

Software per il calcolo strutturale: riflessioni, ricerche, confronti.

ing. Adriano Castagnone responsabile scientifico S.T.A. DATA srl

ing. Giuseppe Nitti PhD, Politecnico di Torino

Negli ultimi anni il calcolo delle strutture esistenti è diventato uno dei temi più importanti in articoli e pubblicazioni, se non il più importante.

È già stato scritto molto, ma, a vedere l'interesse dei progettisti, forse non ancora abbastanza, soprattutto su temi che non hanno soluzioni definitive e convincenti, temi che ancora oggi sono problemi aperti come il software per il calcolo delle strutture esistenti.

Di questo vorremmo parlare.

A cosa serve il software non ci sono dubbi, quale sia invece la sua vera natura, è materia poco chiara.

È un prodotto?

No, il prodotto non è il software, è la conoscenza contenuta nel software.

Possiamo considerare lo sviluppo del software come una trascrizione della conoscenza nella forma eseguibile. Questo è il codice.

Tuttavia, la scrittura del codice è solo una piccola parte dell'attività di sviluppo del software e sta diventando sempre più piccola, soprattutto su materie così specialistiche e sempre più complesse come il calcolo strutturale.

Possiamo quindi affermare che se abbiamo già la conoscenza, trascriverla non richiede molto sforzo. Il vero lavoro quindi non è scrivere il software, è l'acquisizione della conoscenza contenuta nel software.

L'attività si trasforma quindi rapidamente in una ricerca della conoscenza corretta.

Si potrebbe dire la stessa cosa per i libri: anche i libri sono un mezzo per trasmettere la conoscenza, ma è trasmessa in modo inerte.

La specificità del software è che la conoscenza contenuta è attiva.

Conoscenza resa attiva, in grado di produrre risultati.

Conoscenza resa operativa.

La trasformazione da conoscenza inerte a conoscenza attiva è lo specifico del software (e dei suoi problemi).

L'acquisizione della conoscenza è quindi "la" questione principale.

La tecnologia informatica offre strumenti efficaci ed efficienti per la scrittura del codice, ma la valutazione della conoscenza contenuta nel codice è difficilmente automatizzabile.

Per questo è ancora necessario procedere ad analisi parallele, confrontandosi con software di comprovata validità.

1. Confronto con test di validazione accademici

In questa sessione faremo riferimento a quanto diffuso nella pubblicazione:

Uso dei software di calcolo nella verifica sismica degli edifici in muratura v1.0

Validazione/confronto strumenti software per l'applicazione dei metodi di verifica da norma

Progetto ReLUIS (accordo quadro con il Dipartimento della Protezione Civile 2019-2021)

Questo documento illustra i risultati delle attività svolte in sinergia da varie Unità di Ricerca, esperte di modellazione e analisi della risposta del costruito in muratura, coinvolte nei progetti promossi dal Consorzio Interuniversitario ReLUIS (Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica) e finanziati dal Dipartimento di Protezione Civile (Accordo Quadro DPC-ReLUIS 2014-2018 e 2019-2021). L'attività di ricerca è stata avviata a partire dal 2014 e ha come oggetto l'analisi di strutture benchmark per la valutazione dell'affidabilità di codici di calcolo mirati all'analisi sismica delle costruzioni esistenti in muratura.

Le Unità di Ricerca coinvolte sono state:

- **UniGE** (Università di Genova) – Responsabile Scientifico: Prof.sa S. Cattari, Collaboratori: S. Degli Abbati, D. Ottonelli;
- **UniPV** (Università di Pavia) – Responsabile Scientifico: Prof. G. Magenes, Collaboratori: C.F. Manzini, P. Morandi;
- **UniCH** (Università di Chieti-Pescara) – Responsabile Scientifico: Prof. G. Camata; Collaboratori: Prof. E. Spacone, C. Marano;
- **UniCT-a** (Università di Catania) – Responsabile Scientifico: Prof. I. Calì; Collaboratori: B. Pantò, F. Canizzaro, G. Occhipinti;
- **UniNA-d** (Università di Napoli) – Responsabile Scientifico: Prof. B. Calderoni; Collaboratori: A.E. Cordasco;
- **UniBO** (Università di Bologna) – Responsabile Scientifico: Prof. S. de Miranda; Collaboratori: G. Castellazzi, A.M. D'Altri;
- **IUAV** (Università di Venezia) – Responsabile Scientifico: Prof. A. Saetta; Collaboratori: L. Berto, A. Doria, D. Talledo

Prendendo quindi spunto dai risultati ottenuti da ReLUIS si riportano alcune analisi effettuate sul software 3Muri e il relativo confronto con i risultati ottenuti.

1.1. Struttura benchmark n° 2 – Trilite

“Struttura benchmark n° 2 – Trilite” è uno degli esempi di validazione contenuti nel Documento ReLUIS.

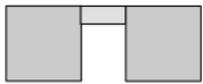
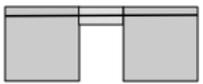
Il documento citato contiene tutte le informazioni per riprodurre i modelli mediante il software 3Muri Ver.13.2.

Questo esempio è costituito dal calcolo di una parete singola modellata con 3 ipotesi differenti.

I pannelli murari verticali, dello spessore di 0.50m, sono in muratura di pietra soggetti ad un carico in sommità pari a 160 kN.

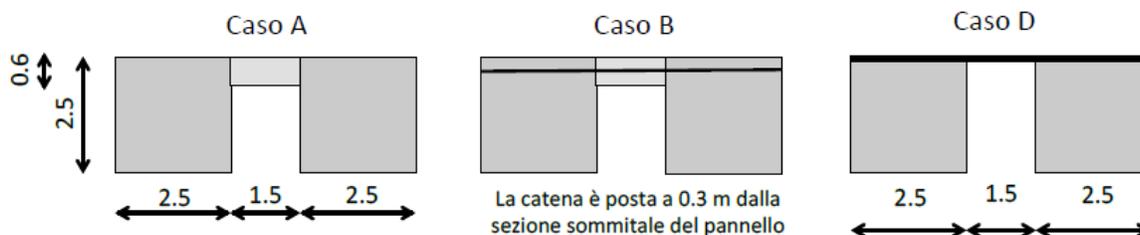
Il trilito è analizzato al variare di diverse configurazioni relative al grado di accoppiamento fornito dall'elemento di collegamento tra i due pannelli verticali che alternativamente è costituito da:

- Caso A): l'apertura è di geometria prefissata e la fascia è in assenza di elemento resistente a trazione accoppiato;
- Caso B): l'apertura è di geometria prefissata e la fascia è accoppiata ad una catena;
- Caso D): l'apertura è a tutta altezza ed è presente una trave di accoppiamento dei maschi (infinitamente rigida sia flessionalmente che assialmente).

