

Prove sperimentali in situ su tipica muratura messinese rinforzata con CAM: arco in muratura a piena scala

Mauro Cilia¹, Ines Cipolla², Piero Colajanni³, Roberto Marnetto⁴, Antonio Recupero⁵, Nino Spinella⁶ ■



Nome Progetto:

Inserito nel contesto del Progetto "INnovazione del CAM Mediante Impiego di Nuove Opzioni di processo"

Tipo di progetto:

Prove sperimentali su struttura ad arco in muratura

Luogo:

Località Giampilieri (ME)

Organizzazioni coinvolte:

Università degli Studi di Messina

Imprese coinvolte:

CHIMETEC s.a.s. (Ragusa), ABI s.r.l. (Ragusa)

Periodo lavori:

Giugno 2013

1. Introduzione

Il presente lavoro illustra i risultati di una campagna sperimentale di prove *in situ* recentemente realizzata nella zona di Messina, in particolare il fine della sperimentazione è la valutazione del comportamento a taglio-compressione della tradizionale muratura messinese (nota in generale per le basse proprietà meccaniche dovute alle caratteristiche della pietra, alla cattiva qualità della malta ed alla mancanza di connessioni trasversali) rinforzata con il sistema CAM (Cucitura Attiva dei Manufatti).

Poiché l'elevato rischio sismico che caratterizza la zona dello Stretto amplifica l'esigenza di migliorare le prestazioni meccaniche e le connessioni trasversali della muratura, si verifica sperimentalmente tale soluzione, che, consentendo di realizzare un sistema di legature pre-tensionate tridimensionale, è in grado di compattare pietre e malta migliorando il comportamento globale della muratura. Il caso-studio è un arco in muratura a piena scala, che è stato isolato dalla restante parte di un antico edificio, al fine di poter eseguire i test. Dapprima, all'arco è

¹ Direttore Tecnico, Chimetec s.a.s., Ragusa - ✉ info@chimetec.com

² Dipendente, Chimetec s.a.s., Ragusa - ✉ info@chimetec.com

³ Professore Associato, Università di Messina, Dipartimento di Ingegneria Civile, Informatica, Edile, Ambientale e Matematica Applicata (DICIEAMA) - ✉ pcolajanni@unime.it

⁴ Responsabile Ricerca e Sviluppo, EdilCAM Sistemi S.r.l., Roma - ✉ r.marnetto@edilcamsistemi.com

⁵ Ricercatore, Università di Messina, Dipartimento di Ingegneria Civile, Informatica, Edile, Ambientale e Matematica Applicata (DICIEAMA) - ✉ antonino.recupero@unime.it

⁶ Assegnista di Ricerca, Università di Messina, Dipartimento di Ingegneria Civile, Informatica, Edile, Ambientale e Matematica Applicata (DICIEAMA) - ✉ nino.spinella@unime.it

stata applicata una spinta orizzontale fino alla comparsa della prima fessura, quindi è stato rinforzato e portato con spinta orizzontale sino a rottura. I risultati delle prove sperimentali eseguite hanno evidenziato i vantaggi nell'impiego del sistema CAM, in particolare nel fornire incrementi di rigidità, resistenza e duttilità.

2. Contesto e descrizione della campagna sperimentale

Il lavoro di sperimentazione descritto in questo contributo si inserisce nel contesto del progetto di ricerca "In.CAM.M.I.N.O. – INnovazione del CAM Mediante Impiego di Nuove Opzioni di processo", sviluppato dall'Università degli Studi di Messina con la collaborazione di CHIMETEC s.a.s. e ABI s.r.l. di Ragusa.

Le prove sono state realizzate in situ nelle zone alluvionate della località Giampilieri su edifici con tessiture tipiche (Figura 1). In particolare, le strutture oggetto di studio sono contestualizzate all'interno di un piano di esproprio e imminente demolizione necessario alla realizzazione di un canale fagatore che contribuisca alla messa in sicurezza del versante, il quale è stato interessato dalla forte alluvione del 2009 che ha causato innumerevoli danni a cose e persone.

L'oggetto di studio della campagna sperimentale è un portale ad arco a tutto sesto (Figura 2), con piedritti di altezza 2.40 m e freccia di 0.84 m, appartenente ad un edificio in muratura prospiciente piazza Pozzo, in località Giampilieri. La parete ad arco si estende per una lunghezza pari a $L = 4.23$ m, ha un'altezza totale $H = 4.55 + 1.25 = 5.75$ m, e spessore variabile $s = 0.74 \div 86$ m.

La tipologia muraria è disordinata, con ciottoli e pietre erratiche irregolari, la malta è povera e non sono presenti ricorsi. L'osservazione visiva ha permesso di assimilarla ad una 'muratura in pietrame disordinato'. (secondo NTC2008).

