

POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE



TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Effetti di interazione locale nella risposta sismica di strutture intelaiate in calcestruzzo armato con tamponamento in muratura

Relatore

Prof. Fabio Di Trapani

Correlatore

Ing. Marilisa Di Benedetto

Candidato

Giovanni Manco

Anno accademico 2022/2023

Sommario

Durante un evento sismico, le strutture intelaiate in calcestruzzo armato (c.a.) con tamponamenti in muratura, manifestano una risposta non lineare, principalmente dovuta alla complessa interazione che si presenta tra telaio in c.a. e tamponamento in muratura. Tale interazione introduce una significativa variazione nella distribuzione delle sollecitazioni interne nella zona di contatto tra telaio e tamponamento, la quale risulta funzione delle dimensioni del telaio e dei rapporti di resistenza e rigidezza dei materiali utilizzati per il tamponamento. Nonostante la ricerca scientifica abbia prodotto numerosi studi rilevanti in questo campo, ci sono ancora molti aspetti aperti che richiedono un'analisi approfondita.

Il presente lavoro di tesi si concentra sull'analisi degli effetti delle interazioni locali tra telaio e tamponamento con particolare riferimento allo studio della variazione della domanda di taglio all'estremità delle colonne e alla modalità di collasso ad essa associata. Lo studio propone lo studio degli effetti locali attraverso un approccio di micro-modellazione numerica. Sono stati selezionati due provini provenienti da due differenti campagne sperimentali e modellati attraverso STKO, software grafico per OpenSees. I modelli sono stati realizzati attraverso l'uso di elementi 2D con comportamento non lineare, tenendo conto dell'interazione telaio-tamponamento attraverso l'utilizzo di un'interfaccia attritiva. Dopo aver validato i risultati mediante il confronto tra i dati sperimentali e quelli ottenuti dalla simulazione numerica, la domanda di taglio è stata registrata utilizzando uno script Python fornito da ASDEA Software. Tale script consente di calcolare l'integrazione delle forze nodali in una sezione adiacente all'estremità della colonna. Il presente lavoro di tesi fornisce inoltre un'analisi parametrica al fine di valutare la redistribuzione della domanda di taglio al variare dei parametri di design del tamponamento in muratura: variazione del rapporto di resistenza mattone-malta e variazione dello spessore del tamponamento. Infine, tali aspetti sono stati analizzati su una struttura prototipo in c.a. a scala reale, fornendo un'analisi dettagliata per possibili sviluppi futuri sul tema.

Abstract

During a seismic event, reinforced concrete frame structures with masonry infill exhibit a non-linear response primarily due to the complex interaction between the reinforced concrete frame and the masonry infill. This interaction leads to a significant variation in the distribution of internal forces in the contact zone between the frame and the infill, which is influenced by the aspect ratio of the frame and the material strength and stiffness ratios used for the infill. Despite extensive research in this field, many aspects still require to be analyzed.

This thesis work focuses on examining the effects of local interactions between the frame and infill, with a specific emphasis on studying the variation in shear demand at the column ends and the associated collapse mechanisms. The study employs a numerical micro-modeling approach to investigate these local effects. Two specimens from different experimental campaigns were selected and modeled using STKO, a graphical software for OpenSees. The models were implemented using 2D elements with non-linear behavior, accounting for the frame-infill interaction using a frictional interface. After the calibration and validation of results by comparing experimental and numerical data, shear demand was recorded using a Python script provided by ASDEA Software. This script facilitates the calculation of nodal force integration in a section adjacent to the column ends. Furthermore, this thesis work conducts a parametric analysis to assess the redistribution of shear demand by varying masonry infill design parameters, such as the brick-mortar strength ratio and infill thickness. Finally, these aspects are evaluated on a full-scaled reinforced concrete prototype structure, providing a detailed analysis of potential future developments in this field.

Indice

Elenco delle figure	3
Elenco delle tabelle	6
1 Introduzione.....	8
2 Campagne sperimentali di riferimento	12
2.1 Descrizione dei provini	12
2.1.1 Provino S1B	12
2.1.2 Provino #8	14
2.2 Risultati delle prove sperimentali.....	18
2.2.1 Provino S1B	18
2.2.2 Provino #8	20
3 Modellazione numerica	22
3.1 Descrizione del modello.....	22
3.1.1 Tamponamento in muratura	23
3.1.2 Telaio in calcestruzzo armato.....	28
3.1.3 Interfaccia tamponamento – telaio	31
3.1.4 Condizioni di vincolo e di carico	31
3.1.5 Setting dell’analisi.....	33
3.2 Validazione del modello.....	35
3.2.1 Provino S1B	35
3.2.2 Provino #8	36
4 Influenza del design del tamponamento nella domanda di taglio	37
4.1 Analisi parametrica	37
4.2 Modalità di registrazione della domanda di taglio	39
4.3 Risultati dell’analisi parametrica.....	41
4.3.1 Variazione del rapporto f_b/f_m nel provino S1B.....	41

4.3.2	Variazione del rapporto f_b/f_m nel provino #8	44
4.3.3	Variazione dello spessore della muratura nel provino S1B	48
4.3.4	Variazione dello spessore della muratura nel provino #8	52
4.4	Correlazione tra la variazione della domanda di taglio e la variazione del rapporto f_b/f_m	56
5	Analisi di un prototipo in calcestruzzo armato a scala reale	59
5.1	Descrizione della struttura prototipo	60
5.2	Risultati delle analisi pushover	66
5.3	Variazione della domanda di taglio al variare del rapporto f_b/f_m	68
5.3.1	Correlazione tra la variazione della domanda di taglio e la variazione del rapporto f_b/f_m	70
5.4	Taglio alla base e contributo della tamponatura al variare del rapporto f_b/f_m	73
6	Conclusioni.....	76
	APPENDICI.....	79
A.	Valutazione delle proprietà meccaniche del calcestruzzo confinato con il modello di Mander, Priestley, Park (1989)	79
A.1	Provino S1B	79
A.2	Provino #8	81
B.	Script Python per la registrazione del taglio	83
C.	Valutazione del taglio resistente	101
C.1	Formulazione di Biskinis	101
C.2	Formulazione di Sezen e Moehle.....	105
	Bibliografia	108

Elenco delle figure

Figura 1.1 – Comportamento di una muratura intelaiata sotto azione laterale [15] ...	8
Figura 1.2 – Differenti tipologie di collasso [16]	9
Figura 1.3 – Alcune tipologie di puntoni nella macro-modellazione [25]: (a) Holmes [17], (b) Smith B. [23], (c) Chrysostomou et al. [22], (d) El-Dakhakhni et al. [21], (e) Crisafulli [20], (f) Furtado et al. [24].....	10
Figura 1.4 – (a) Micro-modellazione dettagliata, (b) Micro-modellazione semplificata, (c) Meso-modellazione [30].....	11
Figura 2.1 - Geometria e layout di armatura del provino S1B (misure in cm) [32] .	13
Figura 2.2 – Strumentazione di prova utilizzata [24]	14
Figura 2.3 - Geometria e layout di armatura del provino #8 (misure in pollici) [33]	15
Figura 2.4 – Sezioni di travie e colonna del provino #8 (misure in pollici)[33]	16
Figura 2.5 – Unità di muratura del provino #8 (misure in pollici)[33].....	16
Figura 2.6 - Strumentazione di prova utilizzata [33]	17
Figura 2.7 – Risposta ciclica forza-spostamento sperimentale del provino S1B[32]	18
Figura 2.8 – Danneggiamento della colonna e del nodo nel provino S1B [32].....	19
Figura 2.9 – Crack pattern a fine test del provino S1B [32].....	19
Figura 2.10 – Risposte monotoniche sperimentali forza-spostamento dei provini del Dataset2 (1 in.=2.54 cm; 1 kip=4.45 kN) [33]	20
Figura 2.11 - Crack pattern a fine test del provino #8 [33]	20
Figura 3.1 - Legge uniassiale a trazione, [35]	23
Figura 3.2 - Legge uniassiale a compressione, [35]	25
Figura 3.3 – Micro-modello del pannello di muratura (S1B a sinistra e # 8 a destra)	27
Figura 3.4 – Mesh dei pannelli di muratura (S1B a sinistra e #8 a destra).....	27
Figura 3.5 – Esempio di sezione a fibre usata nelle barre di armatura.....	29
Figura 3.6 – Modello del telaio (S1B a sinistra e #8 a destra).....	29
Figura 3.7 – <i>Embedded elements</i> - vincolo tra calcestruzzo e barre di armatura	30
Figura 3.8 – <i>Interaction</i> muratura-telaio e sistemi di riferimento locali (provino #8)	31
Figura 3.9 – Linear TimeSeries	32
Figura 3.10 – Condizioni di carico e di vincolo (provino #8)	32
Figura 3.11 – Modello partizionato: provino S1B.....	34
Figura 3.12 – Modello partizionato: provino #8.....	34
Figura 3.13 – Confronto tra risposta numerica e sperimentale del provino S1B	35
Figura 3.14 – Confronto tra danneggiamento numerico e sperimentale del provino S1B	35
Figura 3.15 - Confronto tra risposta numerica e sperimentale del provino #8	36

Figura 3.16 - Confronto tra danneggiamento numerico e sperimentale del provino #8	36
.....	36
Figura 4.1 : <i>Section cut</i> nel provino S1B.....	39
Figura 4.2 : <i>Section cut</i> nel provino #8.....	40
Figura 4.3 : Sistema di riferimento locale in corrispondenza della <i>section cut</i>	40
Figura 4.4 - Provino S1B: curve pushover al variare del rapporto f_b/f_m	41
Figura 4.5 : Provino S1B - domanda di taglio al variare del rapporto f_b/f_m : (a) colonna sinistra (b) colonna destra.....	42
Figura 4.6 : Provino S1B: danneggiamento al variare del rapporto f_b/f_m	43
Figura 4.7 : Provino S1B: distorsioni al variare del rapporto f_b/f_m	44
Figura 4.8 : Provino #8: curve pushover al variare del rapporto f_b/f_m	45
Figura 4.9 : Provino #8 - domanda di taglio al variare del rapporto f_b/f_m : (a) colonna sinistra (b) colonna destra.....	45
Figura 4.10 : Provino #8: danneggiamento al variare del rapporto f_b/f_m	46
Figura 4.11 : Provino #8: distorsioni al variare del rapporto f_b/f_m	47
Figura 4.12 : Provino S1B: confronto delle curve pushover al variare dello spessore della muratura	48
Figura 4.13 : Provino S1B - domanda di taglio al variare dello spessore della muratura: (a) colonna di sinistra (b) colonna di destra.....	49
Figura 4.14 : Provino S1B: danneggiamento al variare dello spessore della muratura	49
.....	49
Figura 4.15 : Provino S1B: distorsioni nel telaio al variare dello spessore della muratura.....	49
Figura 4.16 : Provino S1B: curve pushover al variare dello spessore della muratura con rapporto f_b/f_m minimo.....	50
Figura 4.17 : Provino S1B - domanda di taglio al variare dello spessore della muratura con rapporto f_b/f_m minino: (a) colonna sinistra (b) colonna destra.....	50
Figura 4.18 : Provino S1B: danneggiamento al variare dello spessore della muratura con rapporto f_b/f_m minimo.....	51
Figura 4.19 : Provino S1B: distorsioni nel telaio al variare dello spessore della muratura con rapporto f_b/f_m minimo	51
Figura 4.20 : Provino #8: confronto delle curve pushover al variare dello spessore della muratura	52
Figura 4.21 : Provino #8 - domanda di taglio al variare dello spessore della muratura: (a) colonna sinistra (b) colonna destra.....	52
Figura 4.22 : Provino #8: danneggiamento al variare dello spessore della muratura	53
Figura 4.23 : Provino #8: distorsioni nel telaio al variare dello spessore della muratura.....	53
Figura 4.24 : Provino #8: curve pushover al variare dello spessore della muratura con rapporto f_b/f_m minimo.....	54
Figura 4.25 : Provino #8 - domanda di taglio al variare dello spessore della muratura con rapporto f_b/f_m minimo: (a) colonna sinistra (b) colonna destra	54

Figura 4.26: Provino #8: danneggiamento al variare dello spessore della muratura con rapporto f_b/f_m minimo	55
Figura 4.27: Provino #8: distorsioni nel telaio al variare dello spessore della muratura con rapporto f_b/f_m minimo	55
Figura 4.28 - Provino S1B - Variazione taglio nelle colonne: (a) taglio massimo relativo, (b) normalizzazione rispetto al taglio massimo assoluto, (c) normalizzazione rispetto al taglio del bare frame	57
Figura 4.29 - Provino #8 - Variazione taglio nelle colonne: (a) taglio massimo relativo, (b) normalizzazione rispetto al taglio massimo assoluto, (c) normalizzazione rispetto al taglio del bare frame	57
Figura 5.1: Micro-modello della struttura prototipo.....	59
Figura 5.2: Struttura prototipo: sezioni di trave e colonna (misure in mm)	60
Figura 5.3: Struttura prototipo: geometria e carichi verticali (misure in mm)	62
Figura 5.4: Primo modo di vibrare: telaio tamponato (sinistra) e telaio c.a. (destra).....	64
Figura 5.5: Modello partizionato: Telaio tamponato.....	65
Figura 5.6: Modello partizionato: Telaio in c.a. (bare frame)	65
Figura 5.7: Struttura prototipo: curve pushover	66
Figura 5.8: Danneggiamento della struttura prototipo al termine dell'analisi.....	67
Figura 5.9: Danneggiamento del telaio non tamponato al termine dell'analisi.....	68
Figura 5.10: Section cut per le colonne del primo piano della struttura prototipo ...	68
Figura 5.11: Variazione della domanda di taglio nel telaio al piano primo: (a) section cut 1 (b) section cut 2 (c) section cut 3 (d) section cut 4	69
Figura 5.12: Variazione della domanda di taglio nelle colonne: (a) taglio massimo relativo, (b) normalizzazione rispetto al taglio massimo assoluto, (c) normalizzazione rispetto al taglio del bare frame	71
Figura 5.13: Section cut alla base della struttura prototipo	73
Figura 5.14: Contributo degli elementi strutturali e non strutturali al tagliante di base al variare del rapporto f_b/f_m	74

Elenco delle tabelle

Tabella 2.1 – Caratteristiche principali del provino S1B - Dataset 1 [32].....	12
Tabella 2.2 – Caratteristiche meccaniche della muratura del provino S1B [24]	13
Tabella 2.3 – Caratteristiche principali del provino #8 - Dataset 2 [33].....	15
Tabella 2.4 – Caratteristiche geometriche e meccaniche delle barre di armatura del provino #8 [33]	16
Tabella 2.5 – Caratteristiche meccaniche del calcestruzzo del provino #8 [33].....	17
Tabella 2.6 – Caratteristiche meccaniche della muratura del provino #8 [33]	17
Tabella 2.7 – Fasi critiche durante il test [33]	21
Tabella 2.8 – Livello di drift per ogni fase critica del provino #8 [33]	21
Tabella 3.1 - Stima dei parametri meccanici del mattone nei due provini	26
Tabella 3.2 - Parametri meccanici del mattone nei due provini	26
Tabella 3.3 – Stima dei parametri meccanici della malta nei due provini.....	26
Tabella 3.4 - Parametri meccanici della malta nei due provini.....	26
Tabella 3.5 – Diametri equivalenti delle barre di armature nel provino S1B.....	28
Tabella 3.6 - Diametri equivalenti delle barre di armature nel provino #8.....	28
Tabella 3.7 – Parametri acciaio - <i>Steel02</i>	29
Tabella 3.8 – Parametri meccanici del calcestruzzo non confinato nei due provini.	30
Tabella 3.9 - Parametri meccanici del calcestruzzo confinato nei due provini	30
Tabella 3.10 – Parametri delle interfacce telaio-muratura.....	31
Tabella 3.11 – Analysis Command.....	33
Tabella 4.1: Analisi parametrica: provino S1B.....	38
Tabella 4.2: Analisi parametrica: provino #8	38
Tabella 4.3: Parametri meccanici dei test al variare di f_b/f_m : provino S1B.....	38
Tabella 4.4: Parametri meccanici dei test al variare di f_b/f_m : provino #8.....	39
Tabella 4.5: Variazione della domanda di taglio sulle colonne del provino S1B al variare del rapporto f_b/f_m	57
Tabella 4.6: Variazione della domanda di taglio sulle colonne del provino #8 al variare del rapporto f_b/f_m	58
Tabella 5.1: Diametri equivalenti delle barre di armatura	61
Tabella 5.2: Peso degli elementi strutturali e della muratura.....	61
Tabella 5.3: Massa degli elementi strutturali e della muratura	63
Tabella 5.4: Massa equivalente dei carichi applicati	63
Tabella 5.5: Telaio tamponato e telaio in c.a.: risultati dell’analisi modale	63
Tabella 5.6: Telaio tamponato: autovettori, masse di piano e forze modali	64
Tabella 5.7: Telaio c.a.: autovettori, masse di piano e forze modali	64
Tabella 5.8: Parametri meccanici dei test al variare di f_b/f_m	66
Tabella 5.9: Taglio massimo relativo al variare di f_b/f_m	71

Tabella 5.10: Taglio massimo normalizzato rispetto al taglio massimo assoluto al variare di f_b/f_m	72
Tabella 5.11: Taglio massimo normalizzato rispetto al taglio del bare frame al variare di f_b/f_m	72
Tabella C.1: Provino S1B: taglio resistente delle colonne calcolato secondo <i>Biskinis</i>	102
Tabella C.2: Provino #8: taglio resistente delle colonne calcolato secondo <i>Biskinis</i>	102
Tabella C.3: Prototipo (section cut 1): taglio resistente delle colonne calcolato secondo <i>Biskinis</i>	103
Tabella C.4: Prototipo (section cut 2): taglio resistente delle colonne calcolato secondo <i>Biskinis</i>	103
Tabella C.5: Prototipo (section cut 3): taglio resistente delle colonne calcolato secondo <i>Biskinis</i>	103
Tabella C.6: Prototipo (section cut 4): taglio resistente delle colonne calcolato secondo <i>Biskinis</i>	104
Tabella C.7: Provino S1B: taglio resistente delle colonne calcolato secondo <i>Sezen e Moehle</i>	105
Tabella C.8: Provino #8: taglio resistente delle colonne calcolato secondo <i>Sezen e Moehle</i>	106
Tabella C.9: Prototipo (section cut 1): taglio resistente delle colonne calcolato secondo <i>Sezen e Moehle</i>	106
Tabella C.10: Prototipo (section cut 2): taglio resistente delle colonne calcolato secondo <i>Sezen e Moehle</i>	106
Tabella C.11: Prototipo (section cut 3): taglio resistente delle colonne calcolato secondo <i>Sezen e Moehle</i>	107
Tabella C.12: Prototipo (section cut 4): taglio resistente delle colonne calcolato secondo <i>Sezen e Moehle</i>	107

1 Introduzione

La reazione delle strutture intelaiate in calcestruzzo armato con tamponamenti in muratura, sia nel piano che fuori dal piano, è oggetto di approfondite ricerche a livello mondiale [1]–[6]. Tuttavia, l'interazione complessa tra il tamponamento in muratura e i componenti del telaio in calcestruzzo rimane ancora in fase di studio. Tale interazione genera notevoli non linearità quando la struttura è sottoposta a forze sismiche, potenzialmente causando collassi fragili a causa di rotture locali dovute a sollecitazioni di taglio. Questo aspetto ha suscitato particolare interesse in ambito scientifico rimanendo tuttavia un tema ancora da approfondire.

Durante un evento sismico, il comportamento di telai tamponati è molto complesso da prevedere e analizzare in quanto in queste strutture l'interazione telaio-tamponamento influenza la risposta sia a livello globale che locale. Come studiato in [7]–[10], gli effetti globali includono una variazione significativa della resistenza, rigidezza e duttilità della struttura. D'altra parte, si verificano anche interazioni locali delle tamponature con gli elementi del telaio. In presenza di azioni orizzontali, il pannello di muratura tende a distaccarsi parzialmente dal telaio, rimanendo in contatto con esso solo per una porzione limitata delimitando la formazione di un puntone diagonale che punta sui nodi diagonalmente opposti della struttura (Figura 1.1). Questo comportamento concentra gli sforzi in un'area di contatto del telaio limitata, causando effetti di interazione locale nelle regioni prossime ai nodi del telaio e producendo un notevole incremento della domanda di taglio in quelle sezioni, come dimostrato negli studi [11]–[14].

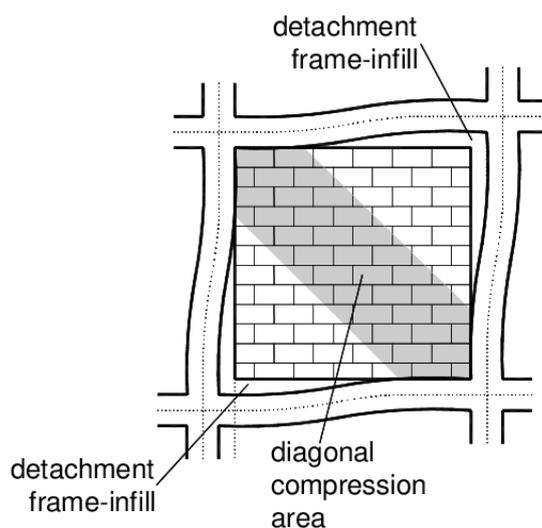


Figura 1.1 – Comportamento di una muratura intelaiata sotto azione laterale [15]

Infatti, sono numerosi i meccanismi di rottura di un telaio tamponato che possono indurre un incremento delle sollecitazioni nel telaio e causarne collassi locali (Figura 1.2). Ad esempio, se la resistenza della malta è bassa in rapporto con quella dell'unità di muratura la rottura può concentrarsi sui giunti di malta con una prevalente rottura per scorrimento. Al contrario, se il tamponamento è molto rigido e resistente, può verificarsi un collasso fragile per taglio della colonna [16].

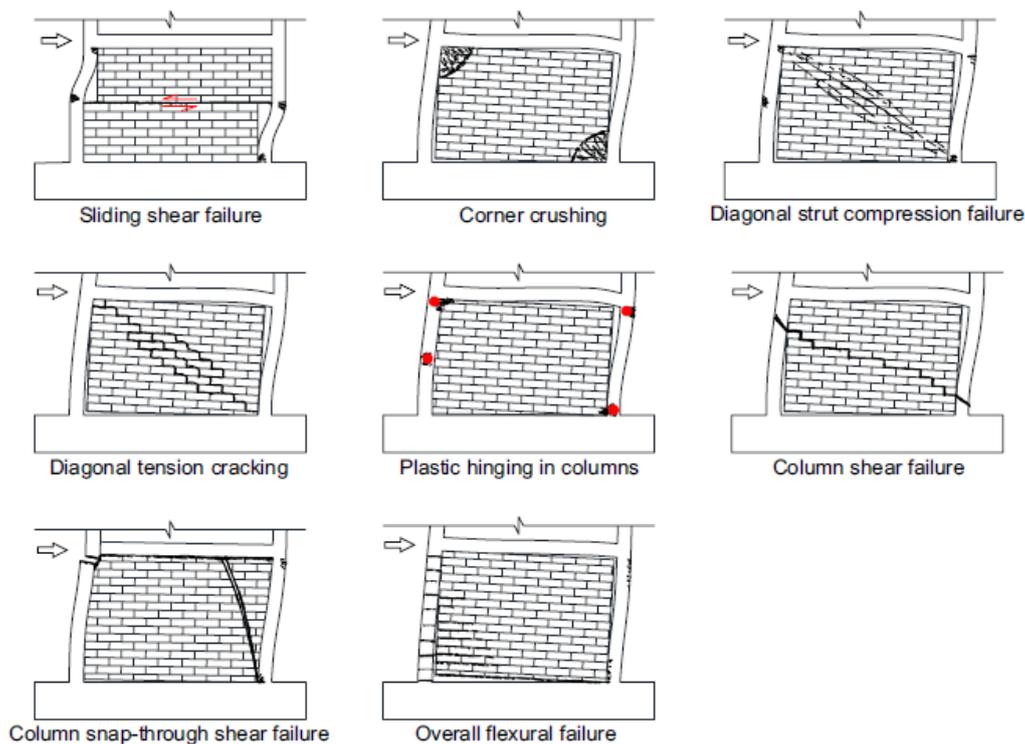


Figura 1.2 – Differenti tipologie di collasso [16]

La letteratura scientifica esplora ampiamente le tecniche di modellazione agli elementi finiti, per valutare l'impatto del tamponamento sulle strutture intelaiate in c.a.. Numerose sono le tecniche di modellazione proposte, divise principalmente nelle categorie di macro-modellazione e micro-modellazione. La prima viene spesso utilizzata in grandi strutture in cui si ha bisogno di una semplificazione del problema per ridurre gli oneri computazionali. Essa si concentra principalmente sull'utilizzo di una o più bielle diagonali equivalenti che collegano simmetricamente parti del telaio. Il primo studio condotto riguardo questo tema fu quello di Holmes [17], da cui più recentemente si è preso spunto per altri macro-modelli più sofisticati che sfruttano la stessa teoria di base del puntone. Un esempio è quello proposto da Papia et al. 2003 [18] in cui si utilizza una biella concentrica che consente di ottenere una buona affidabilità di risposta in termini di rigidezza globale della struttura. Successivamente, sono stati

proposti macro-modelli a più puntone ([9], [13], [19]–[23]), la cui novità principale sta nel fatto di poter catturare la domanda di taglio addizionale nelle colonne grazie al fatto che i puntone posizionati all'interno del telaio sono in grado di trasmettere taglio negli elementi strutturali [24] (Figura 1.3). Tuttavia, la valutazione delle proprietà meccaniche da attribuire ad ogni puntone e il punto di attacco delle bielle, non rappresentano un problema di semplice approccio.

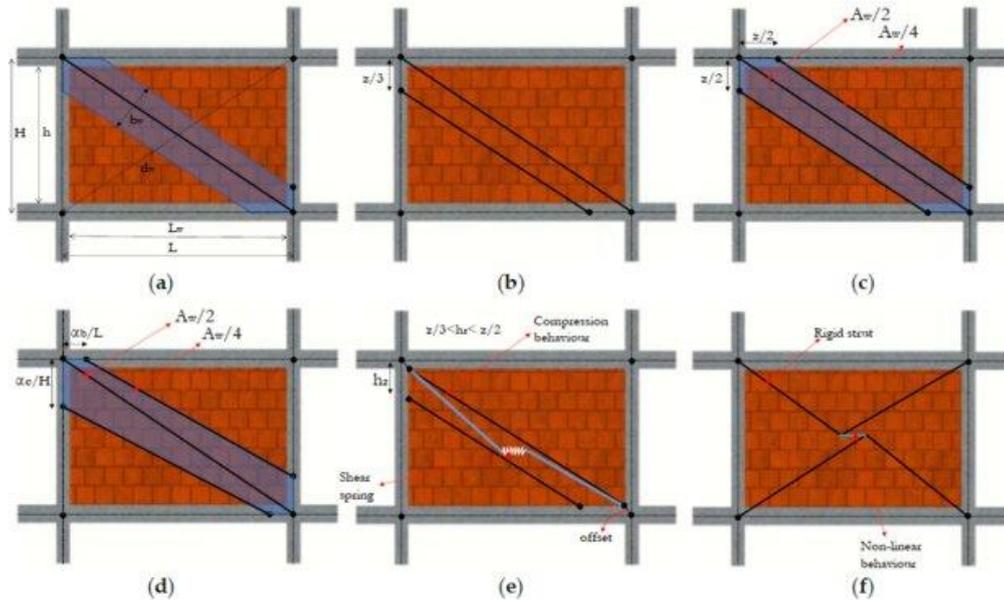


Figura 1.3 – Alcune tipologie di puntone nella macro-modellazione [25]: (a) Holmes [17], (b) Smith B. [23], (c) Chrysostomou et al. [22], (d) El-Dakhkhni et al. [21], (e) Crisafulli [20], (f) Furtado et al. [24]

Un approccio completamente differente da quelli appena esposti è la micro-modellazione in cui ogni elemento del tamponamento è modellato separatamente come elemento continuo, mentre il pannello e il telaio sono collegati attraverso un'interfaccia attritiva che simula lo scorrimento relativo del pannello e l'eventuale distacco. Con questa tecnica di modellazione è possibile cogliere il contributo del pannello murario nei confronti di possibili effetti locali.