Struttura benchmark	Varianti analizzate	Finalità
<p style="text-align: center;">Trilito</p>  <p style="text-align: right;">Caso A)</p>  <p style="text-align: right;">Caso B)</p>  <p style="text-align: right;">Caso D)</p> <p><i>si veda la Scheda benchmark 2</i></p>	<p>Al variare di diverse configurazioni dell'elemento di collegamento tra i due maschi murari e della geometria dell'apertura</p>	<p>Maggiore padronanza sul ruolo: dello sforzo normale e della sua variazione nella determinazione della resistenza di pannelli murari (in particolare maschi); dell'interazione tra pannelli murari di tipo maschio e fascia; del ruolo di elementi di collegamento tra maschi murari</p>
	<p>Caso A) l'apertura è di geometria prefissata e la fascia è in assenza di elemento resistente a trazione accoppiato</p>	
	<p>Caso B) l'apertura è di geometria prefissata e la fascia è accoppiata ad una catena</p>	
	<p>Caso D): l'apertura è a tutta altezza ed è presente una trave di accoppiamento dei maschi (infinitamente rigida sia flessionalmente che assialmente)</p>	

[da Documento ReLUI v1.0, Tabella 1, pag. 9]

Nella seguente tabella sono riportate le caratteristiche geometriche del trilito.



[Da Documento ReLUI v1.0, SCHEDE BENCHMARK n° 2]

Per il caso B, si assuma che la catena abbia un diametro $\phi 20$ con pretiro di 100N, e sia realizzata in acciaio con classe di resistenza s235 e un valore di FC pari a 1.2 come per la muratura.

Per il caso D, l'elemento di accoppiamento è simulato da una trave infinitamente rigida sia flessionalmente che assialmente, tale da riprodurre idealmente lo schema statico di telaio shear-type.

I parametri meccanici della muratura sono invece riportati nella seguente tabella.

Tipologia di muratura: pietra a spacco con buona tessitura $E = 1740$ [MPa] ; $G = 580$ [MPa]; $w = 21$ kN/m ³ Moduli sono da intendersi rappresentativi di una condizione elastica iniziale. Stato fessurato: da ottenersi applicando un fattore riduttivo dei moduli pari a 0.5 $\tau_0 = 0.065$ [MPa]; $f_m = 3.2$ [MPa]; $FC = 1.2$ Criteri di resistenza da adottare per l'interpretazione della risposta dei pannelli: taglio per fessurazione diagonale; pressoflessione

[Da Documento ReLUIS v1.0, SCHEDA BENCHMARK n° 2]

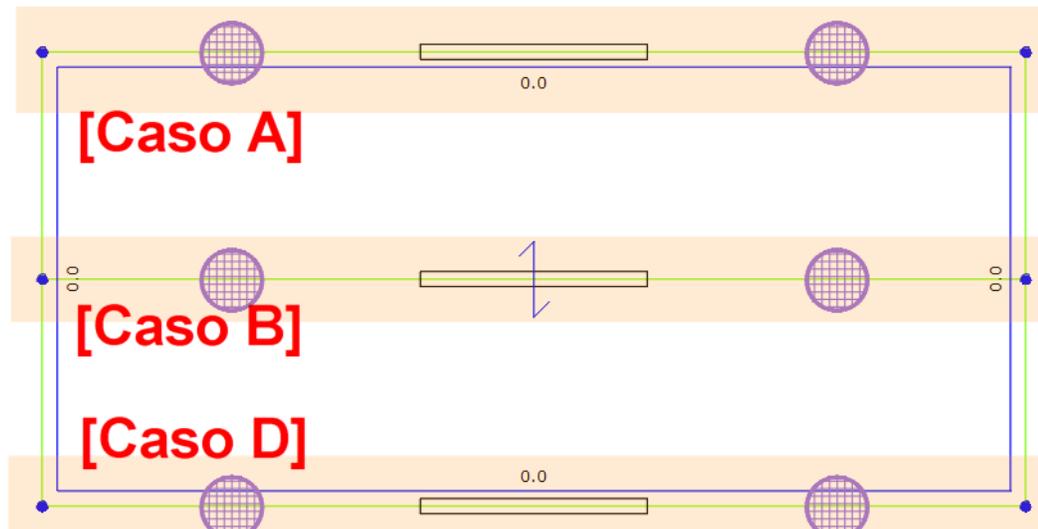
Infine, il testo del benchmark fornisce le seguenti indicazioni:

CONDIZIONI DI CARICO e TIPO DI ANALISI SUGGERITE
$P = 160$ [kN] applicato in sommità a ciascuno dei due maschi Analisi in controllo di spostamento: $u_{max} = 0.025$ m
OUTPUT SUGGERITI
a) curva pushover di parete (taglio di base- spostamento medio di sommità) b) curva taglio-spostamento (o drift) di elemento (i due maschi e la fascia) c) indicazione del meccanismo di collasso attivato in ciascun elemento d) variazione dello sforzo normale e del momento flettente nei due maschi e nella fascia

