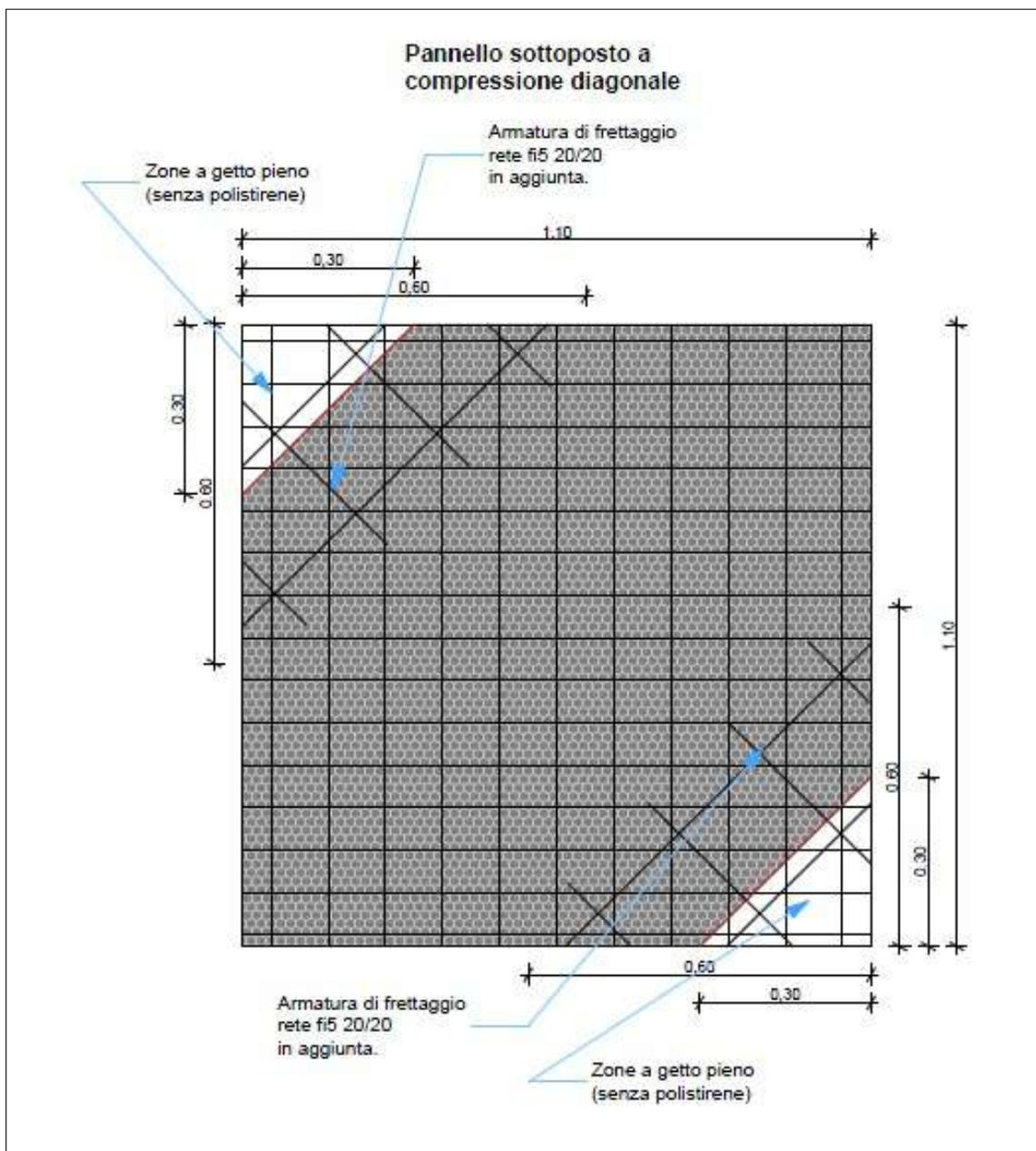


Figura 2.2 Particolare Pannello 1100mm x 1100 mm per prova a compressione diagonale

3. Tipologie di prove eseguite e normative di riferimento

La campagna di prove sperimentali è stata eseguita in modo tale da ottenere un quadro esauriente del comportamento meccanico dei singoli pannelli sandwich mediante l'esecuzione di prove statiche di compressione e taglio. Di seguito si riporta l'elenco delle prove eseguite:

- 4 prove a compressione diagonale su pannelli $h=1100$ mm, $w=1100$ mm;
- 4 prove a compressione centrata su pannelli $h=1100$ mm, $w=1100$ mm;
- 4 prove a compressione eccentrica su pannelli $h=1110$ mm, $w=1100$ mm;
- 4 prove a precompressione e taglio su pannelli $h=1100$ mm, $w=1100$ mm;
- 3 prove a compressione centrata su pannelli $h=3000$ mm, $w=1100$ mm;
- 3 prove a compressione eccentrica su pannelli $h=3000$ mm, $w=1100$ mm.

La normativa utilizzata per le prove di compressione diagonale è l'ASTM E 519/E519 M-15, mentre per le prove di compressione si è fatto riferimento alla normativa UNI EN 1052-1.

4. Prove di compressione diagonale (pannelli 1100mm x 1100mm)

Le prove di compressione diagonale sono state eseguite su pannelli quadrati di lato 1100 mm. Durante la fase di sperimentazione dei provini, è stata utilizzata l'apposita strumentazione al fine di misurare gli spostamenti nel piano di deformazione del provino: sono stati posizionati n.4 trasduttori di spostamento, in particolare uno in posizione verticale ed uno in posizione orizzontale, per ogni faccia del provino. In *Figura 4.1* si riporta l'esatta collocazione della strumentazione di prova.

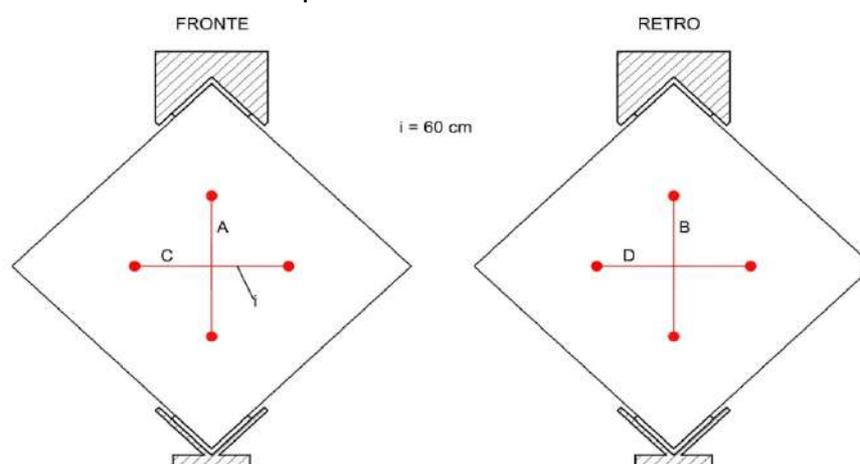


Figura 4.1 Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro del provino

Ogni coppia di trasduttori è stata posizionata in corrispondenza delle diagonali del provino di forma quadrata, con un interasse pari ad $i = 600$ mm, in modo tale da non intralciare la possibile formazione del cuneo di rottura in corrispondenza degli angoli del pannello soggetti a sforzo di compressione.

I test meccanici sono stati eseguiti in controllo di spostamento, applicando un precarico generalmente pari a pochi kN, valore in corrispondenza del quale sono stati azzerati gli strumenti (tale fase consente un adeguato assestamento degli strumenti per la misurazione delle deformazioni impiegati nella prova), e procedendo quindi a caricare il provino sino a rottura.

Ogni provino è stato individuato mediante un codice di prova, come di seguito riportato:

- CD 1: provino 1 con armatura di frettaggio $\phi 5$ 20/20, spessore totale 240 mm;
- CD 2: provino 2 con armatura di frettaggio $\phi 5$ 20/20, spessore totale 240 mm;
- CD 3: provino 3 con armatura di frettaggio $\phi 5$ 20/20, spessore totale 240 mm;
- CD 4: provino 4 con armatura di frettaggio $\phi 5$ 20/20, spessore totale 240 mm.

In base alle indicazioni delle norme ASTM E 519/519 M-1 si calcolano la massima tensione tangenziale τ e la deformazione γ .

La τ_{max} è espressa dalla seguente formula:

$$\tau_{max} = \frac{0,707 P}{A_n}$$

dove:

$$A_n = \frac{(w+h)}{2} tn \quad \text{area netta della sezione orizzontale del pannello;}$$

w = larghezza del campione;

h = altezza del campione;

t = spessore totale della sezione orizzontale considerata del campione;

n = percentuale di area lorda dell'unità solida espressa come decimale;

P = carico max esterno.

Pertanto, l'area netta A_n della sezione orizzontale del pannello è pari a 110000 mm² per tutte le tipologie di provini.

La deformazione γ è stata calcolata nel modo seguente:

$$\gamma = \varepsilon_c + |\varepsilon_t|$$

dove:

ε_c = deformazione di compressione (letta sulla direzione verticale);

ε_t = deformazione di trazione (letta sulla direzione orizzontale).

Di seguito, si riportano i grafici ottenuti dalla prova di compressione diagonale su provini 1100 mm x 1100 mm.

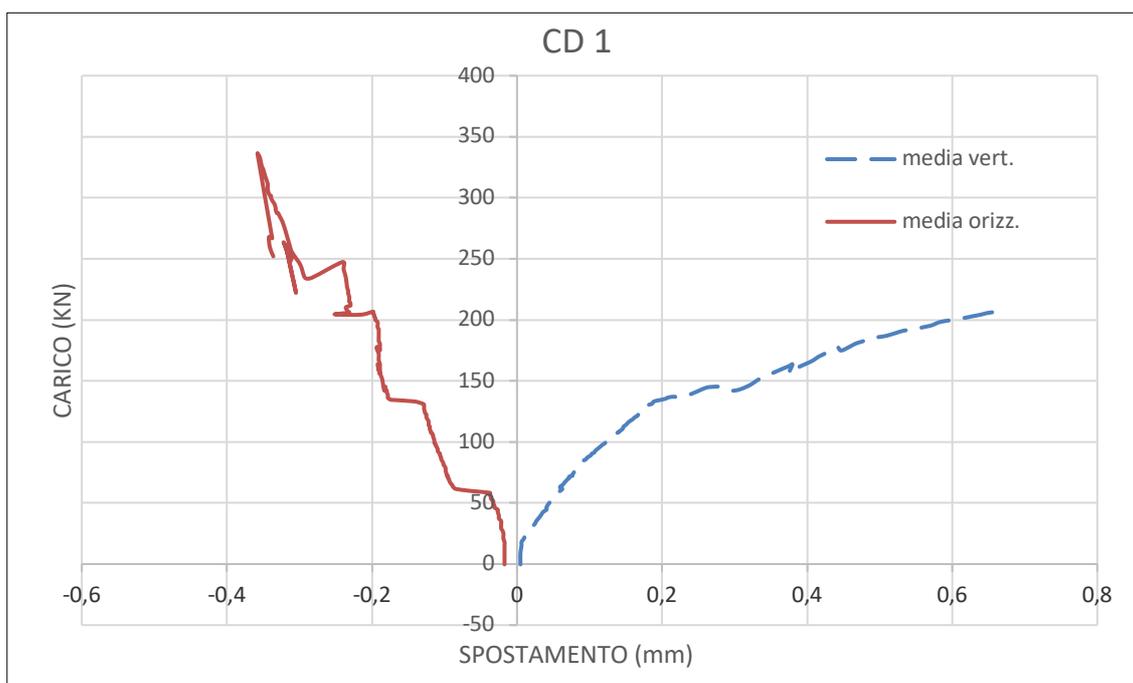


Figura 4.2 Diagramma Forza-Spostamento valori medi misurati sulle due facce

Si precisa che a seguito della crisi locale con distacco in corrispondenza degli spigoli sottoposti a compressione diagonale per il provino CD1, i trasduttori di spostamento posti con un interasse iniziale $i = 1000$ mm, sono stati successivamente disposti con un interasse minore pari a $i = 600$ mm per le rimanenti prove.

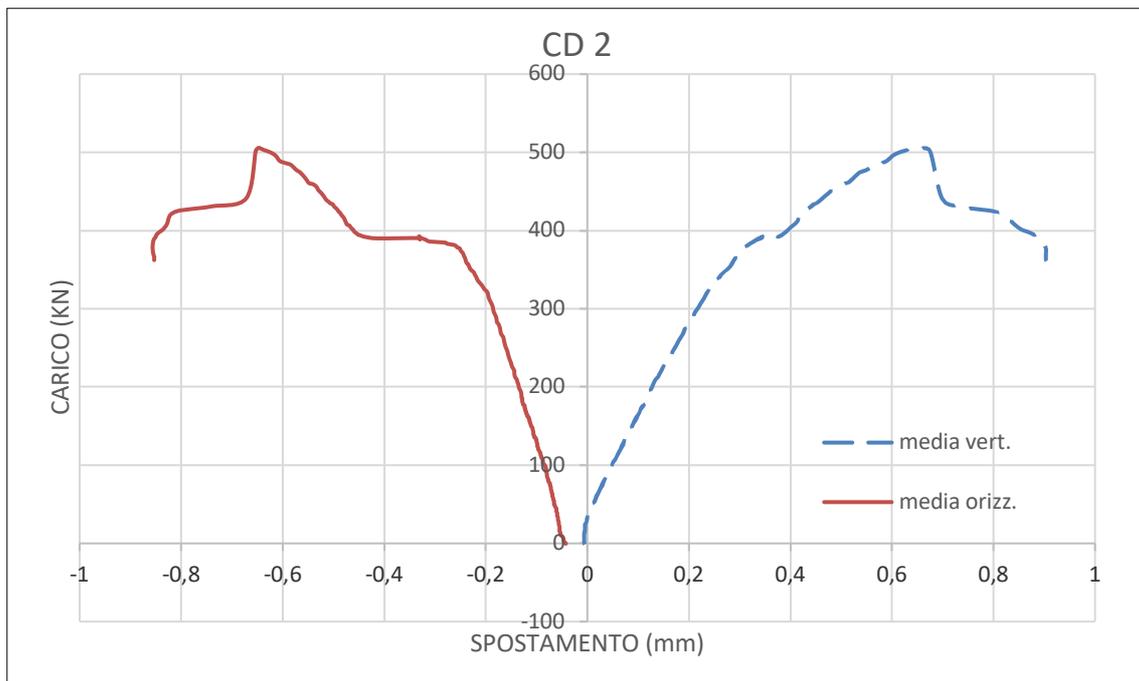


Figura 4.3 Diagramma Forza-Spostamento valori medi misurati sulle due facce

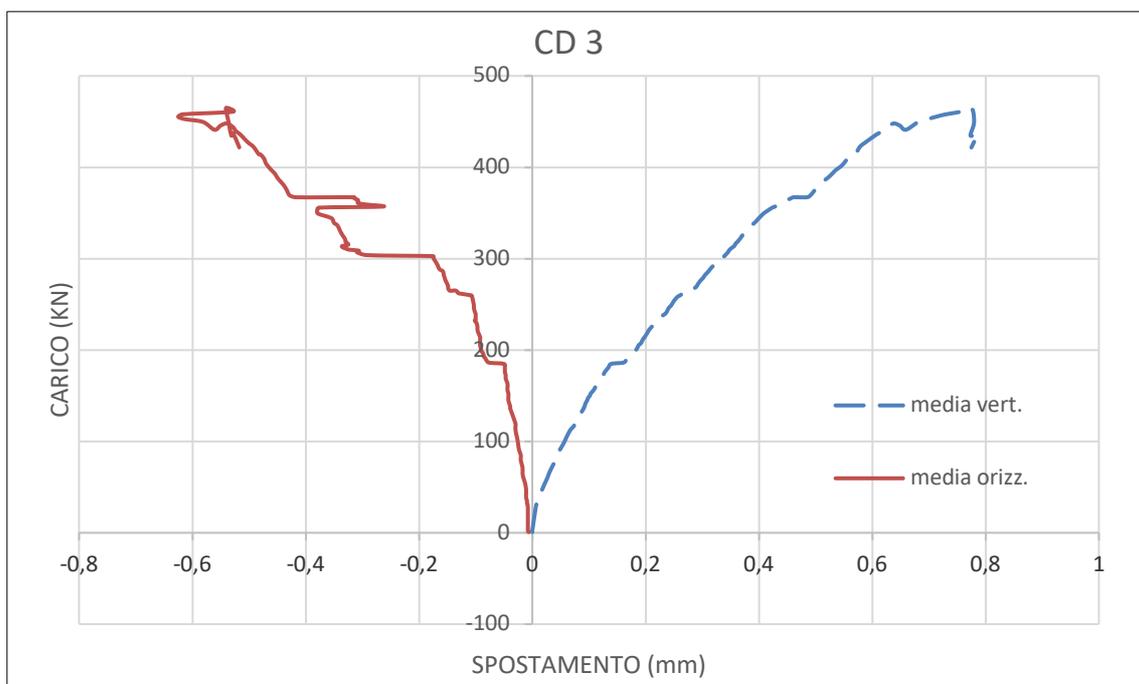


Figura 4.4 Diagramma Forza-Spostamento valori medi misurati sulle due facce

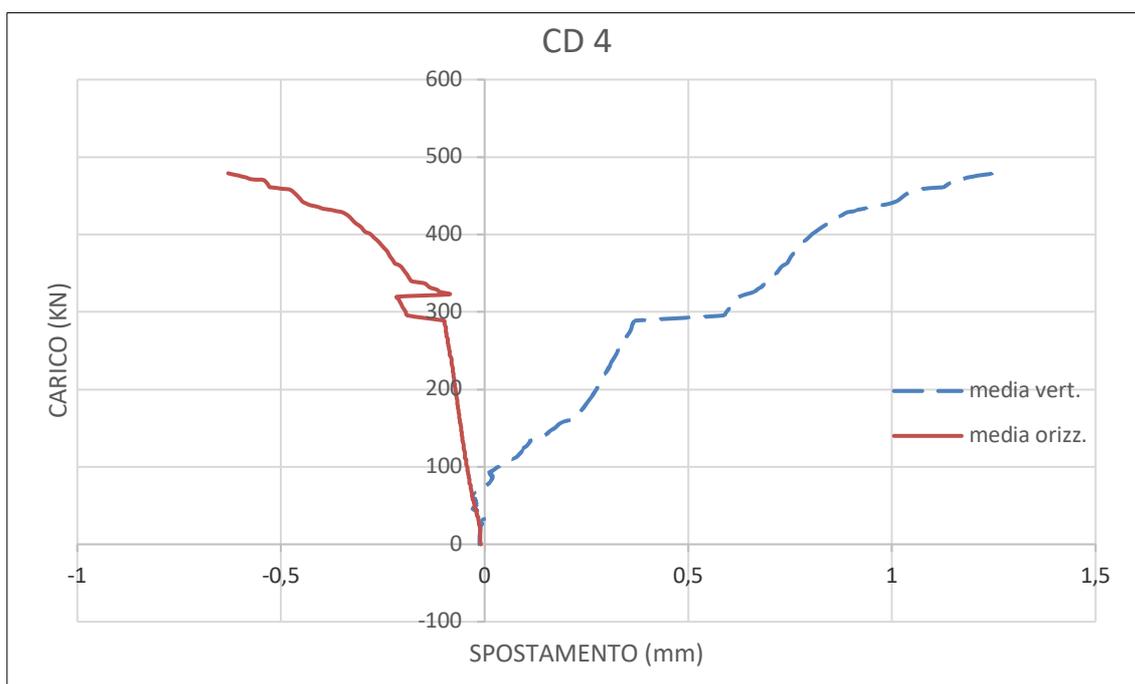


Figura 4.4 Diagramma Forza-Spostamento valori medi misurati sulle due facce

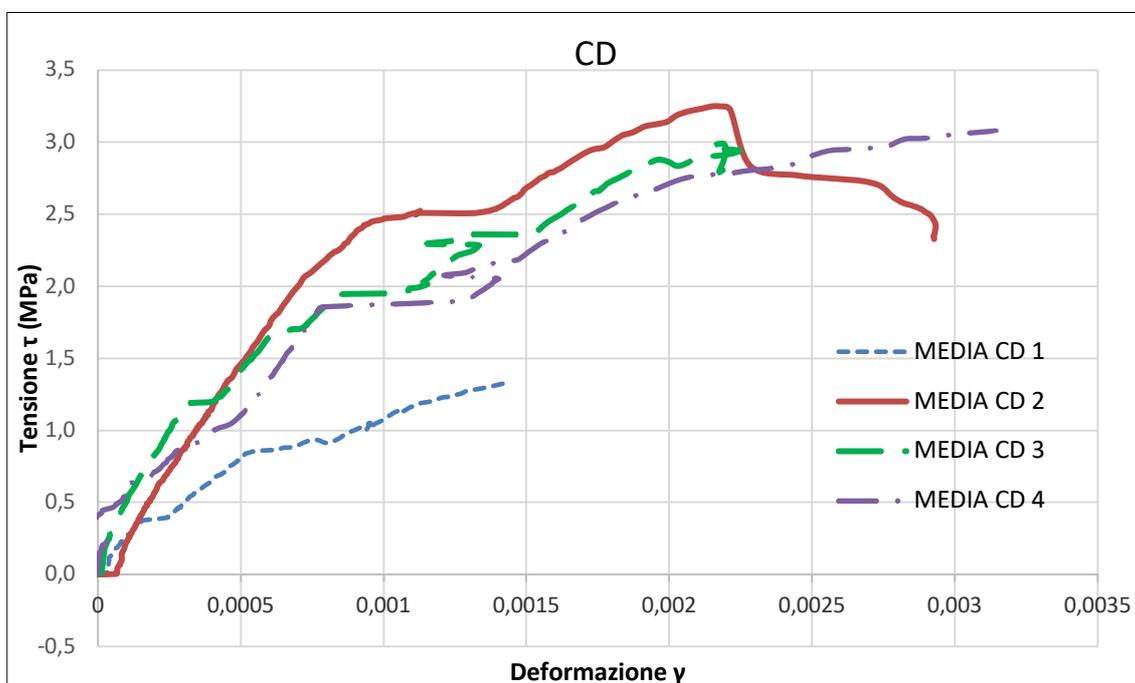


Figura 4.5 Diagramma τ - γ dei valori medi misurati sulle due facce

Nella *Tabella 4.1* vengono espressi i dati principali misurati sui quattro provini, in termini di carico massimo raggiunto, tensione tangenziale massima, deformazione angolare massima e modalità di rottura.