Le operazioni preliminari effettuate sull'arco per

la preparazione alle prove sperimentali sono:

1. scarificazione dell'intonaco esistente per l'individuazione visiva della tipologia muraria e dell'eventuale stato fessurativo (Figura 3);
2. demolizione del parapetto superiore;
3. taglio e profilatura del pannello d'arco (Figure 4 e 5);
4. posa in opera dell'intonaco pre-miscelato (Figura 6);
5. posizionamento di una zavorra di circa 30 kN (120 sacchi di 0.25 kN/cad) sulla sommità della parete ad arco (Figura 7).

Ultimate le fasi preparatorie, sono state eseguite le prove secondo il seguente cronoprogramma:

Data	Descrizione delle Operazioni
03/06/2013	Prova di martinetti piatti doppi su parte laterale all'arco
04/06/2013	Test n. 1: prova di spinta su arco nudo;
11/06/2013	Test n. 2: prova di spinta su arco rinforzato con martinetto di corsa 50 mm;
26/06/2013	Test n. 3: prova di spinta su arco rinforzato con martinetto di corsa 100 mm.

La prova è consistita nell'applicazione di cicli successivi di carico/scarico di una forza orizzontale ad una quota di circa 4 metri da terra, trasmessa mediante un martinetto oleodinamico (Figura 8). Gli spostamenti del provino sono stati costantemente monitorati mediante l'impiego di trasduttori posizionati in corrispondenza di una struttura metallica esterna, sganciata dalla parete, appositamente realizzata per materializzare i punti fissi. Più in dettaglio, sono stati monitorati punti della struttura che rivestivano particolare interesse, in modo da rilevare spostamenti relativi lungo la direzione di carico e fuori dal piano (Figure da 9 a 14).

Figura 1
Foto aerea della zona d'intervento.





Figura 2
Arco oggetto di studio: stato di fatto (a sinistra).



Figura 3
Scarificazione dell'intonaco (a destra).



Figura 4
Taglio Verticale.



Figura 5
Taglio Orizzontale.



Figura 6
Posa in opera dell'intonaco (a sinistra).



Figura 7
Posizionamento di 120
sacchi di cemento
(a destra).

Figura 8
Martinetto idraulico per la
spinta dell'arco non
rinforzato.



Figura 9
Posizionamento dei
trasduttori.