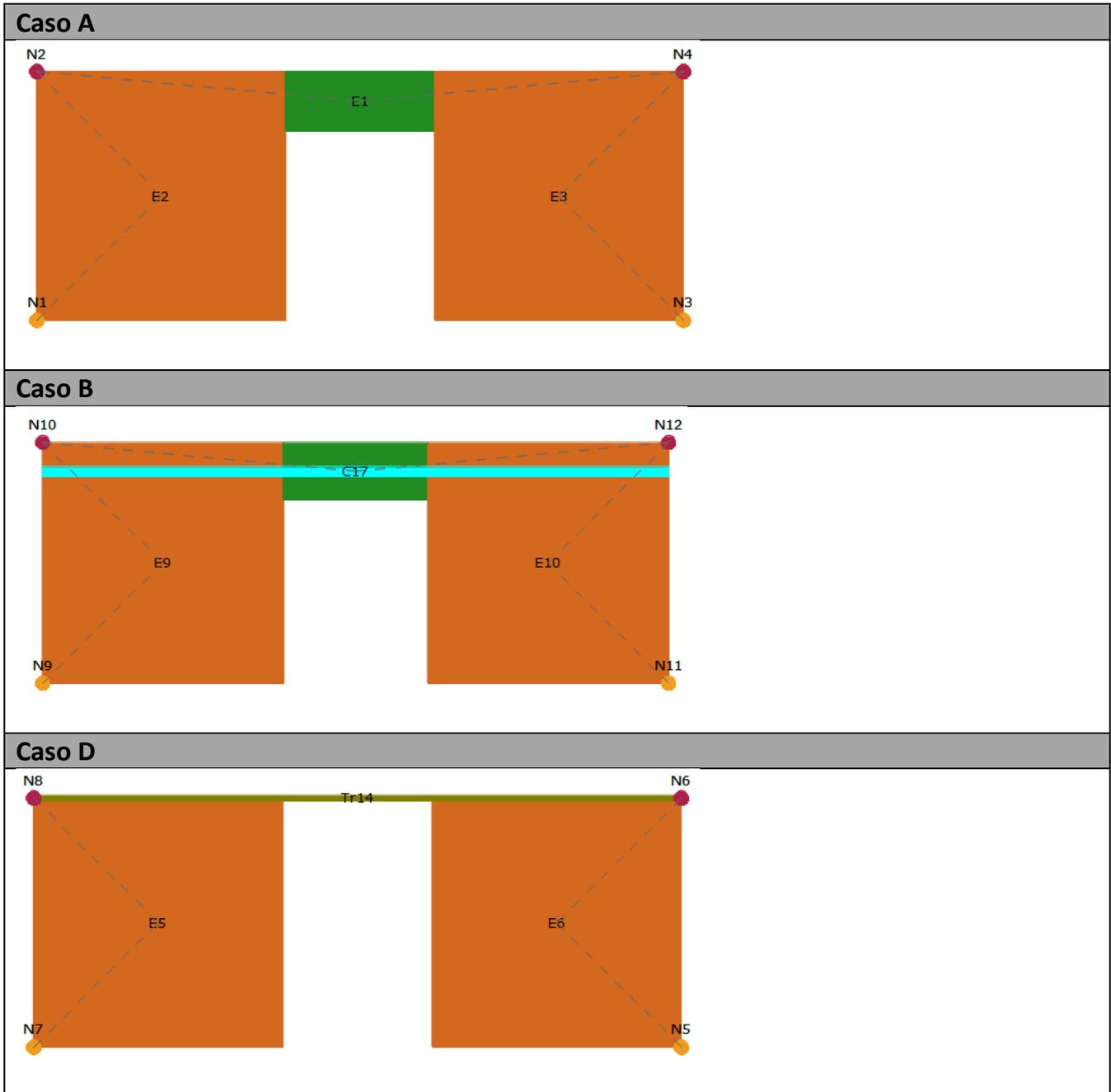
[Da Documento ReLUIS v1.0, SCHEDA BENCHMARK n° 2]

Coerentemente con le linee guida illustrate nel benchmark, le soglie di drift ultimo sono state assunte pari a 0.6% nel caso della modalità di danno per pressoflessione ed a 0.4% nel caso della modalità di danno a taglio (sia essa conseguenza di una modalità di danno per scorrimento oppure per fessurazione diagonale).

Mediante il programma 3Muri è stato riprodotto un singolo modello dotato di 3 pareti principali in direzione X che riproducono esattamente i 3 casi di cui sopra.



In seguito alla generazione automatica della mesh, si è proceduto all'editing manuale della stessa in modo da renderla identica come ipotesi a quelle del caso di benchmark.



Nelle figure seguenti sono riportate le schermate del software 3muri che forniscono la visione globale dei risultati dell'analisi di ogni parete.

Nelle finestre presenti in ognuna delle schermate, partendo da quella in basso a sinistra e procedendo in senso antiorario, è riportata:

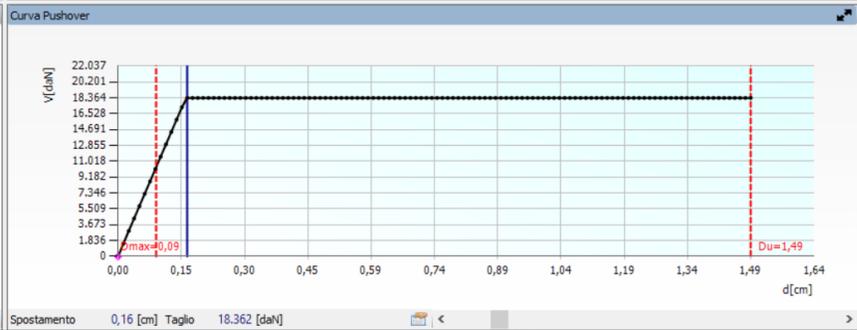
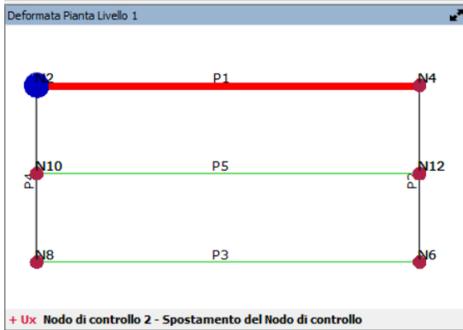
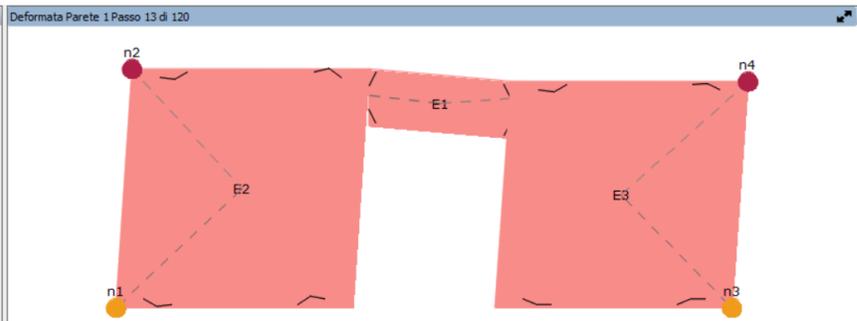
- La posizione della parete all'interno del modello. La parete P1 è trilita del caso A, la parete P5 è trilita del caso B, mentre la parete P3 è trilita del caso D.
- La curva taglio-drift derivante dall'analisi pushover di parete singola. Le due linee verticali rosse tratteggiate indicano rispettivamente il drift massimo e ultimo, mentre la

linea verticale blu indica il primo passo della curva pushover nel quale tutti gli elementi del trilito risultano plasticizzati.