Tab.4.1 Risultati principali delle prove di compressione diagonale su provini quadrati

Codice pannello	Carico max [kN]	τ_{max} [MPa]	γ_{max} [-]	Modalità di rottura
CD 1	336,14	2,16	0,0009	crisi locale degli spigoli
CD 2	505,47	3,25	0,0029	fessurazione diagonale
CD 3	465,00	2,99	0,0022	fessuraz.diagonale + crisi locale dello spigolo
CD 4	479,00	3,08	0,0031	fessuraz.diagonale + crisi locale dello spigolo

Per avere un quadro più completo dei risultati, vengono elencati anche i valori medi dei risultati ottenuti nella *Tabella 4.2*. Si trascurano nel calcolo dei valori medi i risultati della prova CD1, per il distacco degli strumenti di misura avvenuto a causa della crisi locale agli spigoli.

Tab.4.2 Valori medi ottenuti dalle prove di compressione diagonale su provini quadrati

Valori medi prova CD		
Carico max [kN]	τ_{max} [MPa]	γ_{max} [-]
483,16	3,07	0,027

Analizzando i risultati ottenuti per i provini CD2, CD3, CD4, si denota un quadro fessurativo costituito da fratture lungo la diagonale principale del provino conformi alle modalità di rottura per compressione diagonale. Inoltre, si evidenzia lo schiacciamento dello spigolo inferiore o superiore soggetto a sforzo di compressione.

Le immagini successive rappresentano le principali modalità di crisi registrate per ciascun provino testato.



Figura 4.6 Crisi locale spigolo CD1 retro



Figura 4.7 Fessurazione diagonale CD2



Figura 4.8 Schiacciamento spigolo e fessurazione diagonale CD3 fronte



Figura 4.9 Schiacciamento spigolo e fessurazione diagonale CD4 retro

5. Prove di compressione centrata (pannelli 1100mm x 1100mm)

Sono state eseguite n.4 prove di compressione centrata su provini quadrati di lato 1100 mm, armati con rete $\phi 5$ e di spessore complessivo pari a 240 mm. Alle estremità superiore ed inferiore sono stati realizzati due cordoli in c.a. di sezione pari a 240x115 mm, armati con 2+2 $\phi 12$ longitudinale e staffe $\phi 8/20$. Per ogni prova sono stati installati dei trasduttori di spostamento per la lettura delle deformazioni verticali e per gli spostamenti fuori dal piano, inoltre sono stati posizionati dei trasduttori di spostamento in corrispondenza dello spessore del pannello, al fine di monitorare lo spanciamento del provino durante la prova di carico. In *Figura 5.1* si riporta lo schema con cui è stata posizionata la strumentazione.

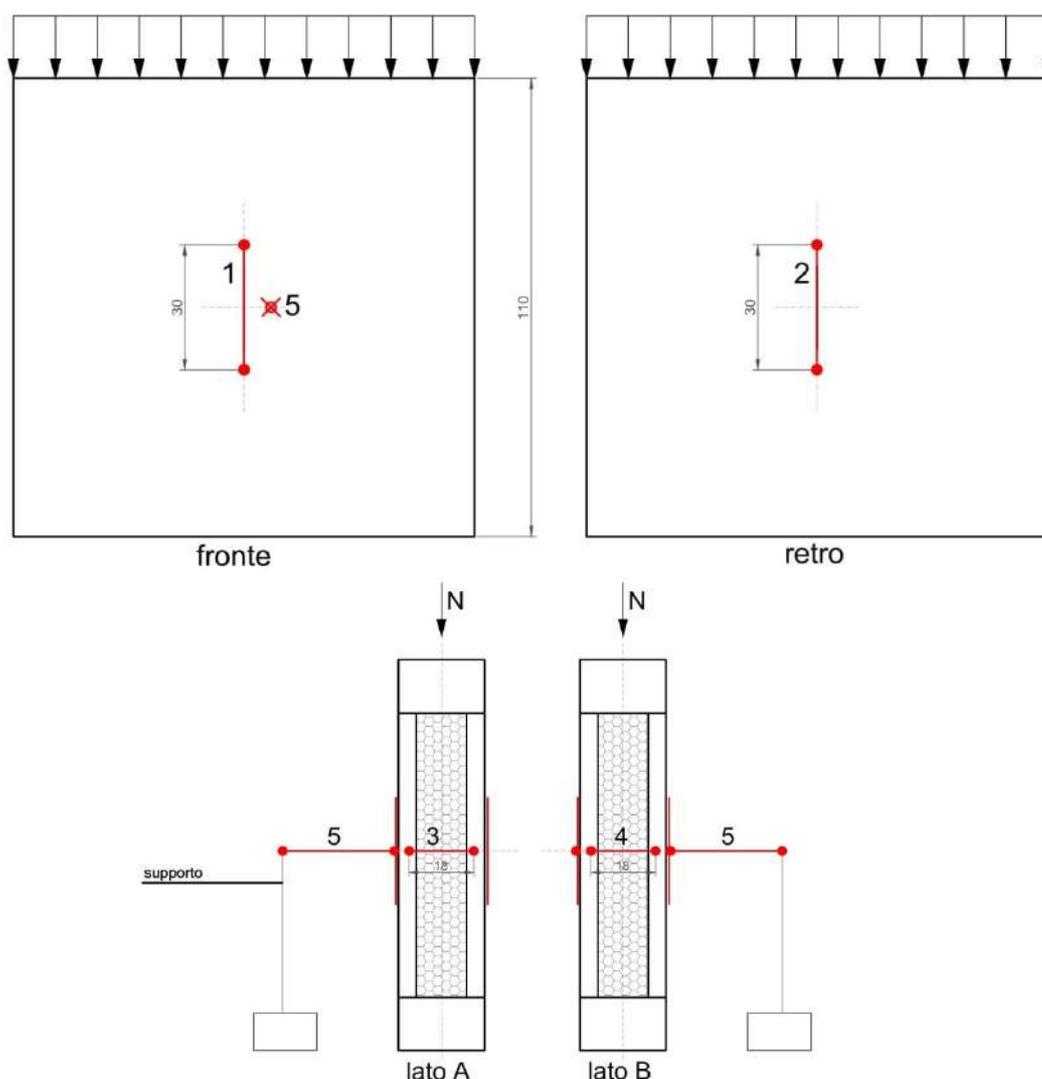


Figura 5.1 Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro, lato A e lato B del provino

Ad ogni provino è stato associato un codice identificativo della prova eseguita:

- CC 1: provino 1
- CC 2: provino 2
- CC 3: provino 3
- CC 4: provino 4

Le prove sono state condotte con sforzo assiale crescente, applicando il carico mediante una piastra rigida in modo da distribuire gli sforzi uniformemente lungo il lato del provino.

I grafici ottenuti, mostrano l'andamento dei valori più significativi dei parametri analizzati durante la prova, forza di compressione e spostamento verticale registrato.