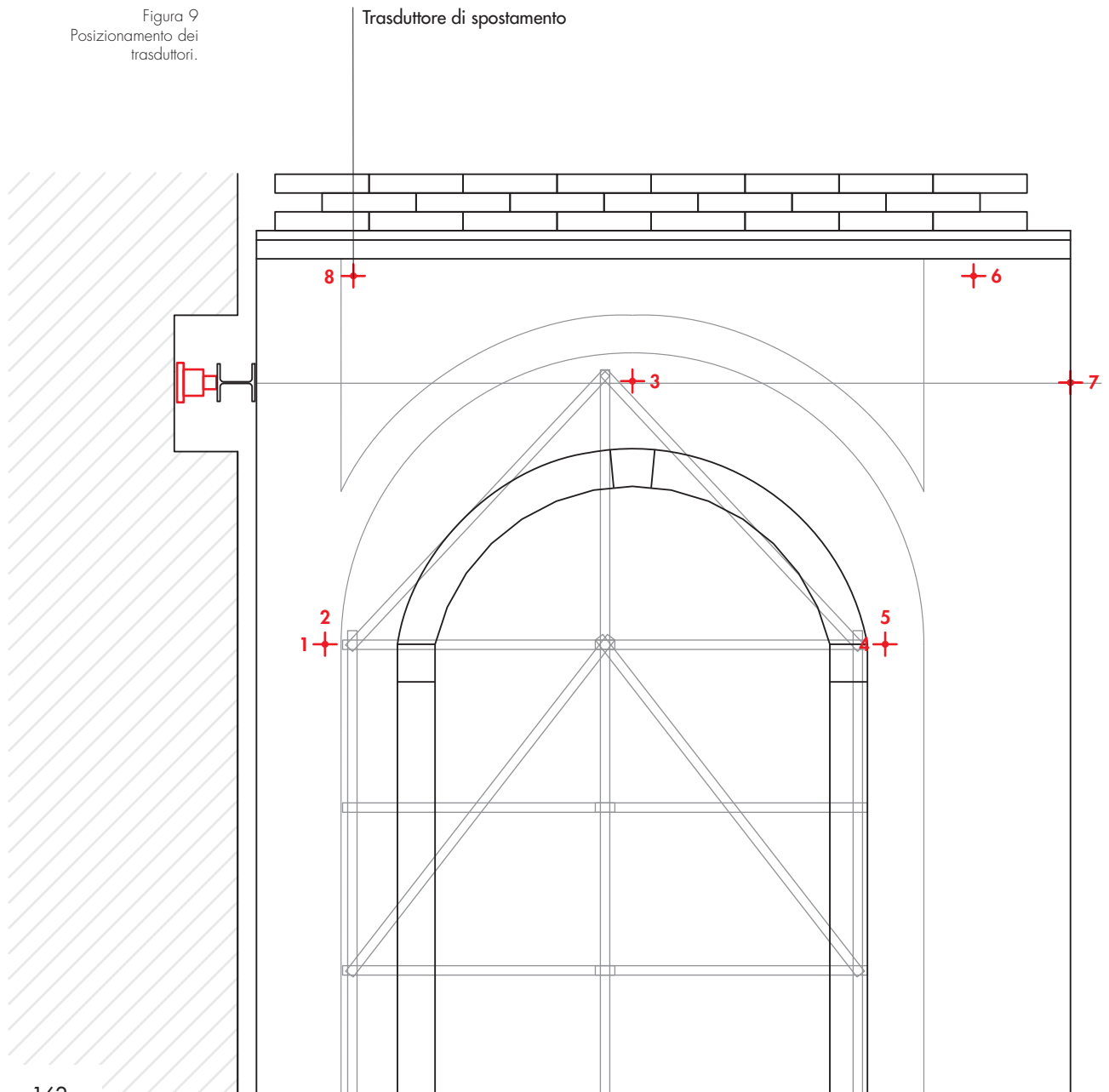




Figura 10
Posizionamento dei
traduttori n. 1 e 2 sul telaio
in acciaio.



Figura 11
Posizionamento del
traduttore n. 3.

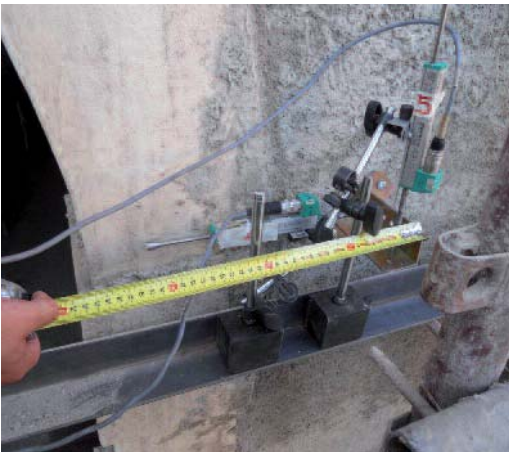


Figura 12
Posizionamento dei
traduttore n. 4, 5, 6.



Figura 13
Posizionamento dei
traduttore n. 7, 8.

Figura 14
Posizionamento dei traduttori a livello di solaio per la misura degli spostamenti fuori piano.



3. Risultati delle prove

3.1 Prove di caratterizzazione

Al fine di determinare le caratteristiche meccaniche del pannello in muratura, la parete ortogonale al pannello ad arco è stata sottoposta ad una prova di caratterizzazione mediante martinetti piatti doppi (Figura 15). Tale tecnica consiste nell'introdurre nella muratura due martinetti piatti paralleli orizzontali ad una distanza verticale compresa tra 40 e 50 cm in modo da localizzare un concio murario ed esercitare una sollecitazione di compressione monoassiale su di esso (nel caso specifico la pressione massima registrata è stata pari a 1.90 N/mm^2), rilevandone anche le deformazioni.

3.2 Prove di spinta laterale

Sono state eseguite tre prove di spinta laterale, i

cui primi dati estrapolati sia sull'arco non rinforzato, sia su quello rinforzato sono riassunti in Tabella 1. Di seguito si riportano maggiori dettagli delle singole prove

3.2.1 Prova su arco nudo

La prova di spinta laterale dell'arco nudo è stata eseguita in controllo di spostamento impiegando un martinetto idraulico della capacità di 200 kN e corsa utile di $\pm 50 \text{ mm}$, collocato in una nicchia precedentemente realizzata sulla parete dell'edificio adiacente a quota 4 m da terra. In particolare sono stati eseguiti 6 cicli di carico e scarico, incrementato la forza applicata di 10 kN ad ogni ciclo successivo.

Nonostante si sia previsto di fermare questa prova al manifestarsi dell'apertura della prima lesione al rene di sinistra, in modo da non danneggiare

Figura 15
Prova sulla muratura mediante martinetti piatti doppi: a) schema; b) esecuzione sul provino in oggetto di studio.

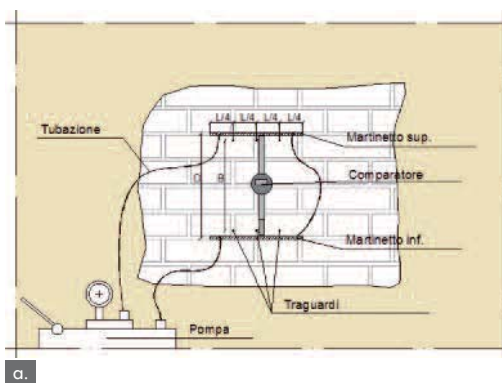


Tabella 1 - Primi risultati delle prove di spinta laterale

N. Prova	Carico Verticale (kN)	Forza Orizzontale Massima (kN)	Spostamento Massimo (mm)
1 Arco non rinforzato	30	50.6	4.42
2 Arco rinforzato	30	111.1	70.02
3 Arco rinforzato	30	96.7	255.98

eccessivamente l'arco, si ritiene sia stato comunque raggiunto il livello di resistenza massima del provino, dato che il grafico forza-spostamento è caratterizzato da un tratto orizzontale per un valore di forza pari a circa 50 kN (Figura 16). In Tabella 2 sono riportati i valori numerici di forze e spostamenti significativi monitorati, in particolare le ultime tre colonne rappresentano lo spostamento iniziale, quello finale a forza nulla e la differenza, cioè lo spostamento residuo a fine ciclo.