- La deformata della parete corrispondente al passo della curva pushover precedentemente indicato. In questo grafico il colore rosa indica che l'elemento si è plasticizzato per pressoflessione, mentre il colore giallo indica che l'elemento si è plasticizzato per taglio. Le linee verdi indicano rispettivamente la posizione della catena (Caso B) e della trave infinitamente rigida (Caso D).
- Tabella con le sollecitazioni agenti sugli elementi in muratura corrispondente al punto della curva pushover precedentemente indicato.

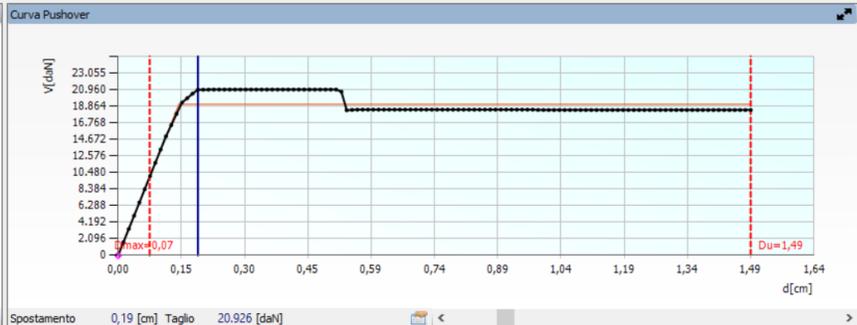
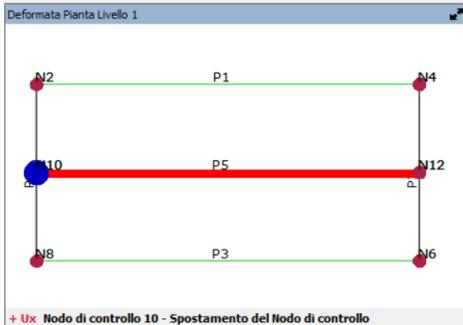
Risultati Parete 1

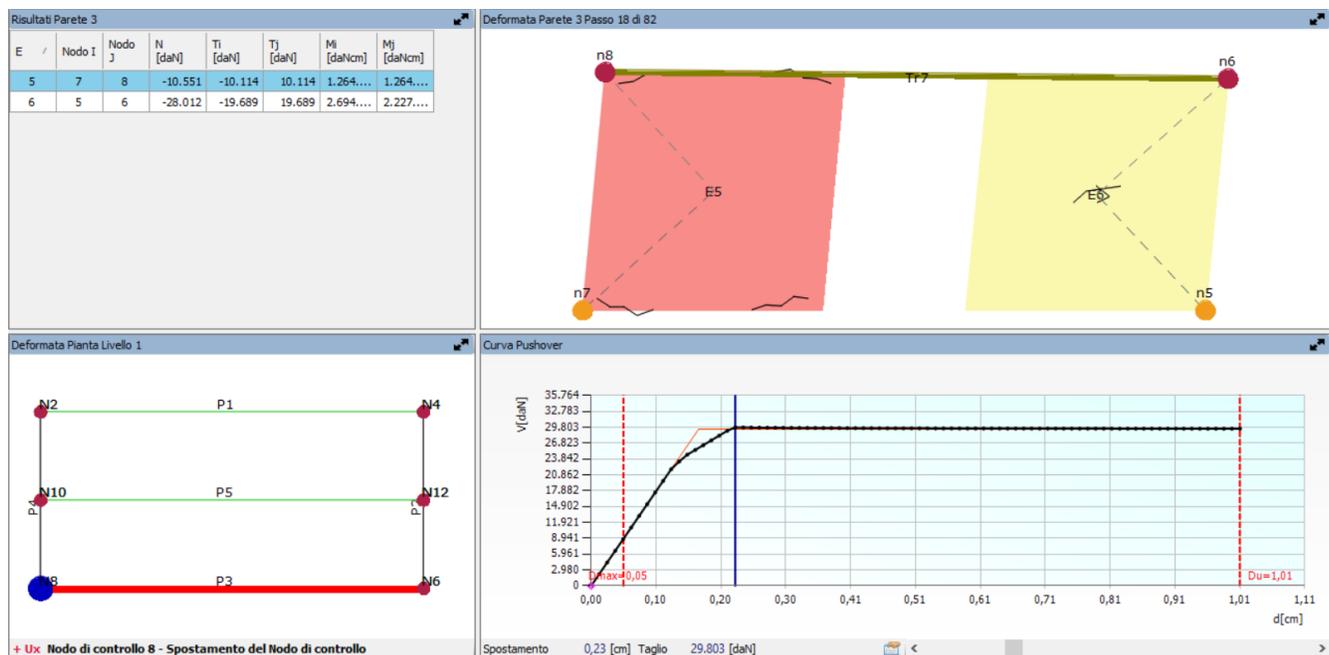
E	Nodo I	Nodo J	N [daN]	Ti [daN]	Tj [daN]	Mi [daNcm]	Mj [daNcm]
1	2	4	90	0	0	0	0
2	1	2	-19.667	-8.919	8.919	2.268....	-39.004
3	3	4	-19.841	-9.443	9.443	2.287....	73.685



Risultati Parete 5

E	Nodo I	Nodo J	N [daN]	Ti [daN]	Tj [daN]	Mi [daNcm]	Mj [daNcm]
8	10	12	-1.072	1.625	-1.625	-123.752	-119.998
9	9	10	-18.071	-9.394	9.394	2.098....	249.713
10	11	12	-21.454	-11.532	11.532	2.456....	426.795





Nelle seguenti tabelle sono riportati i risultati del calcolo svolto utilizzando il software 3muri, confrontati con quelli illustrati nel benchmark n° 2 del Documento ReLUIS.