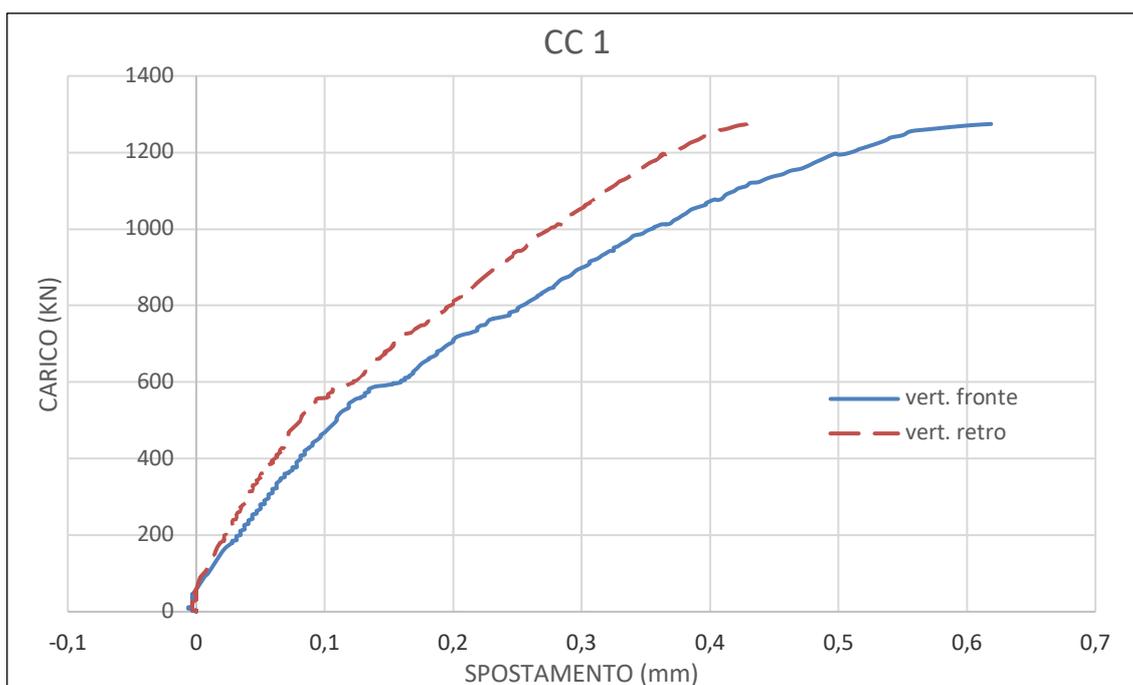


Figura 5.2 Diagramma Forza-Spostamento valori misurati sulle due facce

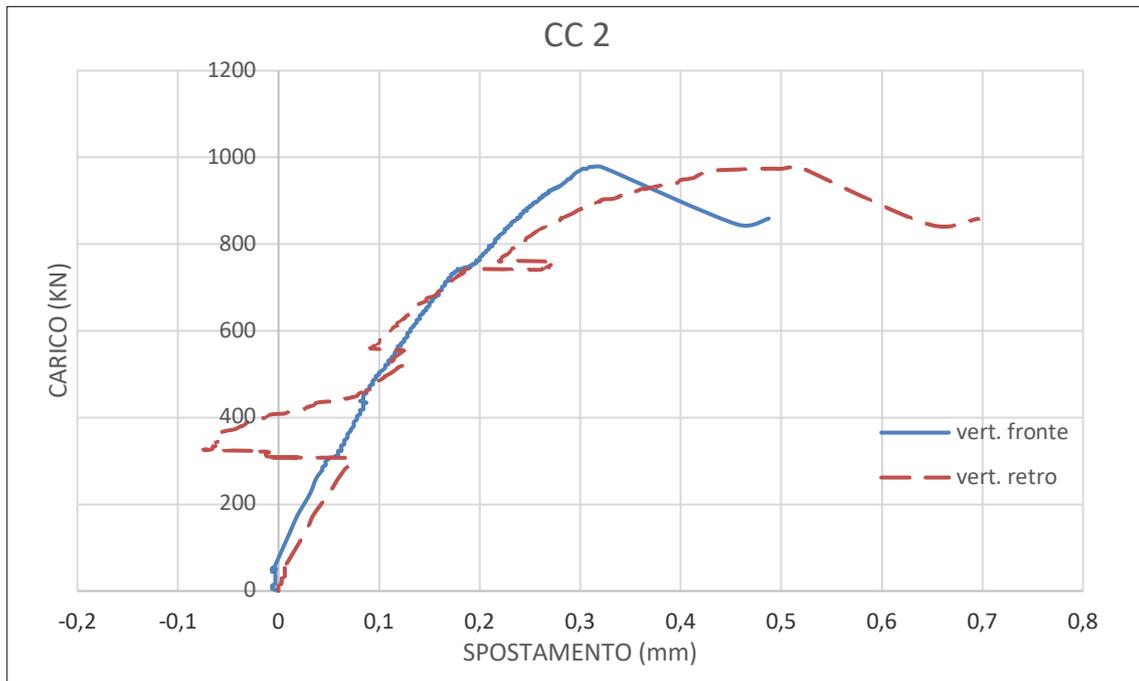


Figura 5.3 Diagramma Forza-Spostamento valori misurati sulle due facce

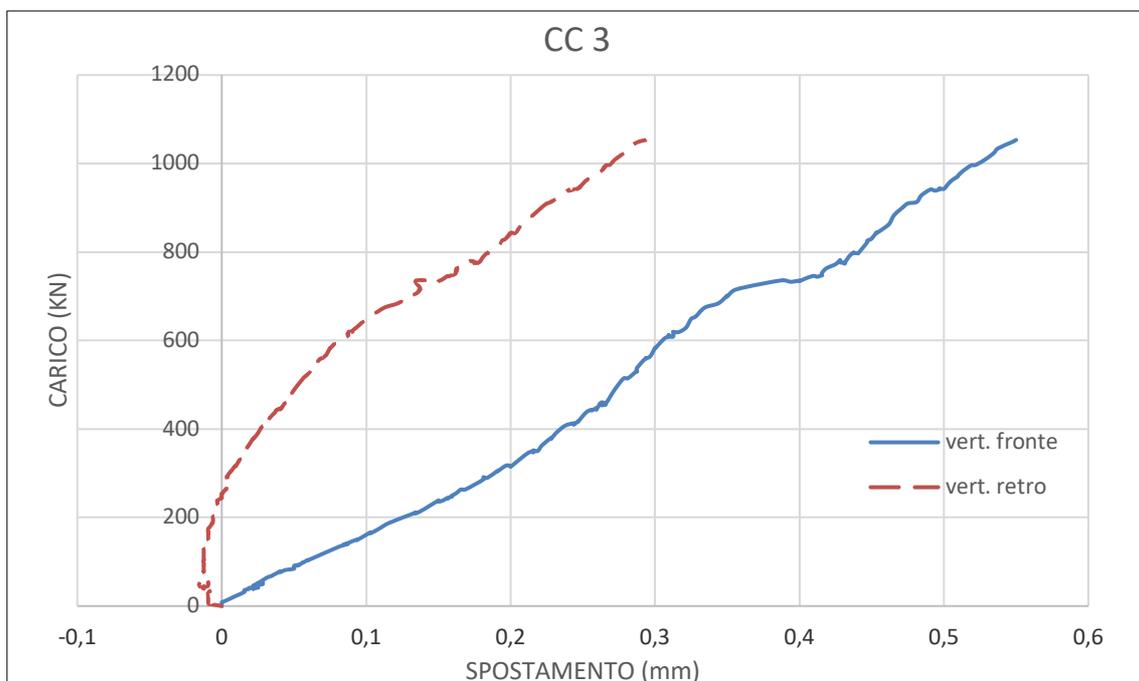


Figura 5.4 Diagramma Forza-Spostamento valori misurati sulle due facce

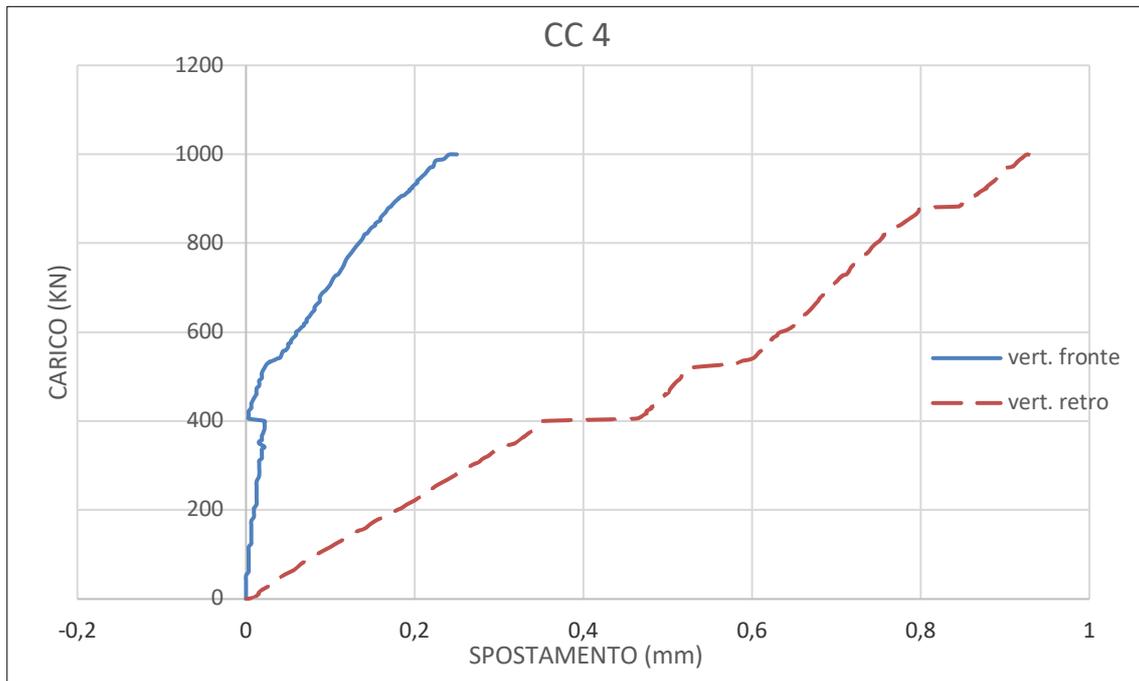


Figura 5.5 Diagramma Forza-Spostamento valori misurati sulle due facce

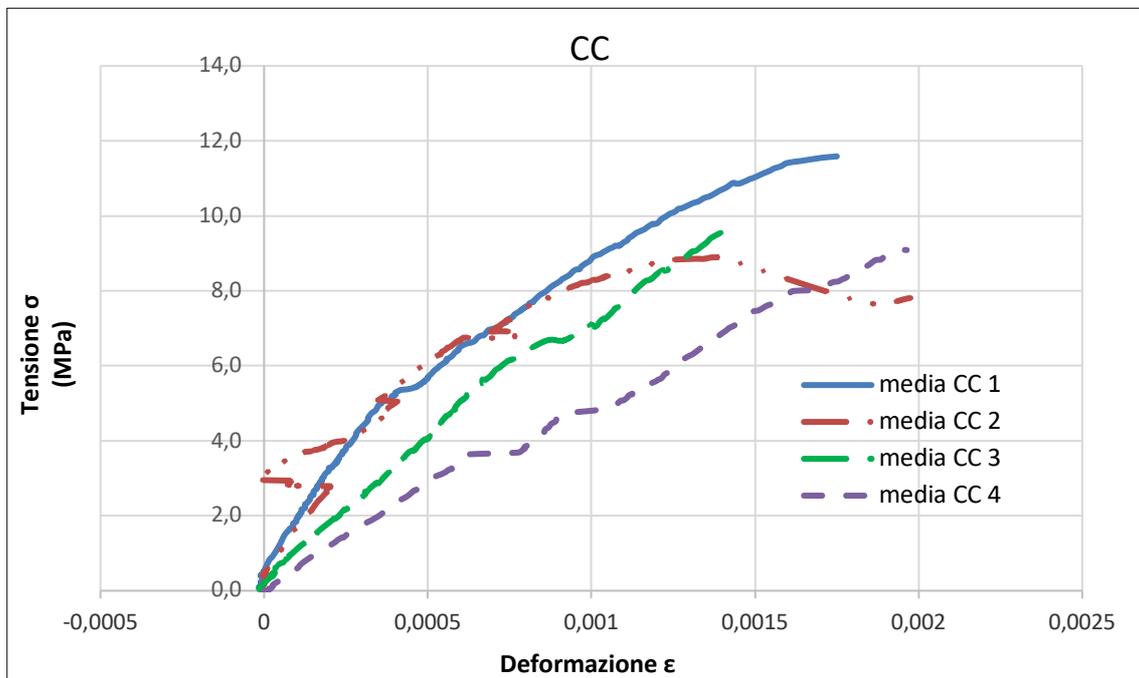


Figura 5.6 Diagramma $\sigma_c - \epsilon$ valori misurati sulle due facce

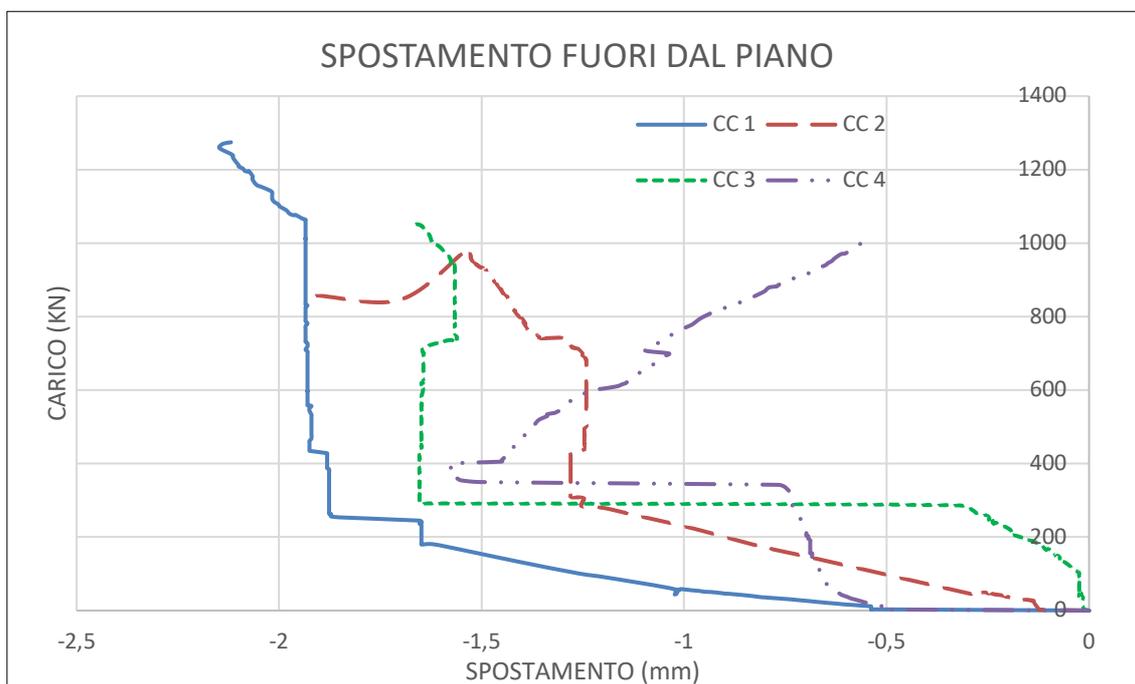


Figura 5.7 Spostamenti fuori dal piano dei provini misurati per il lato fronte

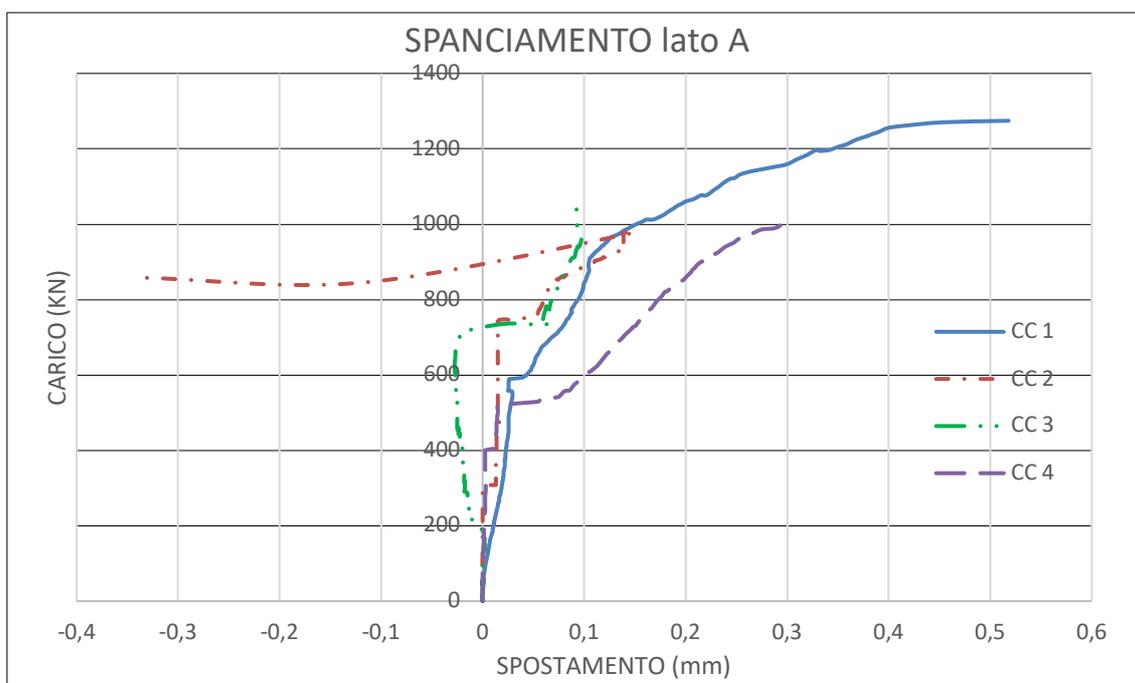


Figura 5.8 Spanciamento misurato per il lato A di ciascun provino

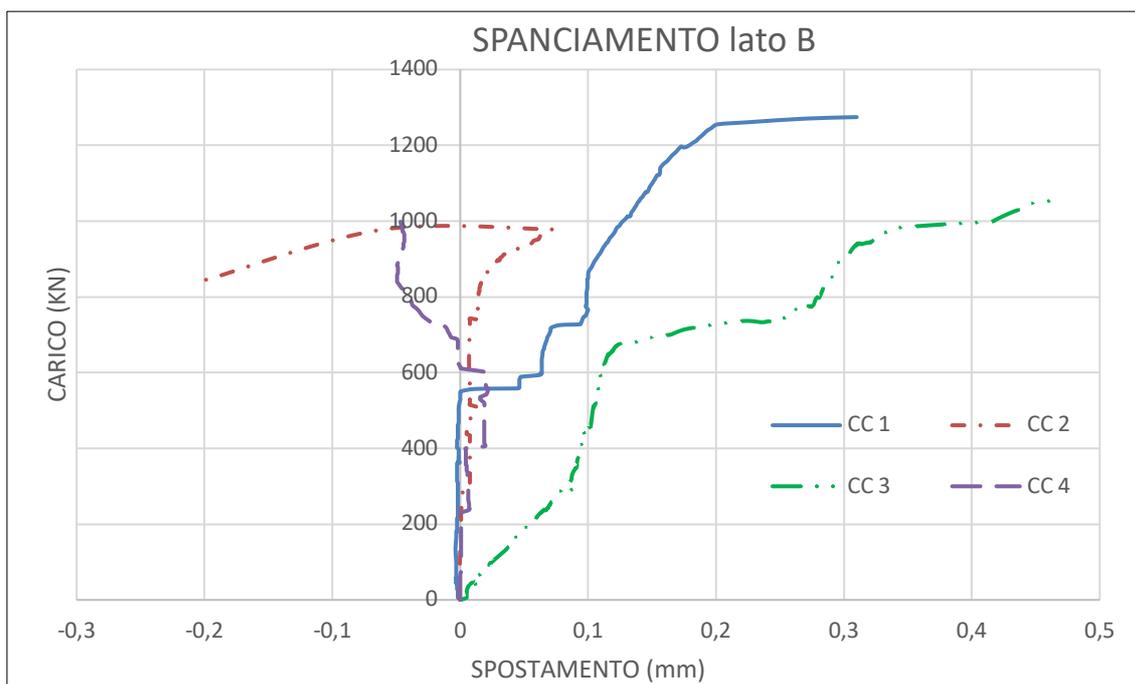


Figura 5.9 Spanciamento misurato per il lato B di ciascun provino

Come per la prova precedente, vengono tabulati i dati principali misurati sui quattro provini, in termini di carico massimo raggiunto, tensione di compressione massima, deformazione verticale massima e modalità di rottura (vedi *Tabella 5.1*).

Tab.5.1 Risultati principali delle prove di compressione centrata su provini quadrati

Codice pannello	Carico max [kN]	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [-]	Modalità di rottura
CC 1	1274,46	11,59	0,0021	Schiacciamento cordolo sup + fessuraz. Verticale
CC 2	978,16	8,89	0,0023	Schiacciamento cordolo sup + fessuraz. verticale
CC 3	1053,31	9,58	0,0010	Fessurazione verticale di compressione
CC 4	999,77	9,09	0,0031	Fessurazione verticale di compressione

Si riportano inoltre i valori medi dei risultati ottenuti in *Tabella 5.2*.

Tab.5.2 Valori medi ottenuti dalle prove di compressione diagonale su provini quadrati

Valori medi prova CC		
Carico max	σ_{max}	ϵ_{max}
[kN]	[MPa]	[-]
1076,42	9,79	0,0021

Con riferimento alle misurazioni effettuate, si nota che tutti i provini giungono a rottura per valori simili di carico massimo. Il diagramma σ - ϵ mostra un comportamento a compressione del pannello pressoché lineare fino a rottura. Inoltre, non si registrano fenomeni di instabilità fuori dal piano apprezzabili, sia globali che relativi alle singole cortine di calcestruzzo, come viene evidenziato dai grafici relativi agli spostamenti fuori dal piano ed allo spanciamiento, che hanno registrato valori non significativi dell'ordine del millimetro.

Nelle immagini successive è possibile osservare le principali modalità di rottura per ogni provino, caratterizzate da fratture verticali e da schiacciamenti a livello dei cordoli.



Figura 5.10 Schiacciamento cordolo superiore provino CC1



Figura 5.11 Schiacciamento cordolo superiore e fessurazioni verticali CC2



*Figura 5.12 Fessurazione verticale
provino CC3*



*Figura 5.12 Fessurazione verticale
provino CC4*

6. Prove di compressione eccentrica (pannelli 1100mm x 1100mm)

Sono state eseguite n.4 prove di compressione eccentrica su provini quadrati di lato 1100 mm, armati con rete $\phi 5$ e di spessore complessivo pari a 240 mm. Alle estremità superiore ed inferiore sono stati realizzati due cordoli in c.a. di sezione pari a 240x115 mm, armati con 2+2 $\phi 12$ longitudinale e staffe $\phi 8/20$. Per ogni prova sono stati installati dei trasduttori di spostamento per la lettura delle deformazioni verticali e per gli spostamenti fuori dal piano, su entrambe le facce del provino; inoltre sono stati posizionati dei trasduttori di spostamento in corrispondenza dello spessore del pannello, al fine di monitorare lo spanciamento del provino durante la somministrazione del carico eccentrico.

In *Figura 6.1*, si riporta lo schema con cui è stata posizionata la strumentazione.

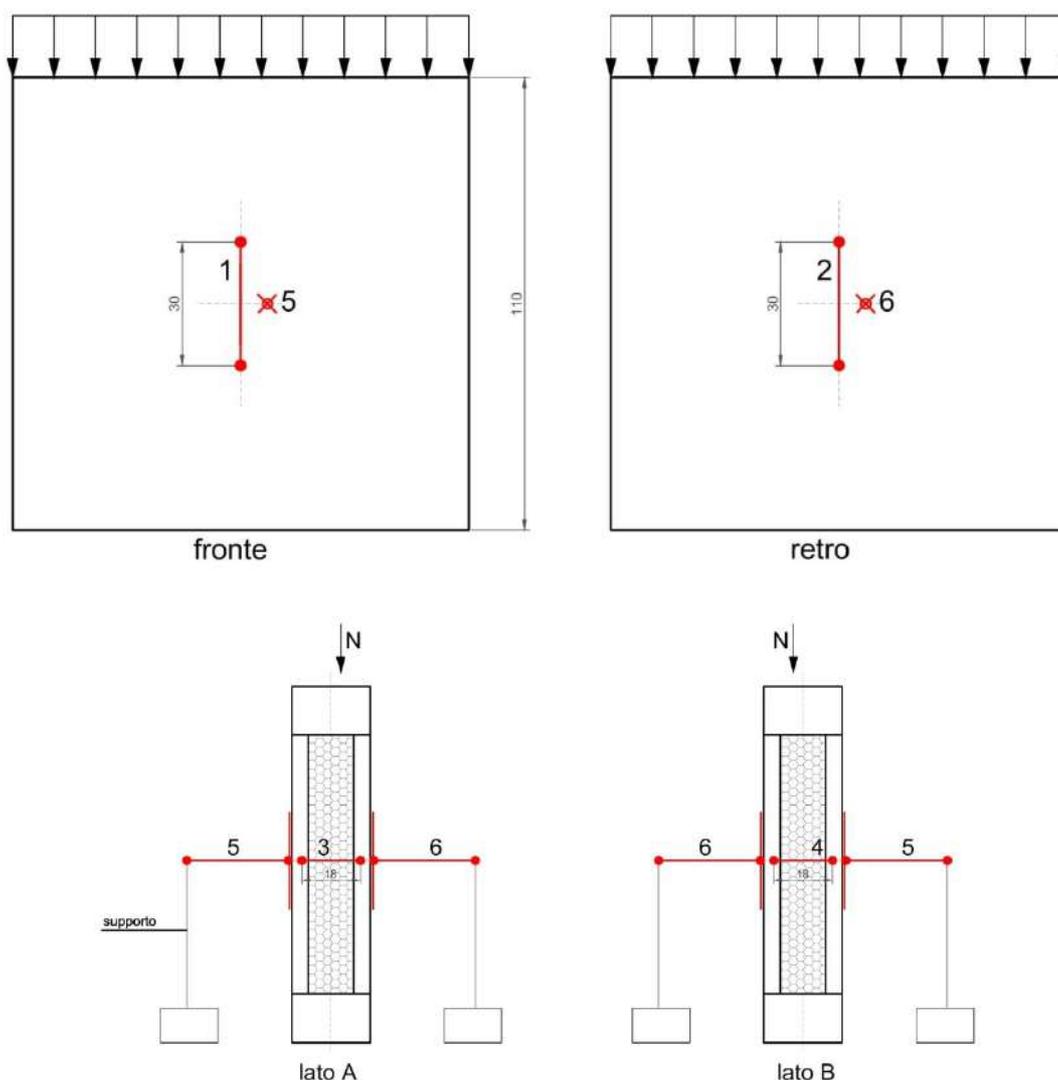


Figura 6.1 Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro, lato A e lato B del provino

Ad ogni provino è stato associato un codice identificativo della prova eseguita:

- CE 1: provino 1
- CE 2: provino 2
- CE 3: provino 3
- CE 4: provino 4

Il carico è stato applicato mediante una traversa rigida posta sulla sommità del provino, in modo da distribuire uniformemente gli sforzi. Al piede del pannello è stata invece posta una traversa rigida collegata ad un sistema a cerniera cilindrica orizzontale, al fine di permettere la rotazione del provino sottoposto a compressione eccentrica (*Figura 6.2*). La prova è stata condotta disponendo il carico con un'eccentricità pari ad $e = 30$ mm, dal centro del provino.



Figura 6.2 Setup di prova - Disposizione della cerniera cilindrica orizzontale al piede del provino

Nei grafici seguenti sono stati elaborati i dati ottenuti dalla prova di compressione eccentrica su provini 1100mm x 1100mm. La tensione normale σ_e massima è stata calcolata considerando il contributo del momento prodotto dall'eccentricità del carico. Non avendo prodotto effetti apprezzabili, viene solo riportato il diagramma di spanciamento per il pannello CE 1.