Molti autori hanno utilizzato la micro-modellazione nello studio del comportamento dei telai tamponati ([11], [26]–[29]), con diversi gradi di dettaglio (Figura 1.4), come:

- Micro-modellazione dettagliata: è il modello con il più alto grado di dettaglio in cui è modellato ogni elemento della struttura. Infatti, il tamponamento viene costruito riducendo al minimo il livello di semplificazioni arrivando alla modellazione dei giunti di malta e dei mattoni come entità continue e separate.

- Micro-modellazione semplificata: differente dalla prima perchè il giunto di malta viene semplificato in un'interfaccia attritiva che simula il comportamento reale del giunto stesso;
- Meso-modellazione: è una scelta semplificata, in quanto gli elementi della muratura si considerano omogenizzati in un unico pannello avente le proprietà del complesso murario.

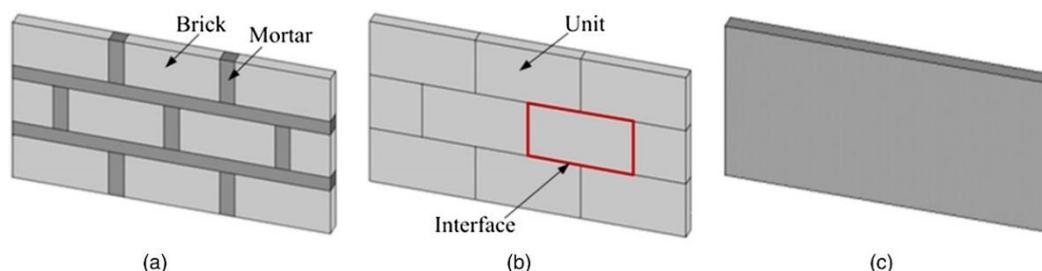


Figura 1.4– (a) Micro-modellazione dettagliata, (b) Micro-modellazione semplificata, (c) Meso-modellazione [30]

Nel contesto descritto, il presente lavoro di tesi si propone di approfondire lo studio degli effetti globali e di interazione locale dei telai in calcestruzzo armato tamponati, con particolare attenzione alla variazione della domanda di taglio all'estremità delle colonne e al collasso ad essa associato. Lo studio si basa su un'analisi numerica con una micro-modellazione dettagliata al fine di migliorare la comprensione della non-linearità del comportamento strutturale. Sono stati utilizzati due campioni provenienti da diverse campagne sperimentali, i quali sono stati modellati attraverso il software *STKO* [31], un'interfaccia grafica per *OpenSees*. I modelli sono stati creati utilizzando elementi 2D con comportamento non lineare, considerando l'interazione tra il telaio e il tamponamento mediante l'uso di un'interfaccia attritiva. Dopo aver confrontato i risultati della simulazione numerica con i dati sperimentali per convalidare i risultati, si svolge un'analisi parametrica per valutare come la risposta globale e la domanda di taglio sono influenzate da alcuni parametri di design del tamponamento in muratura, quali il rapporto di resistenza a compressione tra il mattone e la malta e lo spessore del tamponamento. Nello specifico la domanda di taglio è stata registrata tramite uno script Python fornito da *ASDEA Software Technology*. Questo script consente l'integrazione delle forze nodali in una sezione scelta adiacente all'estremità della colonna. Successivamente è stato costruito un prototipo a scala reale, basato sulla calibrazione e validazione di uno dei provini selezionati dalle campagne sperimentali. Su quest'ultimo sono state svolte le medesime simulazioni numeriche al variare del rapporto di resistenza mattone-malta, al fine di fornire un esempio su scala reale dell'influenza di tali parametri, potenzialmente utili alla progettazione del tamponamento, nella risposta globale e locale del sistema strutturale.

2 Campagne sperimentali di riferimento

Per lo sviluppo della presente tesi sono state individuate nella letteratura scientifica due campagne sperimentali sviluppate rispettivamente da Cavaleri e Di Trapani [32] e Mehrabi e Shing [33].

Nel primo dataset citato [32] sono stati investigati tre telai tamponati con differenti tipologie di muratura, rispettivamente di calcarenite (provino S1A), laterizio (provino S1B) e calcestruzzo alleggerito (provino S1C). Nella seconda campagna di riferimento [33] vengono studiati 12 telai tamponati caratterizzati da un'ampia variazione di caratteristiche meccaniche della muratura.

In particolare, queste due serie di campagne sperimentali sono state scelte per la completezza delle informazioni e la presenza di rotture fragili come le rotture a taglio sulle colonne, dovute all'interazione tra telaio e tamponamento.

Per lo studio numerico successivo, si sono selezionati dalle due sopracitate campagne sperimentali rispettivamente il provino S1B e il provino #8. Nel paragrafo successivo si presentano in dettaglio le caratteristiche geometriche e le proprietà meccaniche dei provini selezionati.

2.1 Descrizione dei provini

2.1.1 Provino S1B

Questo primo provino di riferimento è un telaio tamponato in calcestruzzo armato dove la tamponatura ha una altezza netta di 1600 mm, una larghezza di 1600 mm e presenta uno spessore di 150 mm, con un rapporto di forma tra lunghezza e altezza della muratura pari a 1. In Tabella 2.1 sono riportate le principali caratteristiche del provino preso in esame.

Provino	Materiale unità di muratura	Dimensione colonne	Dimensione trave	Fattore di forma h/l
		[mm]	[mm]	[-]
S1B	Laterizio	200 x 200	200 x 400	1

Tabella 2.1 – Caratteristiche principali del provino S1B - Dataset 1 [32]

L'unità di muratura è in laterizio forato di dimensione 300×150×250 mm (lunghezza × spessore × altezza) con fori disposti verticalmente. La resistenza a compressione media è stata misurata attraverso prove di compressione e risulta essere lungo la direzione parallela ai fori di 37,68 MPa, mentre è di 2,06 MPa lungo la direzione ortogonale.

Allo stesso modo è stata testata la malta che risulta avere una resistenza media a compressione di 9,16 MPa e presenta uno spessore dei giunti orizzontali e verticali di 12 mm. Tutte le caratteristiche dei materiali del pannello, insieme alle prove effettuate sui prismi di muratura, sono sintetizzate nella Tabella 2.2.

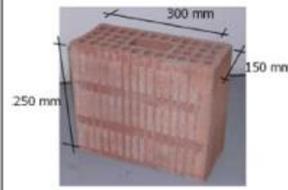
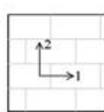
Clay masonry					
S1B	Mortar - $f_m = 9.16$ Units - $f_{bm,v} = 37.68$ $f_{bm,h} = 2.06$	$E_2 = 6401$ $f_m = 8.66$	$E_1 = 5038$ $f_m = 4.18$	$G_{12} = 2547$ $\mu_{12} = 0.07$ $\mu_{21} = 0.09$ $f_{vm} = 1.07$	

Tabella 2.2 – Caratteristiche meccaniche della muratura del provino S1B [24]

Il telaio è stato progettato senza alcun dettaglio costruttivo che segua la normativa sismica, volendo rappresentare una tipica costruzione esistente. Differentemente dal moderno approccio con gerarchia delle resistenze, si progetta una trave “forte” (200 mm x 400 mm) e i pilastri “deboli” (200 mm x 200 mm). Il calcestruzzo ha una resistenza a compressione media di 25 MPa con un modulo elastico di circa 25500 MPa. Le barre di armatura, invece, presentano una resistenza media a trazione di 450 MPa. Nella figura 2.1 si riporta la geometria del telaio e il layout delle barre di armatura.

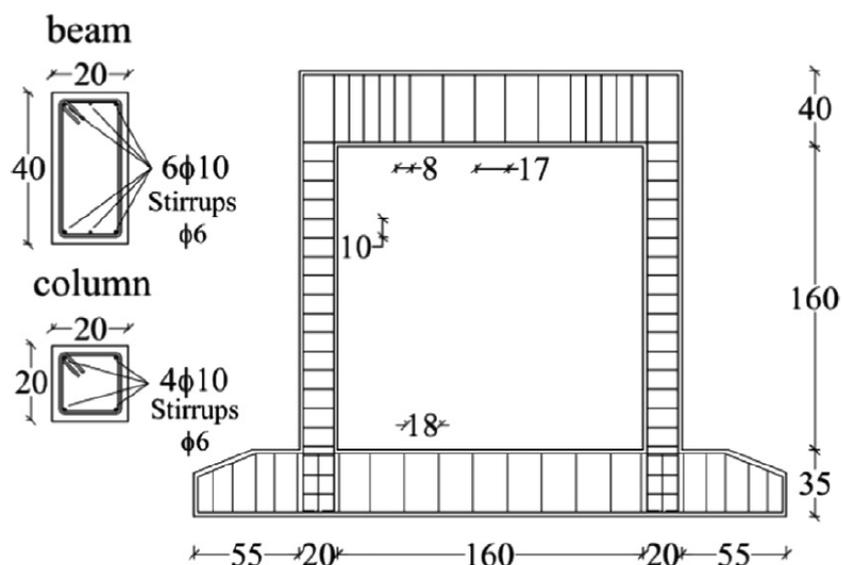


Figura 2.1 - Geometria e layout di armatura del provino S1B (misure in cm) [32]

La prova sperimentale viene condotta applicando prima un carico verticale di 200 kN sulle colonne, mantenuto costante per la fase di prova successiva in cui è applicata l'azione ciclica con un incremento graduale dello spostamento fino a 2,5 % di drift. La strumentazione di prova usata è schematizzata nella Figura 2.2.

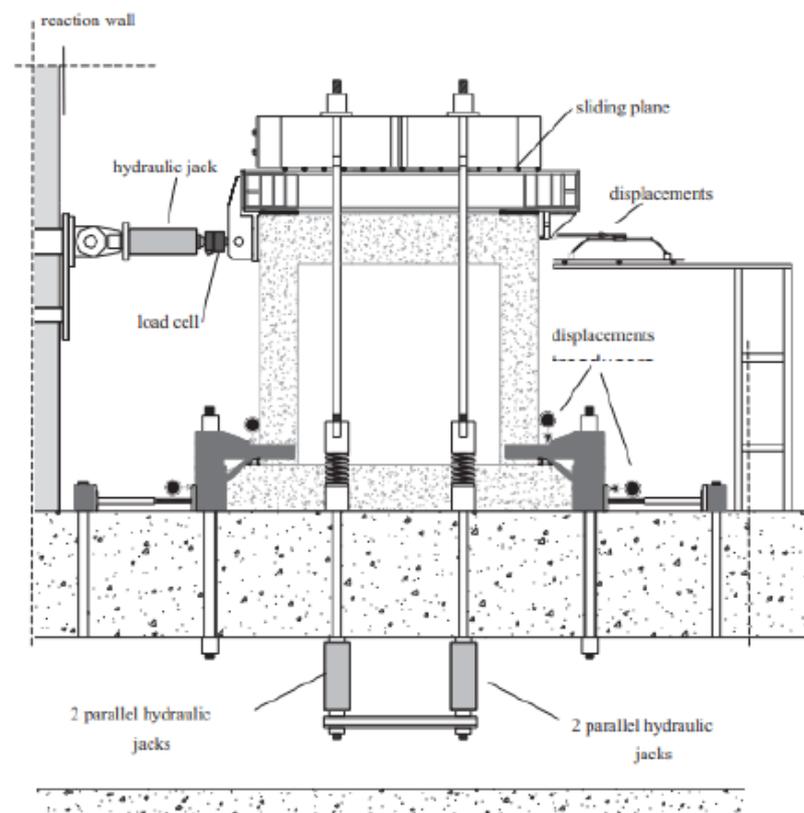


Figura 2.2 – Strumentazione di prova utilizzata [24]

2.1.2 Provino #8

Il provino #8 selezionato dalla campagna sperimentale di Mehrabi et al. [33] ha una altezza netta del pannello in muratura di 1422 mm, una larghezza di 2124 mm e presenta uno spessore di 92 mm, con un rapporto di forma tra altezza e lunghezza pari a 0.67. Di seguito sono riportate le principali caratteristiche del provino in esame (Tabella 2.3).

Provino	Materiale unità di muratura	Dimensione colonne [mm]	Dimensione trave [mm]	Fattore di forma h/l [-]
#8	Laterizio	178 x 178	152 x 229	0.67

Tabella 2.3 – Caratteristiche principali del provino #8 - Dataset 2 [33]

L'unità di muratura è in calcestruzzo forato di dimensione 193×92×92 mm (lunghezza × spessore × altezza) con fori disposti verticalmente (Figura 2.5). La resistenza a compressione media lungo la direzione parallela ai fori risulta essere pari a 16,48 MPa.

Allo stesso modo è stata testata la malta che risulta avere una resistenza media a compressione cilindrica di 15,5 MPa e presenta uno spessore dei giunti orizzontali e verticali di 9,5 mm.

Il telaio in c.a. è un *weak frame* ed è stato progettato secondo le normative americane ACI 318-89 (“Building” 1989) senza alcun criterio sismico, considerando esclusivamente una pressione laterale del vento di 1,24 kPa corrispondente ad una velocità del vento di 44,5 m/s (160 km/h). Il calcestruzzo ha una resistenza a compressione media di 26,8 MPa con un modulo elastico secante (al 45% della resistenza a compressione) di circa 17225 MPa. Le barre di armatura utilizzate sono di diversa tipologia e le loro caratteristiche vengono illustrate nella Tabella 2.4. È bene specificare che il telaio in questione è stato ricavato ripulendo e riparando quello utilizzato nella prova precedente (#4) attraverso delle iniezioni di resina epossidica e utilizzando una pasta cementizia di simili caratteristiche del calcestruzzo da sostituire.

Tutte le caratteristiche dei materiali, insieme alle prove effettuate sui prismi di muratura, sono sintetizzate nelle Tabella 2.5 e Tabella 2.6.

La geometria dettagliata del telaio tamponato viene riportata nelle Figura 2.3, 2.4 e 2.5.

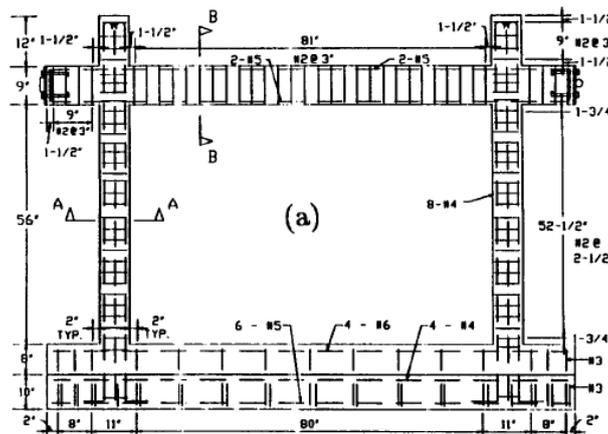


Figura 2.3 - Geometria e layout di armatura del provino #8 (misure in pollici) [33]

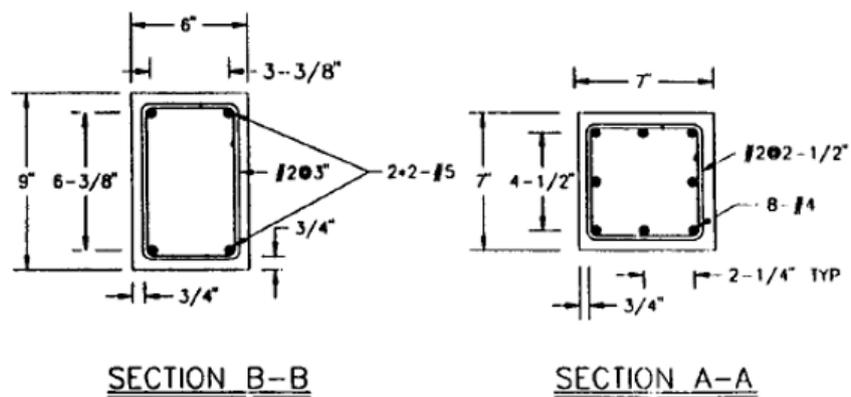


Figura 2.4 – Sezioni di trave e colonna del provino #8 (misure in pollici)[33]

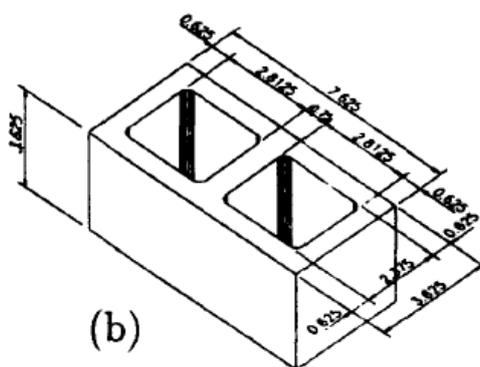


Figura 2.5 – Unità di muratura del provino #8 (misure in pollici)[33]

N. barra	Tipo	Diametro nominale	Tensione di snervamento	Tensione ultima a rottura
		[mm]	[Mpa]	[Mpa]
#2	Liscia	62.5	367.24	449.23
#4	Aderenza migliorata	12.7	420.29	661.44
#5	Aderenza migliorata	15.87	413.40	661.44

Tabella 2.4 – Caratteristiche geometriche e meccaniche delle barre di armatura del provino #8 [33]

# Provino	Modulo secante	Resistenza a compressione	Deformazione al picco	Modulo di rottura	Resistenza a trazione (prova di trazione indiretta)
[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]
#8	17255	26.8	0.0027	4.86	2.76

Tabella 2.5 – Caratteristiche meccaniche del calcestruzzo del provino #8 [33]

# Provino	Prismi di muratura			Resistenza a compressione dei blocchi pieni di muratura	Resistenza a compressione dei cilindri di malta
	Modulo secante	Resistenza a compressione	Deformazione al picco		
[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]
#8	5098.60	4.91	0.0027	16.47	15,50

Tabella 2.6 – Caratteristiche meccaniche della muratura del provino #8 [33]

La prova sperimentale viene condotta applicando prima un carico verticale di 97.9 kN su ogni colonna e sulla trave. Questi carichi vengono mantenuti costanti durante la prova successiva in cui viene applicata un'azione monotonica con un incremento dello spostamento fino al danneggiamento critico della struttura che in questo caso supera i 50 mm. La strumentazione di prova usata è schematizzata nella Figura 2.6 .

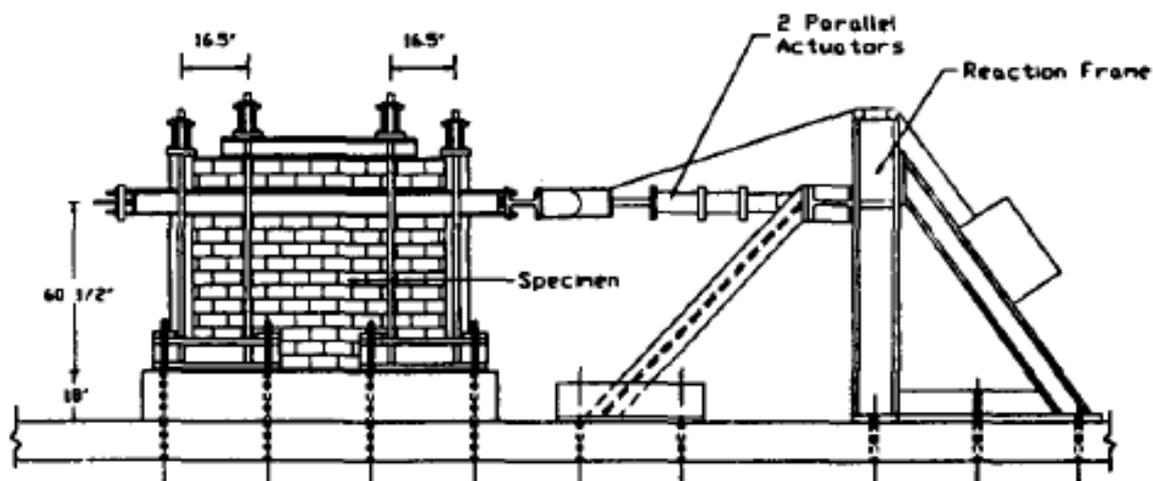


Figura 2.6 - Strumentazione di prova utilizzata [33]

2.2 Risultati delle prove sperimentali

Di seguito vengono riportati i risultati sperimentali ottenuti nelle prove effettuate, completi di analisi IP (in plane) e commenti nei riguardi del danneggiamento nelle varie fasi più significative delle prove.

2.2.1 Provino S1B

Nella Figura 2.7 si riportano i risultati sperimentali relativi ai due test effettuati sul campione S1B. Dopo il picco si osserva una leggera caduta di carico che dimostra una efficace azione di confinamento della muratura da parte del telaio. Si osserva una significativa riduzione della capacità resistente solo dopo 1.8% di drift.

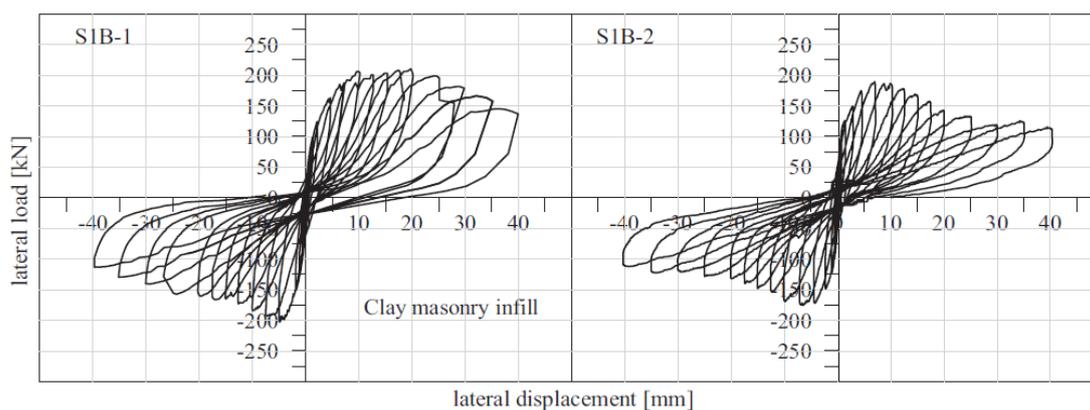


Figura 2.7 – Risposta ciclica forza-spostamento sperimentale del provino S1B[32]

Nei riguardi del danneggiamento della struttura, essa presenta una prima significativa fessurazione diagonale in corrispondenza dei nodi del telaio con propagazione a partire da una porzione della colonna sottostante al nodo (Figura 2.8). Tuttavia, il nodo conserva la sua capacità di trasmettere le sollecitazioni tra i vari elementi costituenti la struttura.



Figura 2.8 – Danneggiamento della colonna e del nodo nel provino S1B [32]

Per maggiori livelli di spostamento si ha una propagazione più evidente delle fessurazioni nella tamponatura accompagnate dalla formazione di crack pseudo-orizzontali a metà altezza delle colonne. I blocchi di muratura sono soggetti a una parziale espulsione di parte di essi, in particolare nelle zone in prossimità delle diagonali del pannello e vicino gli angoli del telaio.

La muratura in mattone di laterizio forato produce un notevole incremento della rigidità rispetto al *bare frame* di 11.4 volte. Questa rigidità viene degradata ad ogni ciclo, principalmente dopo il raggiungimento del picco.

In generale, si può dire che il comportamento globale è abbastanza duttile, sebbene le rotture nei nodi non possano essere considerate tali.



Figura 2.9 – Crack pattern a fine test del provino S1B [32]

2.2.2 Provino #8

La risposta globale al termine dell'analisi è riportata in Figura 2.10, in cui si nota che per il provino #8 si ha una risposta pressoché duttile con una resistenza globale di circa 180 kN.

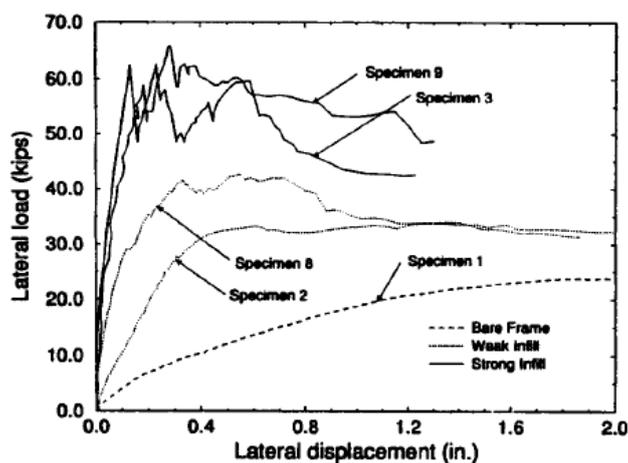


Figura 2.10 – Risposte monotoniche sperimentali forza-spostamento dei provini del Dataset2 (1 in.=2.54 cm; 1 kip=4.45 kN) [33]

Nella campagna sperimentale si segnala che la resistenza all'azione laterale è governata dallo slittamento dei giunti di malta (Figura 2.11). In particolare, nel provino #8, questo fenomeno è quello che produce maggior danno nella struttura, accompagnato anche dalla formazione di fessure diagonali. Si interrompe il test una volta osservato un severo danno del provino che in questo caso risulta essere di 3.1% (circa 44 mm). Per completezza vengono riportati in Tabella 2.8 i valori dei drift misurati per ogni significativa fase del test.

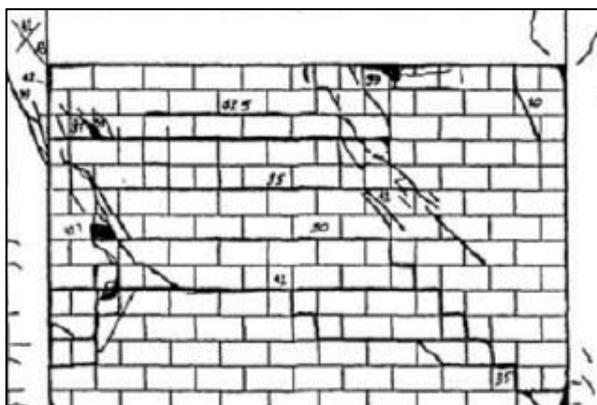


Figura 2.11 - Crack pattern a fine test del provino #8 [33]

ID drift	Fase critica
I	Prima maggiore fessurazione nella muratura
II	Massimo carico laterale
III	Riduzione dell'80% del picco
IV	Maggiore fessurazione a taglio nelle colonne
V	Fessurazione a taglio nei nodi
VI	Slittamento dei giunti di malta
VII	Crushing interno dell'infill
VIII	Crushing agli angoli dell'infill
IX	Snervamento dell'armatura delle colonne
X	Snervamento dell'armatura della trave
XI	Crushing del calcestruzzo delle colonne
XII	Massimo spostamento laterale

Tabella 2.7 – Fasi critiche durante il test [33]

# provino	Drift											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
8	0.2	0.91	1.82	1.98	-	1.49	1.59	1.98	-	-	2.48	3.1

Tabella 2.8 – Livello di drift per ogni fase critica del provino #8 [33]

3 Modellazione numerica

L'obiettivo del presente lavoro di tesi richiede l'implementazione di un modello numerico avanzato e di dettaglio in grado di catturare il comportamento altamente non lineare al fine di studiare gli effetti locali dovuti all'interazione telaio-pannello in muratura delle strutture intelaiate tamponate.

Il software adottato è *OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation)*[34], strumento open source sviluppato dall'Università della California, a Berkeley. Nell'ambito della ricerca è un mezzo molto solido per via delle sue avanzate capacità di risoluzione di problemi lineari e non lineari soprattutto in ramo sismico. Tuttavia, il suo limite è quello di lavorare attraverso un linguaggio di programmazione (*.tcl*). Per tale ragione si è adoperato il software *STKO (Scientific ToolKit for OpenSees)*, un'interfaccia grafica sviluppata da *ASDEA Software Technology* [31]. Esso è dotato di sezioni dedicate al pre- e post-processing, le quali sono progettate per semplificare il processo di modellazione e analisi in *OpenSees*. Il software contiene molte caratteristiche innovative come un'interfaccia di scripting *Python*, strumenti di modellazione CAD e algoritmi di visualizzazione avanzati.