Come si può osservare i risultati ottenuti utilizzando il software 3muri sono in linea con quelli del Documento ReLUIS v1.0 (Tabelle 15 e 16, pag. 69).

	MASCHIO 1 (posto alla destra dell'apertura)									
	SW	Caso A			Caso B			Caso D		
		Vmax [kN]	du [m]	Mecc.	Vmax [kN]	du [m]	Mecc.	Vmax [kN]	du [m]	Mecc.
Risultati ottenuti con i software utilizzati nel Benchmark 2	SW1	93.32	0.0149	PF	117.26	0.0149	PF	196.74	0.0101	T
	SW2	91.883	0.00150	PF	111.575	0.0015	PF	197.898	0.0010	T
	SW4	105.456	0.0150	PF	126.848	0.0149	PF	171.134	0.0099	T
	SW5	94.659	0.0150	PF	116.377	0.0149	PF	173.080	0.0099	T
	SW7	85.78	0.025	PF	138.72	0.025	PF	162.92	0.025	T
	SW8							203.380	0.013	T
	SW10				155.250	0.0145	PF	193.780	0.0153	T
	Max	105.456	0.025		155.250	0.025		203.380	0.025	
	Min	85.78	0.0015		111.575	0.0015		162.92	0.001	
	Media	94.220	0.014		122.157	0.014		180.354	0.011	
Dev.	7.141	0.008		10.790	0.08		15.954	0.009		
Risultati 3muri	94.43	0.0149	PF	115.32	0.0149	PF	196.89	0.0101	T	

	MASCHIO 2 (posto alla sinistra dell'apertura)									
	SW	Caso A			Caso B			Caso D		
		Vmax [kN]	du [m]	Mecc.	Vmax [kN]	du [m]	Mecc.	Vmax [kN]	du [m]	Mecc.
Risultati ottenuti con i software utilizzati nel Benchmark 2	SW1	89.407	0.015	PF	95.3	0.015	PF	112.834	0.010	PF
	SW2	93.915	0.0015	PF	98.102	0.0015	PF	115.782	0.0010	PF
	SW4	78.153	0.0150	PF	83.389	0.0150	PF	171.134	0.0099	T
	SW5	89.290	0.0150	PF	80.794	0.0149	PF	173.080	0.0099	T
	SW7	85.78	0.025	PF	119.370	0.025	PF	146.73	0.025	PF
	SW8							122.476	0.013	PF
	SW10				103.5	0.0145	PF	157	0.0153	PF
	Max	93.915	0.025		119.370	0.025		173.080	0.025	
	Min	85.78	0.0015		80.794	0.0015		115.782	0.001	
	Media	87.309	0.014		95.391	0.014		143.912	0.011	
Dev.	5.877	0.008		15.325	0.008		28.969	0.009		
Risultati 3muri	89.19	0.0149	PF	93.94	0.0149	PF	101.14	0.0101	PF	

Infine, nei seguenti grafici si riportano i domini di resistenza per pressoflessione e taglio.

In virtù dei dati forniti nel testo del benchmark, il dominio di resistenza nei confronti del taglio è stato tracciato utilizzando il criterio di Turnšek – Cacovic, mentre per valutare il dominio di resistenza a pressoflessione, sono stati valutati due casi limite:

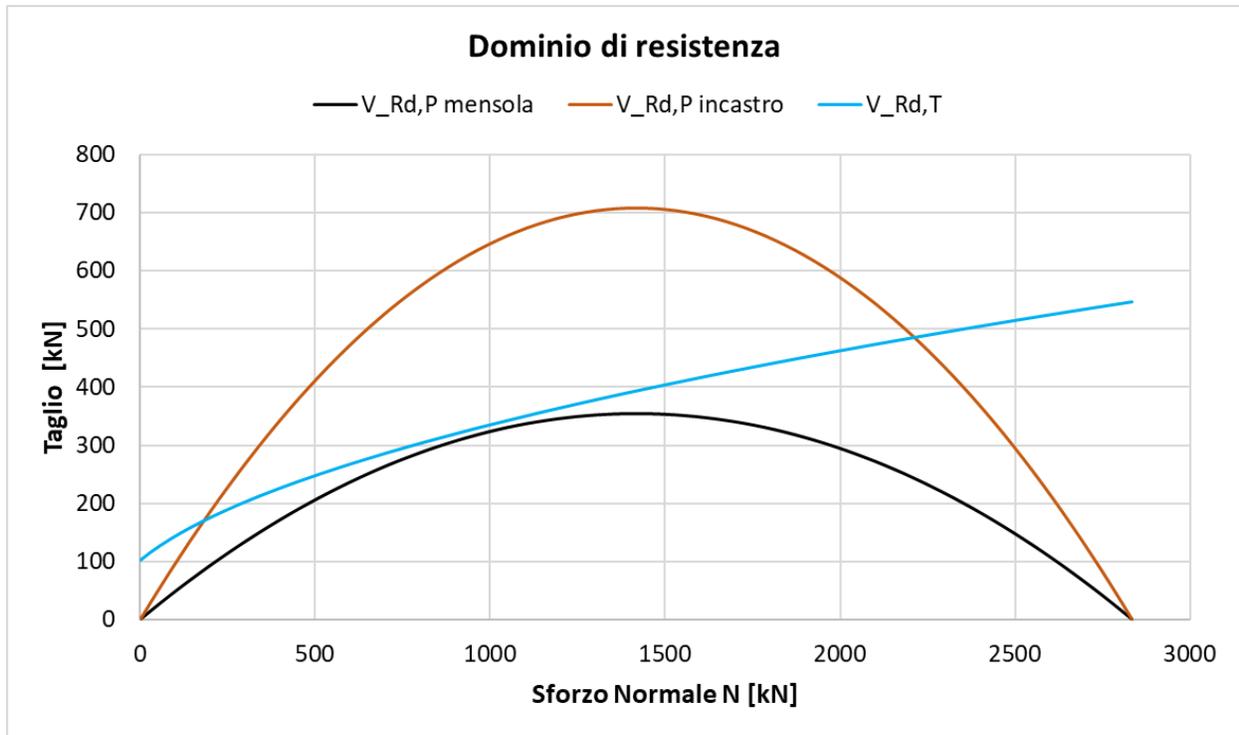
- il comportamento del maschio è assimilabile a quello di una mensola
- il comportamento del maschio è assimilabile a quello di una trave doppiamente incastrata.