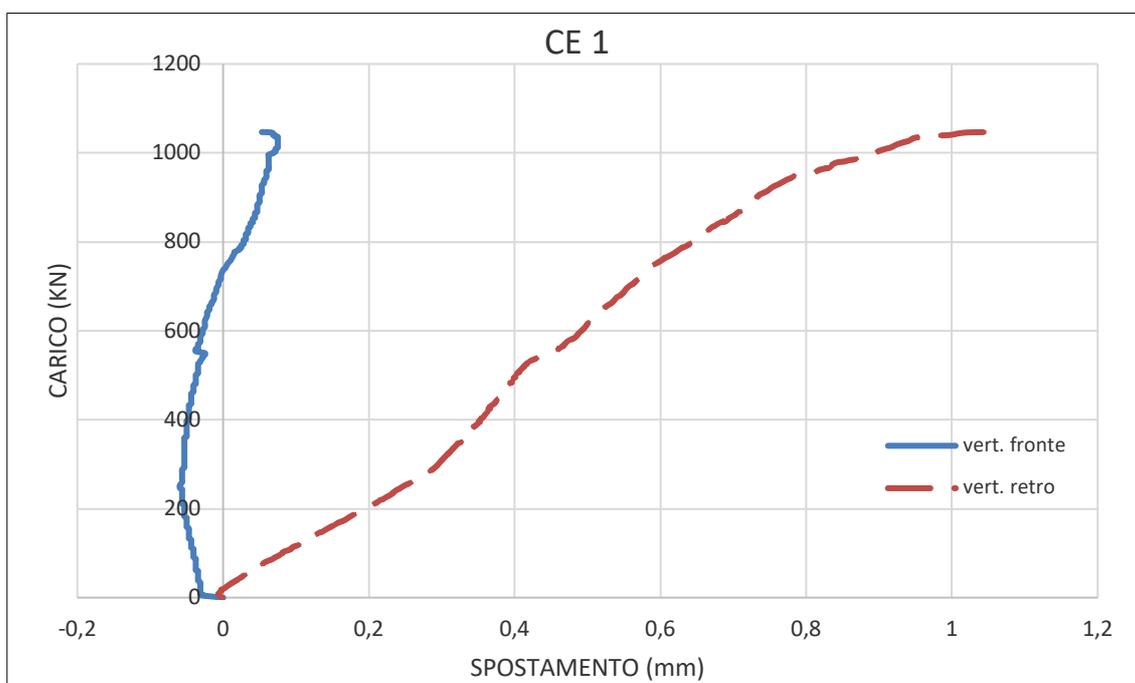


Figura 6.3 Diagramma Forza-Spostamento valori misurati sulle due facce

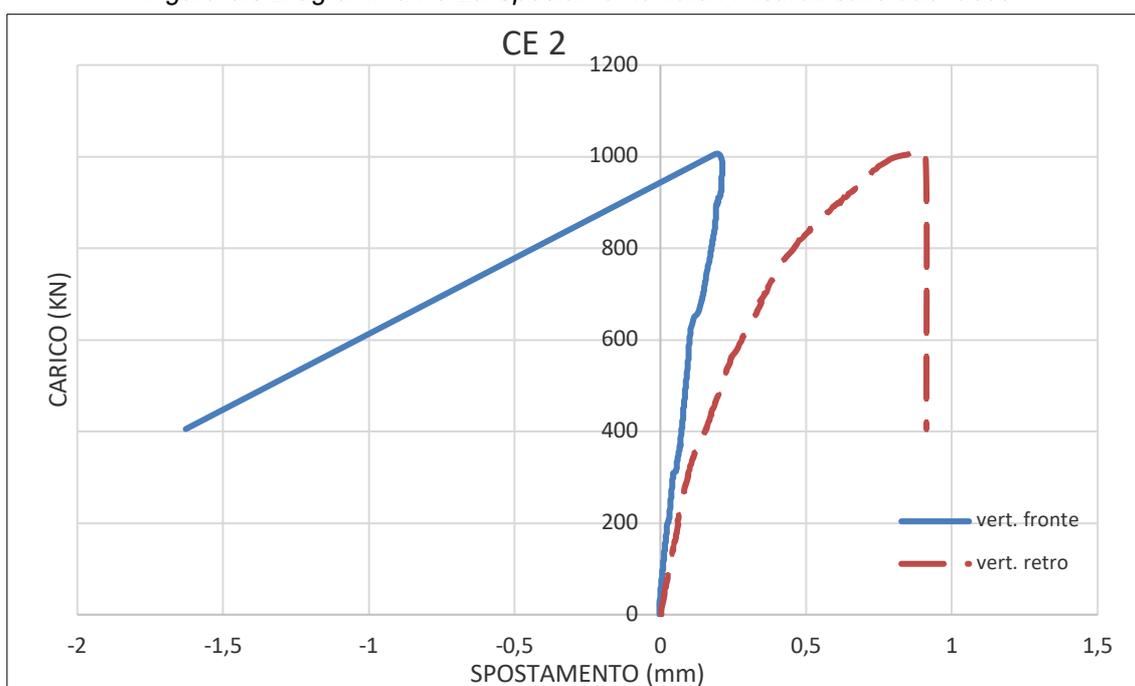


Figura 6.4 Diagramma Forza-Spostamento valori misurati sulle due facce

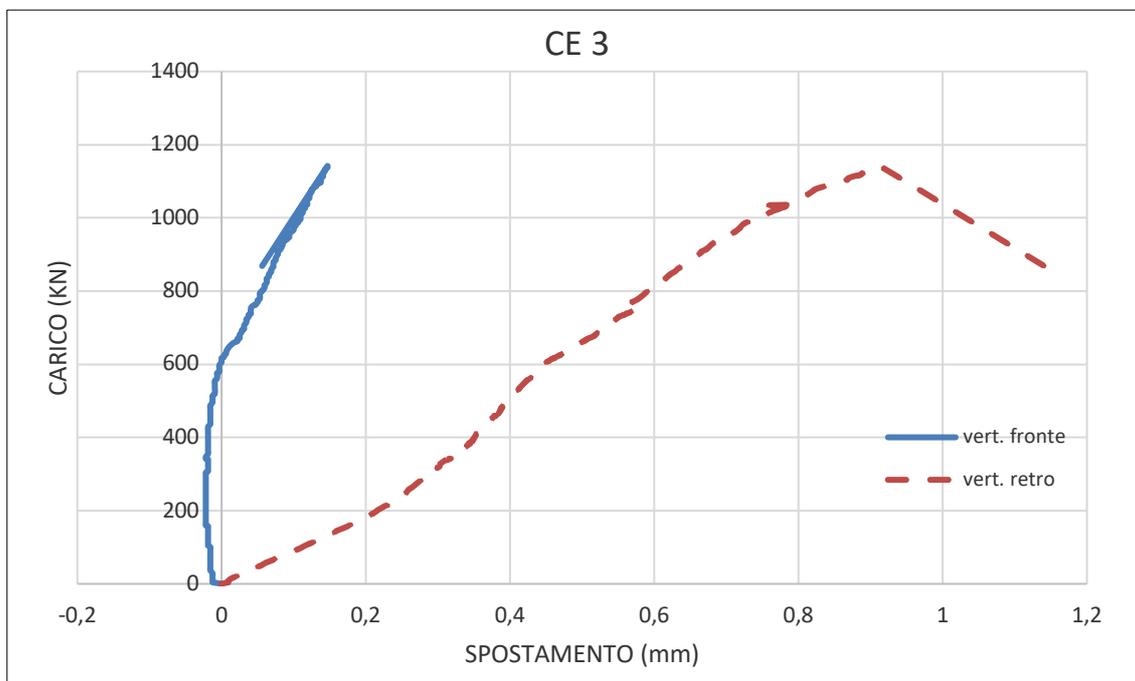


Figura 6.5 Diagramma Forza-Spostamento valori misurati sulle due facce

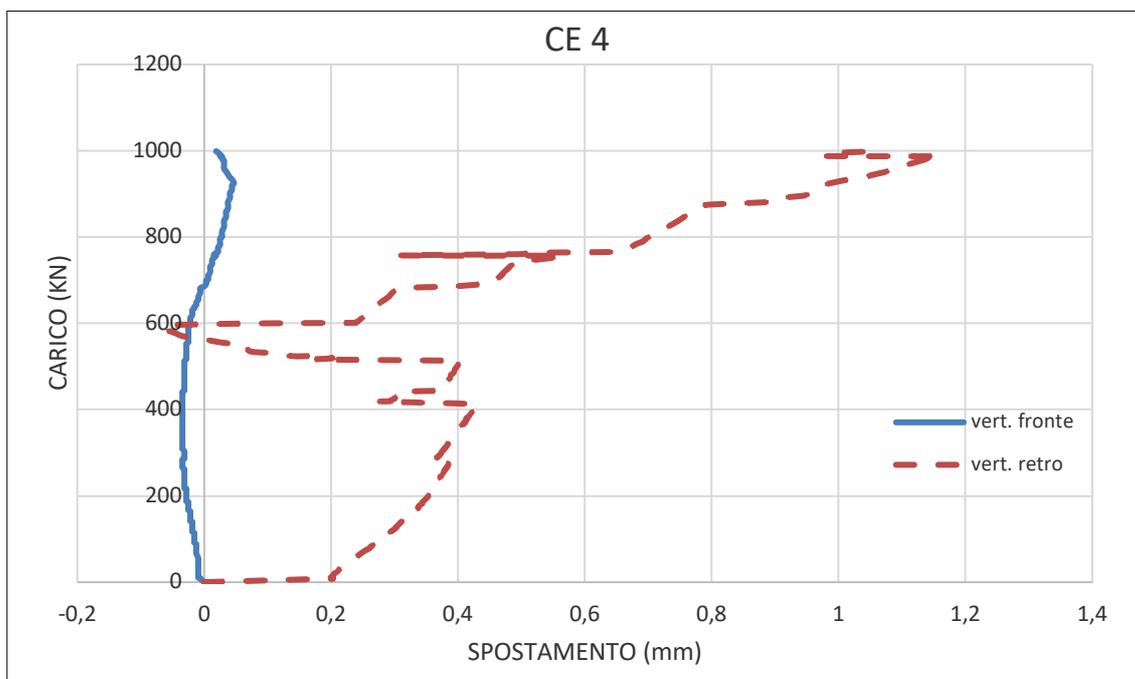


Figura 6.6 Diagramma Forza-Spostamento valori misurati sulle due facce

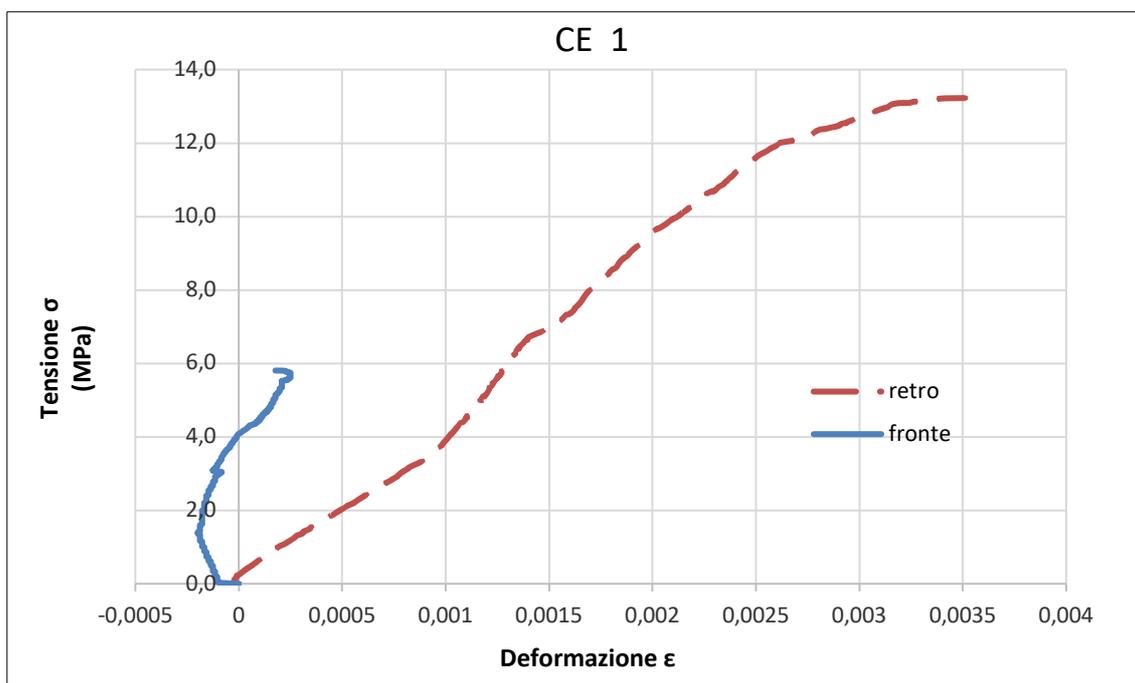


Figura 6.7 Diagramma $\sigma_e - \epsilon$ dei valori misurati sulle due facce

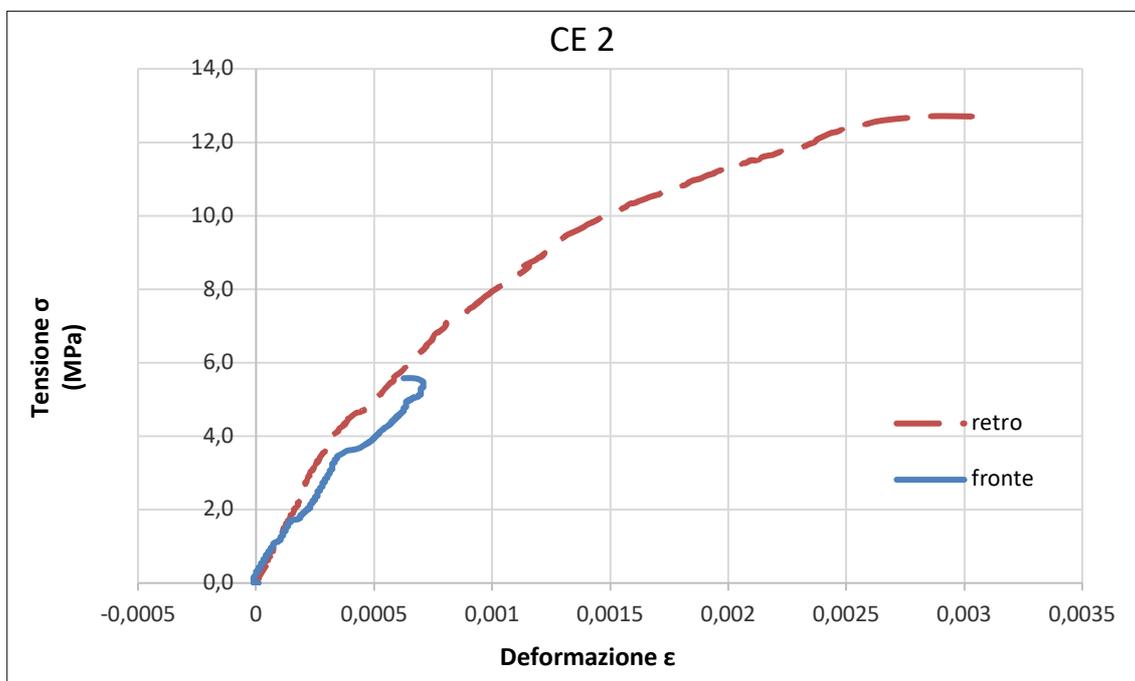


Figura 6.8 Diagramma $\sigma_e - \epsilon$ dei valori misurati sulle due facce

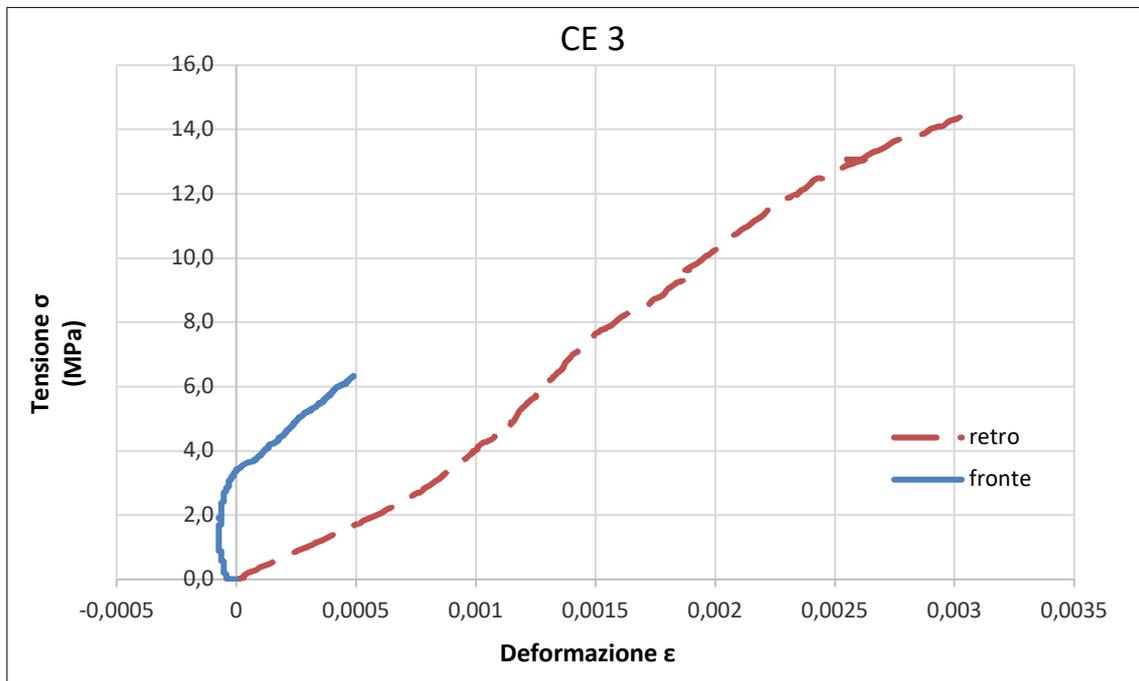


Figura 6.9 Diagramma $\sigma_e - \epsilon$ dei valori misurati sulle due facce

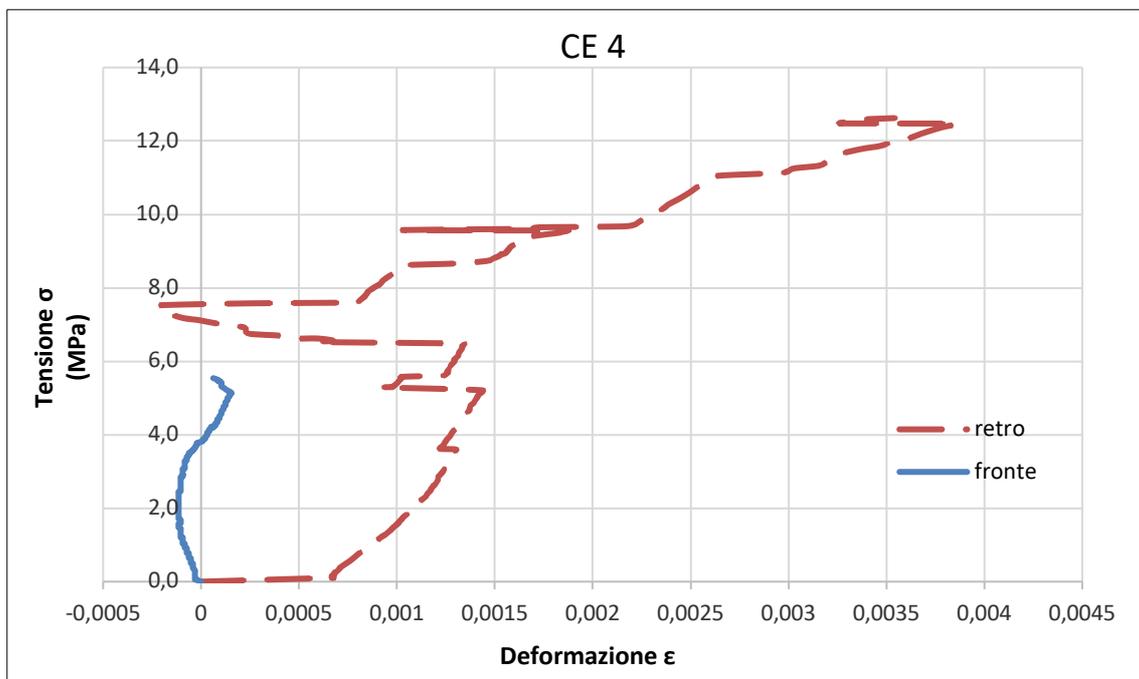


Figura 6.10 Diagramma $\sigma_e - \epsilon$ dei valori misurati sulle due facce

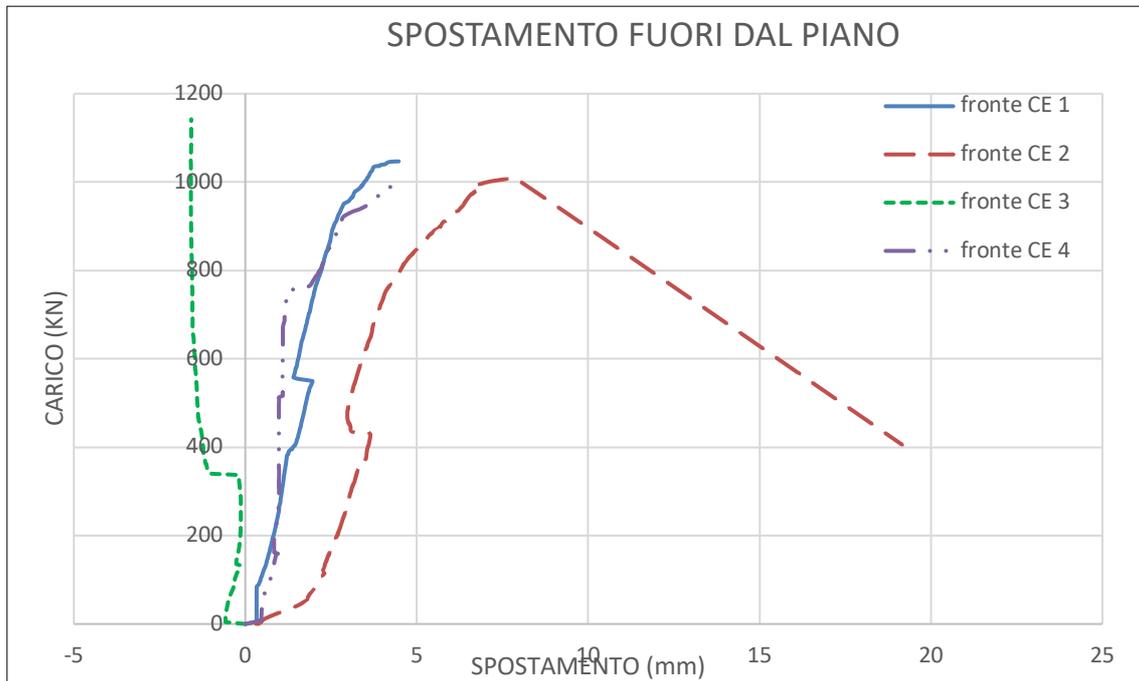


Figura 6.11 Spostamenti fuori dal piano dei provini per il lato fronte

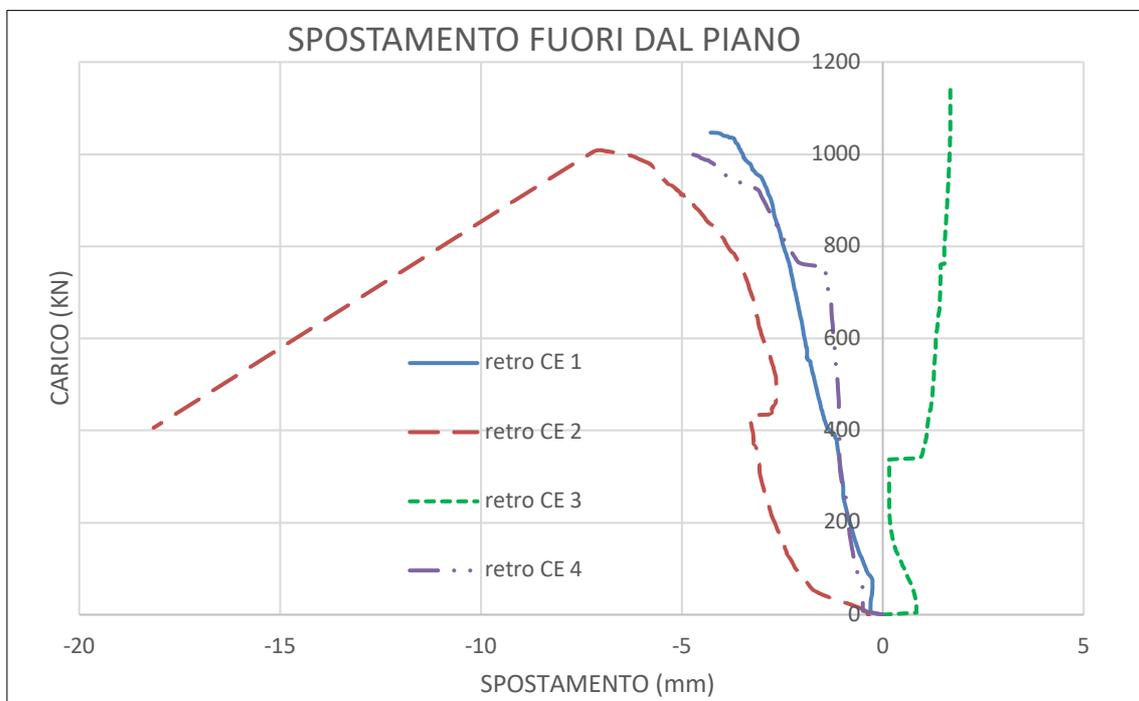


Figura 6.12 Spostamenti fuori dal piano dei provini per il lato retro

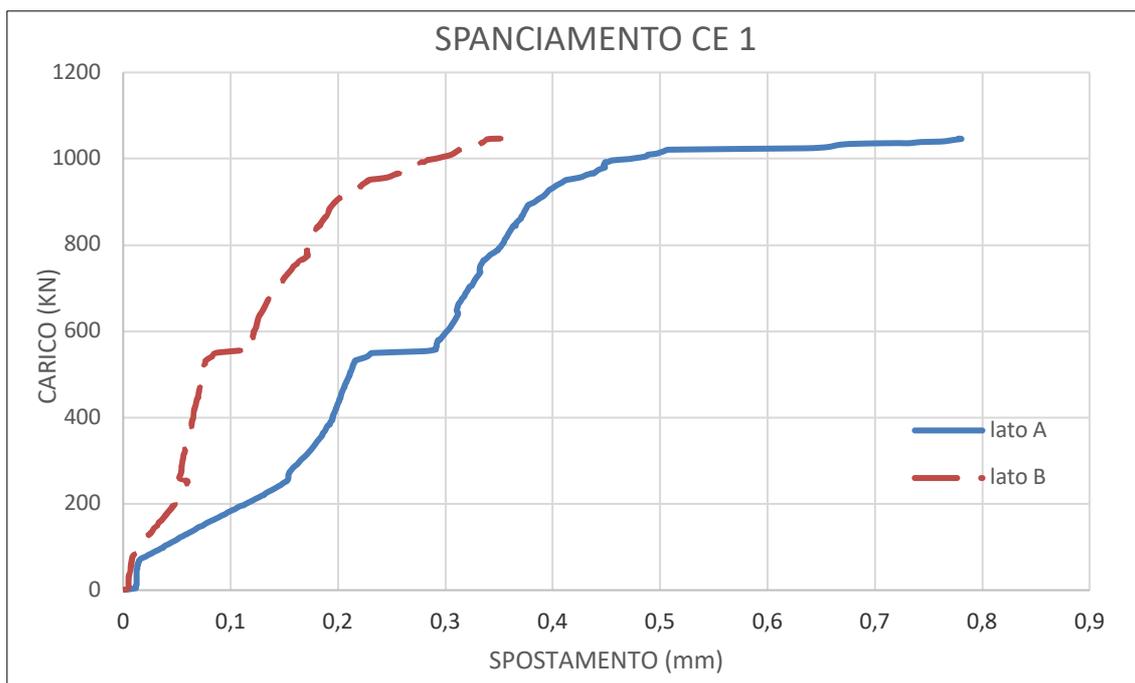


Figura 6.13 Spanciamento più significativo misurato per il lato A e B del provino CE1

Nella *Tabella 6.1* vengono restituiti i dati principali misurati sui quattro provini, in termini di carico massimo raggiunto, tensione di compressione eccentrica massima (lato retro), deformazione verticale massima e modalità di rottura, oltre ai valori medi ottenuti.

Tab.6.1 Risultati principali delle prove di compressione eccentrica su provini quadrati

Codice pannello	Carico max [kN]	σ_e max [MPa]	ϵ max [-]	Modalità di rottura
CE 1	1046,75	13,23	0,0035	Schiacciamento cordolo inf + fessuraz. verticale
CE 2	1006,32	12,71	0,0030	Schiacciamento lato retro e formazione di fessure
CE 3	1141,90	14,43	0,0030	Schiacciamento cordolo sup + fessuraz. verticale
CE 4	998,92	12,62	0,0039	Schiacciamento lato retro e formazione di fessure

Tab.6.2 Valori medi ottenuti dalle prove di compressione eccentrica su provini quadrati

Valori medi prova CE		
Carico max	σ_e max	ϵ max
[kN]	[MPa]	[-]
1048,47	13,25	0,0033

I risultati dei test mostrano un comportamento a pressoflessione dei pannelli accentuato da una leggera instabilità fuori dal piano, come prevedibile per la prova di compressione eccentrica. Infatti, analizzando i grafici Forza-Spostamento, si nota un andamento divergente delle curve, caratterizzate da un diverso comportamento a compressione (lato retro) ed a trazione (lato fronte) delle facce opposte. A causa della non eccessiva eccentricità del carico, i valori degli spostamenti nel lato fronte sono mediamente prossimi allo zero.

Con riferimento alle misurazioni ottenute per il provino CE4, è possibile notare che l'andamento del diagramma $\sigma_e - \epsilon$, è caratterizzato da intervalli in cui si passa da allungamento ad accorciamento. Ciò è sicuramente da attribuire ad una mancata orizzontalità dei pannelli legata ad irregolarità costruttive, come riportato in *Figura 6.14*.



Figura 6.14 Irregolarità costruttiva del pannello CE4 rilevata tramite eccessiva distanza ultimo martinetto-piastra di appoggio

Si allegano quindi le immagini più rappresentative della rottura a pressoflessione per ciascun provino.



Figura 6.15 Schiacciamento e fessurazione verticale retro CE1