Nelle successive sezioni viene illustrato come viene costruito il modello nella sua interezza, i parametri utilizzati nella calibrazione e la sua validazione.

3.1 Descrizione del modello

La risposta strutturale dei provini selezionati è analizzata nel piano attraverso la realizzazione di un modello 2D che segue la proposta in [35], in cui si discretizzano sia i blocchi di muratura che i giunti di malta attraverso elementi continui, facendo uso di un modello di danneggiamento sia in trazione che in compressione, adatto a riprodurre la risposta non lineare degli elementi costituenti la muratura e il telaio in calcestruzzo. In STKO, il problema bidimensionale è analizzato nel piano x-y.

Sia per il telaio in calcestruzzo che per i componenti in muratura, vengono utilizzati elementi *2D quadrilateral elements*. Le barre di armatura in acciaio sono incorporate negli elementi di calcestruzzo e semplicemente modellate come elementi trave 1D di tipo *force based* con sezione a fibre. L'interazione tra il telaio in calcestruzzo armato e il tamponamento in muratura è implementata utilizzando elementi di contatto di tipo *zero-length elements* con interfacce che consentono la simulazione di una legge attrittiva tra telaio e pannello. Le sezioni successive descriveranno in dettaglio la definizione e la modellazione di ogni elemento.

3.1.1 Tamponamento in muratura

Le unità in muratura e i giunti di malta sono modellati con elementi 2D di tipo *quadrilateral elements* a cui viene assegnata una legge costitutiva non lineare di comportamento a trazione e compressione utilizzando il materiale *DamageTC3D* disponibile in *STKO* [35].

Il legame costitutivo adottato presenta un modello di danneggiamento a due parametri d^+/d^- e definito da un tensore degli sforzi come di seguito [35]:

$$\sigma = (1 - d^+) \bar{\sigma}^+ + (1 - d^-) \bar{\sigma}^- \quad 3.1$$

dove $\bar{\sigma}$ è il tensore degli sforzi elastico, mentre $\bar{\sigma}^+$ e $\bar{\sigma}^-$ sono le componenti positive e negative. Le componenti positive e negative dello sforzo sono influenzate dai parametri di danneggiamento d^+ e d^- . Questi parametri rappresentano l'indice di danneggiamento del calcestruzzo, indicando lo stato di deterioramento del materiale. Quando d^+ e d^- assumono il valore 0, il materiale è considerato integro, mentre quando assumono il valore 1, è completamente danneggiato [35]. I valori di danneggiamento d^+ e d^- sono calcolati utilizzando le leggi che descrivono il comportamento del materiale in trazione e in compressione, rappresentate dalle curve di sforzo-deformazione.

Nel caso della trazione, il comportamento del materiale può essere suddiviso in due fasi principali. Nella prima fase elastica lineare, il materiale viene sollecitato e si deforma elasticamente in modo proporzionale alla forza applicata. Tuttavia, una volta che la resistenza a trazione viene superata, il materiale mostra un comportamento di tipo softening. In questa fase, la resistenza diminuisce all'aumentare della deformazione, fino a quando il materiale si rompe completamente (Figura 3.1)

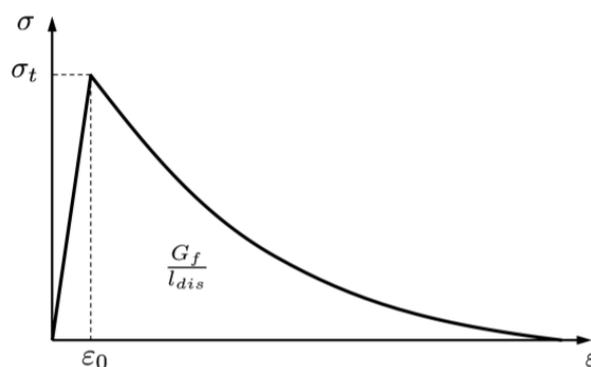


Figura 3.1 - Legge uniassiale a trazione, [35]

Utilizzando la legge esponenziale di softening si ricava l'indice di danneggiamento a trazione d^+ :

$$d^+(r^+) = 1 - \frac{r_0^+}{r^+} \exp\left\{\frac{2H_{dis}(r_0^+ - r^+)}{r_0^+}\right\} \quad 3.2$$

Con:

- H_{dis} parametro di softening;
- r^+ indice di danneggiamento a trazione che considera l'irreversibilità del danno;
- r_0^+ soglia di danno iniziale.

Il comportamento non lineare del materiale è tuttavia dipendente dalla dimensione dell'elemento considerato, ovvero dalla discretizzazione del modello. Di fatti l'energia di frattura totale può essere ricavata dalla seguente relazione:

$$g_f l_{dis} = G_f \quad 3.3$$

essendo G_f l'energia di frattura a trazione, g_f l'energia di frattura specifica per unità di volume e l_{dis} la lunghezza della zona danneggiata che viene considerata equivalente alla lunghezza caratteristica dell'elemento finito ($l_{dis}=l_{ch}$). Da tale relazione si evince che l'energia di frattura dell'elemento è dipendente dalla dimensione dell'elemento e pertanto variando la mesh, l'energia di frattura specifica, ovvero l'energia dissipata dal singolo elemento, viene ricalcolata sulla base della variazione del livello di discretizzazione.

Per ciò che concerne il comportamento a compressione si ha un tratto lineare, uno di hardening e uno di softening, come mostrato in Figura 3.2.

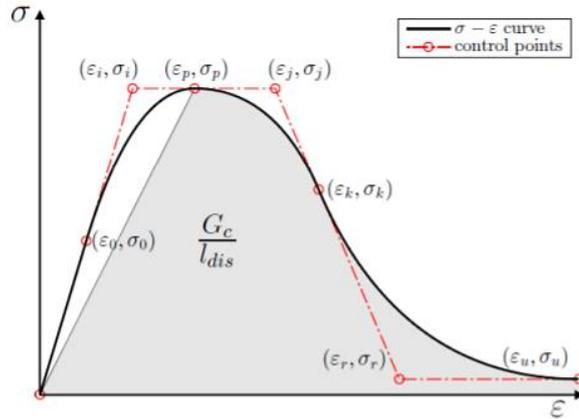


Figura 3.2 - Legge uniassiale a compressione, [35]

Utilizzando la legge uniassiale a compressione si può valutare l'indice di danneggiamento d^- :

$$d^-(r^-) = 1 - \frac{\Sigma(\xi)}{r^-} \quad 3.4$$

Anche in tal caso, è importante considerare come l'energia di frattura sotto compressione dipenda dalla dimensione dell'elemento in questione. Nei problemi discreti, viene utilizzato un valore regolarizzato dell'energia di frattura, che è uguale a G_c/l_{dis} [35].

Il software *STKO* consente l'auto-regolarizzazione dell'energia di frattura in maniera automatizzata, in funzione del livello di discretizzazione del modello in esame. Pertanto, si forniscono come input le energie di frattura a trazione e compressione partendo da valori forniti dalle formulazioni suggerite dal *Fib-Model Code 2010* [36].

$$G_t = 0.073 * f_t^{0.18} \quad 3.5$$

$$G_c = (f_c/f_t)^2 * G_t \quad 3.6$$

Per le unità di muratura forate, avendo due diversi comportamenti meccanici nelle direzioni perpendicolare e parallela ai fori, si utilizza la formulazione proposta da Di Trapani et al. [29-30] in cui si considera la resistenza media del mattone pari a:

$$f_{bm} = \sqrt{f_{b1} * f_{b2}} \quad 3.7$$

dove f_{b1} e f_{b2} sono la resistenza a compressione media sperimentale lungo la direzione parallela e perpendicolare ai fori.

Altri parametri fondamentali come moduli elastici, resistenza a trazione e deformazione al picco sono stati stimati in un intervallo di valori coerenti con le evidenze sperimentali del materiale e successivamente calibrati (Tabella 3.1 e Tabella 3.2).

Provino	E	f_t	f_{c0}	f_{cr}	ε_p
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
S1B	$600f_{cp}$	$0.11f_{cp}$	$0.35f_{cp}$	$0.1f_{cp}$	$2(f_{cp}/E)$
#8	$400f_{cp}$	$0.11f_{cp}$	$0.35f_{cp}$	$0.1f_{cp}$	$1.5(f_{cp}/E)$

Tabella 3.1 - Stima dei parametri meccanici del mattone nei due provini

Provino	E	ν	f_t	f_{c0}	f_{cp}	f_{cr}	G_t	G_c	ε_p
	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[N/mm]	[N/mm]	[-]
S1B	5286	0.15	0.97	3.1	8.81	0.9	0.108	8.93	0.003
#8	5099	0.15	1.18	4.1	11.84	1.2	0.114	11.39	0.003

Tabella 3.2 - Parametri meccanici del mattone nei due provini

Nella Tabella 3.3 e Tabella 3.4 sono riportate invece, la stima dei parametri meccanici sulla base dei dati sperimentali e i valori adottati per i giunti di malta dei due test selezionati.

Provino	E	f_t	f_{c0}	f_{cr}	ε_p
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
S1B	$100f_{cp}$	$0.035f_{cp}$	$0.35f_{cp}$	$0.1f_{cp}$	$2(f_{cp}/E)$
#8	$200f_{cp}$	$0.04f_{cp}$	$0.35f_{cp}$	$0.1f_{cp}$	$3(f_{cp}/E)$

Tabella 3.3 – Stima dei parametri meccanici della malta nei due provini

Provino	E	ν	f_t	f_{c0}	f_{cp}	f_{cr}	G_t	G_c	ε_p
	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[N/mm]	[N/mm]	[-]
S1B	916	0.15	0.32	3.2	9.16	0.9	0.109	88.78	0.02
#8	1602	0.15	0.32	2.6	8.01	0.8	0.106	66.35	0.015

Tabella 3.4 - Parametri meccanici della malta nei due provini

Ai materiali adottati si assegna la funzione *PlaneStress* [37], la quale consente di condensare in una risposta biassiale un qualsiasi elemento con comportamento triassiale. Come elemento si è scelto il *Quad* [38], il quale usa una formulazione isoparametrica bilineare. Nella figura 3.3 si riporta il modello dei pannelli in muratura.

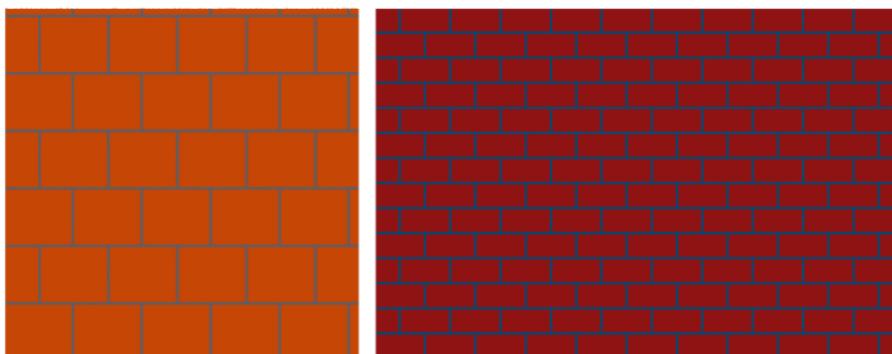


Figura 3.3 – Micro-modello del pannello di muratura (S1B a sinistra e # 8 a destra)

Ogni elemento è poi discretizzato con una mesh a maglie quadrate di dimensioni 20 x 20 mm per entrambi i provini selezionati.

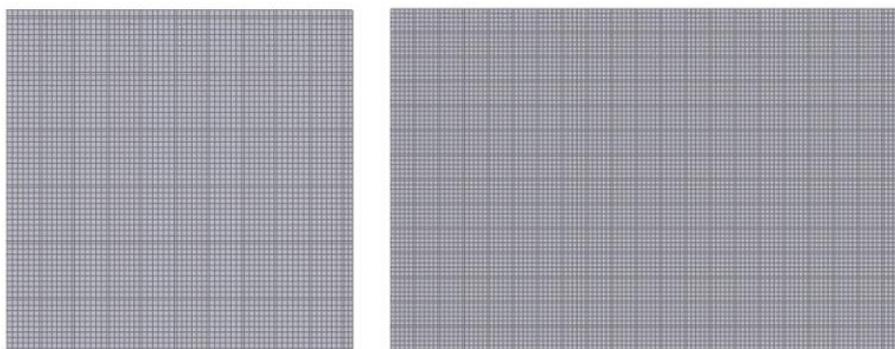


Figura 3.4– Mesh dei pannelli di muratura (S1B a sinistra e #8 a destra)

3.1.2 Telaio in calcestruzzo armato

Il telaio è una struttura che presenta all'interno di esso due diversi materiali che collaborano tra di loro: acciaio e calcestruzzo. Per il frame si utilizzano sempre elementi 2D di tipo *Quadrilateral elements*. La scelta di utilizzare elementi 2D comporta una conversione della disposizione reale delle barre di armatura nello spazio in una equivalente nel piano. Per far ciò si sono calcolati dei diametri equivalenti che tengano conto della distribuzione spaziale nell'elemento trave e colonna (Tabella 3.5 e Tabella 3.6).

Sezione	Tipo	Posizione	Diametro [mm]	Numero	Area [mm ²]	Diametro equivalente [mm]
Colonna	Longitudinale	Superiore	10	2	157.08	14.14
Colonna	Longitudinale	Inferiore	10	2	157.08	14.14
Colonna	Trasversale	-	6	2	56.55	8.49
Trave	Longitudinale	Superiore	10	3	235.62	17.32
Trave	Longitudinale	Inferiore	10	2	235.62	17.32
Trave	Trasversale	-	6	3	56.55	8.49

Tabella 3.5 – Diametri equivalenti delle barre di armature nel provino S1B

Sezione	Tipo	Posizione	Diametro [mm]	Numero	Area [mm ²]	Diametro equivalente [mm]
Colonna	Longitudinale	Superiore	12.70	3	380.03	22.00
Colonna	Longitudinale	Centro	12.70	2	253.35	17.96
Colonna	Longitudinale	Inferiore	12.70	3	380.03	22.00
Colonna	Trasversale	-	6.35	2	63.34	8.98
Trave	Longitudinale	Superiore	15.90	3	397.11	22.49
Trave	Longitudinale	Inferiore	15.90	3	397.11	22.49
Trave	Trasversale	-	6.35	2	63.34	8.98

Tabella 3.6 - Diametri equivalenti delle barre di armature nel provino #8

La modellazione delle barre di armatura avviene attraverso una sezione a fibre [39] in 2D (), dove ad ogni fibra della sezione appartiene un materiale di tipo uniassiale, lo *Steel02* [40]. Esso ha un comportamento elastico-incrudente definito utilizzando i parametri della Tabella 3.7. Dunque, viene creato il *BeamSectionProperty* [41] in cui si definisce il tipo di integrazione (*Lobatto*) e il numero di punti di integrazione, fissati a 3. Viene assegnato, infine un elemento di tipo *forceBeamColumn* [41].

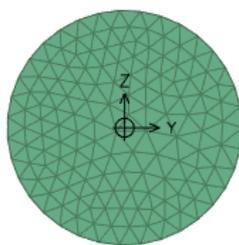


Figura 3.5 – Esempio di sezione a fibre usata nelle barre di armatura

	Fy	R0	CR1	CR2	b	E0
Provino	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[-]	[MPa]
S1B	450	15	0.925	0.15	0.01	210000
#8	420	15	0.925	0.15	0.01	206000

Tabella 3.7 – Parametri acciaio - *Steel02*

Nei riguardi del calcestruzzo si sono utilizzati i medesimi criteri utilizzati nella tamponatura. Tuttavia, il legame costitutivo utilizzato per il telaio è l'*ASDCConcrete3D* [42][43], una versione successiva del già noto *DamageTC3D* presente nella libreria di STKO che, per la sua formulazione intrinseca, riesce a descrivere meglio il comportamento del calcestruzzo e l'anisotropia del suo comportamento. La fondazione, invece, è modellata con un elemento elastico di tipo *ElasticIsotropic* [44], in quanto non ci si aspetta danneggiamento. In figura 3.6. si riporta il modello del telaio in c.a. dei due provini selezionati.

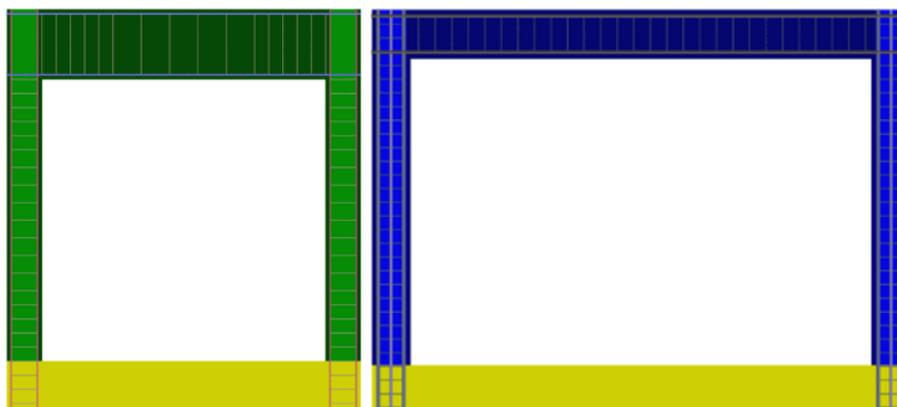


Figura 3.6 – Modello del telaio (S1B a sinistra e #8 a destra)

Nel modello si tiene conto, inoltre, della presenza contemporanea di armatura trasversale e carico verticale sulle colonne, la quale induce un certo livello di confinamento del calcestruzzo. Il modello adottato per la stima dei parametri del calcestruzzo confinato è quello di Mander, Priestley, Park (appendice A) [45]. A tal proposito, al calcestruzzo interno alla gabbia di armatura si sono assegnate le proprietà

del calcestruzzo confinato calcolato con il modello di Mander [45], mentre al calcestruzzo di rivestimento sono assegnate le proprietà meccaniche fornite dalla sperimentazione.

Nella Tabella 3.8 e Tabella 3.9, si riportano i parametri meccanici adottati per il calcestruzzo non confinato e il calcestruzzo confinato.

Provino	E	ν	f_t	f_{c0}	f_{cp}	f_{cr}	G_t	G_c	ϵ_p
	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[N/mm]	[N/mm]	[-]
S1B	25500	0.15	2.75	15	25	5	0.130	10.77	0.002
#8	17225	0.15	2.76	16	26.8	8	0.132	12.42	0.0026

Tabella 3.8 – Parametri meccanici del calcestruzzo non confinato nei due provini

Provino	E	ν	f_t	f_{c0}	f_{cp}	f_{cr}	G_t	G_c	ϵ_p
	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[N/mm]	[N/mm]	[-]
S1B	25500	0.15	2.75	18	32.4	6	0.135	11.13	0.004
#8	17225	0.15	2.76	21	36.2	10.3	0.138	21.3	0.007

Tabella 3.9 - Parametri meccanici del calcestruzzo confinato nei due provini

Per simulare il comportamento delle barre di armatura annegate nel calcestruzzo si utilizza una *node-to-element interaction* che attraverso *ASDEmbeddedNode Element* [46] consente di simulare il vincolo di perfetto annegamento delle barre nella matrice di calcestruzzo, fissando un valore di penalty di 3×10^6 MPa. In figura 3.7 si riporta una rappresentazione del perfetto legame tra barre di armatura e calcestruzzo.

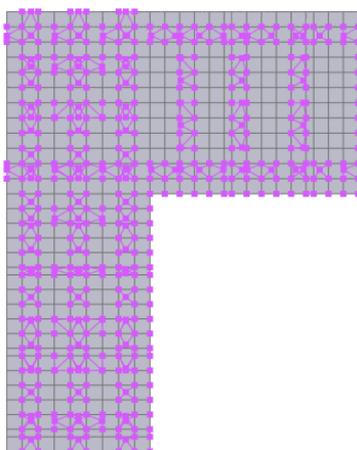


Figura 3.7 – *Embedded elements* - vincolo tra calcestruzzo e barre di armatura

3.1.3 Interfaccia tamponamento – telaio

Il contatto tra telaio e tamponamento influisce in maniera non trascurabile sul comportamento globale e locale della struttura. L'interfaccia è modellata con elementi *zero-lengthContactImplex* che vengono assegnati ad un'interazione node-to-node tra nodi interni del telaio (master nodes) e nodi esterni del pannello (slave nodes) (figura 3.8). La legge è regolata da un comportamento attritivo alla Coulomb e consente di cogliere lo slittamento e il distacco tra pannello e telaio in c.a.. L'elemento di contatto prevede la definizione di parametri come K_n (penalty nella direzione normale) e K_t (penalty nella direzione tangenziale) e μ (coefficiente di attrito), definiti in Tabella 3.10.

Provino	Interfaccia	K_n	K_t	μ
		[N/mm]	[N/mm]	[-]
S1B	Colonna-muratura	1000000	1000000	0.7
S1B	Trave-muratura	1000000	1000000	0.7
#8	Colonna-muratura	100000	10000	0.7
#8	Trave-muratura	10000	10000	0.7

Tabella 3.10 – Parametri delle interfacce telaio-muratura

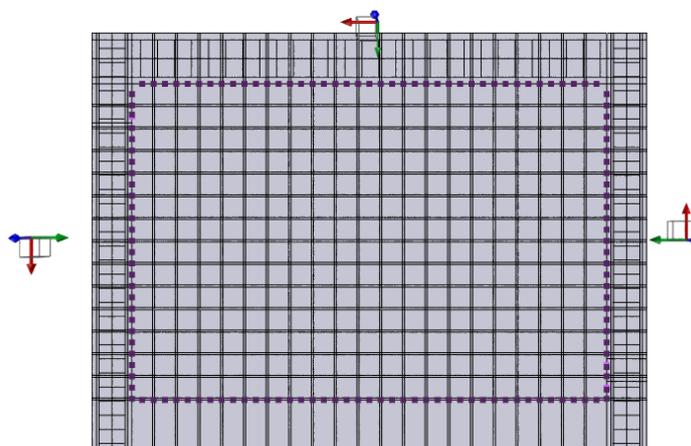


Figura 3.8 – Interaction muratura-telaio e sistemi di riferimento locali (provino #8)

3.1.4 Condizioni di vincolo e di carico

Come descritto in precedenza, le due prove da simulare sono dei test nel piano in cui vengono applicate azioni cicliche (S1B) e monotoniche (#8). Per entrambi i provini si

effettuano delle analisi statiche non lineari, applicando ai modelli numerici un'azione monotonica.

I telai selezionati sono vincolati con un *fix constraint* [47] alla base, in cui sono bloccate le traslazioni nel piano.

Sono poi applicati i carichi verticali sia sulle colonne che sulla trave superiore, assegnati come *EdgeForces* (carichi distribuiti per unità di lunghezza).

Per l'applicazione del carico monotonico orizzontale, invece, essendo una prova a controllo di spostamento, la forza è unitaria e viene attribuita attraverso un *EdgeForce* al bordo sinistro della trave superiore.

Infine, si definisce una *linear TimeSeries* [48], in cui il fattore di carico applicato (unitario) cresce linearmente nel corso degli step di analisi (Figura 3.9).

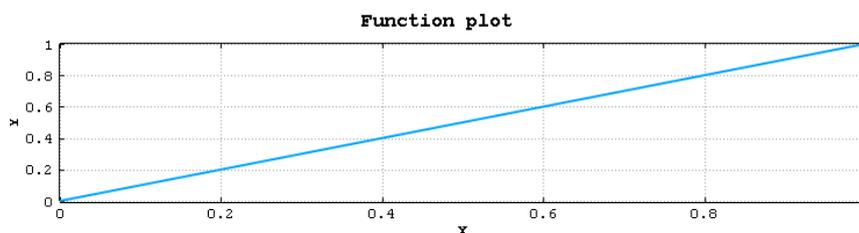


Figura 3.9 – Linear TimeSeries

Nella figura 3.10 è riportato uno schema delle condizioni di vincolo e di carico applicate ai modelli.

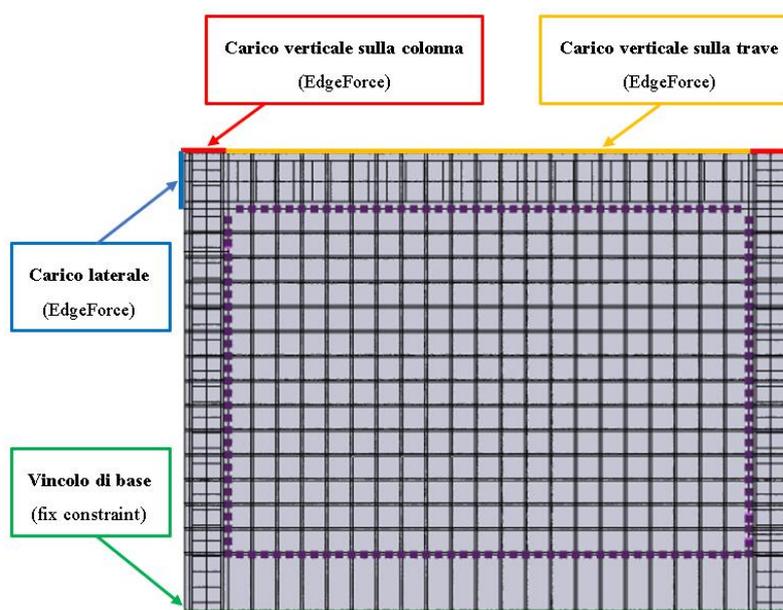


Figura 3.10 – Condizioni di carico e di vincolo (provino #8)

3.1.5 Setting dell'analisi

Dopo aver costruito il modello come descritto nei paragrafi precedenti, sono stati fissati gli step di analisi. In questa fase si definisce un *MPCORRecorder* [49], nel quale si inseriscono i risultati da registrare durante ogni step di analisi. Sono state definite le impostazioni di analisi nella sezione *Analysis Command* riportate in Tabella 3.11.

AnalysisType [50]	Static
Constraints [51]	Transformation Method [52]
Numberer[53]	Parallel Reverse Cuthill-McKee Numberer[54]
System[55]	Mumps
Algorithm[56]	Krylov-Newton[57]
Test[58]	Norm Displacement Increment Test[59]
Integrator[60]	Parallel Displacement Control[61]
	Provino S1B Provino #8
Analyze	Target Displacement History = 40 Target Displacement History = 46 Adaptive Time Step numIncr = 300

Tabella 3.11 – Analysis Command

- *AnalysisType*. Definisce il tipo di analisi da eseguire: *Static* (per analisi di statiche);
- *ConstraintHandler*. Determina come le equazioni di vincolo sono applicate nell'analisi;
- *Numberer*. Utilizzato per costruire il *DOF_Numberer object*, il quale determina come i gradi di libertà sono numerati. Un *Reverse Cuthill-McKee Numberer* [62] usa lo schema inverso *Cuthill-McKee*, un algoritmo che permette di permutare una matrice sparsa simmetrica in una matrice a banda più compatta e quindi più facilmente risolvibile [63];
- *System*. Utilizzato per memorizzare e risolvere il sistema di equazioni nell'analisi. Si adotta *Mumps* per velocizzare le analisi sfruttando più processori logici;
- *Algorithm*. Determina la sequenza di step adottati per risolvere le equazioni non lineari;

- *Test*. Test adottato per determinare la convergenza al termine di un processo di iterazione;
- *Integrator: Parallel Displacement Control*. Determina il controllo di spostamento per un certo grado di libertà di un fissato nodo del modello.
- *Analyze: Adaptive Time Step*. Modifica il passo temporale per consentire di raggiungere la convergenza in analisi altamente non lineari.

Definita la mesh, il modello è stato partizionato in sub-modelli permettendo di effettuare l'analisi in multi cores, riducendo in questo modo l'onere computazionale. Nello specifico, si sono adottate 4 partizioni per il test S1B e 6 partizioni per il test #8 (Figura 3.11 e Figura 3.12).