Nelle Figure da 17 a 19 è evidenziato il danneggiamento riscontrato sul provino; si possono

notare la lesione alle reni che ha determinato la condizione di fine prova ed altre due lesioni, rispettivamente nell'elemento superiore ed in corrispondenza dell'applicazione del carico, per punzonamento.

3.2.2 Prova su arco rinforzato - $D_{max} = 70 \text{ mm}$

Dopo la prima prova, l'arco è stato rinforzato mediante una maglia con n. 2 nastri verticali e n. 2 nastri orizzontali in acciaio inox AISI 304 (Figura 20). In particolare, i nastri verticali sono stati inghisati in fondazione con malta cementizia premiscelata espansiva ad elevata fluidità

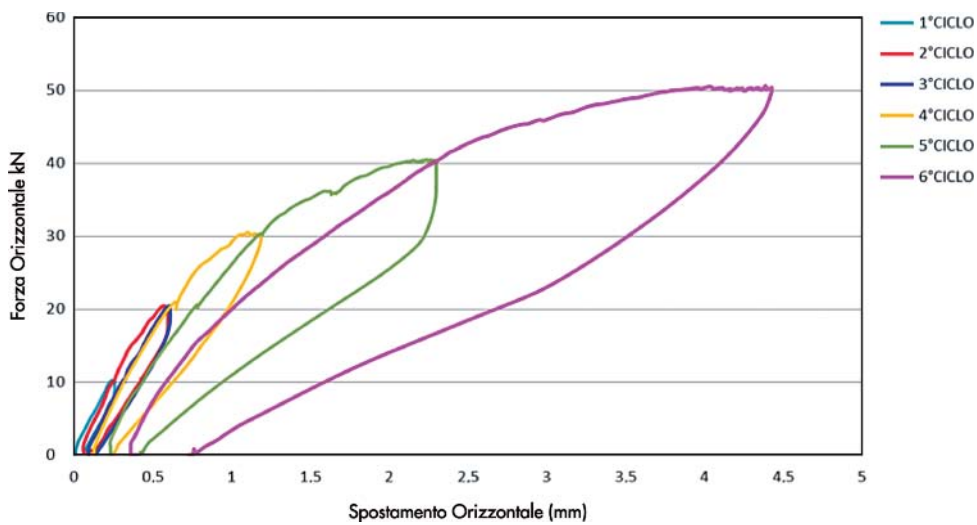


Figura 16
Prova su arco nudo: cicli monotoni di carico e scarico forza-spostamento.

Tabella 2 - Prova su arco nudo: valori di forza e spostamento monitorati

(Ciclo) _{n-esimo}	Azione Orizzontale	Spostamento		(Ciclo) _n
	(kN)	$s_{i,n}$ (mm)	$s_{f,n}$ (mm)	$s_{f,n} - s_{i,n}$ (mm)
1°	10.24	0.000	0.062	0.062
2°	20.43	0.062	0.091	0.029
3°	20.45	0.091	0.127	0.036
4°	30.52	0.127	0.231	0.104
5°	40.50	0.231	0.401	0.170
6°	50.63	0.401	0.727	0.326



Figura 17
Prova 1 su arco nudo: lesioni ai reni.

Figura 18
Prova 1 su arco nudo:
lesione nella zona di carico
per punzonamento.