Figura 6.16 Schiacciamento e fessurazione verticale retro CE2



Figura 6.17 Fessurazione verticale retro CE3



Figura 6.18 Fessurazione verticale retro e schiacciamento CE4

7. Prove di precompressione e taglio (pannelli 1100mm x 1100mm)

Sono state eseguite n.4 prove di precompressione e taglio su provini quadrati di lato 1100 mm, armati con rete $\phi 5$ e di spessore complessivo pari a 240 mm. Alle estremità superiore ed inferiore sono stati realizzati due cordoli in c.a. di sezione pari a 240x115 mm, armati con 2+2 $\phi 12$ longitudinale e staffe $\phi 8/20$. Per ogni prova sono stati installati n.2 trasduttori di spostamento lungo le diagonali del provino, al fine di valutarne l'allungamento e l'accorciamento durante l'esposizione al carico. Un ulteriore trasduttore di spostamento è stato posizionato sul retro del provino per la lettura delle deformazioni verticali. In ultimo, è stato installato un trasduttore di spostamento lungo la direzione di applicazione del carico orizzontale per il monitoraggio degli spostamenti nel piano δ .

In *Figura 7.1* si riporta lo schema con cui è stata posizionata la strumentazione.

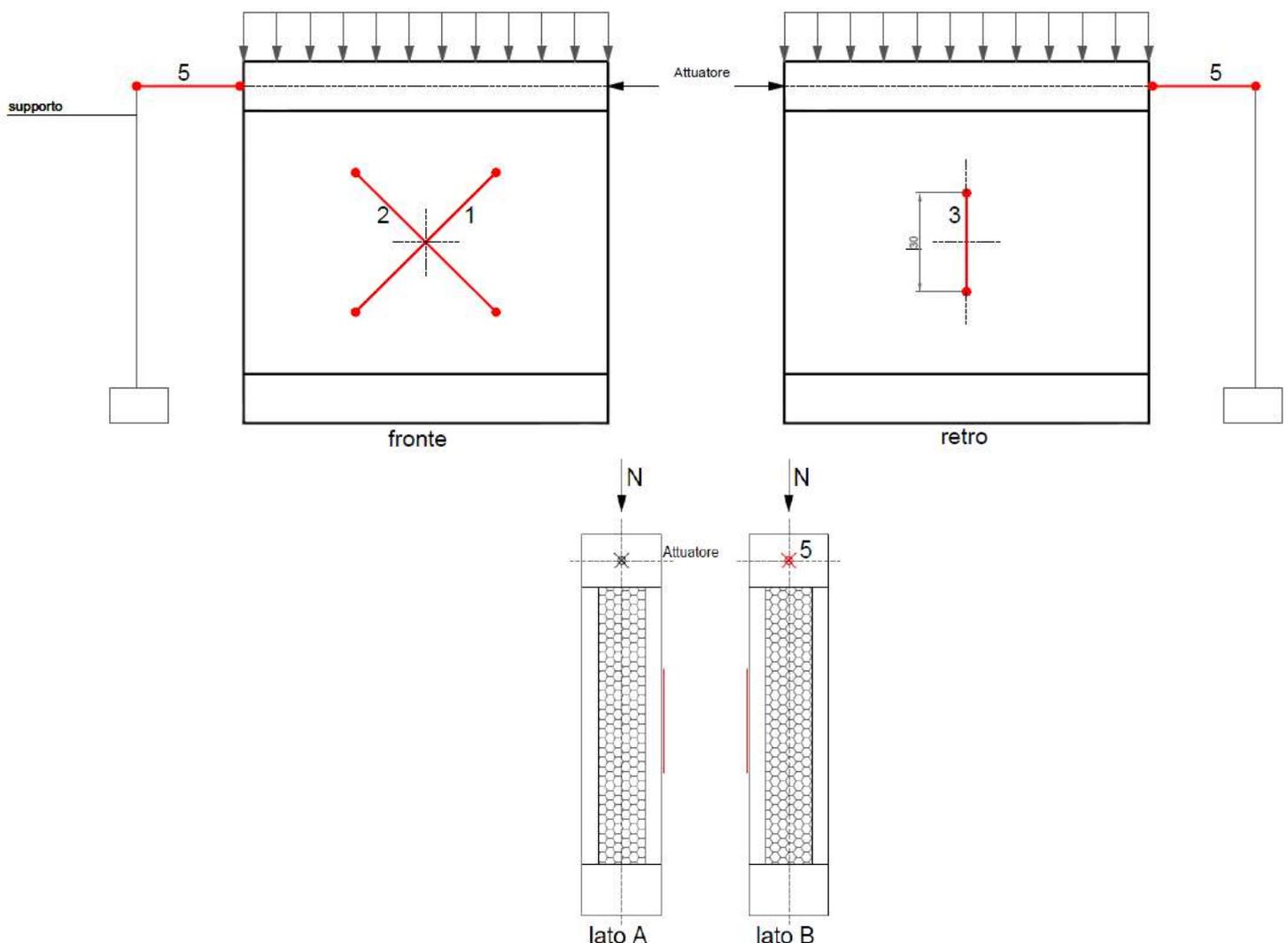


Figura 7.1 Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro, lato A e lato B del provino

Ad ogni provino è stato associato un codice identificativo della prova eseguita:

- PT 1: provino 1
- PT 2: provino 2
- PT 3: provino 3
- PT 4: provino 4

Il precarico verticale è stato applicato al campione per mezzo di quattro martinetti idraulici tali da espletare la capacità di carico richiesta, accoppiati con il cordolo superiore del provino attraverso una piastra rigida di collegamento. Una volta posizionato il provino sotto l'apparato di prova, esso è stato caricato sino a raggiungere il livello di compressione assiale stabilita, pari a circa 400 kN. Successivamente è stato disposto il sistema di spinta orizzontale in corrispondenza del lato A del provino (*Figura 7.2*), opportunamente contrastato alla base del provino, al fine di permettere solo lo spostamento in sommità. Durante lo svolgimento delle prove il carico verticale è stato mantenuto costante, mentre si è provveduto ad incrementare in maniera crescente il valore della spinta orizzontale fino al manifestarsi della condizione di collasso del provino.



Figura 7.2 Setup prova a precompressione e taglio

Va inoltre precisato che non è stato possibile eseguire la prova per il pannello PT4, in quanto la presenza di spiccate irregolarità costruttive del provino avrebbe potuto falsare ed alterare i risultati della prova stessa, oltre che danneggiare la strumentazione.

Le immagini che seguono mostrano i difetti geometrici riscontrati nel provino.



Figura 7.3 Irregolarità costruttiva provino PT4 con evidente non planarità



Figura 7.4 Particolare della mancata orizzontalità del provino misurate in corrispondenza dello spigolo sinistro e destro



In base ai parametri acquisiti durante i test, si calcolano la massima tensione tangenziale τ e la deformazione γ .

$$\tau_{max} = \frac{F_h}{A_b}$$

dove:

F_h = forza orizzontale di taglio;

A_b = area netta della sezione di base del provino.

La deformazione γ viene invece espressa nel seguente modo:

$$\gamma = \frac{\delta}{h}$$

con:

δ = spostamento in sommità;

h = altezza del provino.

I grafici elaborati, mostrano l'andamento dei vari parametri precedentemente indicati.