La variazione dello schema statico viene introdotto nella formulazione mediante il parametro α definito come

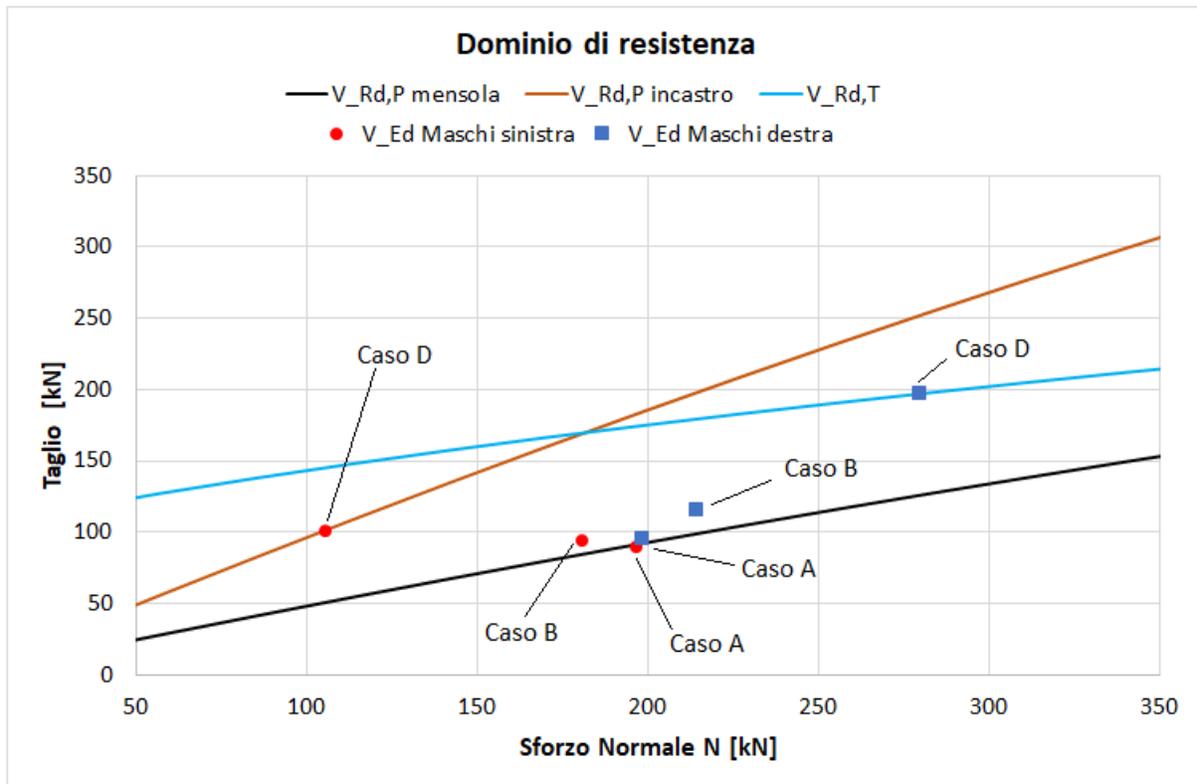
$$\alpha = \left| \frac{M_{\max}}{M_{\max} + M_{\min}} \right|$$

dove M_{\max} ed M_{\min} sono rispettivamente i momenti flettenti agenti all'estremità superiore e inferiore del maschio.

Di conseguenza, nel caso di una mensola $\alpha = 1$ mentre nel caso di una trave doppiamente incastrata $\alpha = 0.5$.



Dominio di resistenza per taglio e pressoflessione (tracciati per i casi limite)



Particolare del dominio di resistenza (tracciati per i casi limite) con la sovrapposizione dei valori sollecitanti

Come si può osservare in quest'ultimo grafico, per la parete del caso A i valori sollecitanti valutati per il maschio di sinistra e per il maschio di destra sono pressoché identici e sono sovrapponibili con il dominio di resistenza per pressoflessione valutato per la mensola (i valori di α valgono rispettivamente 1.02 e 0.97).

Per la parete del caso D invece, i valori sollecitanti valutati per il maschio di sinistra e per il maschio di destra sono nettamente differenti e sono sovrapponibili con il dominio di resistenza per pressoflessione valutato per lo schema statico di trave doppiamente incastrata (i valori di α valgono rispettivamente 0.50 e 0.55). Questa variazione del grado di vincolo è spiegata dalla presenza della trave infinitamente rigida che fa sì che il telaio equivalente all'intera parete sia assimilabile a quello di un telaio di tipo shear-type, dove appunto i pilastri (ovvero i maschi) possono essere modellati come mensole doppiamente incastrate. Inoltre, come evidenziato nelle precedenti tabelle, il maschio di sinistra subisce un collasso per pressoflessione, mentre il maschio di destra subisce un collasso per taglio.

Un caso intermedio si riscontra invece per la parete del caso B, dove la presenza della catena fornisce un grado di vincolo aggiuntivo rispetto al sistema a mensola, ma non è sufficientemente rigida da garantire il rispetto di un modello di tipo shear-type. A dimostrazione di questo, dai risultati del modello elaborato con il software 3muri, si evince i coefficienti α valgono 0.89 e 0.85 rispettivamente per il maschio posto alla sinistra e per quello posto alla destra dell'apertura.

1.2. Struttura benchmark n° 4 – Edificio monocellula bipiano

“Struttura benchmark n° 4 – Edificio monocellula bipiano” è un altro degli esempi di validazione contenuti nel Documento ReLUIIS. Il documento citato contiene tutte le informazioni per riprodurre i modelli mediante il software 3Muri.