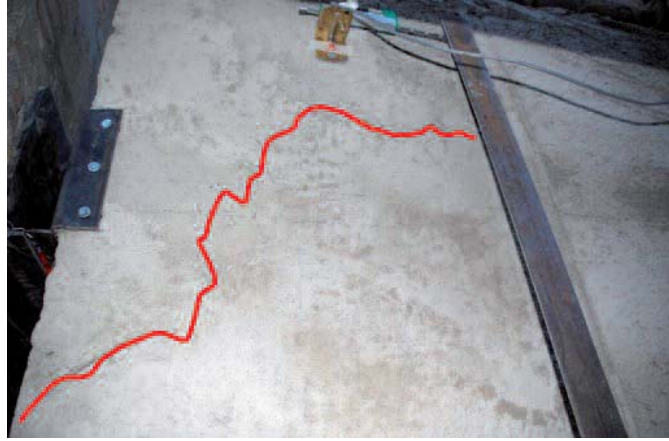
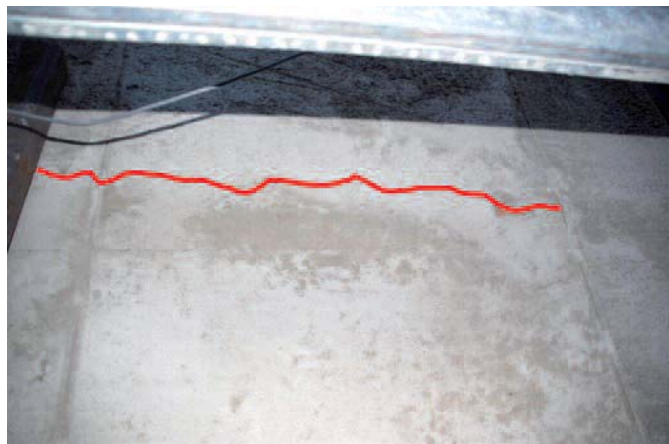


Figura 19
Prova 1 su arco nudo:
lesione dell'elemento
superiore.



ed appositi angolari metallici sono stati disposti agli spigoli dei piedritti, opportunamente inghiassati in fondazione (Figura 21).

In questa seconda prova sono stati effettuati 13 cicli monotoni di carico-scarico, anche in questo caso con incremento di carico pari a 10 kN, spingendosi fino a circa 70 mm di spostamento (Figura 22 e Tabella 3).

Le principali evidenze riscontrate hanno riguardato il carico massimo raggiunto, pari a circa 110 kN (più del doppio della prova su arco nudo), ed il fatto che si sia attivato un meccanismo duttile, caratterizzato dalla formazione delle cerniere plastiche nei 4 punti previsti.

In generale si è riscontrato un notevole incremento del numero delle fessure aperte. Oltre alla riapertura della prima fessura in corrispondenza della sezione alle reni dell'arco, infatti, si sono registrate fessure di notevole ampiezza sia sul piedritto in trazione, sia in corrispondenza della zona di applicazione del carico con una evidente diffusione dello stesso lungo la fascia di piano. È stato comunque osservato che il sistema CAM ha permesso di contenere l'apertura delle fessure, consentendo a buona parte di esse di richiudersi in fase di scarico.

Più in dettaglio, il danneggiamenti osservabile si è manifestato secondo la seguente cronologia (Figure da 23 a 26):

- lesione n.1: riapertura della lesione al rene di sinistra (1° cerniera);
- lesione n. 2: rotazione del piedritto di sinistra (2° cerniera);
- lesione n. 3: apertura di una lesione orizzontale a quota martinetto di spinta che interessa l'intero sviluppo del pannello;
- lesione n. 4: lesione della sezione in chiave (3° cerniera);
- lesione n. 5: rotazione del piedritto di destra (4° cerniera).

Pur presentando un importante quadro fessurativo, la struttura non è stata portata al collasso effettivo. Nella configurazione di massimo carico e massima deformazione, lo scarico ha restituito una quota di ritorno elastico.

3.2.3 Prova su arco rinforzato - $D_{max} = 250$ mm

L'ultima prova pianificata sull'arco rinforzato ha avuto l'obiettivo di portare a collasso il pannello in modo da valutarne lo spostamento ultimo e la resistenza.



Figura 20
Arco rinforzato con CAM:
a) vista esterna;
b) vista interna.



Figura 21
Inghisaggio dei nastri in acciaio e degli angolari alla fondazione.

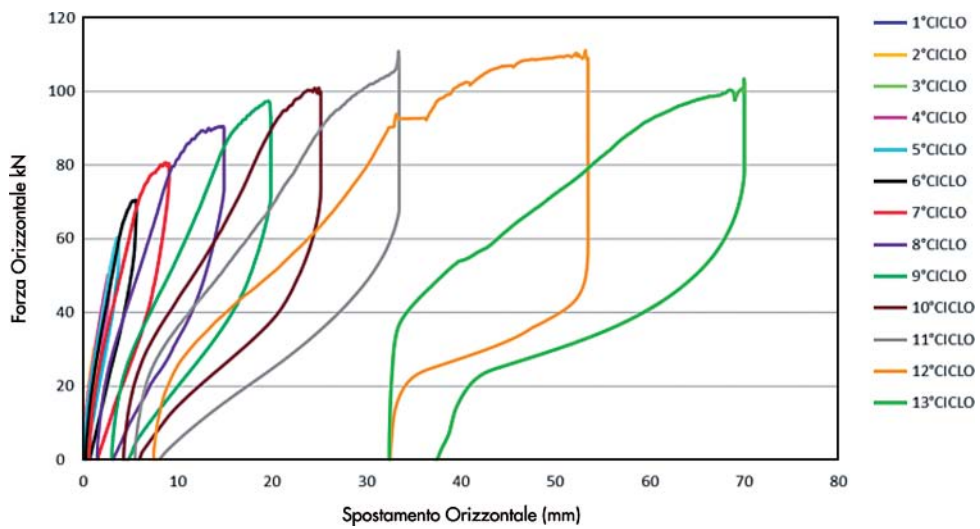


Figura 22
Prova su arco rinforzato:
cicli monotoni di carico e scarico forza-spostamento.