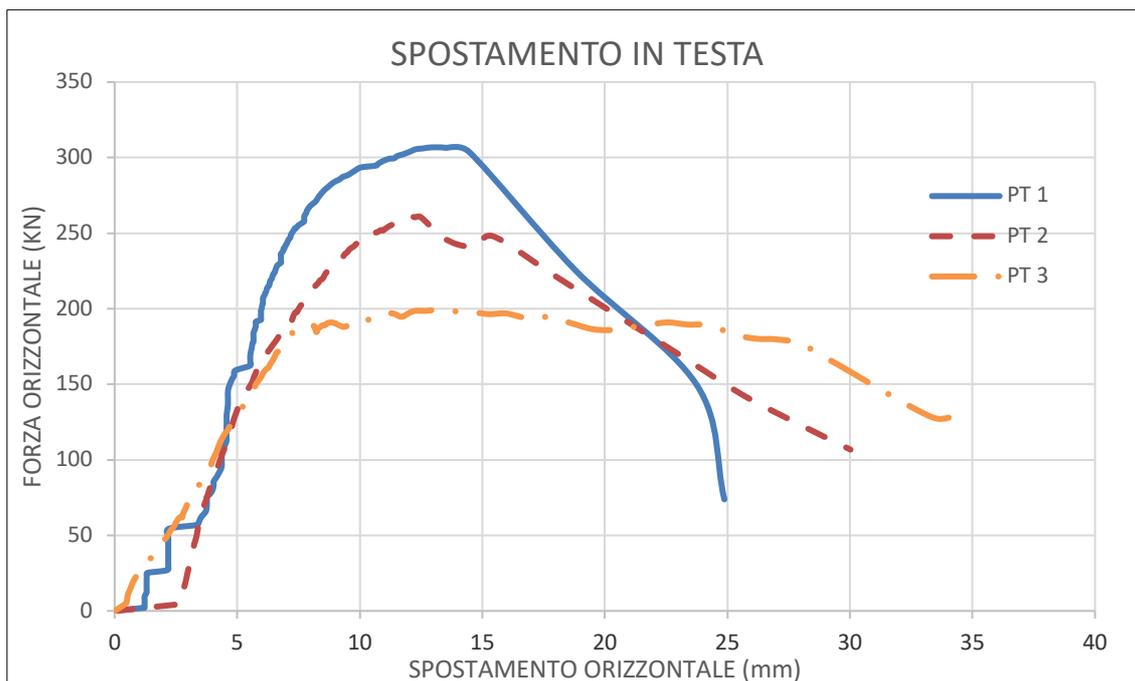


Figura 7.5 Diagramma Forza orizzontale - Spostamento in testa dei provini

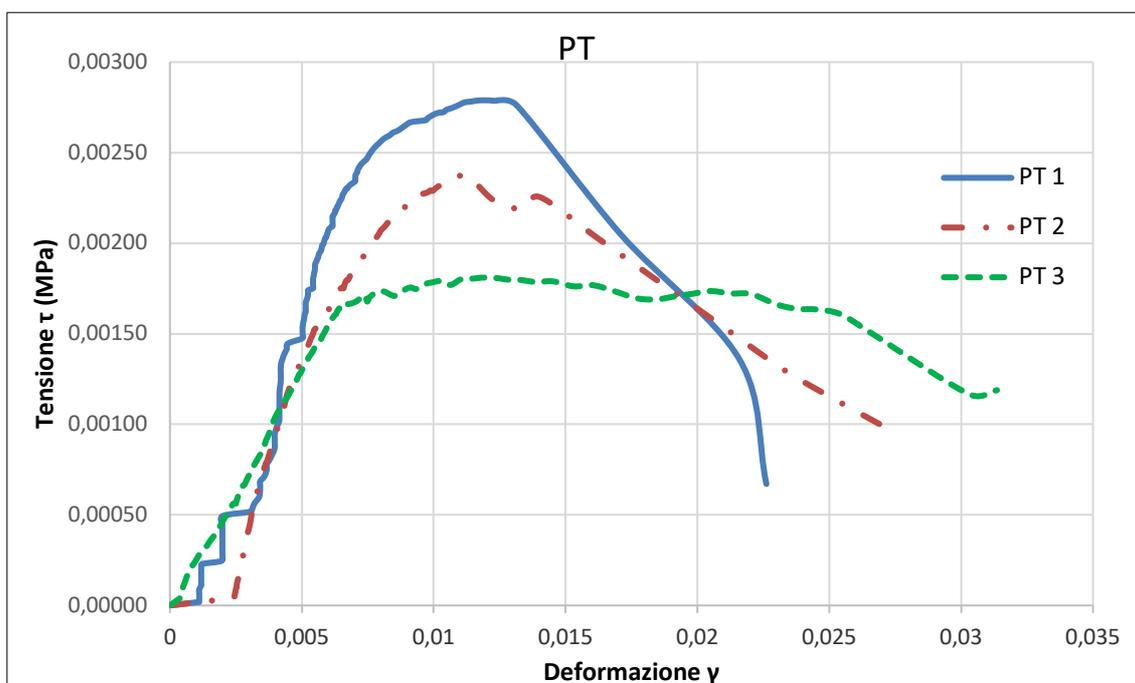


Figura 7.6 Diagramma $\tau - \gamma$

Di seguito vengono tabulati i dati principali misurati sui tre provini utili, in termini forza orizzontale massima raggiunta, spostamento massimo in testa, tensione tangenziale massima, deformazione angolare massima e modalità di rottura.

Tab.7.1 Risultati principali delle prove di precompressione e taglio e su provini quadrati

Codice pannello	$F_{h \max}$ [KN]	δ_{\max} [mm]	τ_{\max} [MPa]	γ_{\max} [-]	Modalità di rottura
PT 1	307,77	25	0,00278	0,023	Fessuraz.diagonale + schiacciamento spigolo inf
PT 2	261,08	30	0,00237	0,027	Fessuraz.diagonale + schiacciamento spigolo inf
PT 3	199,09	34	0,00181	0,031	Fessuraz.diagonale + schiacciamento spigolo inf
PT 4	-	-	-	-	non testato

Tab.7.2 Valori medi ottenuti dalle prove di precompressione e taglio su provini quadrati

Valori medi prova PT			
$F_{h \max}$	δ_{\max}	τ_{\max}	γ_{\max}
[KN]	[mm]	[MPa]	[-]
255,98	30	0,00232	0,027

I risultati ottenuti mostrano una uniformità rispetto alle modalità di rottura dei provini testati: in particolare, si è avuta una rottura a taglio per fessurazione diagonale, con conseguente schiacciamento dello spigolo inferiore del pannello.

Nelle immagini successive è possibile osservare il quadro fessurativo a seguito della prova di precompressione e taglio.



Figura 7.7 Fessurazione diagonale e schiacciamento spigolo fronte PT1

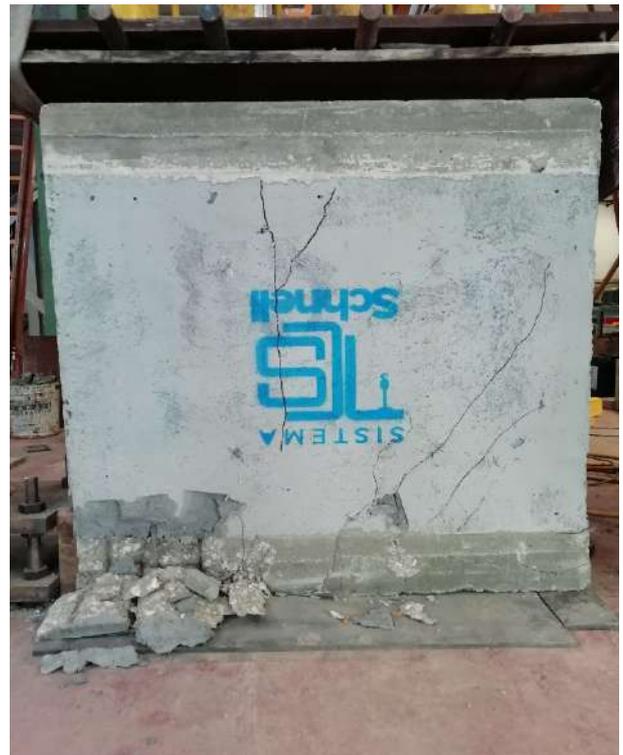


Figura 7.8 Fessurazione diagonale e schiacciamento spigolo fronte PT2



Figura 7.9 Fessurazione diagonale e schiacciamento spigolo fronte PT3

8. Prove di compressione centrata (pannelli 1100mm x 3000mm)

Sono state effettuate n.3 prove di compressione centrata su provini rettangolari di dimensioni $h=3000$ mm, $w=1100$ mm, armati con rete $\phi 5$ e di spessore complessivo pari a 240 mm. Alle estremità superiore ed inferiore sono stati realizzati due cordoli in c.a. di sezione pari a 240×115 mm, armati con $2+2\phi 12$ longitudinale e staffe $\phi 8/20$. Per ogni prova sono stati installati dei trasduttori di spostamento per la lettura delle deformazioni verticali e per gli spostamenti fuori dal piano, inoltre è stato collocato un trasduttore di spostamento in corrispondenza dello spessore del pannello, al fine di monitorare lo spanciamento del provino durante la prova di carico.

In *Figura 8.1* si può osservare il setup di prova, mentre a seguire viene raffigurata l'esatta disposizione della strumentazione.



Figura 8.1 Setup di prova – compressione centrata su provini 1100x3000 mm

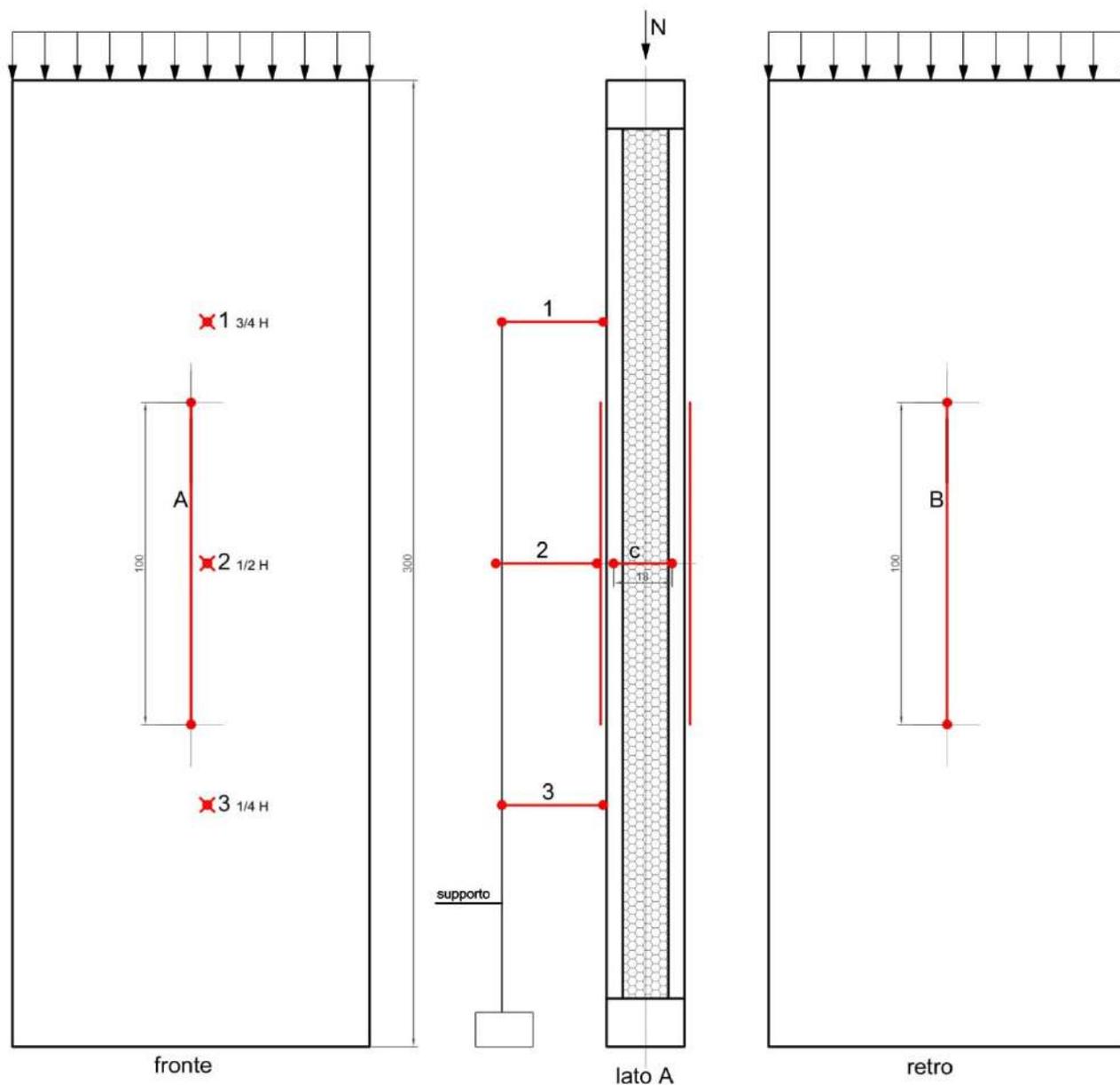


Figura 8.2 Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro, lato A

Ad ogni provino è stato associato un codice identificativo della prova eseguita:

- Cc 1: provino 1
- Cc 2: provino 2
- Cc 3: provino 3

Le prove sono state condotte con sforzo assiale crescente, applicando il carico mediante una piastra rigida in modo da distribuire gli sforzi uniformemente lungo il lato del provino.

I grafici elaborati nelle immagini successive, riportano l'andamento dei diagrammi Forza-Spostamento verticale acquisiti durante la prova.