DATI GEOMETRICI	
<p>La struttura benchmark n°4 è costituita da un edificio 3D mono-cellula in muratura ordinaria a due piani, le cui dimensioni in pianta e in prospettiva sono riportate in Figura 1 (al variare delle diverse varianti geometriche proposte) e in Figura 2.</p> <p>Lo spessore assunto delle pareti è pari a 0.25 m.</p>	
Configurazione I	Configurazione II
<p>Figura 1 – Pianta delle tre configurazioni analizzate per la struttura benchmark n°4.</p>	
Parete TIPO A	Parete TIPO B
<p>Figura 2 – Prospetti e idealizzazione a telaio equivalente per le tre configurazioni analizzate della struttura benchmark n° 4.</p>	
PARAMETRI MECCANICI	
<p>Tipologia di muratura: mattoni pieni e malta di calce $E = 1800$ [MPa] ; $G = 600$ [MPa] ; $w = 17.50$ kN/m³ Moduli da intendersi rappresentativi di una condizione elastica iniziale. Stato fessurato: da ottenersi applicando un fattore riduttivo dei moduli pari a 0.5 $f_{tm} = 0.04$ [MPa]; $f_{v0} = 0.23$ [MPa]; $f_{tb} = 1.22$ [MPa]; $\mu = 0.58$; $f_m = 6.2$ [MPa] ; $\tau_0 = 0.163$ [MPa]; $l_b/h_b = 4$ $FC = 1$ (valori assunti da dati sperimentali)</p> <p><u>Solai</u>: solai assunti rigidi; nel caso il programma non disponga dell'ipotesi di piano rigido assumere le proprietà di rigidezza equivalenti a una soletta piena di calcestruzzo (classe C25/30) di spessore pari a 0.2 m.</p>	
CONDIZIONI DI CARICO e TIPO DI ANALISI SUGGERITE	
<p>I solai sono orditi perpendicolarmente alle pareti orientate in X. Il carico è pari a 10 kN/m². La risposta è studiata mediante analisi statica non lineare con distribuzione di forze proporzionale alle masse ($u_{max} = 0.04$ m, con riferimento al secondo piano dell'edificio).</p>	

[Da Documento ReLUIS v1.0, SCHEDA BENCHMARK n° 4]

Nel presente documento, volendo fornire la validazione del modello di calcolo implementato utilizzando il software 3muri, coerentemente con i risultati di calcolo forniti nel documento ReLUIS, sono presentate le analisi relative alla sola configurazione II, la quale, rispetto alla

configurazione I che presenta pianta simmetrica, risente maggiormente degli effetti di redistribuzione delle azioni da una parete all'altra.

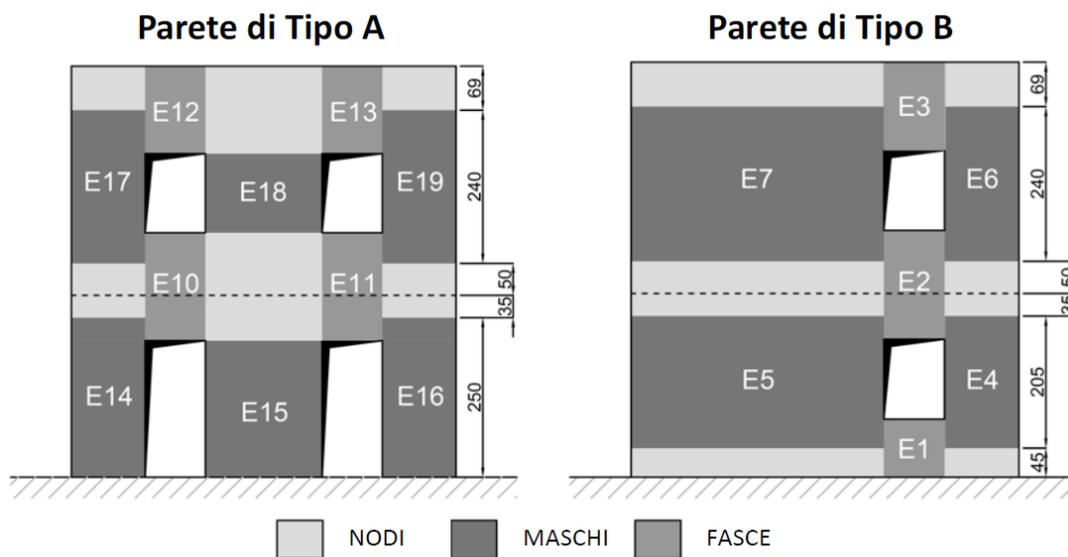
Inoltre, verranno considerate per le fasce murarie le seguenti variabili:

- CASO A: assenza di elementi resistenti a trazione accoppiati;
- CASO C: presenza di un cordolo di dimensioni pari a $0.25 \times 0.25 \text{ m}^2$ armato con $2+2\phi 16$ longitudinali (2 all'estradosso e due all'intradosso) e staffe a due braccia $\phi 10$ passo 0.2m (classe di resistenza acciaio B450C, classe di resistenza cls C25/30, fattore di confidenza FC pari a 1 come nel caso degli elementi in muratura).

Coerentemente con le linee guida illustrate nel benchmark, le soglie di drift ultimo sono state assunte pari a 0.6% nel caso della modalità di danno per pressoflessione ed a 0.4% nel caso della modalità di danno a taglio.

Infine, si precisa che il dominio di resistenza nei confronti del taglio, sia per quanto riguarda i maschi che le fasce murarie, è stato determinato utilizzando il criterio di Turnšek – Cacovic.

Utilizzando il software 3Muri è stato riprodotto un modello per ogni differente configurazione. La mesh generata automaticamente dal software è stata editata manualmente in modo da renderla identica a quelle proposte dagli Autori del benchmark, riportate nella seguente figura.



[da Documento ReLUIS v1.0, Figura 51, pag. 96]

Un primo test di validazione riguarda la massa totale della struttura, con il confronto tra il valore restituito dal software 3muri e quelli riportati nel Documento ReLUIS, dove è indicato il valore teorico calcolato manualmente e quello stimato da diversi software contemplati nel benchmark.