Figura 3.11 – Modello partizionato: provino S1B

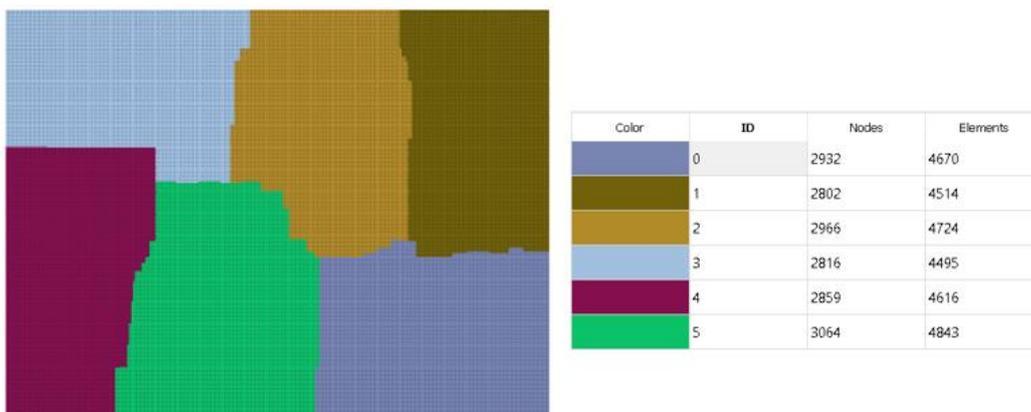


Figura 3.12 – Modello partizionato: provino #8

3.2 Validazione del modello

Di seguito vengono riportati i risultati numerici ottenuti a valle della calibrazione, in cui si fornisce un confronto diretto con le evidenze sperimentali di riferimento sia in termini di curve pushover che in termini di danneggiamento.

3.2.1 Provino S1B

La curva numerica ottenuta nel primo provino presenta una resistenza al picco di poco superiore agli inviluppi sperimentali, ma comunque considerata accettabile. In generale, si può dire che le risposte rispecchiano l'andamento delle curve sperimentali in termini di rigidità, resistenza al picco e fase post-picco.

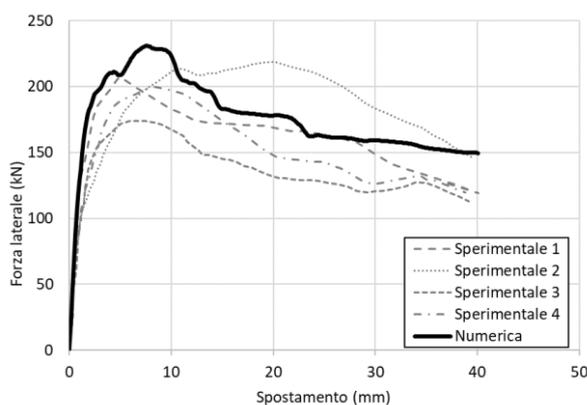


Figura 3.13 – Confronto tra risposta numerica e sperimentale del provino S1B

Confrontando il danneggiamento numerico e quello sperimentale si nota una rottura a taglio diagonale della muratura con sliding dei giunti di malta e rotture dei blocchi di muratura in prossimità degli angoli del pannello. Si evidenziano anche delle fessure propagate nelle colonne adiacenti ai nodi evidenziando una buona aderenza con il crack pattern sperimentale.



Figura 3.14 – Confronto tra danneggiamento numerico e sperimentale del provino S1B

3.2.2 Provino #8

Analizzando la risposta del provino #8 è osservabile anche in questo caso una chiara corrispondenza tra risposta sperimentale e numerica sia in termini di rigidezza che picco di resistenza e fase post-picco.

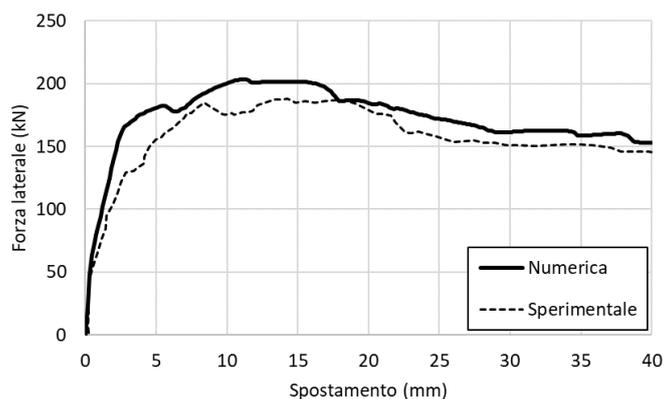


Figura 3.15 - Confronto tra risposta numerica e sperimentale del provino #8

Il risultato è aderente anche in termini di danneggiamento. Confrontando il danno sperimentale e quello numerico si può notare un prevalente scorrimento dei giunti di malta, con parziale fessurazione dei blocchi di muratura vicino gli angoli della tamponatura. Il modello è inoltre in grado di cogliere le fessurazioni a taglio nelle colonne ed eventuali distacchi tra pannello in muratura e telaio in c.a..

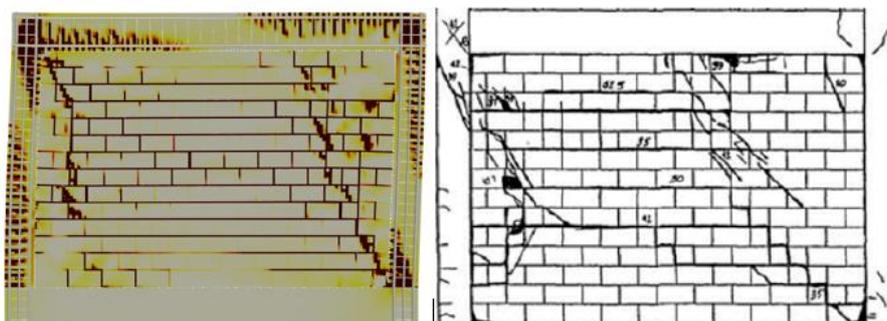


Figura 3.16 - Confronto tra danneggiamento numerico e sperimentale del provino #8

4 Influenza del design del tamponamento nella domanda di taglio

Come specificato nel paragrafo introduttivo di tale lavoro di tesi, l'interazione tra il tamponamento in muratura e il telaio in calcestruzzo armato genera una risposta altamente non lineare. In particolare, durante un evento sismico, il tamponamento in muratura influisce in modo significativo sugli effetti globali e locali della struttura. Pertanto in questo capitolo, verrà analizzato come la variazione dei parametri di design del tamponamento in muratura influiscano nella domanda di taglio registrata alle estremità delle colonne del telaio in c.a.. A tal fine si è condotta un'analisi parametrica valutando gli effetti della variazione nel rapporto tra le resistenze a compressione della mattona e della malta e dello spessore del tamponamento nella risposta globale, nella duttilità del sistema e negli effetti locali, registrando la domanda di taglio alle estremità delle colonne e confrontandola con il taglio resistente della sezione strutturale in esame.

4.1 Analisi parametrica

L'analisi parametrica effettuata rappresenta un approccio metodologico volto a valutare le variazioni delle prestazioni strutturali in relazione a modifiche apportate a uno o più parametri. L'obiettivo fondamentale consiste nell'indagare come queste variazioni incidano sulle risposte della struttura, in termini di sforzi, deformazioni e danneggiamenti.

Nella presente tesi si è valutata la sensibilità della struttura rispetto alle variazioni nei parametri di input con cui è stato calibrato il modello, consentendo una comprensione più approfondita degli aspetti che esercitano un maggiore impatto sulle prestazioni.

È stata analizzata la risposta dei provini S1B e #8 focalizzando prima l'attenzione sull'influenza della variazione della resistenza a compressione della malta (f_m), rapportata con quella del mattone (f_b). Questo rapporto (f_b/f_m) è stato fatto variare da un minimo di 0.7 fino ad un massimo di 5. Di conseguenza, le caratteristiche meccaniche stimate della malta che dipendono dalla resistenza a compressione e riportate nella Tabella 3.3 nel capitolo 3, subiranno anch'esse delle variazioni in linea con i parametri scelti in fase di calibrazione del modello (Tabella 4.3 e Tabella 4.4).

Nelle successive analisi, si è incrementato lo spessore del pannello di muratura fino allo spessore delle colonne. Infine, su tali simulazioni è stato applicato un rapporto $f_b/f_m = 0.7$, al fine di evidenziare eventuali rotture a taglio alle estremità delle colonne dovuto a fenomeni di interazione locali.

Tutte le simulazioni numeriche svolte nell'analisi parametrica sono sintetizzate nella Tabella 4.1 e Tabella 4.2.

Codice	f_b [MPa]	f_m [MPa]	f_b/f_m [-]	spessore [mm]
S1B_0.7_150	8.8	12.57	0.7	150
S1B_0.96_150	8.8	9.16 (originale)	0.96	150
S1B_1.2_150	8.8	7.33	1.2	150
S1B_2_150	8.8	4.40	2	150
S1B_4_150	8.8	2.20	4	150
S1B_5_150	8.8	1.76	5	150
S1B_0.96_200	8.8	9.16 (originale)	0.96	200
S1B_0.7_200	8.8	12.57	0.7	200

Tabella 4.1: Analisi parametrica: provino S1B

Codice	f_b [MPa]	f_m [MPa]	f_b/f_m [-]	spessore [mm]
S8_0.7_92	11.84	16.91	0.7	92
S8_1.2_92	11.84	9.87	1.2	92
S8_1.5_92	11.84	8.01 (originale)	1.5	92
S8_2_92	11.84	5.92	2	92
S8_4_92	11.84	2.96	4	92
S8_5_92	11.84	2.37	5	92
S8_1.5_178	11.84	8.01 (originale)	1.5	177.8
S8_0.7_178	11.84	16.91	0.7	177.8

Tabella 4.2: Analisi parametrica: provino #8

f_b/f_m	E [MPa]	ν [-]	f_t [MPa]	f_{c0} [MPa]	f_{cp} [MPa]	f_{cr} [MPa]	G_t [N/mm]	G_c [N/mm]	ε_p [-]
0.7	1257	0.15	0.440	4.40	12.57	1.26	0.115	93.99	0.02
0.96	916	0.15	0.32	3.2	9.16	0.9	0.109	88.78	0.02
1.2	733	0.15	0.257	2.57	7.33	0.73	0.104	85.29	0.02
2	440	0.15	0.154	1.54	4.40	0.44	0.095	77.81	0.02
4	220	0.15	0.077	0.77	2.20	0.22	0.084	68.68	0.02
5	176	0.15	0.062	0.62	1.76	0.18	0.081	65.97	0.02

Tabella 4.3: Parametri meccanici dei test al variare di f_b/f_m : provino S1B

f_b/f_m	E	ν	f_t	f_{c0}	f_{cp}	f_{cr}	G_t	G_c	ϵ_p
	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[N/mm]	[N/mm]	[-]
0.7	3382	0.15	0.68	5.58	16.91	1.69	0.121	75.90	0.015
1.2	1974	0.15	0.39	3.26	9.87	0.99	0.110	68.89	0.015
1.5	1602	0.15	0.32	2.6	8.01	0.8	0.106	66.35	0.015
2	1184	0.15	0.24	1.95	5.92	0.59	0.101	62.84	0.015
4	592	0.15	0.12	0.98	2.96	0.30	0.089	55.47	0.015
5	474	0.15	0.09	0.78	2.37	0.24	0.085	53.29	0.015

Tabella 4.4: Parametri meccanici dei test al variare di f_b/f_m : provino #8

4.2 Modalità di registrazione della domanda di taglio

La registrazione della sollecitazione di taglio all'interno delle colonne è stata effettuata estrapolando e integrando le forze interne nella sezione di estremità (*section cut*) in ciascuna colonna (Figura 4.1 e Figura 4.2). Nei casi in analisi, le zone più sollecitate sono la sezione superiore della colonna di sinistra e quella inferiore della colonna di destra a causa dell'incremento della domanda di taglio dovuta all'interazione telaio-tamponamento. Nello specifico, si è tenuto conto della presenza di eventuali effetti di bordo generati dalla trave superiore e quella di fondazione, pertanto le sezioni in cui si è effettuata la registrazione sono sufficientemente lontane dalle sezioni di bordo.

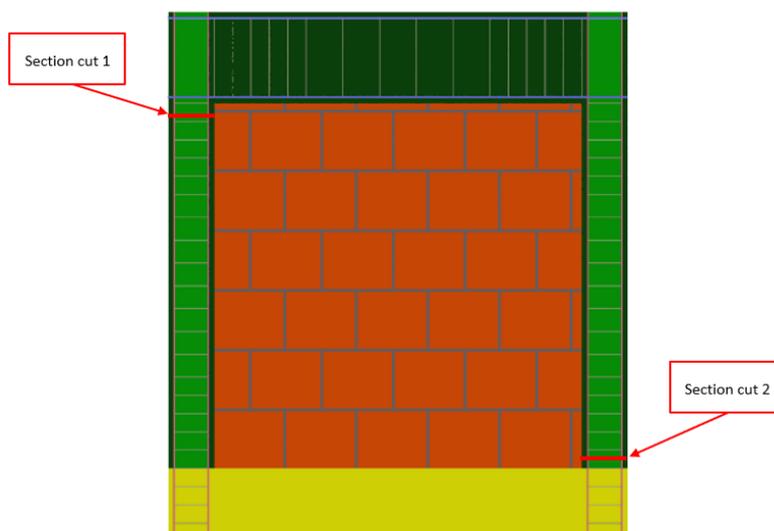


Figura 4.1 : *Section cut* nel provino S1B

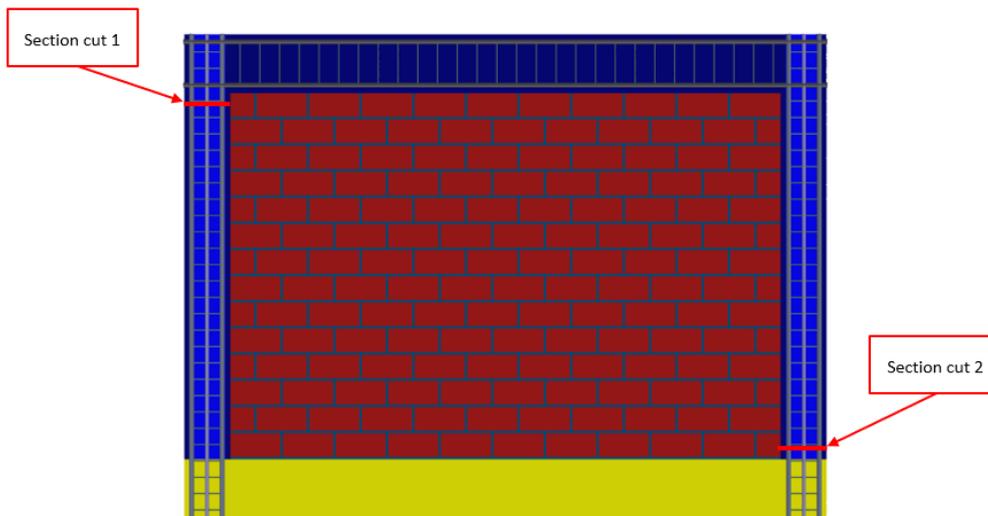


Figura 4.2 : *Section cut* nel provino #8

Nello specifico la registrazione della domanda di taglio è avvenuta attraverso l'impiego di uno script Python fornito da *ASDEA Software Technology* (appendice B), permettendo di ottenere i valori delle sollecitazioni attraverso l'integrazione delle forze nodali. Tale procedura richiede la specifica di due nodi, che determinano un segmento su cui viene eseguita l'integrazione. Successivamente, su questo segmento viene fissato un sistema di riferimento locale, orientato come illustrato nella Figura 4.3, attraverso il quale lo script estrae la domanda di taglio per ogni incremento di spostamento, consentendo di osservare l'evoluzione nel corso dell'analisi.

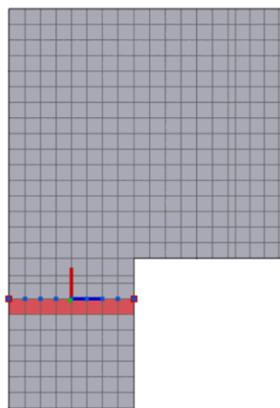


Figura 4.3 : Sistema di riferimento locale in corrispondenza della *section cut*

4.3 Risultati dell'analisi parametrica

In questo paragrafo, sono presentati i risultati ottenuti attraverso i test numerici sviluppati nell'analisi parametrica in cui si confrontano le risposte globali in termini di resistenza e duttilità del sistema e gli effetti locali sul telaio in c.a. in termini di domanda di taglio, danneggiamento locale. I valori di domanda di taglio sono stati successivamente confrontati con il valore di taglio resistente, utilizzando le formulazioni di *Biskinis* (Eurocodice 8 – parte 3 [64]) e *Sezen e Moehle* [65] (appendice C).

4.3.1 Variazione del rapporto f_b/f_m nel provino S1B

Come riportato nel paragrafo precedente dapprima si è valutata l'influenza del rapporto f_b/f_m nella risposta globale e locale dei provini selezionati per la calibrazione e validazione (provini S1B e #8). Analizzando i risultati derivanti dalla variazione di questo rapporto nel campione S1B (Figura 4.4), emerge che riducendo il rapporto f_b/f_m e, di conseguenza, impiegando una malta meno resistente rispetto al campione originale, si osserva una diminuzione del picco di resistenza complessiva. Questo è accompagnato da un aumento della duttilità del sistema. È importante notare che, nonostante ciò, si garantisce comunque un raddoppio della resistenza complessiva rispetto a quella fornita esclusivamente dal telaio non tamponato (*bare frame*).

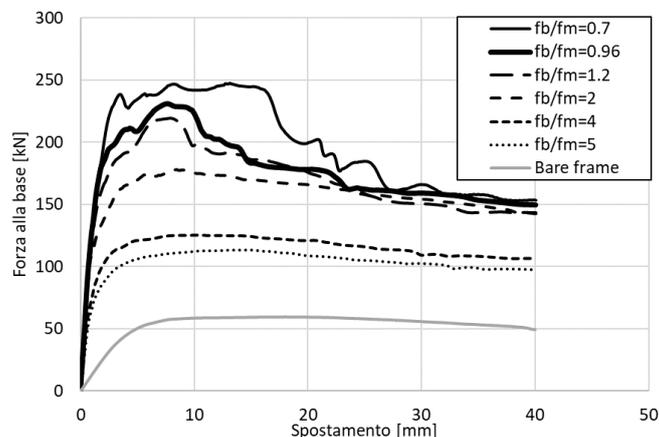


Figura 4.4 - Provino S1B: curve pushover al variare del rapporto f_b/f_m

Dall'analisi del test S1B_0.7_150 (

Figura 4.4), si osserva come una riduzione del rapporto f_b/f_m , e quindi un conseguente aumento della resistenza massima a compressione del materiale, comporta un

innalzamento del picco di resistenza nella risposta complessiva. In particolare, una differenza di 3.41 MPa tra le due tipologie di malta ha determinato un incremento di circa 20 kN nel picco di resistenza (+9%). La rigidezza del tratto elastico è rimasta invariata, mentre nel post picco si ha una fase softening simile alla curva numerica con malta originale, sebbene con un ritardo nella sua manifestazione. Al contrario, riducendo la resistenza a compressione della malta e, dunque anche le sue proprietà meccaniche e di resistenza, si osserva una diminuzione sostanziale della resistenza di picco. Come evidenziato nel test S1B_5_150, con una riduzione di 7.4 MPa della resistenza a compressione della malta si presenta un picco di resistenza a 110 kN rispetto ai 230 kN del test originale (-48%). Questo, come riportato precedentemente ha evidenziato un progressivo passaggio da una risposta fragile ad una duttile. La resistenza residua è rimasta pressoché costante nell'intervallo di valori f_b/f_m compreso tra 0.7 e 2.

Successivamente è stata registrata la domanda di taglio alle estremità delle colonne del provino, interessate da un incremento di domanda dovuto all'interazione locale tra telaio e tamponatura. Analizzando la domanda di taglio nella colonna di sinistra e destra (Figura 4.5), si nota chiaramente una sua riduzione all'aumentare del rapporto f_b/f_m . La domanda di taglio è stata poi confrontata con il taglio resistente fornito dalle formulazioni di *Biskinis* e *Sezen e Moehle*. Da tale confronto si evidenzia come effettivamente per la colonna di sinistra, non sia stata superata in alcun caso la resistenza a taglio della sezione a meno del provino S1B_0.7_150 in cui si supera la resistenza a taglio nel caso in cui questa sia calcolata con la formulazione di *Biskinis*. La colonna di destra, invece, presenta una domanda di taglio notevolmente superiore. Nel caso in cui il rapporto f_b/f_m sia pari a 0.7 si verifica un superamento di circa 40 kN del taglio resistente. Di conseguenza, è plausibile prevedere che in tali sezioni si possa essere verificata una rottura a taglio. D'altra parte, solo con rapporti f_b/f_m superiori a 1.2 si hanno sezioni in cui non si supera la resistenza a taglio.

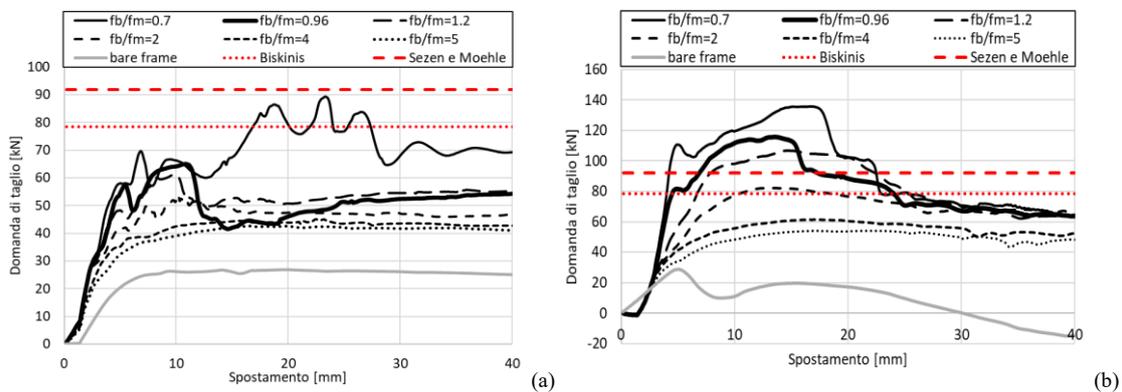


Figura 4.5: Provino S1B - domanda di taglio al variare del rapporto f_b/f_m : (a) colonna sinistra (b) colonna destra

In Figura 4.6 e Figura 4.7 sono riportati, rispettivamente, i danneggiamenti e le distorsioni angolari al collasso, che rivelano effettivamente pronunciate fessurazioni di taglio e rilevanti scorrimenti angolari.

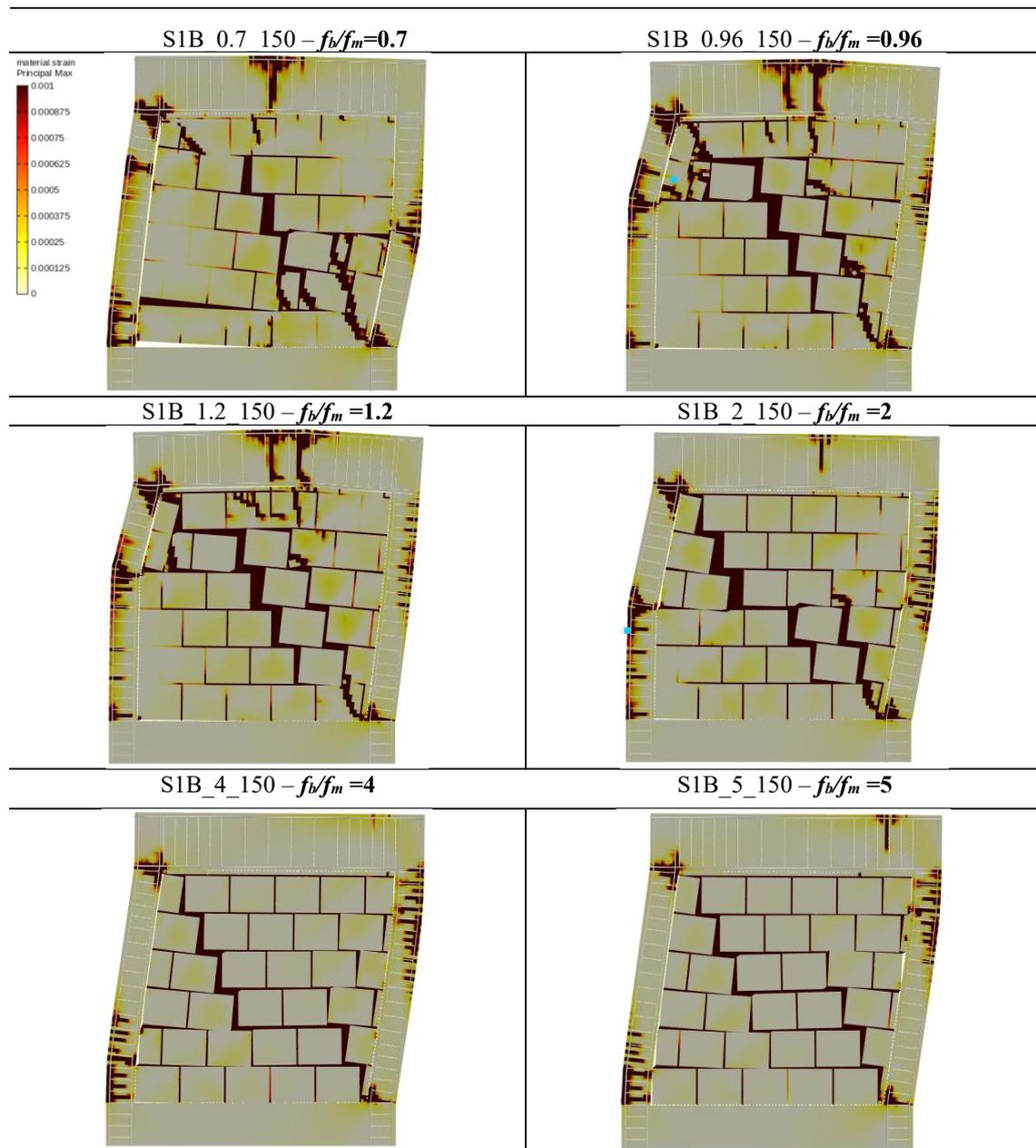


Figura 4.6: Provino S1B: danneggiamento al variare del rapporto f_b/f_m

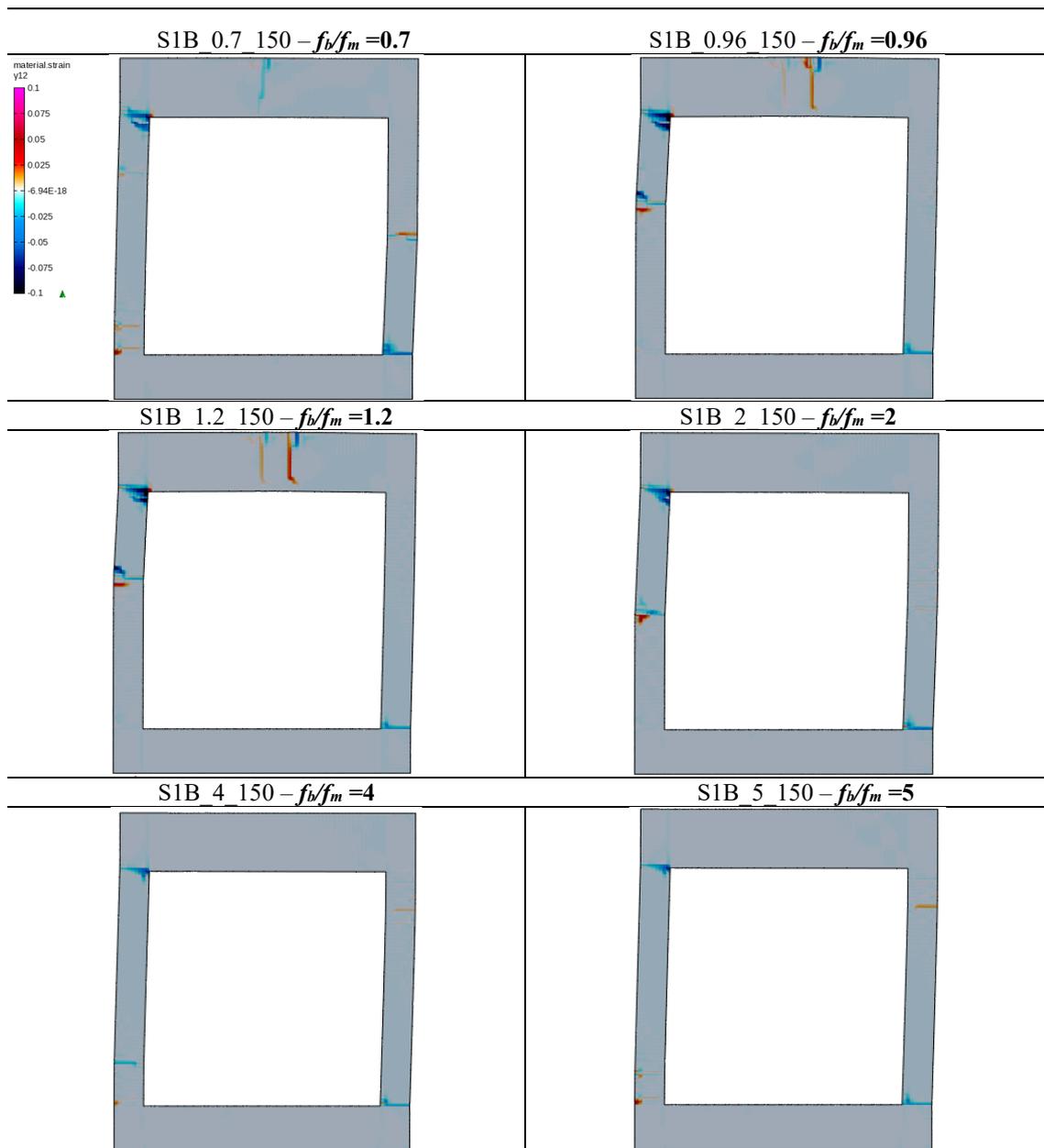


Figura 4.7: Provino S1B: distorsioni al variare del rapporto f_b/f_m

4.3.2 Variazione del rapporto f_b/f_m nel provino #8

Simili considerazioni sono state raggiunte analizzando i risultati ottenuti sul provino #8 (Figura 4.8). Nei due test in cui si ha una maggiore resistenza a compressione della malta rispetto l'originale si verifica un innalzamento del picco di resistenza nella risposta globale. Nel caso del test S8_0.7_92, raddoppiando la resistenza della malta, si individua un incremento del picco di circa 180 kN (+90%) anticipato da 0.8% a 0.3% di

drift con una risposta post-picco notevolmente più fragile. Nei test con rapporti alti di f_b/f_m si possono riscontrare le medesime valutazioni fatte per il provino S1B, con una risposta post picco quasi perfettamente plastica. D'altra parte, la resistenza residua rimane pressoché costante per tutte le simulazioni.