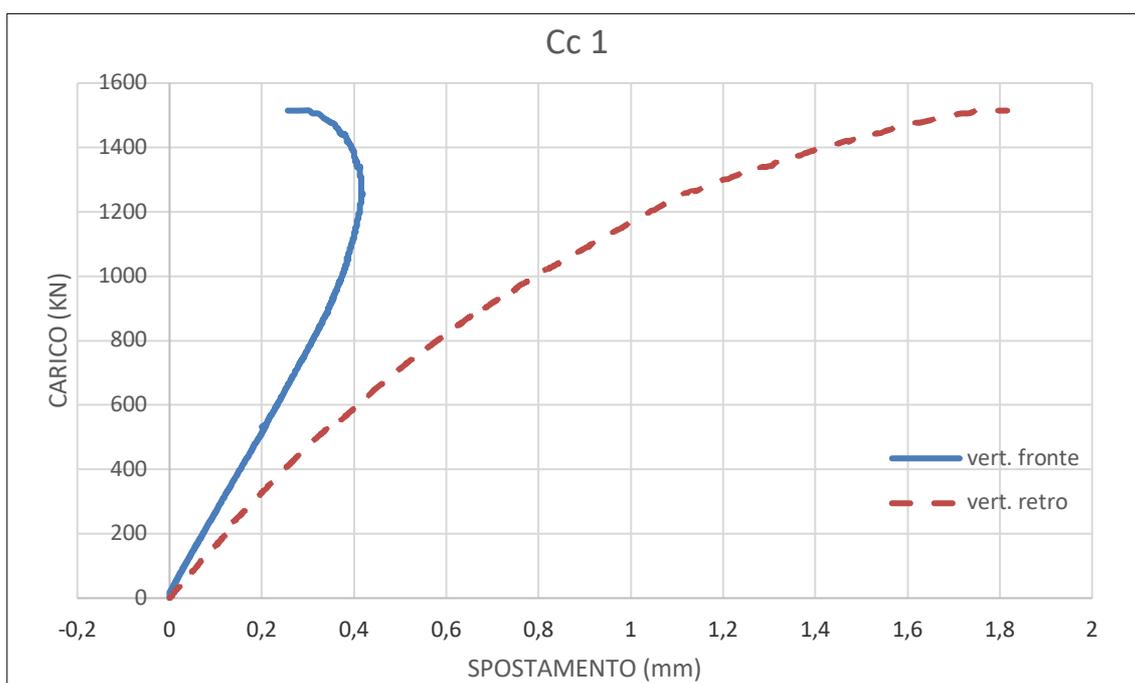


Figura 8.3 Diagramma Forza-Spostamento valori misurati sulle due facce

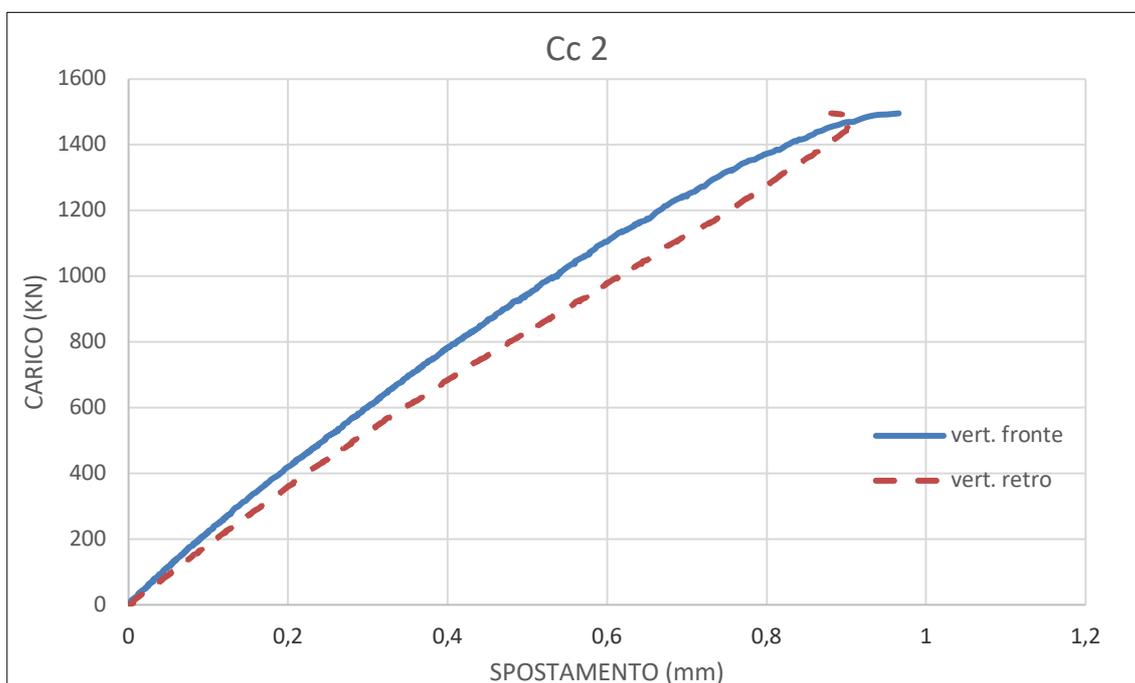


Figura 8.4 Diagramma Forza-Spostamento valori misurati sulle due facce

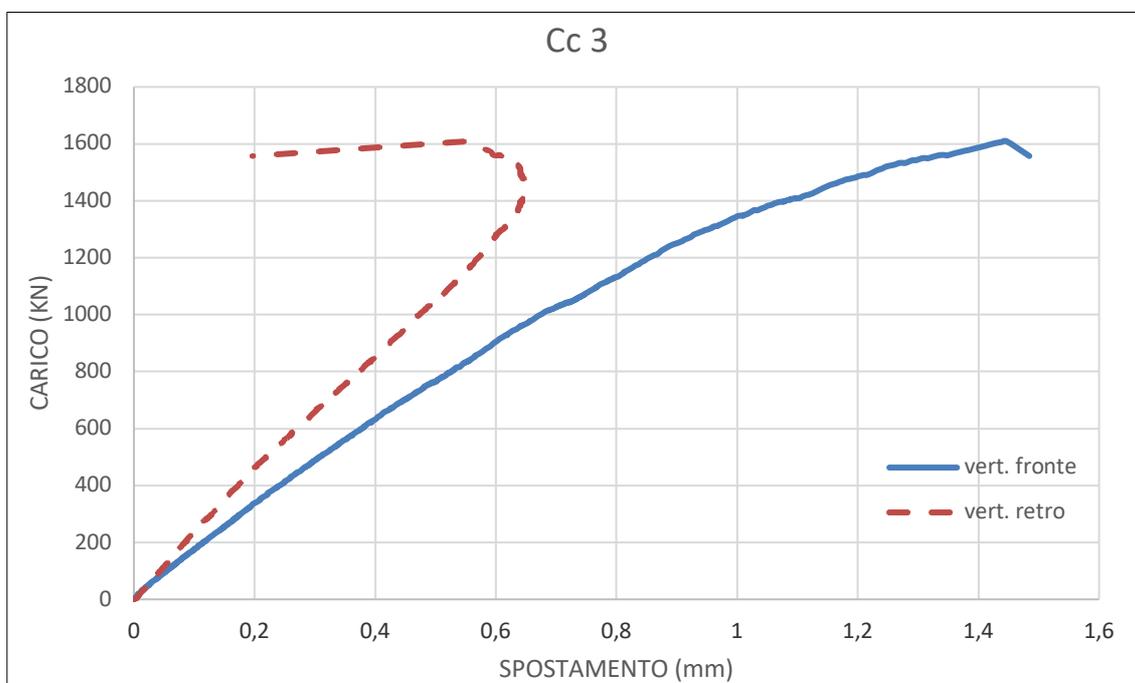


Figura 8.5 Diagramma Forza-Spostamento valori misurati sulle due facce

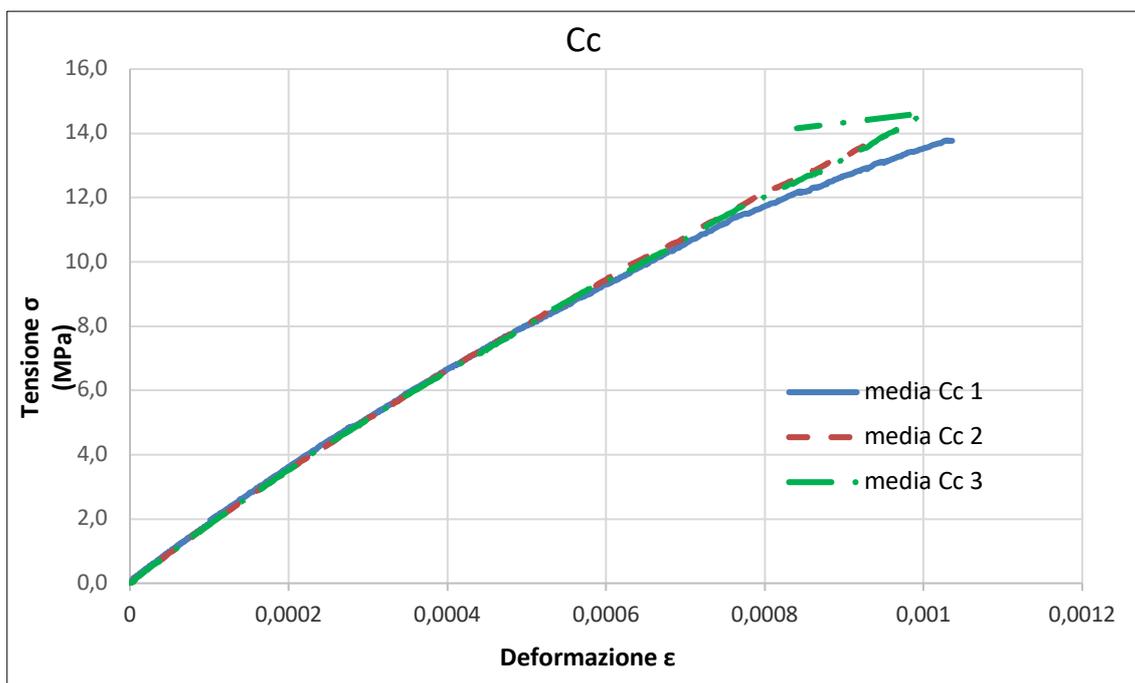


Figura 8.6 Diagramma $\sigma_c - \epsilon$ valori misurati sulle due facce

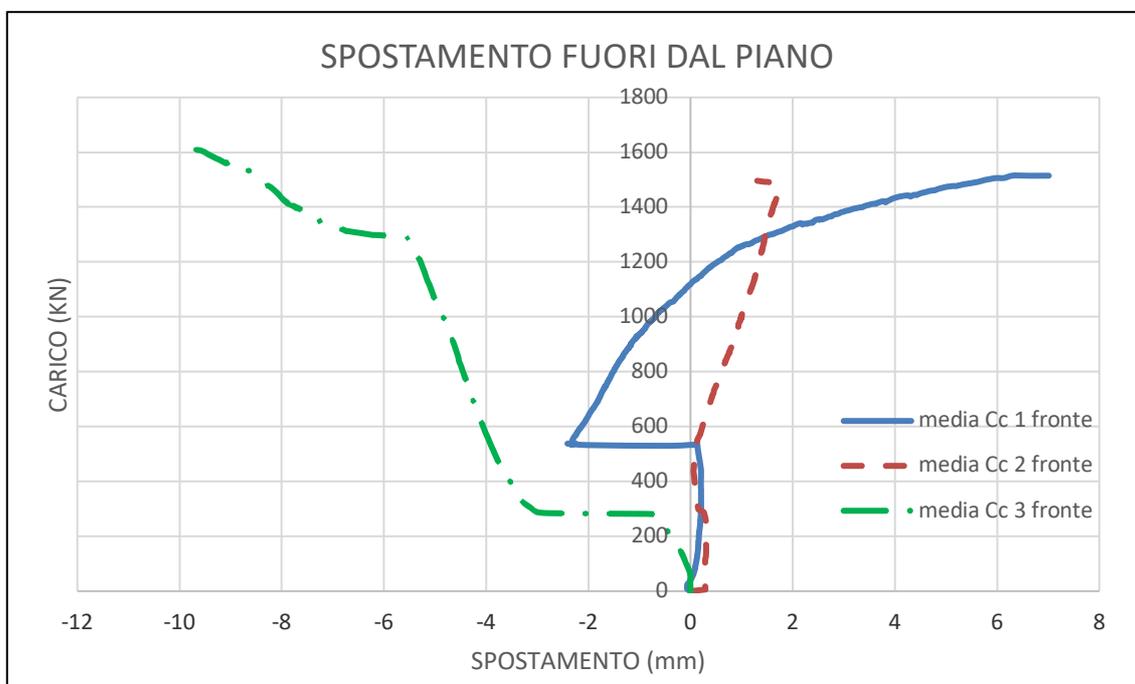


Figura 8.7 Spostamenti fuori dal piano misurati per il lato fronte

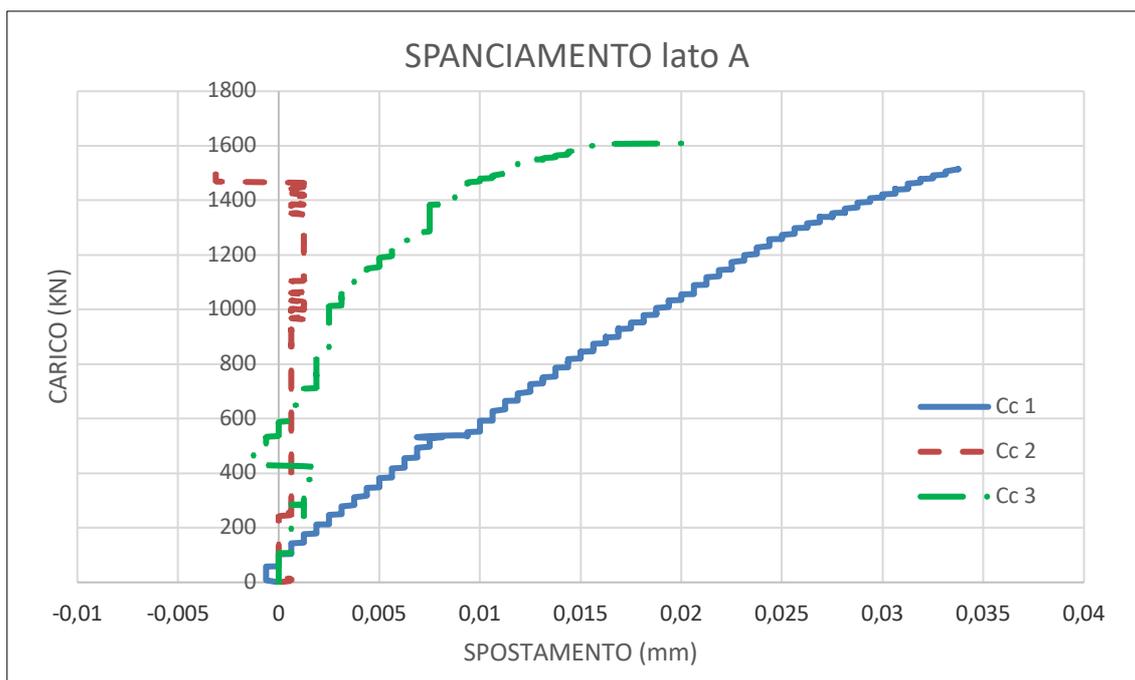


Figura 8.8 Spanciamento misurato per il lato A di ciascun provino

Come per le precedenti prove, vengono tabulati i dati principali misurati sui 3 provini, in termini di carico massimo raggiunto, tensione di compressione massima, deformazione verticale massima e modalità di rottura, oltre ai valori medi registrati.

Tab.8.1 Risultati principali delle prove di compressione centrata su provini rettangolari

Codice pannello	Carico max [kN]	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [-]	Modalità di rottura
Cc 1	1515,20	13,77	0,0018	Schiacciamento cordolo superiore
Cc 2	1495,95	13,60	0,0009	Inflessione fuori dal piano
Cc 3	1609,01	14,63	0,0015	Inflessione f.d.p. + schiacciamento cordolo inf.

Tab.8.2 Valori medi ottenuti dalle prove di compressione centrata su provini rettangolari

Valori medi prova Cc		
Carico max	σ_{max}	ϵ_{max}
[kN]	[MPa]	[-]
1540,05	14	0,0014

Da un'analisi dei risultati ottenuti dai test, si può notare come tutti e tre i provini raggiungano valori simili di carico massimo, con una media pari a 1540 kN, sviluppando buone capacità di resistenza. Inoltre, i pannelli di altezza pari a 3000 mm raggiungono un carico massimo di compressione di circa il 30% superiore rispetto ai pannelli di altezza pari a 1000 mm (vedi *Tabella 5.2*).

La rottura si è manifestata per instabilità fuori dal piano dei pannelli, soggetti ad una sollecitazione di pressoflessione una volta superato un certo livello critico del carico di compressione. Le linee di frattura orizzontali a flessione sono posizionate nella zona di mezzera, in cui si realizza l'inflessione massima. Inoltre, si evidenzia la presenza di schiacciamenti localizzati nei cordoli superiori o inferiori.

Di seguito alcune immagini delle rotture significative dei provini testati.

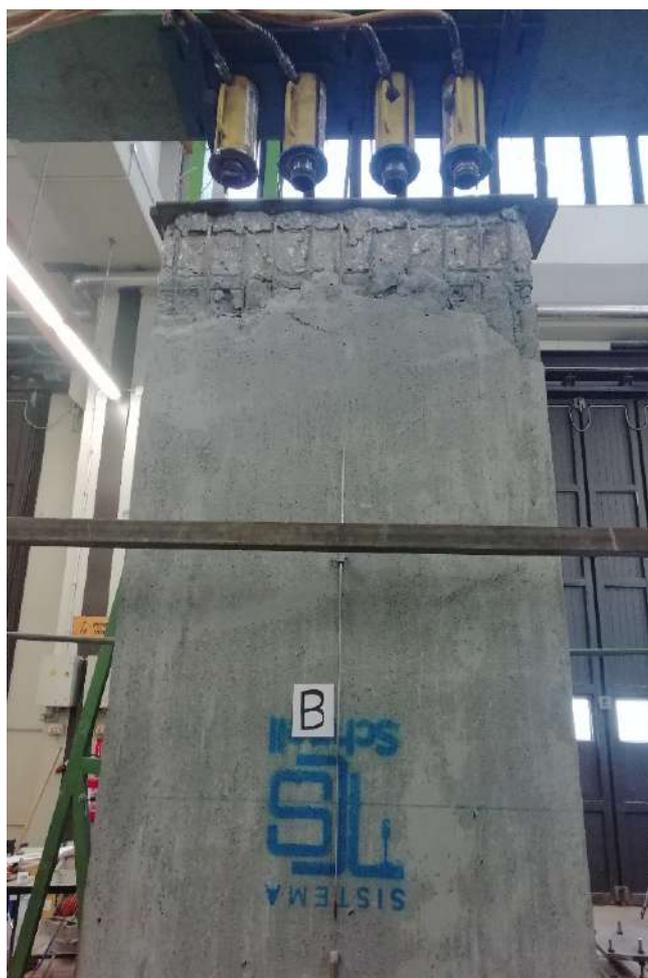


Figura 8.9 Schiacciamento cordolo superiore Cc 1



Figura 8.10 Inflessione fuori dal piano Cc 2



Figura 8.11 Inflessione fuori dal piano Cc 3

9. Prove di compressione eccentrica (pannelli 1100mm x 3000mm)

Sono state eseguite n.3 prove di compressione eccentrica su provini rettangolari di dimensioni $h=3000$ mm, $w=1100$ mm, armati con rete $\phi 5$ e di spessore complessivo pari a 240 mm. Alle estremità superiore ed inferiore sono stati realizzati due cordoli in c.a. di sezione pari a 240×115 mm, armati con $2+2\phi 12$ longitudinale e staffe $\phi 8/20$. Analogamente alla prova di compressione centrata, sono stati installati dei trasduttori di spostamento per la lettura delle deformazioni verticali e per gli spostamenti fuori dal piano, inoltre è stato collocato un trasduttore di spostamento in corrispondenza dello spessore del pannello, al fine di monitorare lo spanciamiento del provino durante la somministrazione del carico eccentrico.

Il carico è stato applicato mediante martinetti idraulici posti sulla sommità del provino. Al piede del pannello è stata invece posta una traversa rigida collegata ad un sistema a cerniera cilindrica orizzontale, al fine di permettere la rotazione del provino sottoposto a compressione eccentrica (*Figura 9.1*). La prova è stata condotta disponendo il carico con un'eccentricità pari ad $e=30$ mm.



Figura 9.1 Setup di prova – Predisposizione del provino sulla cerniera cilindrica

In *Figura 9.2* si riporta lo schema con cui è stata posizionata la strumentazione di prova.

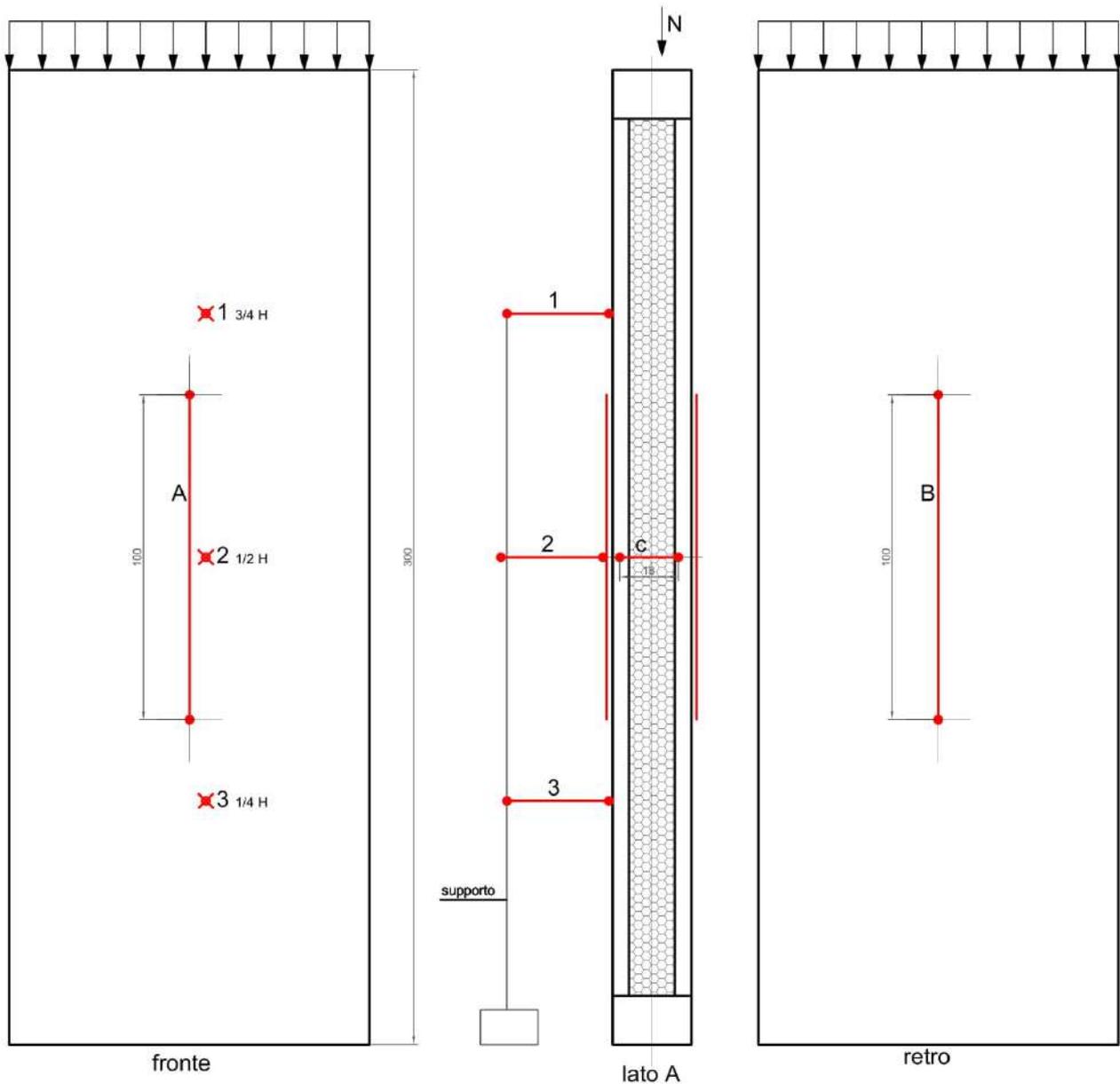


Figura 9.2 Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro, lato A

Ad ogni provino è stato associato un codice identificativo della prova eseguita:

- Ce 1: provino 1
- Ce 2: provino 2
- Ce 3: provino 3

Nei grafici che seguono, sono stati elaborati i dati ottenuti dalla prova di compressione eccentrica su provini 1100mmx3000mm. In linea con la precedente prova effettuata su pannelli quadrati 1100mmx1100mm, la tensione di compressione eccentrica σ_e è stata calcolata considerando il contributo del momento.