Tabella 3 - Prova su arco rinforzato: valori di forza e spostamento monitorati

(Ciclo) _{n-esimo}	Azione Orizzontale	Spostamento		(Ciclo) _n
	(kN)	s _{i,n} (mm)	s _{f,n} (mm)	s _{f,n} - s _{i,n} (mm)
1°	20.25	0.000	0.019	0.019
2°	30.29	0.019	0.055	0.036
3°	40.49	0.055	0.060	0.005
4°	50.35	0.060	0.141	0.081
5°	60.33	0.141	0.274	0.133
6°	70.51	0.274	0.653	0.379
7°	80.64	0.653	1.524	0.871
8°	90.62	1.524	3.196	1.672
9°	97.41	3.196	4.742	1.546
10°	100.94	4.742	5.941	1.199
11°	110.92	5.941	8.039	2.098
12°	111.13	8.039	32.506	24.468
13°	103.39	32.506	37.359	4.852

Figura 23
Prova su arco rinforzato:
lesione n. 1, sezione ai reni.



Figura 24
Prova su arco rinforzato:
lesione n. 2, piedritto di
sinistra.



Figura 25
Prova su arco rinforzato:
lesione n. 3 e 4, slittamento
dell'elemento superiore e
fessurazione sezione in
chiave (a sinistra).



Figura 26
Prova su arco rinforzato:
lesione n. 5, Piedritto di
destra (a destra).

L'arco, già danneggiato durante la prova precedente, è stato in grado di sostenere un'azione orizzontale di circa **96.7 kN** ed uno spostamento orizzontale in piano pari a 25 cm (Figura 27 e Tabella 4), dopodiché la prova (Figure da

28, 29, 31 e 32a) è stata sospesa per un eccessivo fuori piombo del pannello (Figure 30, 32b e 33). A conclusione dell'ultimo ciclo di scarico, la deformazione residua era particolarmente evidente (circa 140 mm).

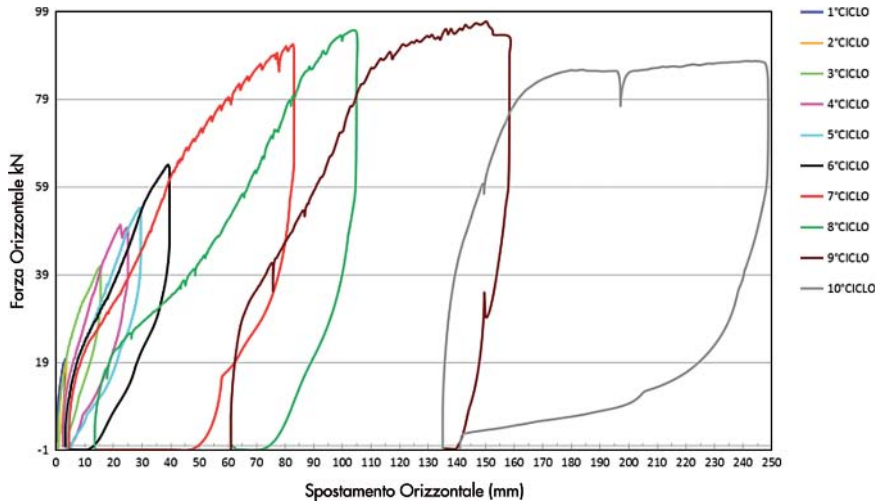


Figura 27
Prova su arco rinforzato danneggiato: cicli monotoni di carico e scarico forza-spostamento.

Tabella 4 - Prova su arco rinforzato danneggiato: valori di forza e spostamento monitorati

(Ciclo) _{n-esimo}	Azione Orizzontale	Spostamento		(Ciclo) _n
	(kN)	$s_{i,n}$ (mm)	$s_{f,n}$ (mm)	$s_{f,n} - s_{i,n}$ (mm)
1°	19.84	0.007	0.698	0.691
2°	19.90	0.698	0.683	-0.015
3°	40.98	0.683	2.406	1.723
4°	50.44	2.406	3.723	1.317
5°	54.35	3.723	3.286	-0.438
6°	64.14	3.286	10.229	6.943
7°	91.58	10.229	13.909	3.680
8°	94.28	13.909	61.029	47.120
9°	96.77	61.029	135.256	74.227
10°	87.76	135.256	140.988	5.731



Figura 28
Prova su arco rinforzato danneggiato: danneggiamento durante l'ultimo ciclo di carico.

Figura 29
Prova su arco rinforzato
danneggiato: apertura
lesione nella sezione delle
reni (a sinistra).



Figura 30
Prova su arco rinforzato
danneggiato: fuori piombo
(a destra).