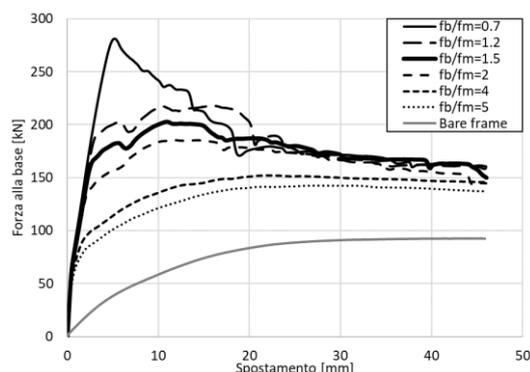


Figura 4.8: Provino #8: curve pushover al variare del rapporto f_b/f_m

Anche in tal caso si è registrata la domanda di taglio alle estremità delle colonne confrontandola con i valori di taglio resistente (Figura 4.9). Nello specifico, nella colonna sinistra (Figura 4.8), solo il test S8_0.7_92 supera la resistenza a taglio calcolata con la formulazione di *Sezen e Moehle*. Nello stesso campione nella colonna di destra (Figura 4.9 b), invece, si ha un netto superamento del taglio resistente di Biskinis, mentre nei campioni con rapporto f_b/f_m tra 1.2 e 2 la domanda di taglio supera la resistenza a taglio calcolata con la formulazione di *Sezen e Moehle*. Per rapporti superiori le sezioni di estremità presentano una domanda di taglio inferiore alla resistenza a taglio calcolata. Nelle deformate, la rottura a taglio è meno evidente rispetto alle analisi del provino S1B, mentre nelle figure che mostrano gli scorrimenti angolari, emergono notevoli distorsioni che giustificano il superamento della resistenza a taglio in quelle specifiche sezioni.

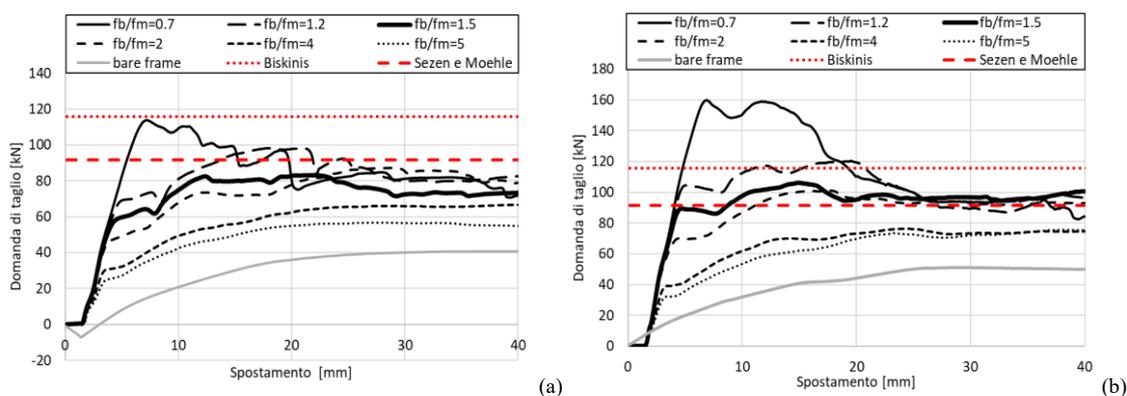


Figura 4.9: Provino #8 - domanda di taglio al variare del rapporto f_b/f_m : (a) colonna sinistra (b) colonna destra

In Figura 4.10 e Figura 4.11 sono riportati, rispettivamente, i danneggiamenti e le distorsioni angolari al collasso, che rivelano effettivamente pronunciate fessurazioni di taglio e rilevanti scorrimenti angolari.

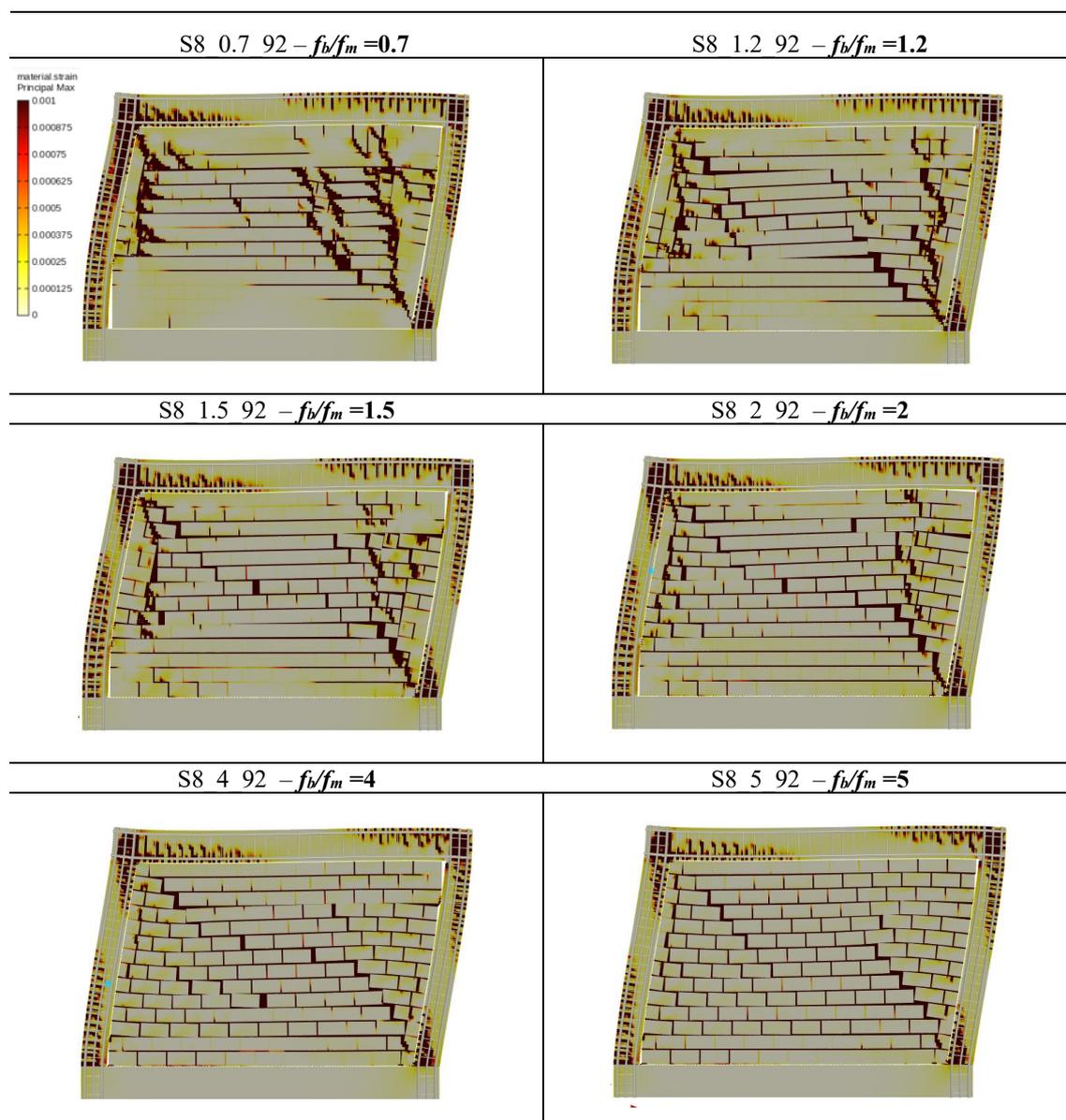


Figura 4.10: Provino #8: danneggiamento al variare del rapporto f_b/f_m

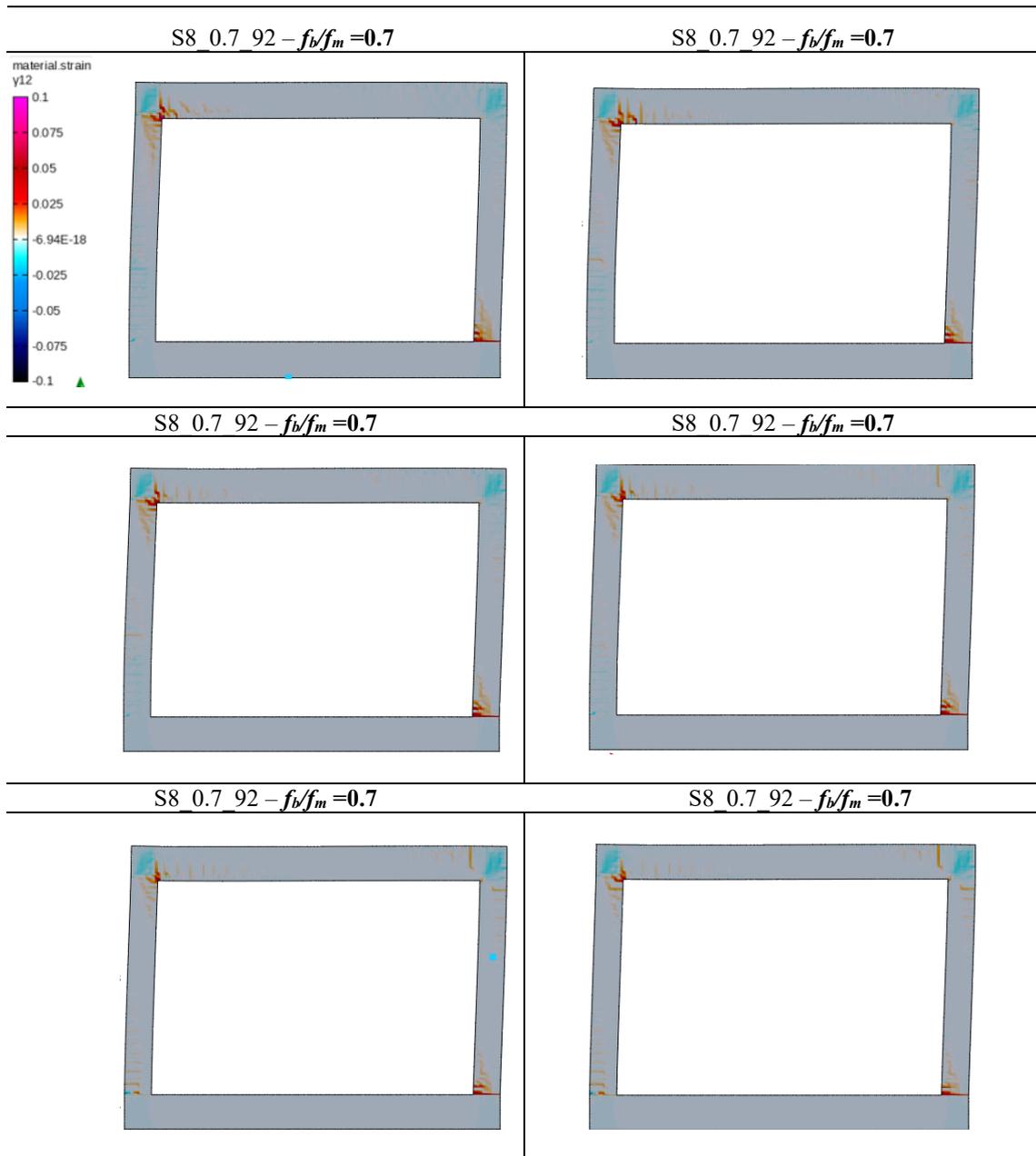


Figura 4.11: Provino #8: distorsioni al variare del rapporto f_b/f_m

4.3.3 Variazione dello spessore della muratura nel provino S1B

Un altro parametro di design della muratura è lo spessore del tamponamento, nel seguente paragrafo si riportano i risultati relativi alla simulazione numerica in cui si incrementa lo spessore del tamponamento fino allo spessore delle colonne e si confronta con i risultati numerici ottenuti sul campione originale [33], in termini di effetti globali e locali.

I campioni numerici sono stati testati prima con il rapporto f_b/f_m originale e poi con il valore minimo ($f_b/f_m = 0.7$), al fine di catturare eventuali rotture a taglio negli elementi strutturali.

Nel caso del provino S1B_0.96_200 (Figura 4.12), lo spessore della muratura è stato incrementato di un terzo rispetto al valore originale, portandolo da 150 mm a 200 mm (+33%). È evidente che uno spessore maggiore genera un aumento della resistenza globale. Inoltre, si verifica anche un aumento della rigidità iniziale, seppur limitato.

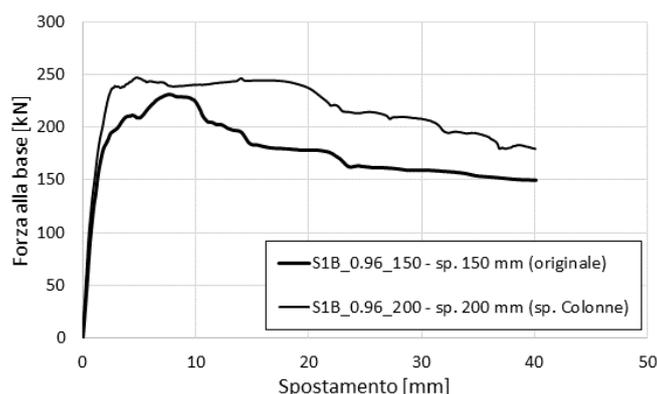


Figura 4.12: Provino S1B: confronto delle curve pushover al variare dello spessore della muratura

Nell'analisi della domanda di taglio nelle sezioni delle colonne adiacenti ai nodi (Figura 4.13), si osserva un incremento medio della domanda di taglio di circa 20 kN in entrambe le colonne. Nella colonna di sinistra non si verifica un superamento del taglio resistente, mentre nella colonna di destra, l'aumento ulteriore della domanda rispetto alla capacità genera un marcato aumento delle distorsioni nella sezione analizzata e un superamento della resistenza a taglio della sezione.

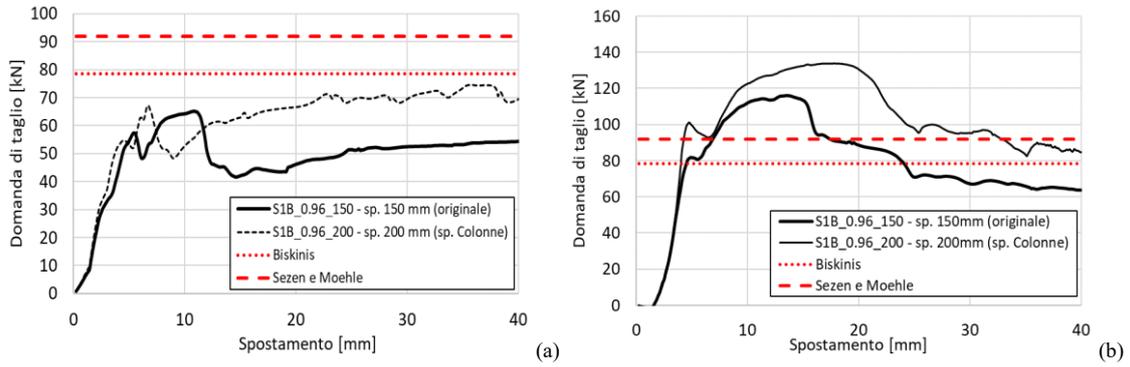


Figura 4.13: Provino S1B - domanda di taglio al variare dello spessore della muratura: (a) colonna di sinistra (b) colonna di destra

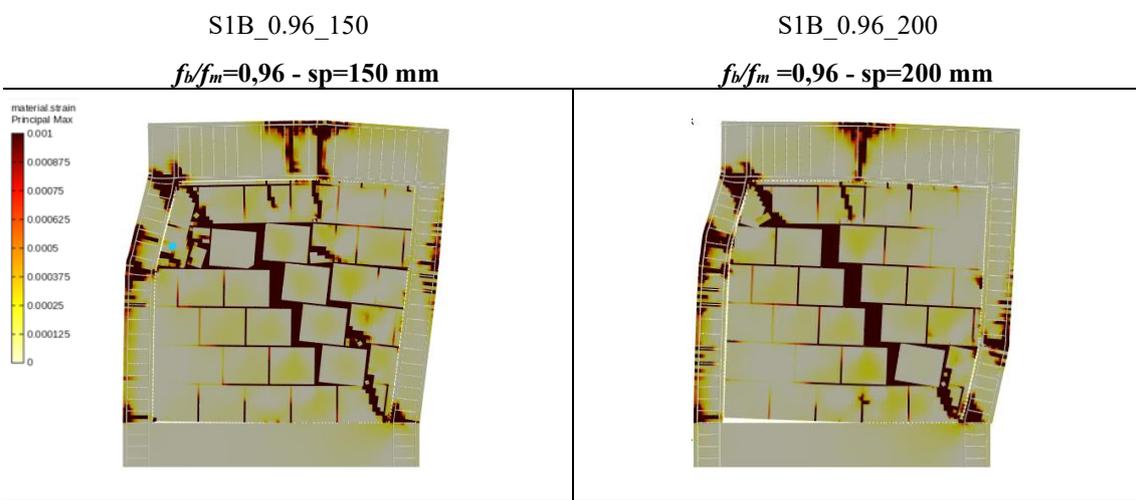


Figura 4.14: Provino S1B: danneggiamento al variare dello spessore della muratura

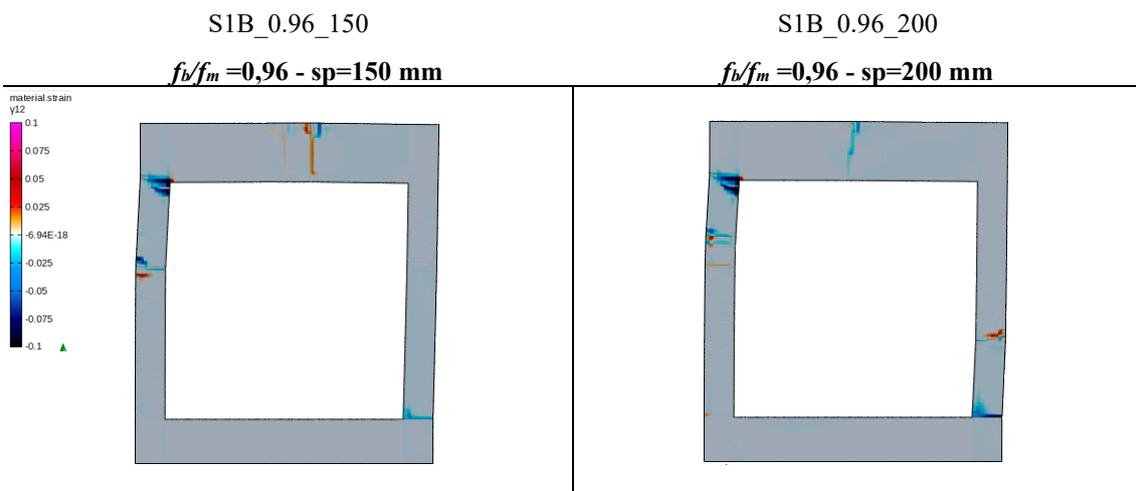


Figura 4.15: Provino S1B: distorsioni nel telaio al variare dello spessore della muratura

In seguito, è stata effettuata un confronto tra i due campioni numerici che presentavano variazioni negli spessori e rapporto f_b/f_m originale (0.96), utilizzando il rapporto f_b/f_m più basso (0.7). Come evidenziato in Figura 4.16 l'effetto sulla risposta globale del campione con spessore maggiore si amplifica se a questo si associa un rapporto f_b/f_m più basso. Dal confronto effettuato emerge come siano replicabili le considerazioni fatte nel caso precedente in cui la resistenza della malta era mantenuta nel suo valore originale. za della malta originale e spessore aumentato. Infatti, gli effetti dovuti all'aumento dello spessore sono simili, con una differenza della resistenza al picco di circa 50 kN (+20%).

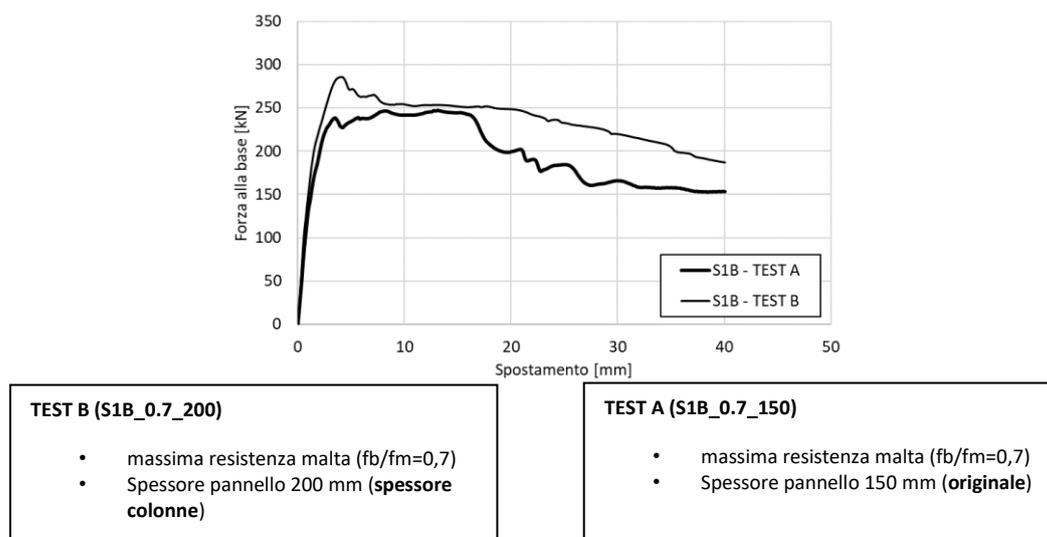


Figura 4.16: Provino S1B: curve pushover al variare dello spessore della muratura con rapporto f_b/f_m minimo

Anche la domanda di taglio nelle due colonne aumenta proporzionalmente, evidenziando come il taglio massimo assoluto raggiunto rimane pressoché invariato in entrambe le colonne (Figura 4.17). Il superamento del taglio resistente viene individuato con la formulazione di Biskinis nel caso della colonna di sinistra mentre nella colonna di destra si ha un notevole superamento della resistenza a taglio, con evidenti aumenti delle fessurazioni di taglio e scorrimenti angolari.

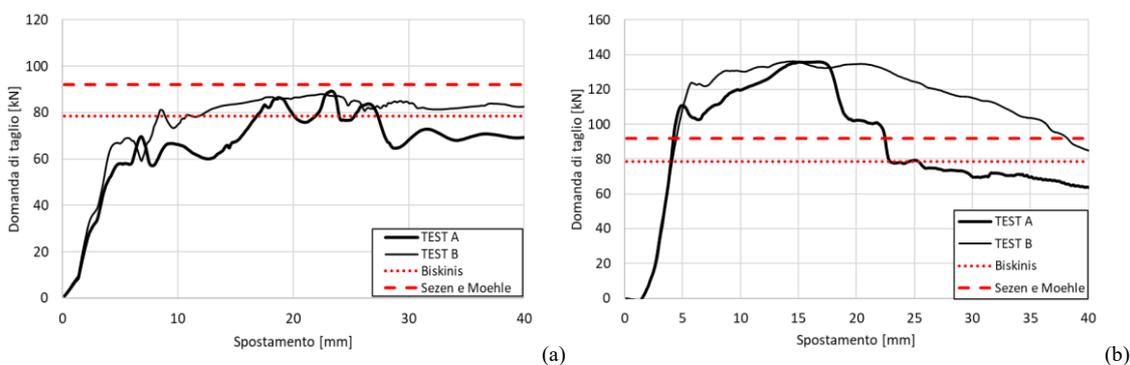


Figura 4.17: Provino S1B - domanda di taglio al variare dello spessore della muratura con rapporto f_b/f_m minino: (a) colonna sinistra (b) colonna destra

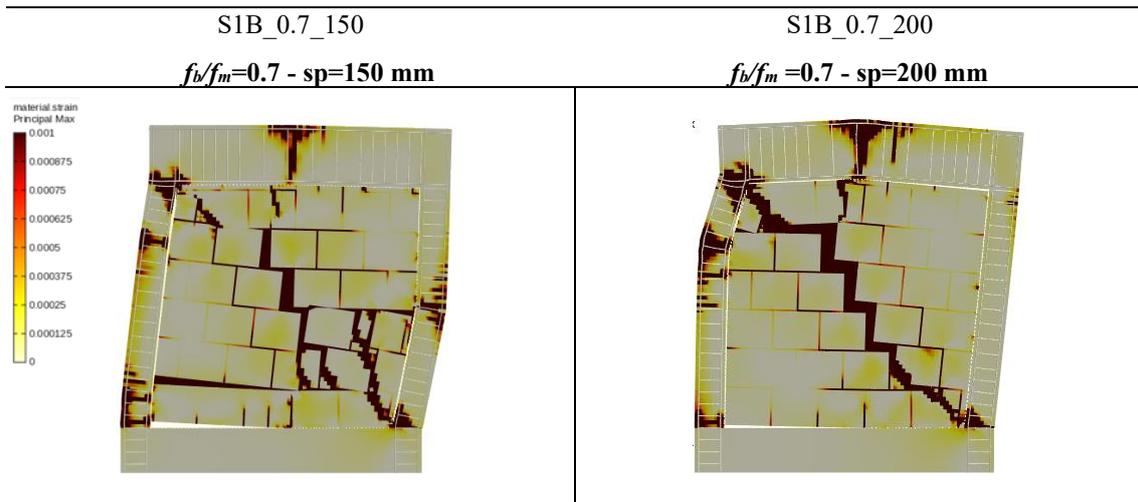


Figura 4.18: Provino S1B: danneggiamento al variare dello spessore della muratura con rapporto f_b/f_m minimo

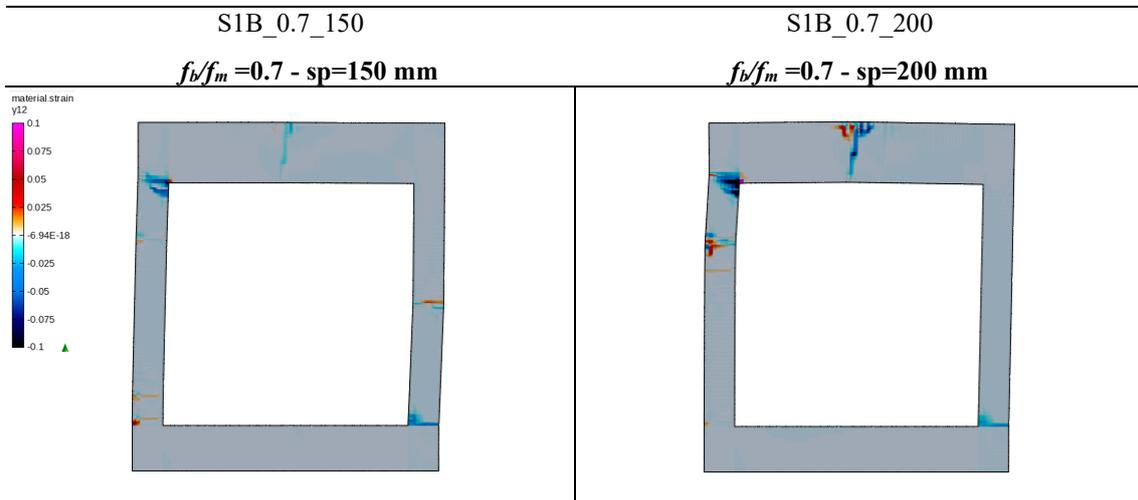


Figura 4.19: Provino S1B: distorsioni nel telaio al variare dello spessore della muratura con rapporto f_b/f_m minimo

4.3.4 Variazione dello spessore della muratura nel provino #8

Nel caso del provino S8_1.5_178 (Figura 4.20), lo spessore del pannello è stato quasi raddoppiato rispetto allo spessore iniziale (+97%), raggiungendo i 177.8 mm rispetto ai 92 mm di spessore iniziale mantenendo il rapporto f_b/f_m originale (1.5). A differenza del test S1B_0.96_200, in cui si aveva un aumento dello spessore del 33%, in questo caso gli effetti dell'incremento di spessore sono più evidenti. Nelle analisi pushover, si ha una differenza di resistenza al picco di circa 75 kN (+37%) con un incremento della rigidezza iniziale.