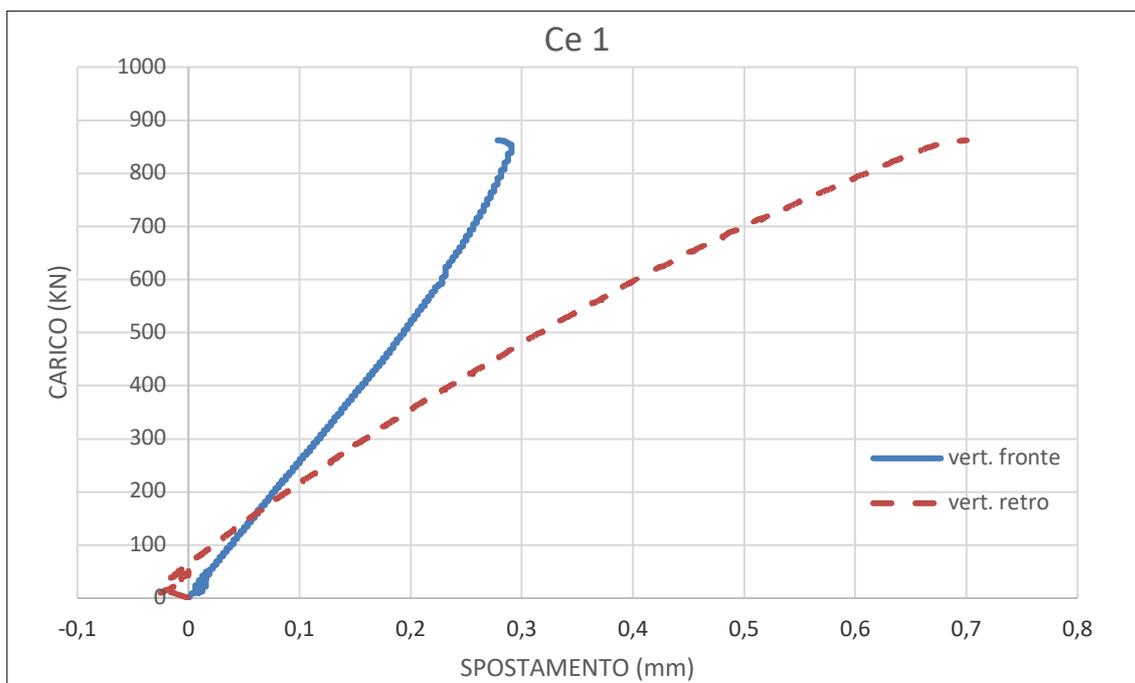


Figura 9.3 Diagramma Forza-Spostamento valori misurati sulle due facce

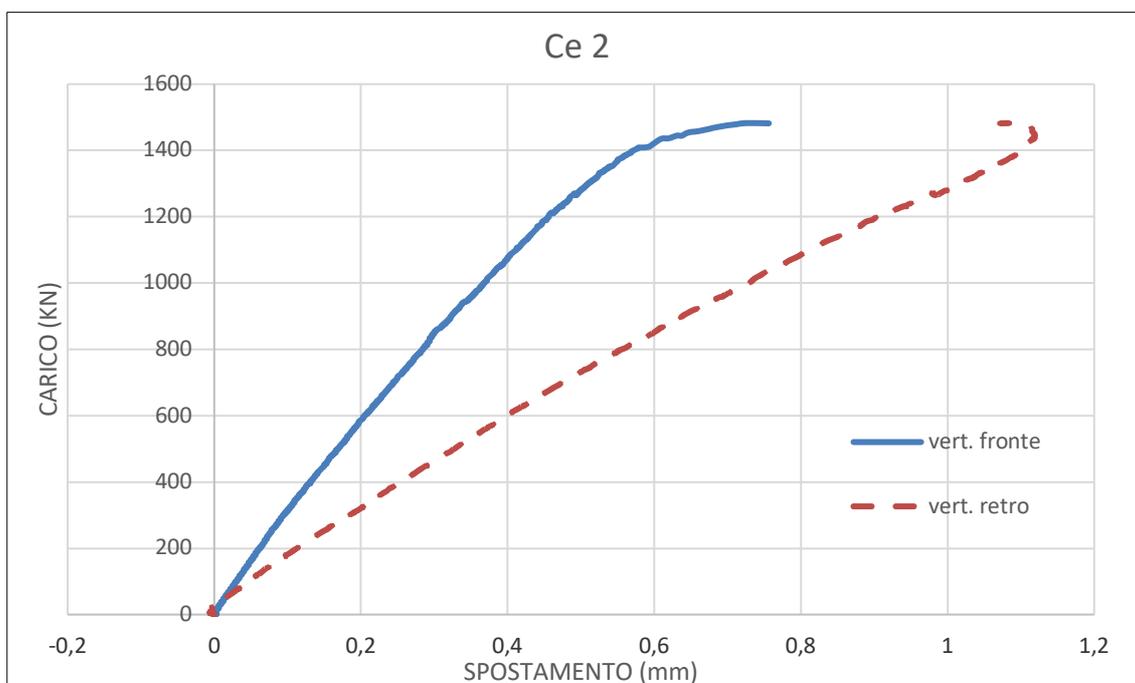


Figura 9.4 Diagramma Forza-Spostamento valori misurati sulle due facce

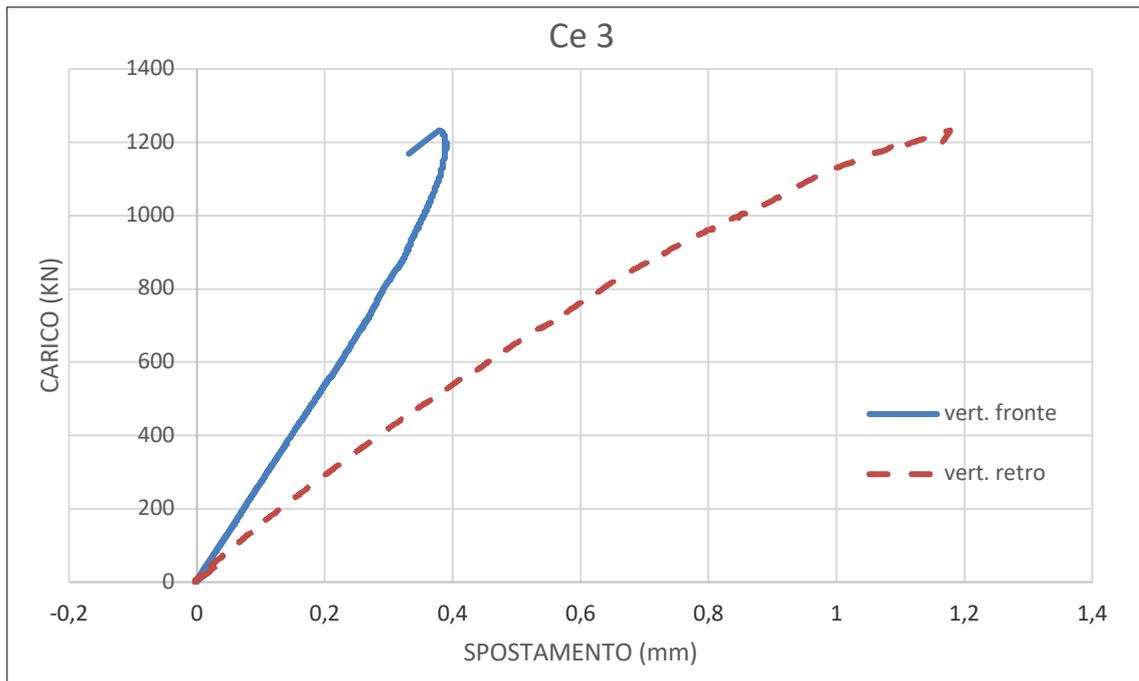


Figura 9.5 Diagramma Forza-Spostamento valori misurati sulle due facce

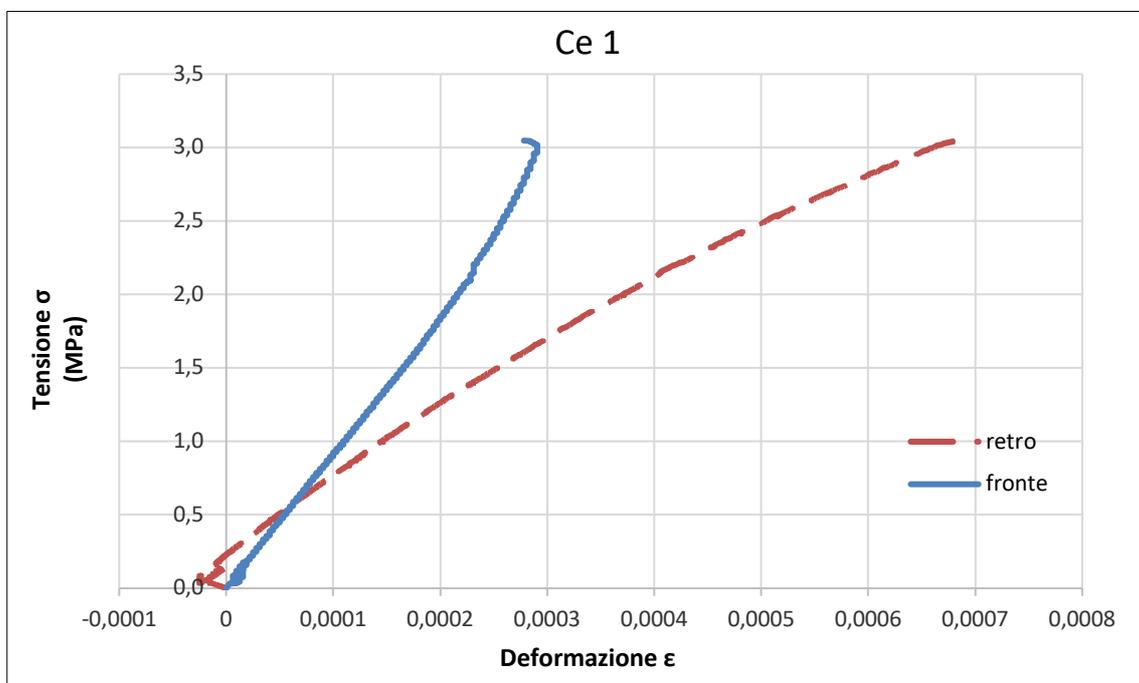


Figura 9.6 Diagramma $\sigma_e - \epsilon$ dei valori misurati sulle due facce

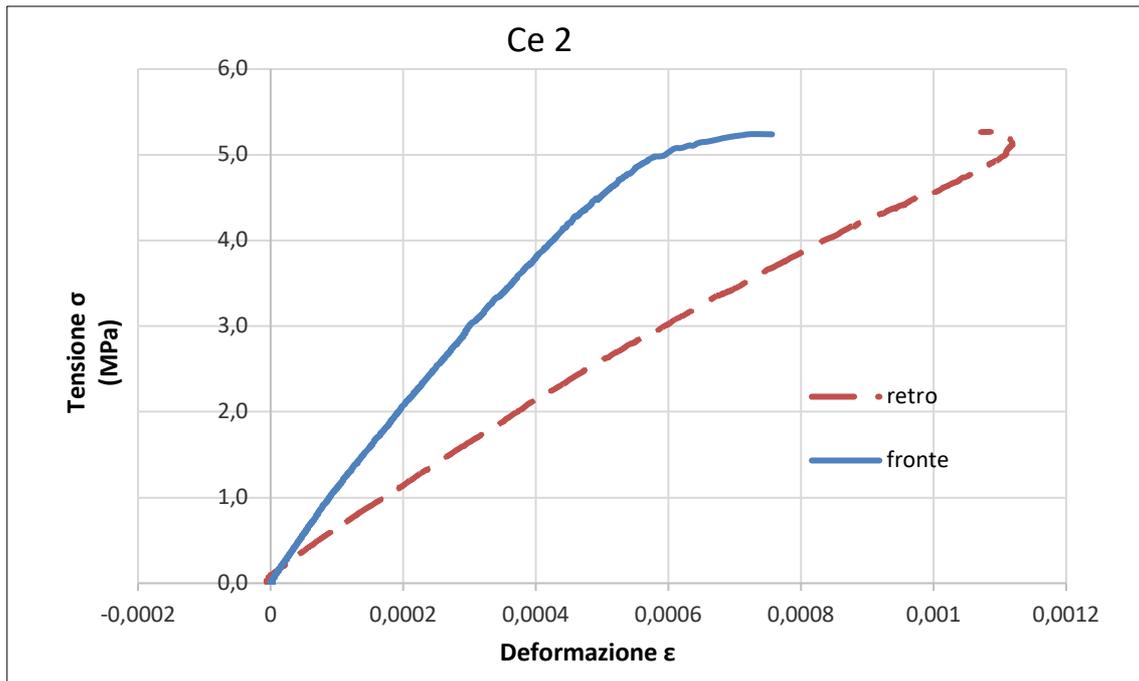


Figura 9.7 Diagramma $\sigma_e - \epsilon$ dei valori misurati sulle due facce

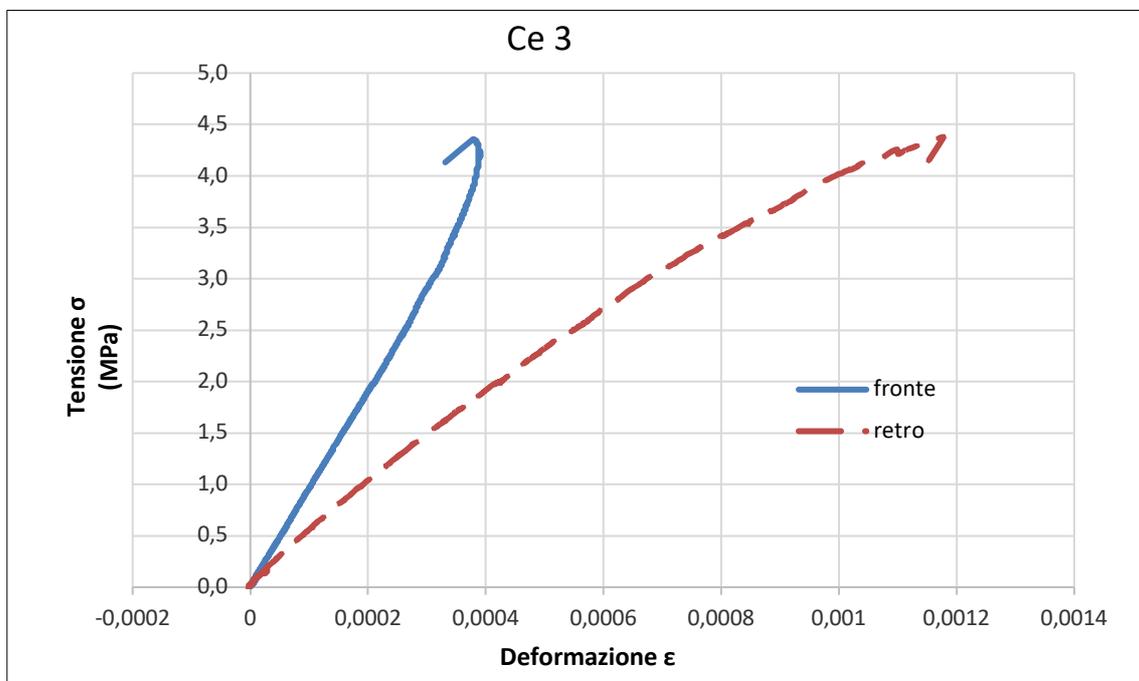


Figura 9.8 Diagramma $\sigma_e - \epsilon$ dei valori misurati sulle due facce

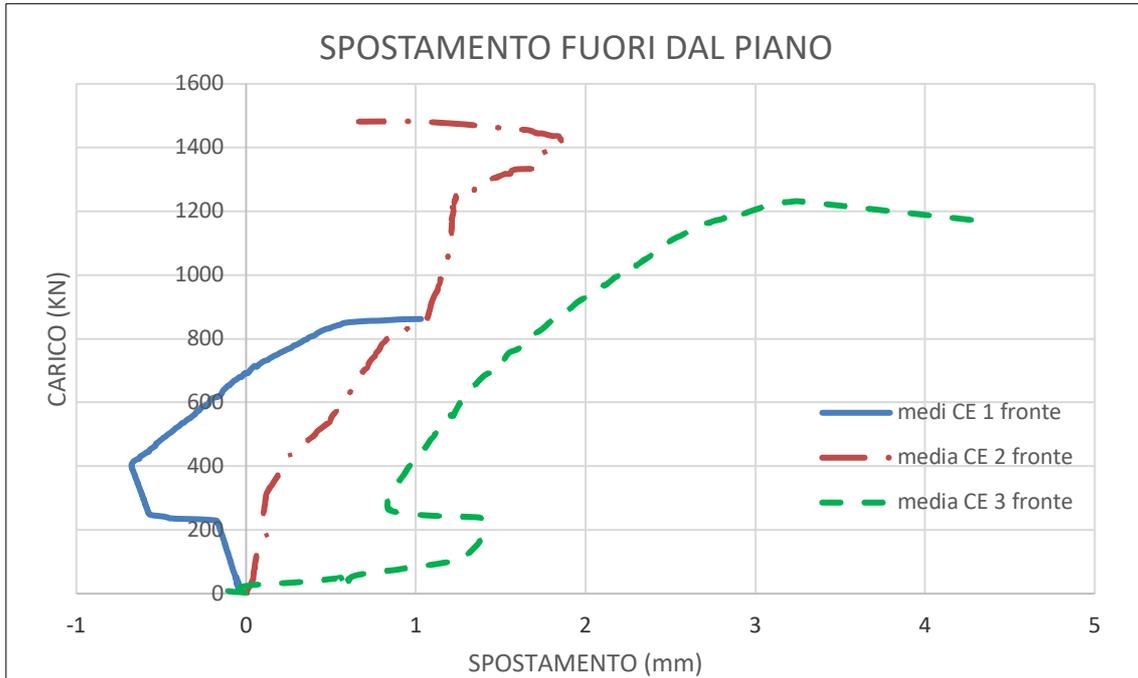


Figura 9.9 Spostamenti fuori dal piano misurati per il lato fronte

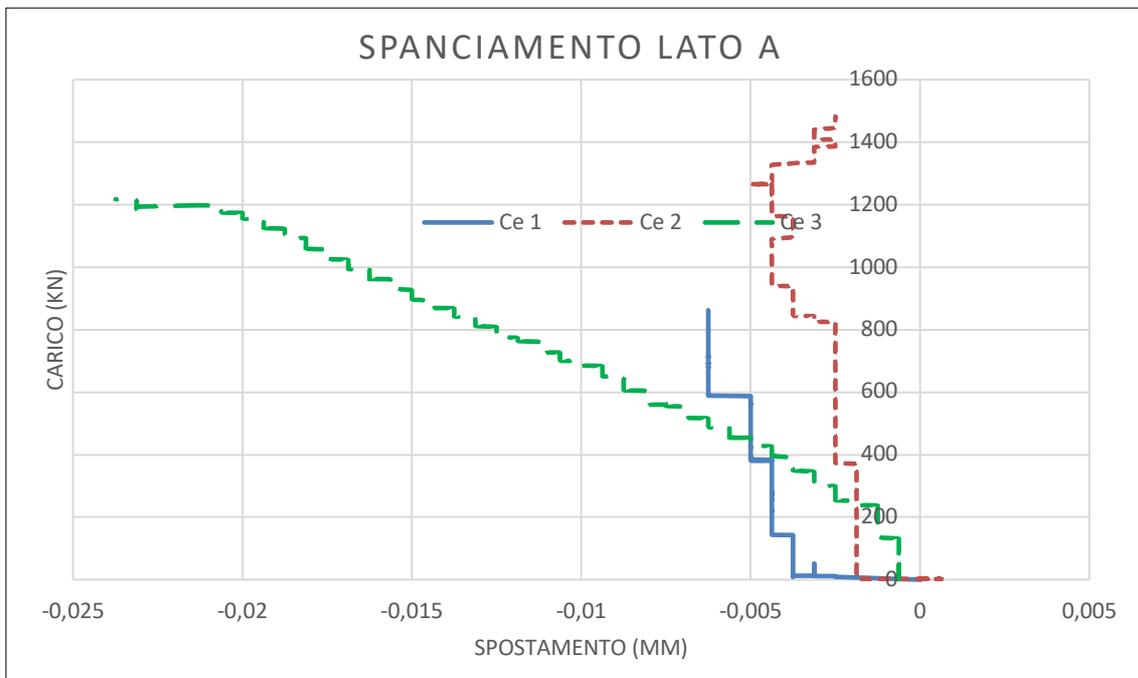


Figura 9.10 Spanciamento misurato per il lato A di ciascun provino

Nella *Tabella 9.1* vengono restituiti i dati principali misurati sui quattro provini, in termini di carico massimo raggiunto, tensione di compressione eccentrica massima, deformazione verticale massima e modalità di rottura, oltre ai valori medi ottenuti.

Tab.9.1 Risultati principali delle prove di compressione eccentrica su provini rettangolari

Codice pannello	Carico max [kN]	$\sigma_{e \max}$ [MPa]	ϵ_{\max} [-]	Modalità di rottura
Ce 1	862	3,06	0,001	Schiacciamento cordolo inferiore
Ce 2	1482	5,27	0,001	Schiacciamento cordolo superiore
Ce 3	1232	4,38	0,001	Schiacciamento cordolo superiore

Tab.9.3 Valori medi ottenuti dalle prove di compressione eccentrica su provini rettangolari

Valori medi prova Ce		
Carico max	$\sigma_{e \max}$	ϵ_{\max}
[kN]	[MPa]	[-]
1192	4,24	0,001

In riferimento ai grafici ottenuti dalle misurazioni per il provino Ce 1, si può notare come il pannello non abbia sviluppato completamente le proprie capacità deformative e di resistenza. Questo è da attribuirsi alla rottura del cordolo inferiore che non ha permesso di terminare la prova.

I rimanenti provini testati hanno invece prodotto discreti risultati in termini di resistenza al carico e deformazione. Non si sono registrati fenomeni apprezzabili di instabilità fuori dal piano ed il comportamento a pressoflessione è stato poco evidente. Questo è da imputare alla non eccessiva eccentricità del carico ed alla rottura localizzata dei cordoli per schiacciamento, che, in questo particolare tipo di prova, hanno rappresentato un elemento di debolezza.

In allegato alcune delle immagini più esplicative del manifestarsi del collasso per i provini sottoposti a carico eccentrico.



Figura 9.11 Schiacciamento cordolo inferiore Ce 1



Figura 9.12 Schiacciamento cordolo superiore Ce 2



Figura 9.13 Schiacciatura cordolo superiore Ce 3