Figura 31
Prova su arco rinforzato
danneggiato: rotazione del
pedritto di sinistra.



Figura 32
Prova su arco rinforzato
danneggiato: rotazione del
pedritto di destra
a) nel piano;
b) fuori piano (a destra).





Figura 33
Trasduttore di spostamento in testa al pannello, pre e durante le prove. Oltre a rilevare uno spostamento nel piano dell'arco, si evidenzia un notevole fuori piombo.

4. Discussione dei risultati

La sperimentazione condotta sull'arco in muratura ha avuto l'obiettivo di valutare l'efficacia del sistema CAM come tecnica di miglioramento sismico.

I risultati ottenuti hanno messo in evidenza come il sistema di rinforzo contribuisca nell'incrementare la resistenza del pannello e, una volta raggiunta la resistenza massima, nell'assicurare una notevole capacità in spostamento e dissipativa, se rapportata alla risposta dell'arco nudo. In particolare, nei successivi grafici (da 34 a 36) e in Tabella 5, si osserva, **a parità di spinta**

orizzontale (~ 50 kN), che:

- Lo spostamento dell'arco nudo è **1.62** volte superiore a quella dell'arco rinforzato;
- Lo spostamento residuo dell'arco nudo è **5.15** volte superiore quello dell'arco rinforzato;
- La prova 1, al 6° ciclo di carico, si trova chiaramente in campo plastico: si ha un decadimento progressivo della rigidezza tagliante;
- La prova 2, a parità di carico, è ancora in campo elastico. L'arco mantiene un comportamento elastico fino all'ottavo ciclo, con un livello di carico pari a 90.6 kN.
- La massima resistenza dell'arco rinforzato è

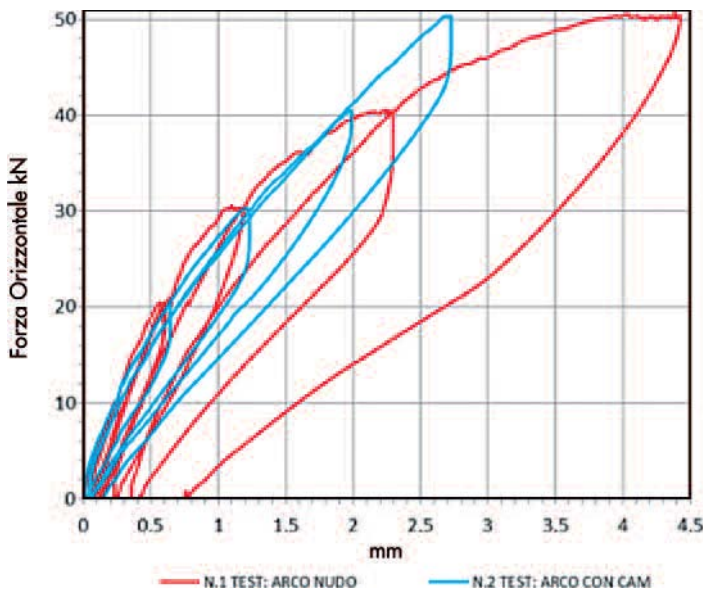


Figura 34
Confronto, a parità di forza (circa 50 kN) fra la risposta dell'arco nudo e di quello rinforzato.

pari al 120% in più di quella fornita dal pannello nudo (Tabella 5).

- Nonostante sotto l'effetto di tale carico si sia riscontrato un notevole incremento del numero delle fessure aperte, si è tuttavia osservato che il sistema CAM, anche durante le fasi di carico ciclico, abbia permesso sia di contenere l'apertura delle fessure, sia di consentire che buona parte di esse si richiudesse nelle fasi di scarico.

Nelle Figure 35 e 36 sono riportate le curve di capacità ottenute dalle tre prove effettuate. Ricordando che la terza prova ha riguardato un pannello già danneggiato, si osserva dai primi cicli di carico un evidente degrado della rigidità rispetto alla prova 2. In particolare nella prova 3 il pannello mantiene la rigidità che lo stesso aveva raggiunto al termine di quella precedente ed il livello di carico massimo è di poco inferiore ($96.77 \text{ kN} < 103.39 \text{ kN}$).

Tabella 5 - Confronto fra la risposta dell'arco nudo (prova 1, ciclo 6) e quella dell'arco rinforzato (prova 2, ciclo 4)

ID Prova	Ciclo di carico	Azione orizzontale al ciclo considerato (kN)	Spostamento massimo (mm)	Spostamento residuo (mm)	Massima azione orizzontale (kN)	Incremento di max azione orizzontale (%)
1 Arco nudo	6°	50.6	4.42	0.727	50.6	-
2 Arco rinforzato	4°	50.35	2.72	0.141	111.1	120%

Figura 35
Confronto fra le risposte forza-spostamento delle tre prove.