In questo contesto si sottolinea che, come dichiarato dagli Autori del Documento ReLUIS, nel calcolo manuale delle masse non è stato considerato il contributo della fascia posta sotto la finestra situata al primo livello della parete tipo B. Questa scelta è lecita in quanto questa

porzione di fascia, essendo compresa tra due nodi vincolati, non influenza il comportamento sismico della struttura.

Considerando anche questo contributo, i valori delle masse risultano pari a 101643 kg (caso A) e 107950 kg (caso C).

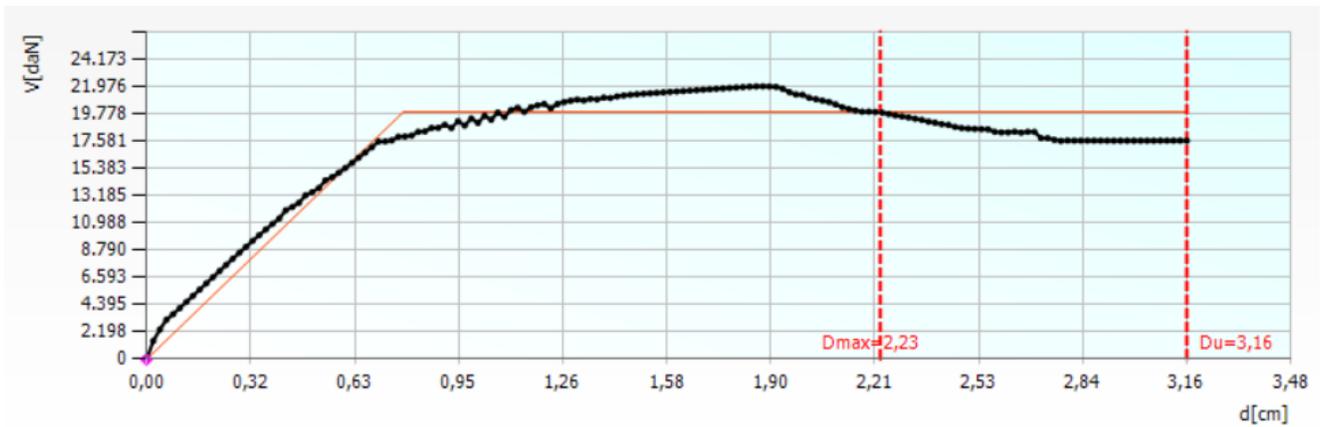
Infine, si sottolinea che per la valutazione manuale della massa del caso C, coerentemente con quanto riportato nel Documento ReLUIIS e con la filosofia di calcolo della maggior parte dei software (compreso 3muri), nella stima dei volumi si è considerata la completa compenetrazione tra il cordolo e la muratura, ovvero alla massa della muratura (ottenuta per il caso A) è stata sommata la massa del cordolo.

Nella seguente tabella (stralciata dal Documento ReLUIIS v1.0, Tabella 21, pag.99) è riportato il confronto tra le masse della struttura valutate per il caso A e per il caso C della configurazione II.

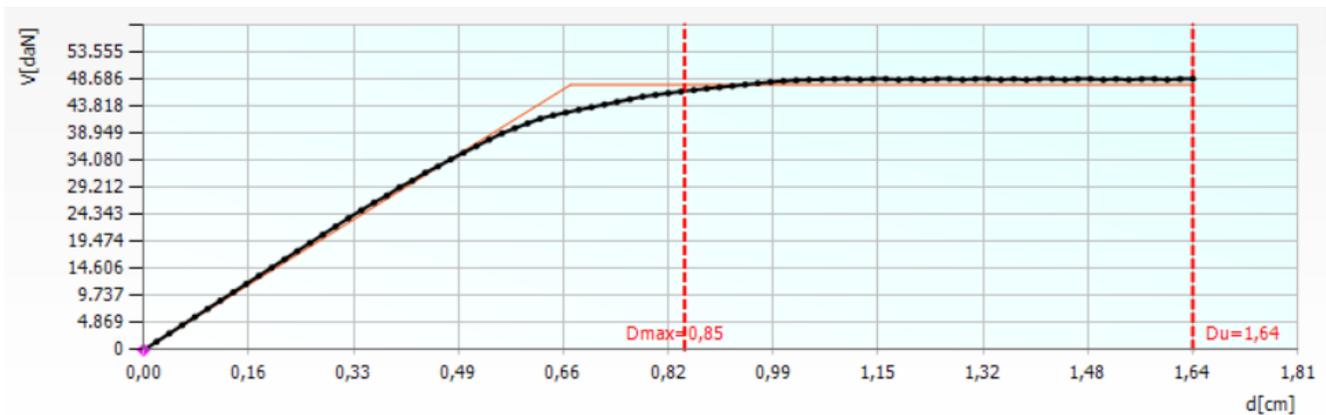
	Caso A		Caso C	
	[kg]	Differenza % (sulla stima manuale)	[kg]	Differenza % (sulla stima manuale)
Calcolo manuale	101264.0	-	107100.0	-
SW1	101680.2	0.4%	107799.0	0.7%
SW2	101264.0	0.0%	107100.0	0.0%
SW3	101678.6	0.4%	107959.0	0.8%
SW4	101684.2	0.4%	107762.9	-0.6%
SW5	101684.2	0.4%	108715.8	-1.5%
SW6	101677.0	0.4%	107918.0	0.8%
SW7	99474.5	-1.8%	103310.2	-3.5%
SW10	-	-	104443.0	-2.5%
3Muri	101565.4	0.3%	106568.1	-0.5%

Nelle figure seguenti sono riportate, per ognuno dei casi analizzati, le schermate del software 3muri che forniscono la curva taglio-drift derivante dall'analisi pushover globale della struttura. Le due linee verticali rosse tratteggiate indicano rispettivamente il drift massimo e quello ultimo. Queste curve sono state ottenute controllando lo spostamento del nodo 3 (vertice in alto a sinistra della parete tipo A), sotto l'azione di una distribuzione uniforme di forze concordi con l'asse x.

CASO A



CASO C



Nelle seguenti figure è riportata la sovrapposizione tra le curve appena mostrate e i risultati presenti nel Documento ReLUI v1.0 (Figura 55, pag. 103). Come si può osservare, l'analisi della struttura svolta con il software 3Muri è perfettamente in linea con i risultati ottenuti utilizzando gli altri software.