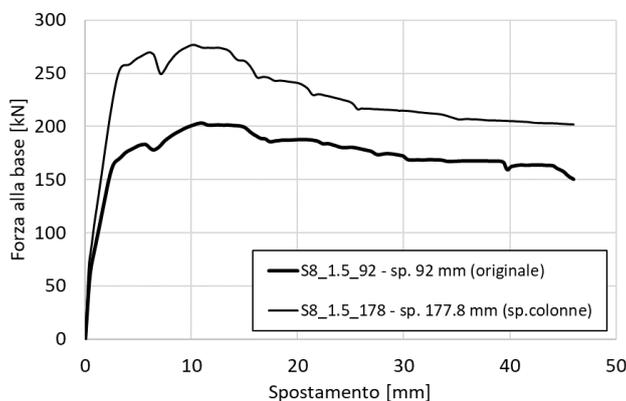


Figura 4.20 : Provino #8: confronto delle curve pushover al variare dello spessore della muratura

Per quanto riguarda la domanda di taglio, con l'aumento dello spessore del pannello, si registra una domanda di taglio maggiore, con un incremento più significativo nella sezione della colonna di destra (Figura 4.21 b e Figura 4.21 b), di 50 kN (+48%), dove si supera il taglio resistente. Nella colonna di sinistra (Figura 4.21 a), l'incremento è meno marcato e quindi la domanda risulta comunque inferiore alla capacità.

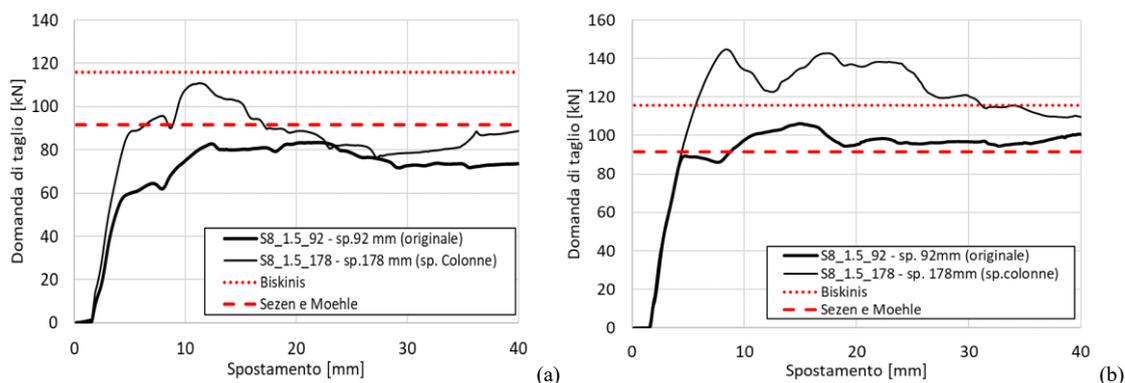


Figura 4.21: Provino #8 - domanda di taglio al variare dello spessore della muratura: (a) colonna sinistra (b) colonna destra

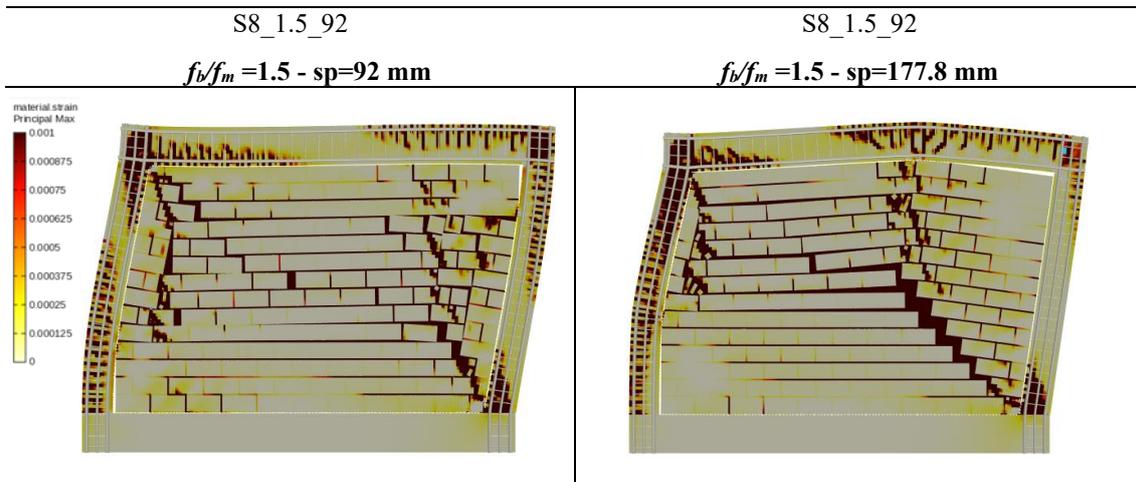


Figura 4.22: Provino #8: danneggiamento al variare dello spessore della muratura

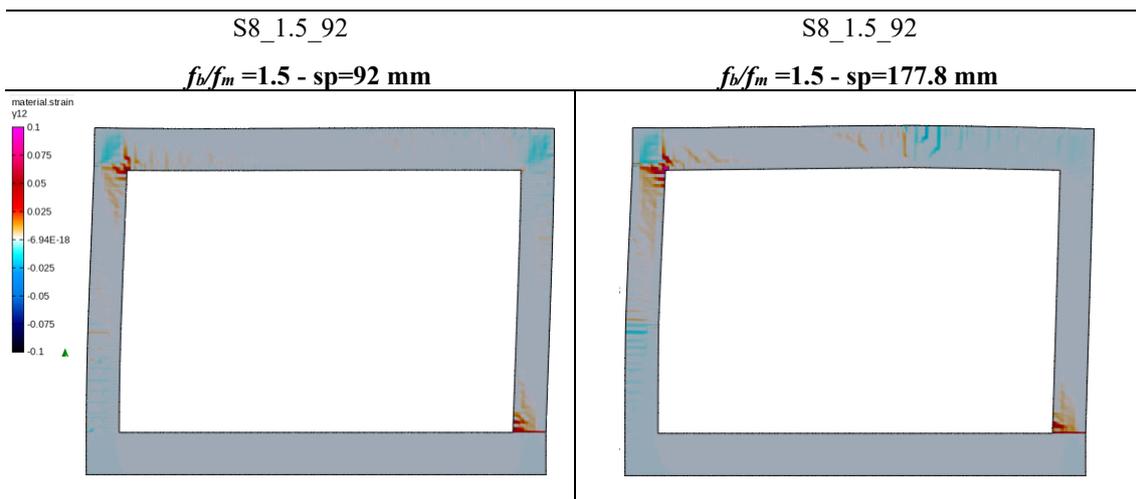
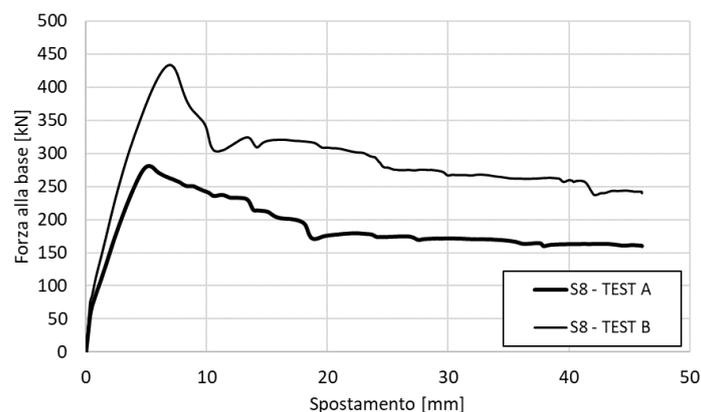


Figura 4.23: Provino #8: distorsioni nel telaio al variare dello spessore della muratura

Risultati più evidenti emergono dai test sul provino #8 utilizzando sui campioni numerici sopra riportati un rapporto f_b/f_m minimo (0.7) (Figura 4.24). Nel caso del confronto fatto in precedenza con malta originale e spessore pari a quello delle colonne, si osservava un incremento della resistenza al picco del 37%. Riducendo il rapporto di design si ha un incremento del 57% nella resistenza di picco, corrispondente a 160 kN in più. Nel test S8_0.7_178, subito dopo il picco si osserva una più pronunciata caduta di carico indice di una probabile rottura a taglio.



TEST A (S8_0.7_92)	TEST B (S8_0.7_178)
<ul style="list-style-type: none"> • massima resistenza malta ($f_b/f_m=0,7$) • Spessore pannello 92 mm (originale) 	<ul style="list-style-type: none"> • massima resistenza malta ($f_b/f_m=0,7$) • Spessore pannello 177,8 mm (spessore colonne)

Figura 4.24: Provino #8: curve pushover al variare dello spessore della muratura con rapporto f_b/f_m minimo

Analizzando la domanda di taglio (), si verifica una redistribuzione delle sollecitazioni interne con un leggero scarico nella colonna di destra, accompagnato da un notevole aumento della domanda nella colonna di sinistra. Ciò comporta un superamento della resistenza a taglio con conseguente aumento delle distorsioni nelle zone in prossimità della sezione analizzata (Figura 4.25).

La muratura subisce meno danni rispetto al test con spessore originale, mentre nel telaio si osservano rotture più evidenti, soprattutto nella più sollecitata colonna di sinistra (Figura 4.26).

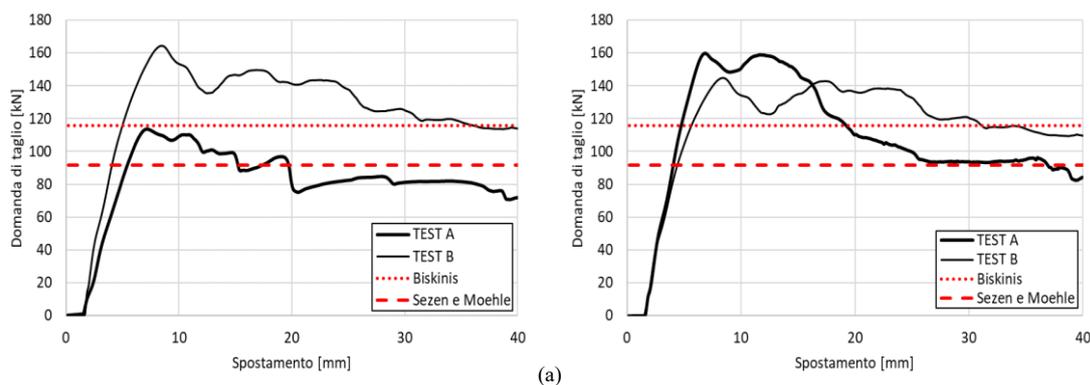


Figura 4.25: Provino #8 - domanda di taglio al variare dello spessore della muratura con rapporto f_b/f_m minimo: (a) colonna sinistra (b) colonna destra

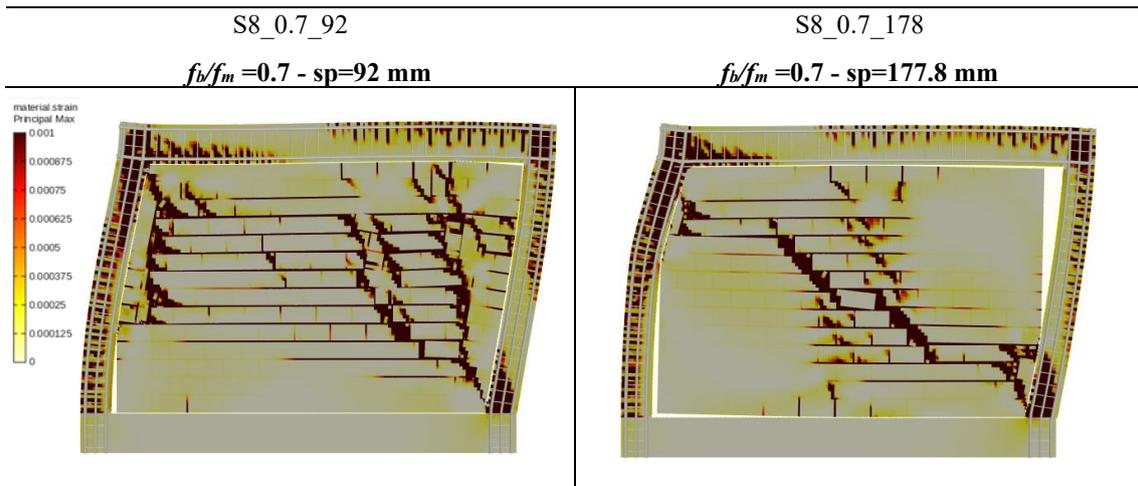


Figura 4.26: Provino #8: danneggiamento al variare dello spessore della muratura con rapporto f_b/f_m minimo

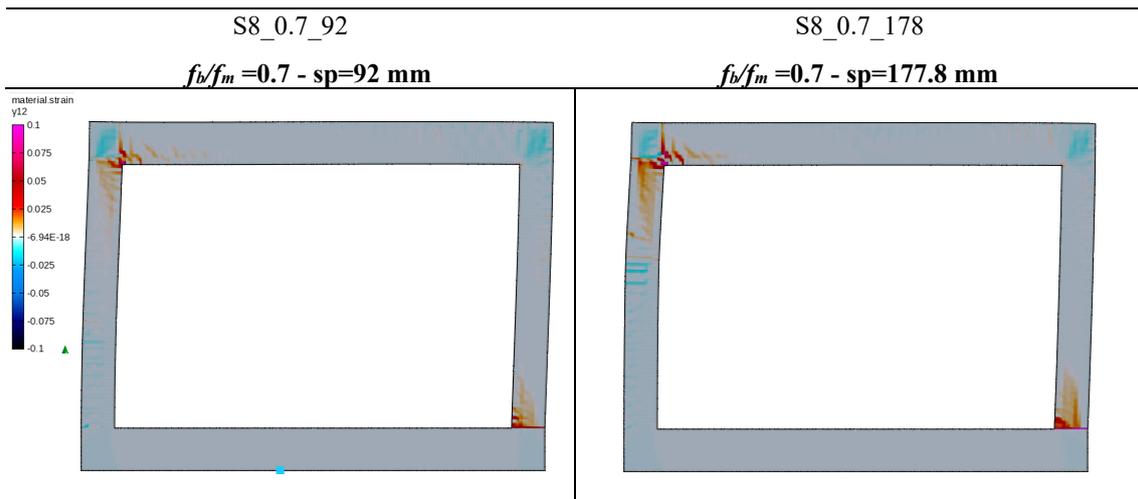


Figura 4.27: Provino #8: distorsioni nel telaio al variare dello spessore della muratura con rapporto f_b/f_m minimo

4.4 Correlazione tra la variazione della domanda di taglio e la variazione del rapporto f_b/f_m

Le analisi condotte nei campioni numerici in cui è stato variato il rapporto tra la resistenza a compressione del mattone e quella della malta hanno mostrato una graduale diminuzione della domanda di taglio all'aumentare di tale rapporto. Questo fenomeno interessa entrambe le colonne e dimostra come una resistenza relativamente bassa della malta rispetto al mattone possa avere effetti positivi sulla manifestazione di collassi locali dovuti all'incremento della sollecitazione tagliante, seppur riducendo la capacità portante globale dell'intera struttura nei confronti di azioni sismiche nel piano. In particolare, la Figura 4.28 e Figura 4.29 (a) mostra la domanda di taglio massima registrata (V_{max} relativo) in ciascuna sezione per ogni rapporto f_b/f_m esaminato, evidenziando una netta diminuzione all'aumentare di tale rapporto in particolare nella colonna di destra, con una differenza di circa 80 kN tra il rapporto più basso ($f_b/f_m = 0.7$) e quello più alto ($f_b/f_m = 5$) in entrambi i provini (S1B e #8). La stessa variazione è riscontrabile nella sezione della colonna di sinistra anche se in modo meno marcato. La Figura 4.28 e Figura 4.29 (b) mostra la domanda di taglio massima in ciascuna sezione per ogni rapporto f_b/f_m esaminato normalizzata rispetto alla domanda di taglio massima registrata tra tutti i campioni numerici (V_{max} assoluto). Tale rappresentazione evidenzia una riduzione della domanda di taglio in termini percentuali all'aumentare del rapporto f_b/f_m , in cui si nota una riduzione di più del 50% in entrambe le colonne per il rapporto f_b/f_m più alto (5) rispetto al rapporto f_b/f_m più basso (0.7). La Figura 4.28 e Figura 4.29 (c), invece, mostra la domanda di taglio massima in ciascuna sezione per ogni rapporto f_b/f_m esaminato, adimensionalizzata rispetto alla domanda di taglio massima registrata nelle due section cut del telaio privo di tamponature (V_{max} bare frame). Il grafico analizzato evidenzia come, nonostante si registri una diminuzione della resistenza complessiva all'aumentare del rapporto f_b/f_m , questa è associata a una riduzione della domanda di taglio nelle colonne. Questo implica uno sforzo minore per gli elementi strutturali. Tuttavia, va notato che anche con rapporti elevati di f_b/f_m , la domanda di taglio risulta in ogni caso 1.5 e 2 volte quella del telaio privo di tamponature.

Nel provino S1B, con un rapporto f_b/f_m pari a 0.7, si osserva un incremento della sollecitazione tagliante massima di 4.7 volte rispetto al telaio privo di tamponature, valore che si riduce a 1.9 nel caso di un rapporto f_b/f_m pari a 4. Analogamente, nella colonna di sinistra dello stesso test, si evidenzia un incremento massimo di 3.3 volte.

Nel provino #8, si osserva un incremento della domanda di taglio inferiore rispetto al caso precedente. In entrambe le sezioni, si registra un massimo incremento di circa il triplo rispetto al telaio senza tamponature, con una domanda di circa 1.5 volte quella del telaio senza tamponature per un rapporto f_b/f_m pari a 5.

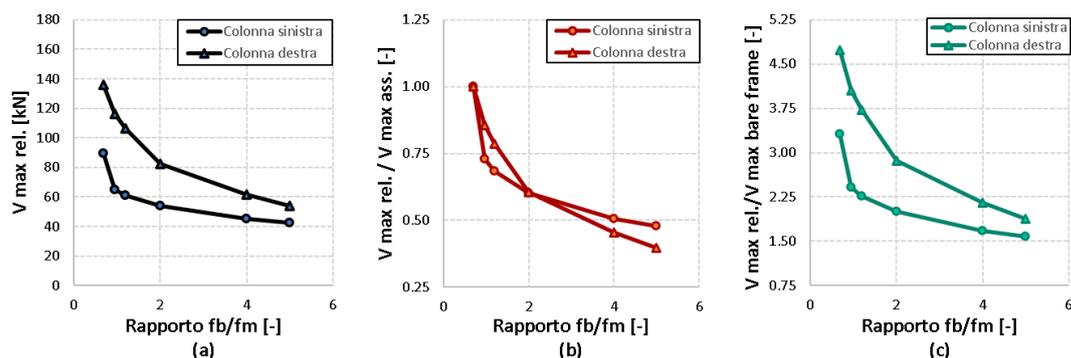


Figura 4.28 - Provino S1B - Variazione taglio nelle colonne: (a) taglio massimo relativo, (b) normalizzazione rispetto al taglio massimo assoluto, (c) normalizzazione rispetto al taglio del bare frame

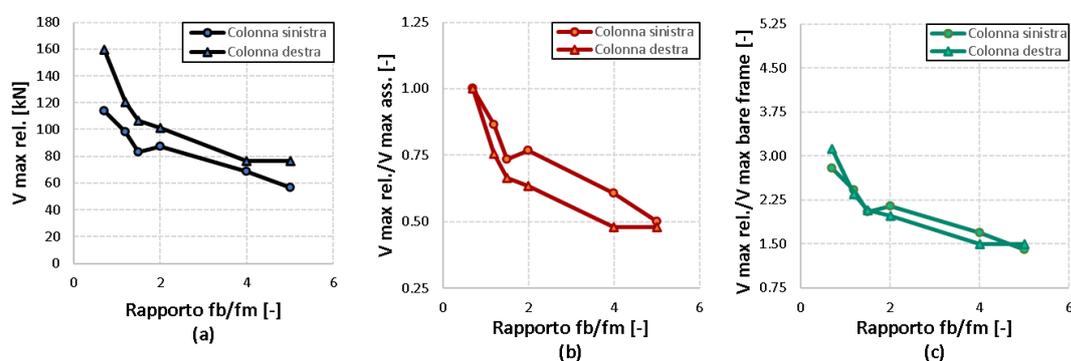


Figura 4.29 - Provino #8 - Variazione taglio nelle colonne: (a) taglio massimo relativo, (b) normalizzazione rispetto al taglio massimo assoluto, (c) normalizzazione rispetto al taglio del bare frame

Nella Tabella 4.5 e Tabella 4.6 sono sintetizzati i dati ottenuti dall'analisi sopra descritta, evidenziando le variazioni della domanda di taglio sia in termini assoluti che in relazione alla domanda di taglio del bare frame.

f_b/f_m	Taglio massimo relativo [kN]		Taglio massimo relativo normalizzato rispetto al taglio massimo assoluto [-]		Taglio massimo relativo normalizzato rispetto al taglio del bare frame [-]	
	Sinistra	Destra	Sinistra	Destra	Sinistra	Destra
0.7	89.35	135.70	1.00	1.00	3.31	4.73
0.96	65.04	116.00	0.73	0.85	2.41	4.05
1.2	61.20	106.60	0.68	0.79	2.27	3.72
2	53.95	82.14	0.60	0.61	2.00	2.87
4	45.17	61.66	0.51	0.45	1.67	2.15
5	42.69	53.97	0.48	0.40	1.58	1.88
Bare frame	26.99	28.66				

Tabella 4.5: Variazione della domanda di taglio sulle colonne del provino S1B al variare del rapporto f_b/f_m

f_b/f_m	Taglio massimo relativo [kN]		Taglio massimo relativo normalizzato rispetto al taglio massimo assoluto [-]		Taglio massimo relativo normalizzato rispetto il taglio del bare frame [-]	
	Sinistra	Destra	Sinistra	Destra	Sinistra	Destra
0.7	113.60	159.70	1.00	1.00	2.79	3.12
1.2	98.11	120.50	0.86	0.75	2.41	2.35
1.5	83.25	106.30	0.73	0.67	2.05	2.07
2	87.20	101.20	0.77	0.63	2.14	1.97
4	68.75	76.60	0.61	0.48	1.69	1.49
5	56.71	76.47	0.50	0.48	1.39	1.49
Bare frame	40.66	51.26				

Tabella 4.6: Variazione della domanda di taglio sulle colonne del provino #8 al variare del rapporto f_b/f_m

5 Analisi di un prototipo in calcestruzzo armato a scala reale

Nel presente capitolo, si procede all'analisi di una struttura prototipo in calcestruzzo armato su scala reale, al fine di studiare come la domanda di taglio si distribuisce e influenza il comportamento di una struttura multipiano, variando il rapporto tra la resistenza a compressione dell'unità di mattone e quella della malta. Il modello (Figura 5.1) è stato realizzato sulla base della validazione e calibrazione del provino S1B [33], mantenendo le stesse proprietà meccaniche per il tamponamento in muratura e per il telaio in c.a.. Dopo una descrizione iniziale del modello e dei carichi agenti sulla struttura, saranno presentate le risposte globali al variare del rapporto f_b/f_m . Successivamente, come visto per i provini S1B e #8, per ogni simulazione verranno analizzate le domande di taglio alle estremità delle colonne del primo piano e si fornirà una panoramica del contributo della muratura nel taglio alla base illustrando il contributo fornito da ciascuna colonna e dai due pannelli in muratura.

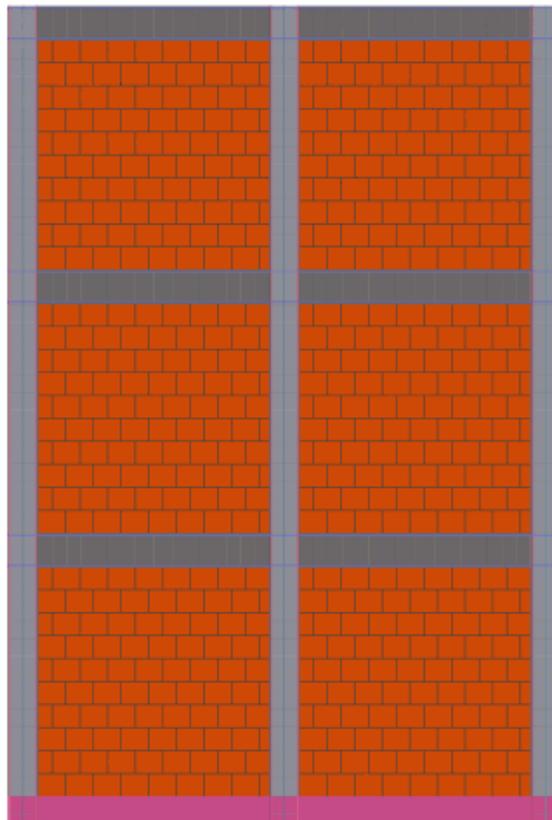


Figura 5.1: Micro-modello della struttura prototipo

5.1 Descrizione della struttura prototipo

Il prototipo oggetto delle analisi è costituito da un telaio bidimensionale in calcestruzzo armato, composto da tre piani e due campate, caratterizzato da una disposizione regolare delle tamponature nelle due direzioni. Ciascun piano, avente un'altezza di 3 metri, è dotato di pannelli di muratura con dimensioni di 2600x150x2600 mm (lunghezza × spessore × altezza), presentando un rapporto di forma tra lunghezza e altezza pari a 1. Le singole unità costituenti i pannelli di muratura (unità di muratura e layer di malta) e il suo grado di contatto con il telaio sono state selezionate dal modello S1B precedentemente calibrato e validato.