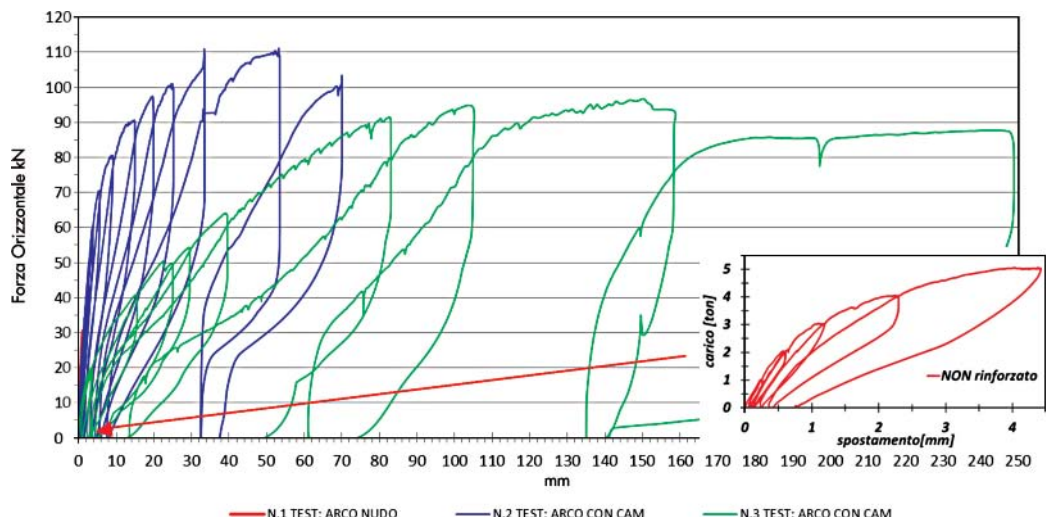
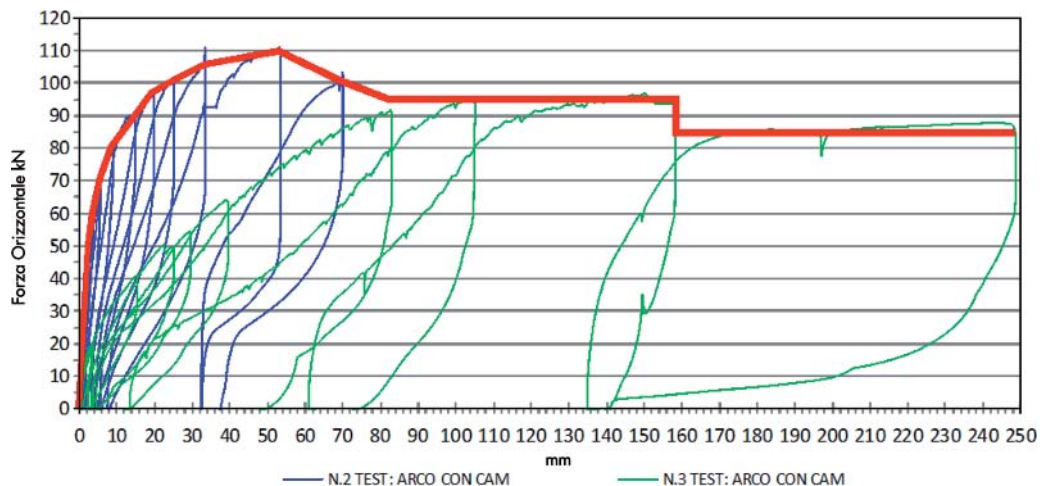


Figura 36
Involuppo della curva forza-spostamento delle due prove con sistema di rinforzo.



Appendice - Caratteristiche dei materiali di rinforzo

Per il sistema di rinforzo CAM sono stati adottati due tipologie di nastri:

- ACCIAIO TYPE 340	
- Sezione resistente:	19 x 1.0 mm ²
- Valore caratteristico della resistenza a rottura:	$f_{tk} \geq 540$ MPa
- Valore caratteristico della resistenza a snervamento:	$f_{yk} \geq 220$ MPa

Per gli inghisaggi dei nastri in fondazione si è utilizzata la malta cementizia premiscelata espansiva EMACO S55, avente le seguenti caratteristiche:

- Caratteristiche espansive in fase plastica:	> 0.3%
- Caratteristiche espansive contrastata a 24 ore:	> 0.03%
- Adesione al calcestruzzo:	> 6 MPa
- Resistenza allo sfilamento delle barre d'acciaio:	> 30 MPa

L'intonaco premiscelato è una malta bastarda per intonaco grezzo, per interno ed esterno, da applicare a mano. Dalla scheda tecnica del prodotto si evince:

- Massa volumetrica apparente della polvere:	1450 kg/m ³
- Massa volumetrica prodotto indurito:	1930 kg/m ³
- Acqua di impasto:	17%
- Granulometria:	< 2.0 mm
- Resistenza a compressione:	5.0 MPa
- Aderenza al supporto:	0.60 MPa