Il set di elementi utilizzati, inclusi legami costitutivi, vincoli e il setting di analisi si presenta coerentemente con quanto descritto nel paragrafo 3.1 di tale lavoro di tesi.

Tuttavia, rispetto al campione S1B originale [33], le sezioni delle travi e delle colonne sono state opportunamente modificate variando la sezione e l'armatura longitudinale, mentre le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo risultano inalterate rispetto a quelle calibrate nel provino S1B. I dettagli di tali modifiche sono illustrati in Figura 5.2. Va sottolineato, tuttavia, che le caratteristiche del campione restano in linea con un telaio progettato senza l'adozione di dettagli costruttivi prescritti dalle normative sismiche.

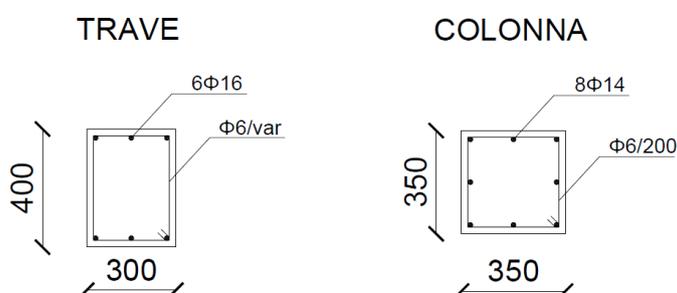


Figura 5.2: Struttura prototipo: sezioni di trave e colonna (misure in mm)

Analogamente ai campioni precedentemente esaminati, l'utilizzo di elementi bidimensionali comporta la necessità di convertire la disposizione reale delle barre di armatura nello spazio in una configurazione equivalente nel piano, determinando i rispettivi diametri equivalenti, come riportato nella Tabella 5.1.

Sezione	Tipo	Posizione	Diametro [mm]	Numero	Area [mm ²]	Diametro equivalente [mm]
Trave	Longitudinale	Superiore	16	3	603.2	27.71
Trave	Longitudinale	Inferiore	16	3	603.2	27.71
Trave	Trasversale	-	6	2	56.5	8.49
Colonna	Longitudinale	Sinistra	14	3	461.8	24.25
Colonna	Longitudinale	Centro	14	2	307.9	19.80
Colonna	Longitudinale	Destra	14	3	461.8	24.25
Colonna	Trasversale	-	6	2	56.5	8.49

Tabella 5.1: Diametri equivalenti delle barre di armatura

Nell'analisi verticale della struttura in esame, sono stati presi in considerazione i pesi propri dei materiali costituenti mediante l'utilizzo di *FaceForce*, i cui valori sono riportati nella Tabella 5.2. Oltre al peso proprio, sono stati applicati carichi sulle colonne e sulle travi del telaio (Figura 5.3) mediante *Edgeforce*, simulando i carichi della porzione di solaio agente sul telaio in esame, opportunamente combinati secondo la combinazione sismica riportata nella Normativa NTC 2018 per un edificio di civile abitazione.

Elemento	Peso specifico [kN/m ³]	Spessore elemento [mm]	<i>FaceForce</i> [N/mm ²]
Muratura	12	150	0.0017658
Trave	25	300	0.0087500
Colonna	25	350	0.0075000

Tabella 5.2: Peso degli elementi strutturali e della muratura

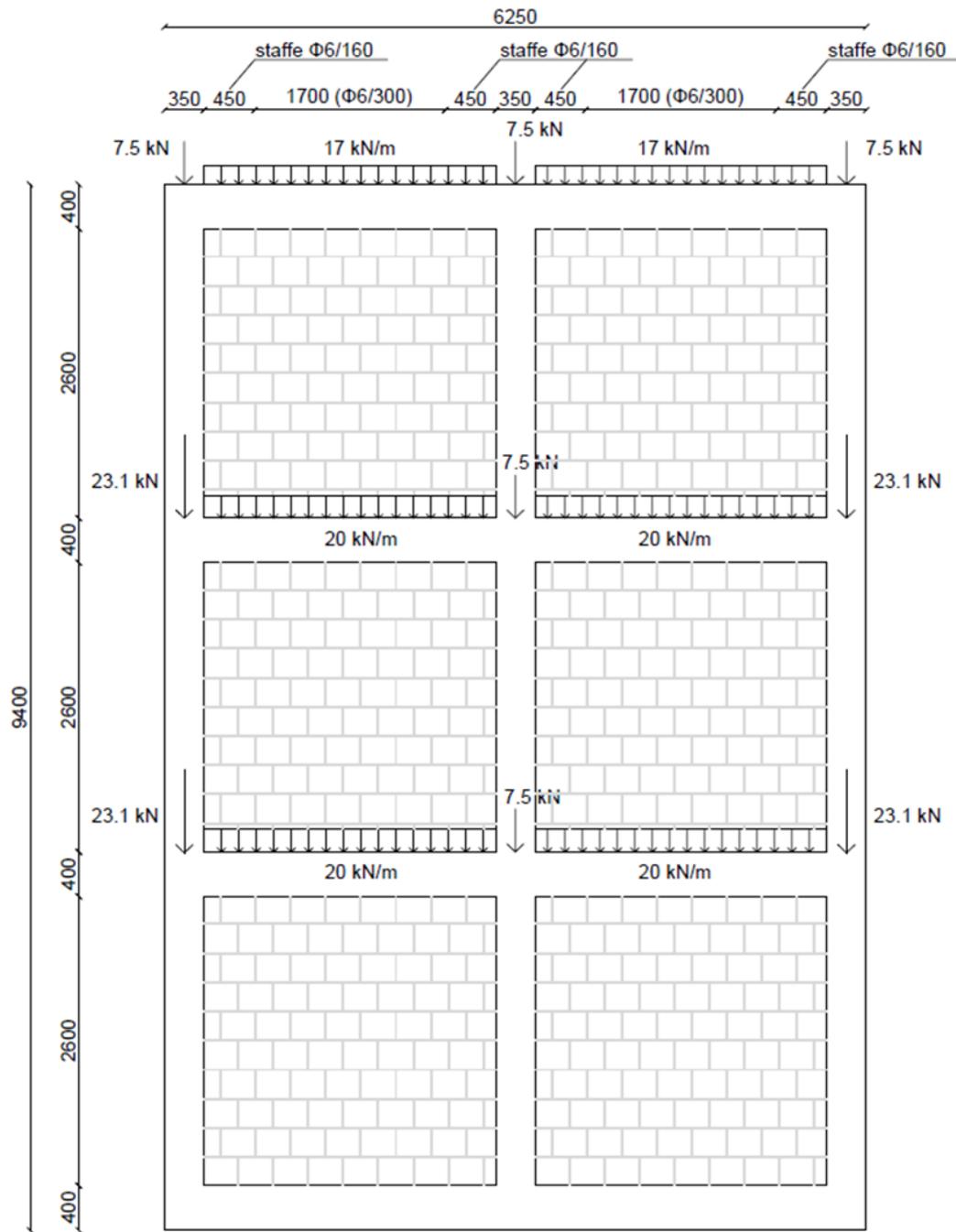


Figura 5.3: Struttura prototipo: geometria e carichi verticali (misure in mm)

Per la determinazione della risposta strutturale sotto l'azione sismica, è stata condotta un'analisi statica non lineare del modello con una distribuzione delle forze di piano proporzionale al primo modo di vibrare della struttura.

A tal proposito, è stata eseguita un'analisi modale, inserendo lo step *Eigen Analysis* [66] dopo l'analisi verticale e utilizzando il risolutore *genBandArpack*. Le masse sono state determinate convertendo i pesi propri e i carichi applicati. Esse sono state assegnate al modello attraverso *FaceMass* e *EdgeMass* (Tabella 5.3 e Tabella 5.4).

Elemento	<i>FaceForce</i> [N/mm ²]	<i>FaceMass</i> [ton/mm ²][10 ⁻⁷]
Massa muratura	0.0017658	1.8
Massa trave	0.0087500	8.919
Massa colonna	0.0075000	7.645

Tabella 5.3: Massa degli elementi strutturali e della muratura

Elemento	<i>EdgeForce</i> [N/mm]	<i>EdgeMass</i> [ton/mm][10 ⁻⁷]
Massa carico trave	20	2.039
	17	1.733
Massa carico colonna	66	6.729
	21.43	2.184

Tabella 5.4: Massa equivalente dei carichi applicati

Allo stesso modo, quanto precedentemente descritto è stato replicato sul prototipo privo di pannelli murari al fine di esaminarne la risposta del telaio non tamponato (T) utilizzato come base per confronti successivi con le simulazioni sul telaio tamponato (TT).

La Tabella 5.5 presenta i risultati ottenuti dalle analisi modali, riferiti esclusivamente al primo modo di vibrazione della struttura, i cui autovettori risultano proporzionali al profilo di forze da applicare nella pushover modale per le simulazioni numeriche successive. Nella Tabella 5.6 e Tabella 5.7 sono specificati gli autovettori, le masse concentrate, e le forze modali corrispondenti a ciascun impalcato della struttura.

Modo	λ [-]	ω [rad/s]	Frequenza [1/s]	Periodo [s]	Fattore di partecipazione modale Γ [-]	
TT	1	3910.75	62.536	9.95291	0.100473	1.32062
T	1	355.515	18.8551	3.00088	0.333235	1.29056

Tabella 5.5: Telaio tamponato e telaio in c.a.: risultati dell'analisi modale

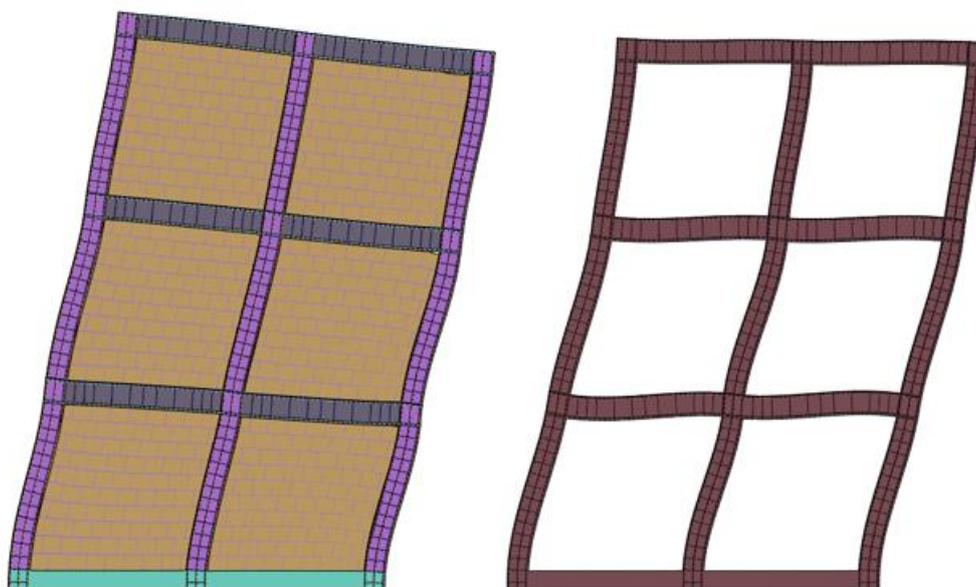


Figura 5.4: Primo modo di vibrare: telaio tamponato (sinistra) e telaio c.a. (destra)

Piano	φ_1 [-]	$\varphi_{1, norm}$ [-]	m [ton]	$\varphi_1 m$ [ton]	F_{modale} [kN]	$F_{modale, norm}$ [kN]
3	0.186	1	15.33	15.329	153.290	0.98085
2	0.129	0.694	22.53	15.629	156.290	1.00000
1	0.062	0.333	22.53	7.511	75.110	0.48062

Tabella 5.6: Telaio tamponato: autovettori, masse di piano e forze modali

Piano	φ_1 [-]	$\varphi_{1, norm}$ [-]	m [ton]	$\varphi_1 m$ [ton]	F_{modale} [kN]	$F_{modale, norm}$ [kN]
3	0.185	1	14.11	14.113	141.130	0.915
2	0.142	0.768	20.10	15.429	154.286	1.000
1	0.068	0.368	20.10	7.388	73.884	0.479

Tabella 5.7: Telaio c.a.: autovettori, masse di piano e forze modali

Dopo aver identificato le forze da applicare nel centro di massa di ciascun impalcato, sono state effettuate analisi pushover con profilo di forze modali, impostando un numero di step pari a 600 incrementi e lo spostamento del punto di controllo a 150 mm, fissato in sommità alla struttura prototipo.

Il modello è discretizzato con una mesh a maglie quadrate di dimensioni 40 x 40 mm e partizionato secondo quanto illustrato nella Figura 5.5, con un tempo computazionale medio di circa 2 ore e 15 minuti per ciascun modello di telaio tamponato, mentre di 45 minuti per il telaio non tamponato.

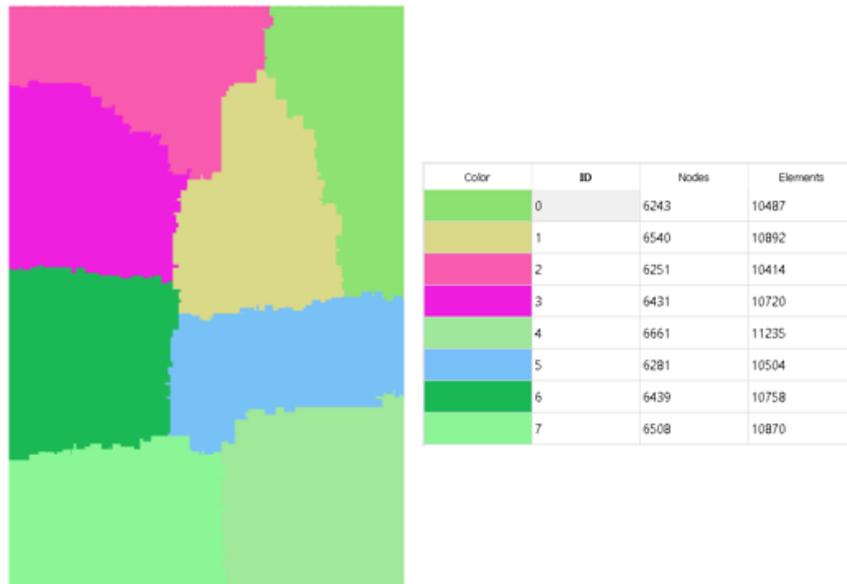


Figura 5.5:Modello partizionato: Telaio tamponato

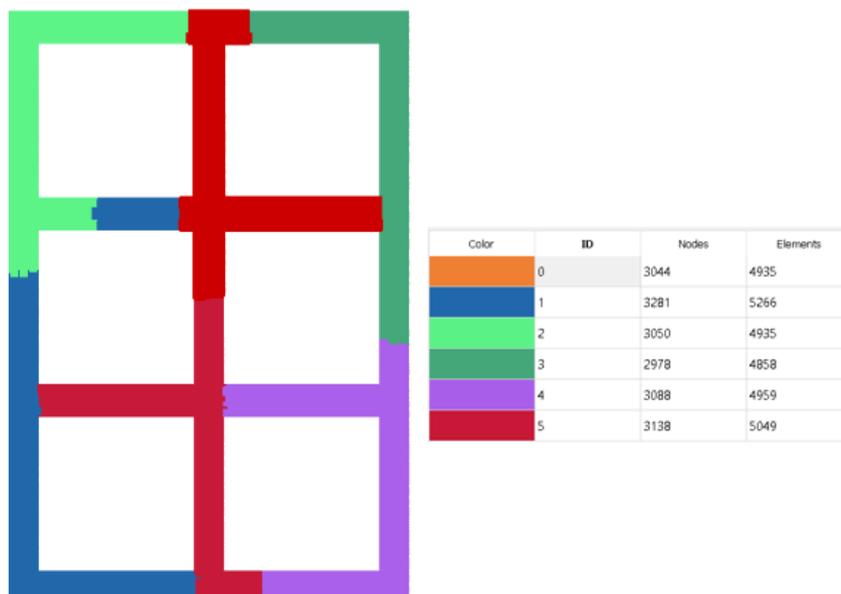


Figura 5.6: Modello partizionato: Telaio in c.a. (bare frame)

Una volta completata la costruzione del modello, è stata eseguita un'analisi parametrica, seguendo un approccio simile a quanto descritto in precedenza (cap.4), variando esclusivamente il rapporto tra la resistenza a compressione del mattone e quella della malta. In Tabella 5.8 sono sintetizzate le simulazioni numeriche effettuate al variare del

rapporto f_b/f_m legate alla variazione della resistenza a compressione della malta e conseguentemente delle proprietà meccaniche ad essa legate.

f_b/f_m	E	ν	f_t	f_{c0}	f_{cp}	f_{cr}	G_t	G_c	ε_p
	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[N/mm]	[N/mm]	[-]
0.7	1257	0.15	0.440	4.40	12.57	1.26	0.115	93.99	0.020
0.96	916	0.15	0.32	3.2	9.16	0.9	0.109	88.78	0.02
1.2	733	0.15	0.257	2.57	7.33	0.73	0.104	85.29	0.02
2	440	0.15	0.154	1.54	4.40	0.44	0.095	77.81	0.02
3	293	0.15	0.103	1.03	2.93	0.29	0.089	72.31	0.02
4	220	0.15	0.077	0.77	2.20	0.22	0.084	68.68	0.02

Tabella 5.8: Parametri meccanici dei test al variare di f_b/f_m

5.2 Risultati delle analisi pushover

In questa sezione, vengono riportate le risposte in termini di forza-spostamento delle analisi pushover descritte in precedenza confrontate con la risposta del telaio privo di tamponature (bare frame). Il telaio non tamponato in c.a. presenta un comportamento duttile con una resistenza di picco raggiunta a circa 230 kN. L'introduzione della tamponatura induce, come previsto, un aumento di rigidità e resistenza ma anche un infragilimento della risposta globale al diminuire del rapporto f_b/f_m (Figura 5.7).

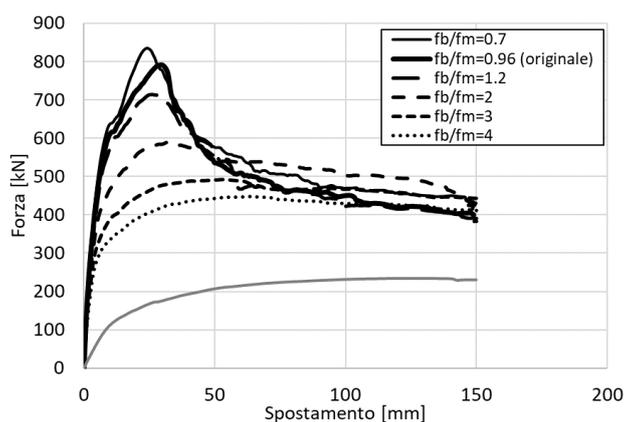


Figura 5.7: Struttura prototipo: curve pushover

Particolarmente significativo è il caso con un rapporto f_b/f_m pari a 0.7, che mostra un incremento della resistenza massima di oltre 3.5 volte rispetto al bare frame (830 kN a 25 mm di spostamento), seguito da un crollo significativo della capacità portante dopo il picco, con una resistenza residua di circa 400 kN. Questo comportamento è simile a quelli osservati con rapporti f_b/f_m successivamente più alti. Raggiunto un rapporto f_b/f_m pari a 2 con un picco di resistenza di quasi 600 kN (2.5 volte quella del bare frame), la risposta risulta più duttile, presentando un ramo quasi plastico dopo il picco di resistenza. Le curve con rapporti più alti presentano un comportamento simile al bare frame ma con una resistenza di circa il doppio rispetto a quella del telaio non tamponato. La resistenza residua si assesta mediamente intorno a 400 kN in ciascuna simulazione numerica, coerentemente con quanto osservato nel singolo provino. In termini di danneggiamento si riscontra come all'aumentare del rapporto f_b/f_m si ottenga una redistribuzione del danno sugli elementi non strutturali quali la tamponatura coinvolgendo anche i piani superiori e limitando il danno nel telaio in c.a. specialmente al piano inferiore. In figura 5.8 e 5.9 si riportano i danneggiamenti rispettivamente del telaio tamponato al variare del rapporto f_b/f_m e del telaio non tamponato.

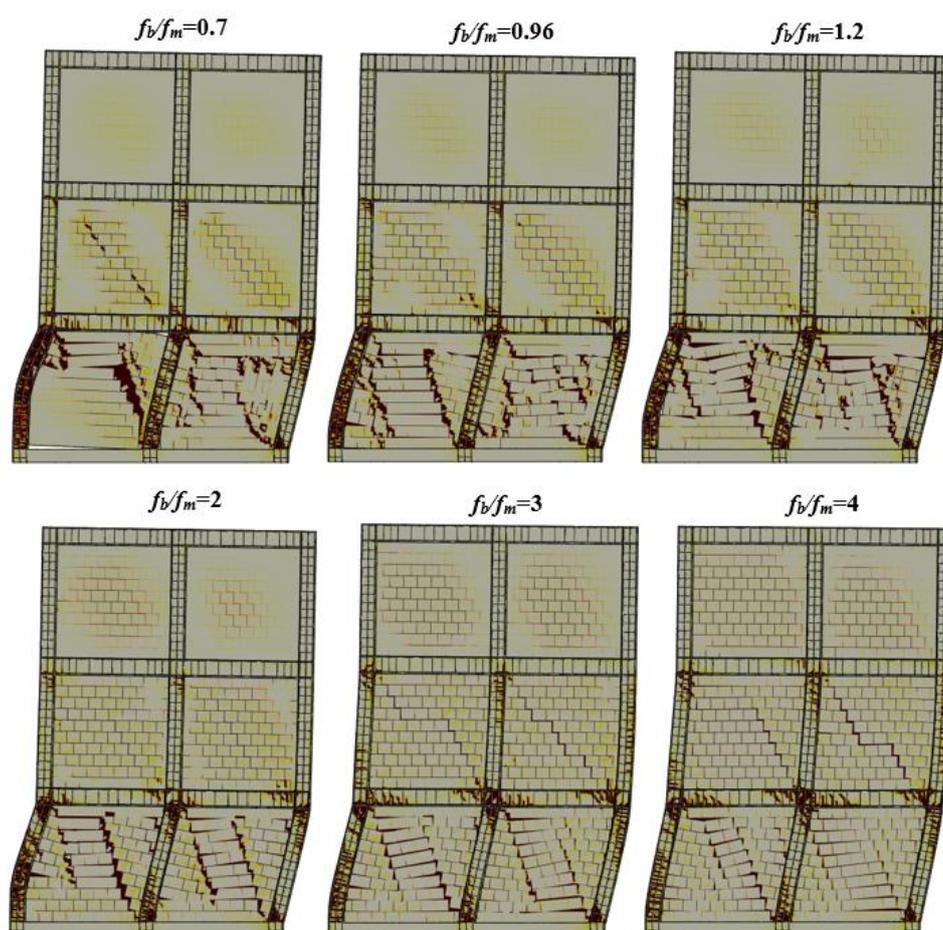


Figura 5.8: Danneggiamento della struttura prototipo al termine dell'analisi

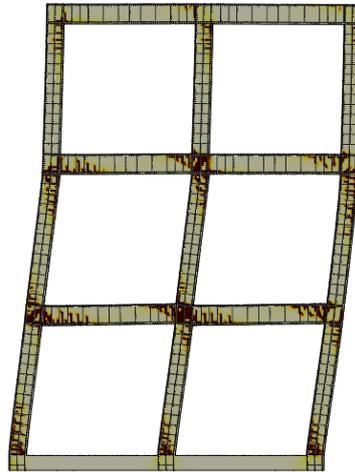


Figura 5.9: Danneggiamento del telaio non tamponato al termine dell'analisi

5.3 Variazione della domanda di taglio al variare del rapporto f_b/f_m

Lo studio delle sezioni di estremità delle colonne al piano inferiore, come illustrato in Figura 4.10, è di notevole interesse in quanto rappresentano le sezioni più sollecitate del telaio. La registrazione delle sollecitazioni di taglio è avvenuta utilizzando lo script Python dedicato (appendice B), seguendo il medesimo procedimento descritto nel paragrafo 4.3.

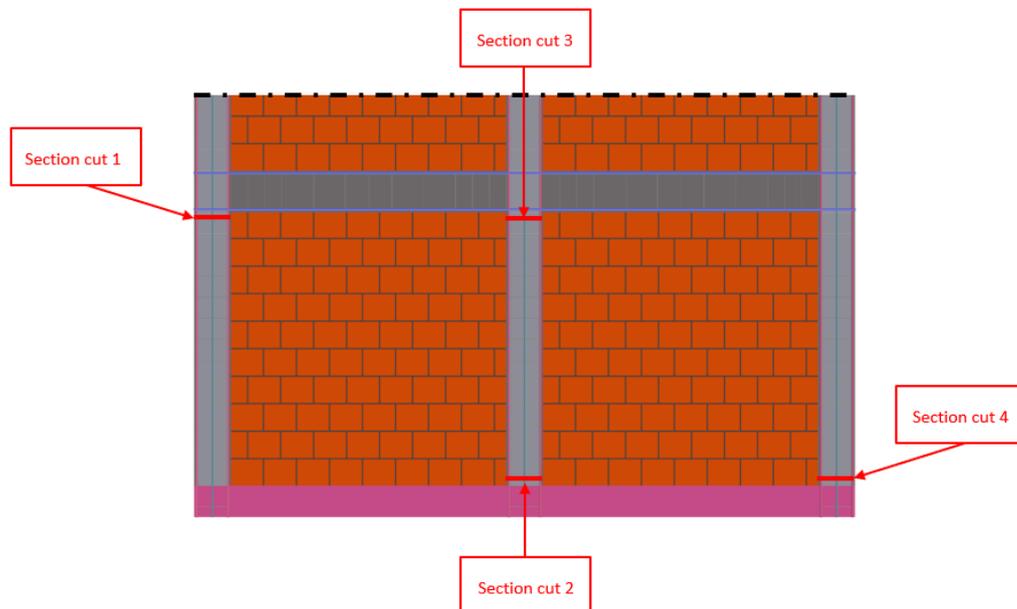


Figura 5.10: Section cut per le colonne del primo piano della struttura prototipo

Le sollecitazioni sono state registrate per ciascuno step di carico. Come ampiamente descritto in precedenza, a causa del carico laterale applicato, i pannelli di muratura si distaccano parzialmente dal telaio, rimanendo in contatto con esso attraverso una lunghezza limitata (lunghezza di contatto). Ciò comporta un aumento della domanda di taglio nelle zone di contatto dove la muratura esercita un carico addizionale sul telaio in c.a.. Come riportato in Figura 5.8, è evidente che questo effetto è notevolmente più pronunciato nel piano inferiore rispetto ai livelli superiori. I risultati ottenuti saranno confrontati con quelli registrati nel telaio non tamponato, e comparati con la resistenza a taglio valutata secondo le formulazioni di Biskinis e Sezen & Moehle, i cui calcoli sono riportati in appendice C. In Figura 5.11 si riportano le domande di taglio registrate nelle sezioni 1, 2, 3 e 4 delle colonne appartenenti al piano inferiore.

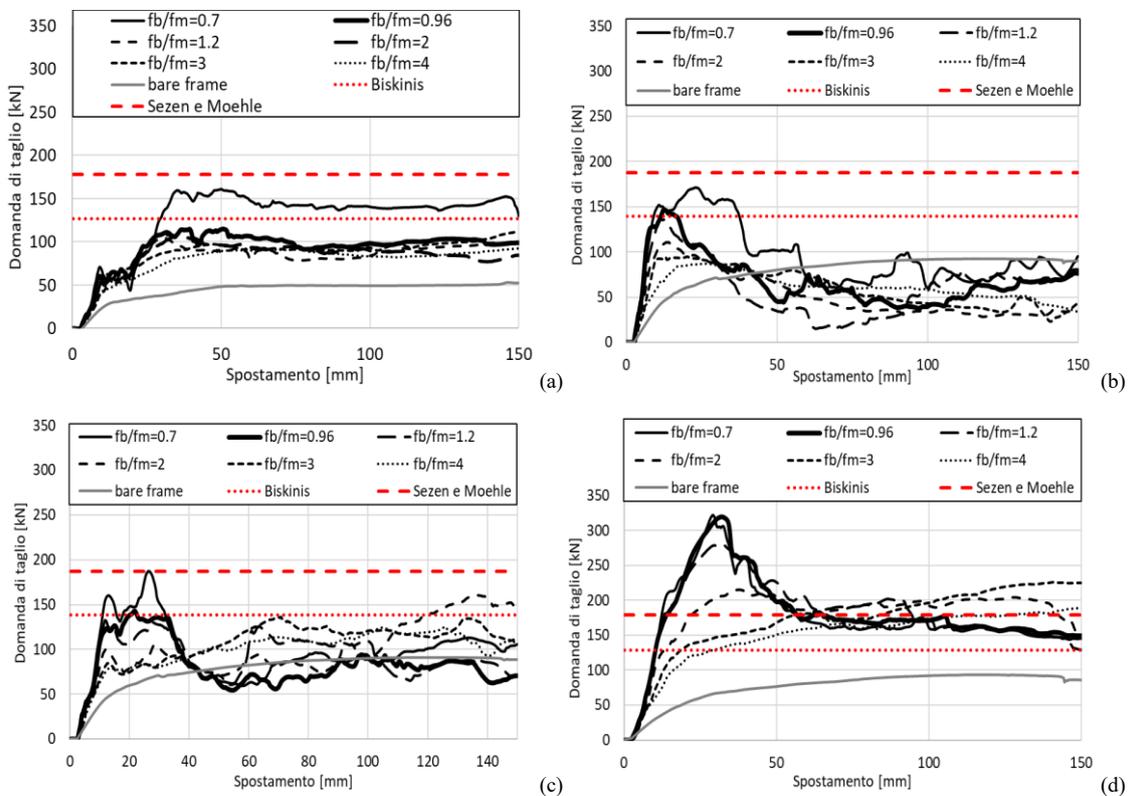


Figura 5.11: Variazione della domanda di taglio nel telaio al piano primo: (a) section cut 1 (b) section cut 2 (c) section cut 3 (d) section cut 4

Analizzando le domande di taglio estratte alla section cut 1 (Figura 5.11 a) emerge che non vi è una differenza significativa al variare del rapporto f_b/f_m , eccetto per il campione con rapporto 0.7, che trasferisce nella sezione di estremità della colonna di sinistra circa 60 kN in più rispetto alla media registrata per le altre simulazioni. Fatta eccezione per

questo caso, le domande di taglio registrate al variare di f_b/f_m confrontate con il bare frame, presentano una sollecitazione tagliante di circa il doppio. Inoltre, in questa sezione, non si supera in nessun caso la resistenza tagliante fornita dalla formulazione di Sezen & Moehle, mentre viene superata quella di Biskinis solo nel caso di rapporto pari a 0.7. Al contrario, nella colonna centrale, si osserva un aumento della domanda di taglio all'aumentare della resistenza della malta. In entrambe le sezioni della colonna centrale (Figura 5.11 b,c), non si supera in nessun caso la resistenza tagliante fornita dalla formulazione di Sezen & Moehle, mentre viene superata quella di Biskinis solo nel caso di rapporto pari a 0.7. La sezione più sollecitata resta la sezione inferiore della colonna di destra (Figura 5.11 d), dove si osserva un significativo incremento della domanda di taglio al diminuire del rapporto f_b/f_m . Nei casi con rapporti di 0.7 e 0.96, la section cut 4 presenta una domanda di taglio pari a 320 kN, circa 4.5 volte quella registrata nel bare frame allo stesso step di analisi. Di conseguenza, il taglio resistente viene superato di circa il 90%. Con i rapporti successivamente più alti, si osserva una variazione di comportamento. La domanda di taglio scende fino a poco più di 200 kN, circa tre volte il bare frame e leggermente superiore al taglio resistente. Il superamento della resistenza a taglio in alcune sezioni di estremità delle colonne al piano inferiore è accompagnato dall'evidente presenza di danni e fessurazioni di taglio, come riportato in Figura 5.8, dove sono illustrati i danni al termine dell'analisi per ogni rapporto f_b/f_m esaminato.

5.3.1 Correlazione tra la variazione della domanda di taglio e la variazione del rapporto f_b/f_m

Nell'ambito dei test svolti con variazioni del rapporto di resistenza a compressione tra il mattone e la malta, è emerso un progressivo decremento della domanda di taglio all'aumentare di tale rapporto. Questa tendenza è più accentuata nella sezione inferiore della colonna di destra (section cut 4). La Figura 5.12(a) mostra la domanda di taglio massima registrata in ciascuna sezione per ogni valore di rapporto f_b/f_m (V_{max} relativo), evidenziando una netta diminuzione all'aumentare del rapporto in esame, con una differenza di 156 kN tra la simulazione con parametro $f_b/f_m = 0.7$ e $f_b/f_m = 4$. Stesse considerazioni si possono fare per la sezione superiore e inferiore della colonna centrale (section cut 3 e section cut 2), con una riduzione media di circa 80 kN tra i due casi estremi. Analogamente, la sezione superiore della colonna di sinistra (section cut 1) segue tale andamento. La Figura 5.12(b) mostra la domanda di taglio normalizzata rispetto al massimo registrato tra le simulazioni effettuate al variare del rapporto f_b/f_m (V_{max} assoluto). Tale rappresentazione evidenzia una riduzione della domanda di taglio, in termini percentuali, all'aumentare del rapporto f_b/f_m , con circa il 45% di riduzione tra i due casi estremi. La Figura 5.12 (c) mostra la domanda di taglio al variare del rapporto f_b/f_m , adimensionalizzata rispetto alla domanda di taglio del telaio privo di tamponature

(V_{max} bare frame). Tale grafico mette in luce come il pannello di muratura influenzi l'insorgenza di sollecitazioni di taglio aggiuntive nel telaio in funzione di tale parametro.

Ad esempio, nel caso più critico (section cut 4 con rapporto $f_b/f_m=0.7$), si osserva un incremento della sollecitazione tagliante massima registrata pari a 3.5 volte rispetto al telaio privo di tamponature, con una riduzione a 1.8 volte nella medesima sezione con rapporto $f_b/f_m=4$. Anche la sezione superiore della colonna di sinistra manifesta un notevole aumento, superando di oltre 3 volte il valore massimo registrato nel telaio senza tamponature. Per quanto riguarda le sezioni della colonna centrale, si registra un incremento meno accentuato, di circa il doppio rispetto al bare frame nel rapporto $f_b/f_m=0.7$. In tutte le sezioni, si evidenzia una graduale diminuzione degli sforzi taglianti proporzionale alla variazione del rapporto f_b/f_m .

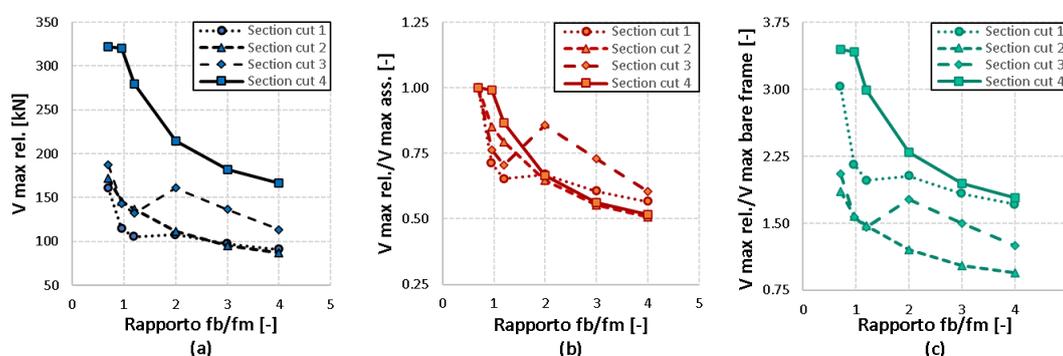


Figura 5.12: Variazione della domanda di taglio nelle colonne: (a) taglio massimo relativo, (b) normalizzazione rispetto al taglio massimo assoluto, (c) normalizzazione rispetto al taglio del bare frame

Nella Tabella 5.9, Tabella 5.10 e Tabella 5.11 sono sintetizzati i risultati delle analisi svolte.

Taglio massimo [kN]				
f_b/f_m	Section cut 1	Section cut 2	Section cut 3	Section cut 4
0.7	160.90	171.60	187.20	322.40
0.96	114.60	146.10	143.00	320.00
1.2	105.20	136.50	132.10	279.50
2	107.70	111.20	160.80	214.70
3	97.38	94.93	136.50	181.50
4	90.99	87.06	113.50	166.70
Bare frame	53.11	92.46	91.07	93.44

Tabella 5.9: Taglio massimo relativo al variare di f_b/f_m

Taglio massimo normalizzato rispetto al taglio massimo assoluto [-]				
f_b/f_m	Section cut 1	Section cut 2	Section cut 3	Section cut 4
0.7	1.00	1.00	1.00	1.00
0.96	0.71	0.85	0.76	0.99
1.2	0.65	0.80	0.71	0.87
2	0.67	0.65	0.86	0.67
3	0.61	0.55	0.73	0.56
4	0.57	0.51	0.61	0.52

Tabella 5.10: Taglio massimo normalizzato rispetto al taglio massimo assoluto al variare di f_b/f_m

Taglio massimo normalizzato rispetto al taglio del bare frame [-]				
f_b/f_m	Section cut 1	Section cut 2	Section cut 3	Section cut 4
0.7	3.03	1.86	2.06	3.45
0.96	2.16	1.58	1.57	3.42
1.2	1.98	1.48	1.45	2.99
2	2.03	1.20	1.77	2.30
3	1.83	1.03	1.50	1.94
4	1.71	0.94	1.25	1.78

Tabella 5.11: Taglio massimo normalizzato rispetto al taglio del bare frame al variare di f_b/f_m

5.4 Taglio alla base e contributo della tamponatura al variare del rapporto f_b/f_m

Nel presente paragrafo, si procede allo studio del taglio alla base e del contributo di ciascun elemento strutturale e non strutturale (telaio in c.a. e tamponamenti in muratura), consentendo di comprendere come il comportamento di ogni singolo elemento influenzi la risposta globale della struttura. In particolare, si registrano i contributi nelle sezioni alla base delle tre colonne e nelle sezioni alla base dei pannelli in muratura (come rappresentato nella Figura 5.13).

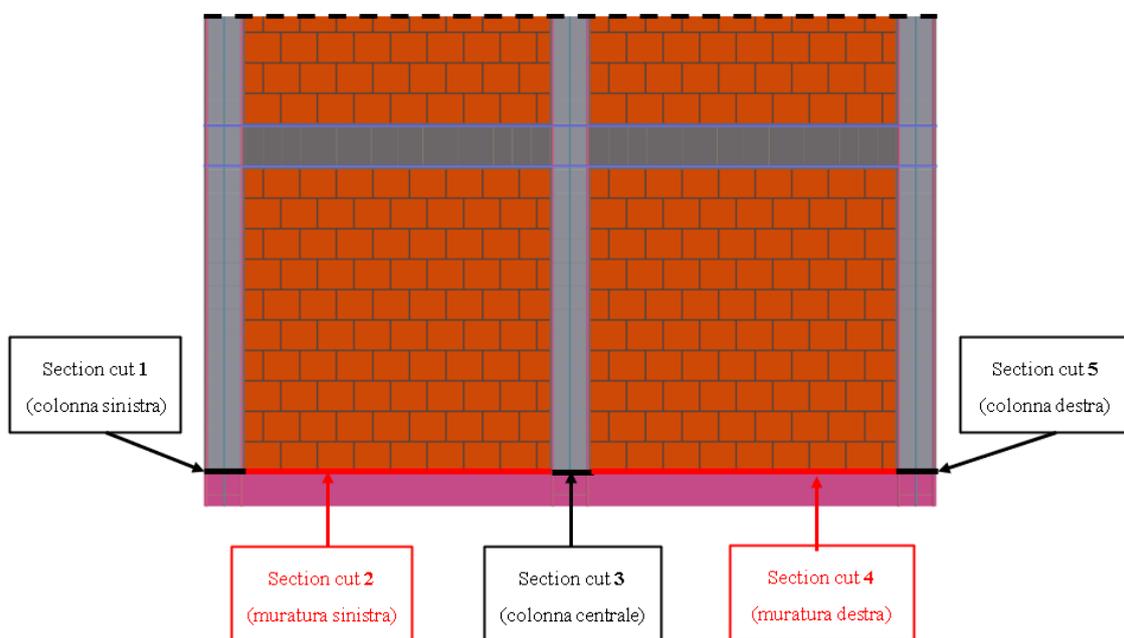


Figura 5.13: Section cut alla base della struttura prototipo

Dai risultati presentati in Figura 5.14 emerge come per quasi tutte le simulazioni numeriche al variare del rapporto f_b/f_m gli elementi a contribuire maggiormente al tagliante di base siano la colonna destra e il pannello di muratura destra. Mentre la colonna sinistra risulta l'elemento strutturale che contribuisce meno al tagliante di base, a causa della direzione dei carichi e della formazione del puntone diagonale in tale direzione.

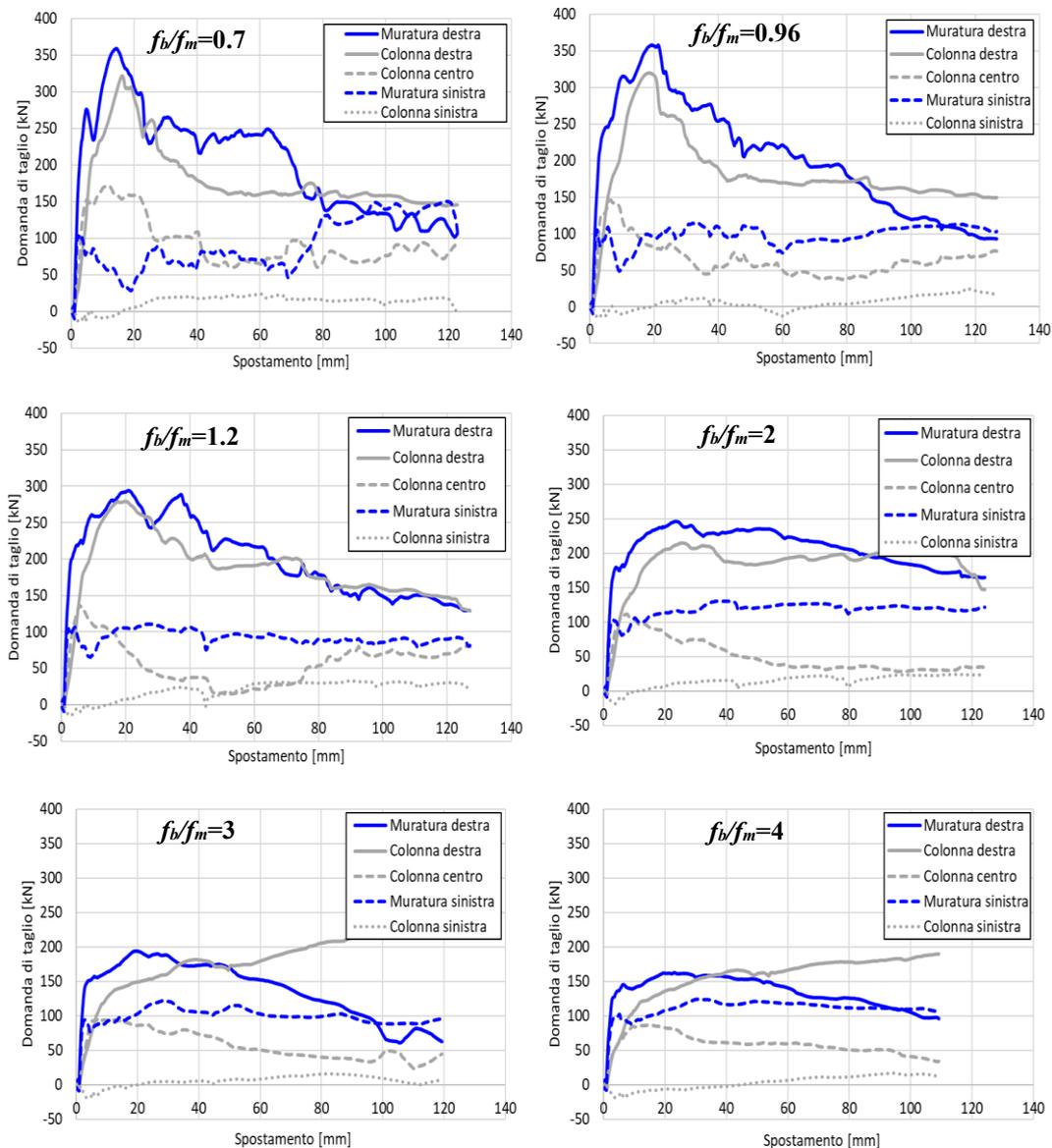


Figura 5.14: Contributo degli elementi strutturali e non strutturali al tagliante di base al variare del rapporto f_b/f_m

Nel modello con il rapporto f_b/f_m più basso (0.7), si osserva che l'elemento che assorbe il maggior taglio alla base è la muratura di destra, con un valore in corrispondenza del picco di circa 360 kN (corrispondente al 43% del taglio totale). Un valore leggermente inferiore viene assorbito dalla colonna di destra, con circa 310 kN (37% del taglio totale). Confrontando la risposta ottenuta con l'analisi pushover, si nota che il comportamento fragile post-picco è principalmente attribuibile alla perdita di resistenza della colonna destra e della muratura destra. Interessante notare come in seguito alla

perdita di carico della muratura destra (probabilmente dovuta ad una rottura a taglio del pannello) a circa 70 mm ci sia una ripresa di carico della muratura sinistra, indice di una sostanziale redistribuzione degli sforzi. Le stesse considerazioni possono essere replicate per il test con il rapporto f_b/f_m pari a 0.96. Al picco, si osserva che la muratura sopporta il 45% del taglio alla base, mentre la colonna contribuisce con il 40%. Nel campione con rapporto f_b/f_m pari a 1.2, contribuiscono in egual misura al tagliante di base, rappresentando circa l'84% del tagliante totale. Mentre, colonna centrale e muratura sinistra registrano un contributo corrispondente al 14% del tagliante totale. Con i risultati derivanti dalla registrazione del taglio alla base per il test con il rapporto $f_b/f_m = 2$, si osserva una risposta maggiormente duttile. Nella muratura, si registra un massimo contributo al tagliante di base pari a 250 kN (corrispondente al 42%) e 210 kN nella colonna di destra (40%). L'elemento che registra ancora una risposta fragile è la colonna di destra che presenta una sostanziale perdita di carico (80 kN). Considerazioni analoghe si possono fare per le simulazioni successivi con rapporti 3 e 4, in cui tuttavia si registra un contributo crescente nel tagliante alla base da parte della colonna destra, probabilmente coincidente con la perdita di carico da parte della muratura destra a circa 50 mm.

In generale, dunque, gli elementi che contribuiscono maggiormente alla resistenza globale della struttura sono la muratura e la colonna di destra. Infatti, per valori alti di resistenza della malta (f_b/f_m bassi), esse sopportano mediamente circa l'80% del tagliante totale, mentre la riduzione dei parametri meccanici della malta determina una redistribuzione dei carichi e un contributo in termini percentuali mediamente più omogeneo tra i diversi elementi strutturali e non strutturali.

6 Conclusioni

Nel corso di eventi sismici, le strutture intelaiate in calcestruzzo armato con tamponamenti in muratura presentano una complessa interazione tra telaio e muratura. Quando la struttura è soggetta a forze orizzontali, il telaio in calcestruzzo entra in contatto con il tamponamento, generando una domanda di taglio addizionale alle estremità delle colonne del telaio, che può portare a meccanismi di collasso locale. L'influenza del tamponamento, l'entità della domanda di taglio addizionale sulle colonne e l'effetto di essa sugli elementi in c.a., dipende sicuramente dai parametri di progetto della muratura e dal rapporto di resistenza e rigidezza dei materiali costituenti la muratura. In tale scenario il presente lavoro di tesi si assesta nello studio dell'impatto di alcuni parametri di design della muratura sugli:

- **effetti globali:** resistenza e duttilità del sistema;
- **effetti locali:** domanda di taglio addizionale ed effetti sul meccanismo di collasso degli elementi in c.a..

Attraverso l'utilizzo di STKO, software grafico per OpenSees, è stata effettuata un'analisi numerica dettagliata di tali effetti adoperando un approccio di micro-modellazione di due telai tamponati provenienti da due campagne sperimentali differenti (Cavaleri e Di Trapani [33], Mherabi et al. [34]). I due telai, differenti per rapporto di forma (h/l) e tipologia di muratura, sono stati testati con analisi pushover. La validazione dell'approccio di modellazione è stata eseguita mediante il confronto con i dati sperimentali, garantendo la robustezza e l'affidabilità del modello proposto.

È stata eseguita successivamente un'analisi parametrica sui due provini selezionati, variando il rapporto tra resistenza a compressione dell'unità di muratura e malta (f_b/f_m), mantenendo fissa la resistenza a compressione del mattone e variando quella della malta e conseguentemente gli altri parametri meccanici ad essa associati. Sono stati confrontati sia le risposte globali in termini di resistenza e duttilità, sia gli effetti locali in termini di domanda di taglio registrata alle estremità delle colonne interessate dal fenomeno di interazione telaio-tamponamento e infine confrontate con la capacità a taglio delle sezioni in esame. Dai risultati mostrati nei paragrafi precedenti è stato possibile dedurre come aumentando il parametro f_b/f_m si abbia un decremento di resistenza globale della struttura che tuttavia risulta sempre più alto di quello fornito dal solo telaio non tamponato (circa il doppio della resistenza del bare frame per un rapporto f_b/f_m alto pari a 4). Inoltre, un tamponamento progettato con rapporto f_b/f_m alto fornisce una risposta più duttile del sistema, evidenziato dalla presenza di un ramo plastico post-picco nella curva pushover. D'altra parte analizzando l'impatto di tale parametro sugli effetti locali, si nota come la domanda di taglio effettivamente

diminuisca per rapporti f_b/f_m più alti e pertanto ci si allontani da eventuali rotture a taglio delle sezioni di estremità delle colonne in c.a..

Successivamente, sulle basi del modello calibrato e validato relativo al provino S1B [33], è stata realizzata una struttura prototipo in calcestruzzo armato in scala reale, al fine di valutare gli effetti globali e locali su un esempio di una struttura reale, suggerendo possibili sviluppi futuri e indicando potenziali suggerimenti per la progettazione dei tamponamenti in muratura. È stata svolta la stessa analisi parametrica condotta per i due campioni precedentemente descritti, al variare del rapporto f_b/f_m , da cui è stato possibile verificare come, anche su scale reale, il rapporto tra le due resistenze a compressione mattone-malta, risulti un parametro da tenere in considerazione nelle fasi di progettazione. Le considerazioni fatte per i provini sperimentali sono state confermate anche sul prototipo a scala reale, in cui per alti valori di f_b/f_m si è registrato una riduzione di resistenza globale con conseguente aumento della duttilità del sistema. A tali valori sono associate risposte locali più favorevoli, registrando una minore domanda di taglio alle estremità delle colonne e dunque una maggiore sicurezza nei confronti dei meccanismi di collasso fragili come rotture a taglio delle colonne dovuta all'interazione telaio-tamponamento.

In conclusione, il rapporto tra la resistenza a compressione dell'unità di muratura e della malta (f_b/f_m) si è rivelato un parametro chiave per la progettazione del tamponamento in muratura. Tale parametro condiziona significativamente le risposte globali e locali, difatti attraverso lo studio qui presentato è stato possibile giungere alle seguenti considerazioni:

- Alti valori del rapporto f_b/f_m hanno provocato l'insorgere di meccanismi prevalentemente di scorrimento dovute alla rottura dei giunti di malta, con un risposte globali di natura duttile e con una resistenza complessiva minore. Al contrario, valori inferiori o vicini all'unità, hanno generato meccanismi di rottura prevalentemente caratterizzati dalla rottura del pannello di muratura con prevalente fessurazione dei blocchi di muratura, conseguente comportamento fragile e resistenza globale maggiore;
- All'aumentare del rapporto tra la resistenza a compressione del mattone e quella della malta si ha una graduale diminuzione della domanda di taglio delle sezioni di estremità delle colonne con minore danneggiamento delle zone di nodo, confermando come il rapporto di resistenza analizzato possa essere potenzialmente preso in considerazione nella progettazione dei tamponamenti in muratura, nonché per prevedere l'insorgenza di domande di taglio eccessive e che porterebbero all'insorgenza di rotture a taglio.
- La resistenza globale per rapporti f_b/f_m alti (3, 4), è comunque più alta di quella che si otterrebbe con il solo telaio non tamponato (circa il doppio). Pertanto, un tamponamento così progettato porterebbe in ogni caso un taglio circa 2 volte più

grande del telaio non tamponato ma con il vantaggio della presenza di un meccanismo più duttile, dove la rottura è concentrata su elementi non strutturali per prevalente scorrimento dei giunti di malta.

Questi risultati forniscono una visione dettagliata della risposta strutturale al variare del rapporto di resistenza mattone-malta, offrendo informazioni utili per la progettazione e la comprensione del comportamento delle strutture intelaiate in calcestruzzo armato e tamponate durante eventi sismici. La variazione del rapporto di resistenza mattone-malta e dello spessore del tamponamento ha mostrato impatti significativi sulla risposta sismica, sottolineando l'importanza di considerare attentamente questi fattori durante la fase di progettazione del tamponamento in muratura.

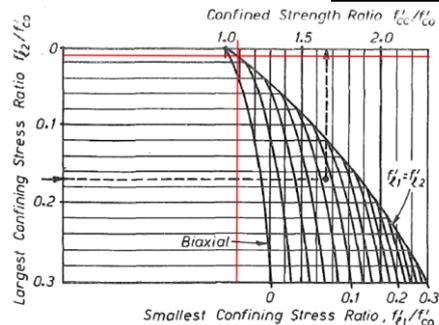
APPENDICI

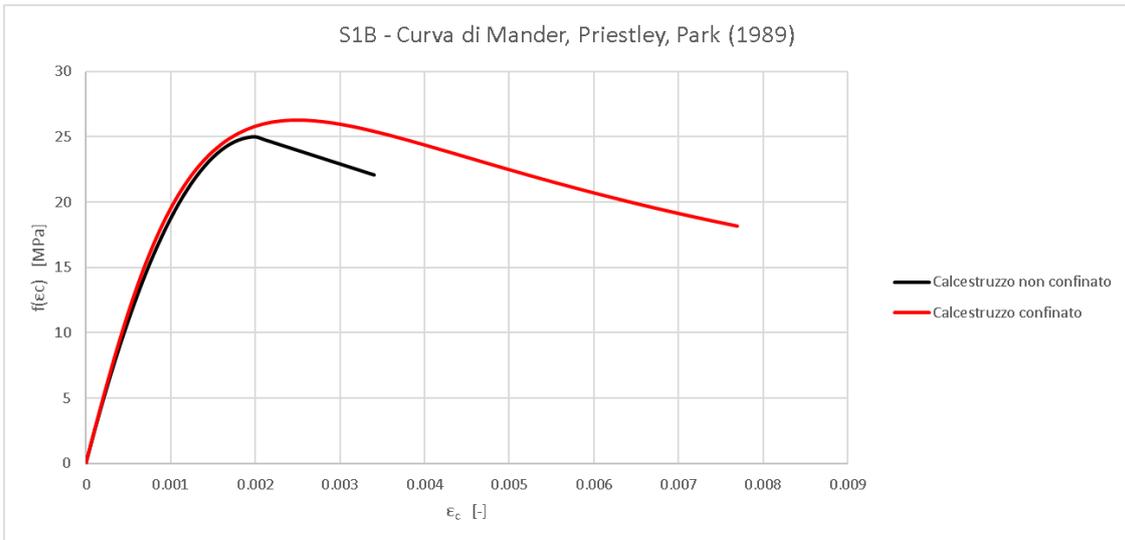
A. Valutazione delle proprietà meccaniche del calcestruzzo confinato con il modello di Mander, Priestley, Park (1989)

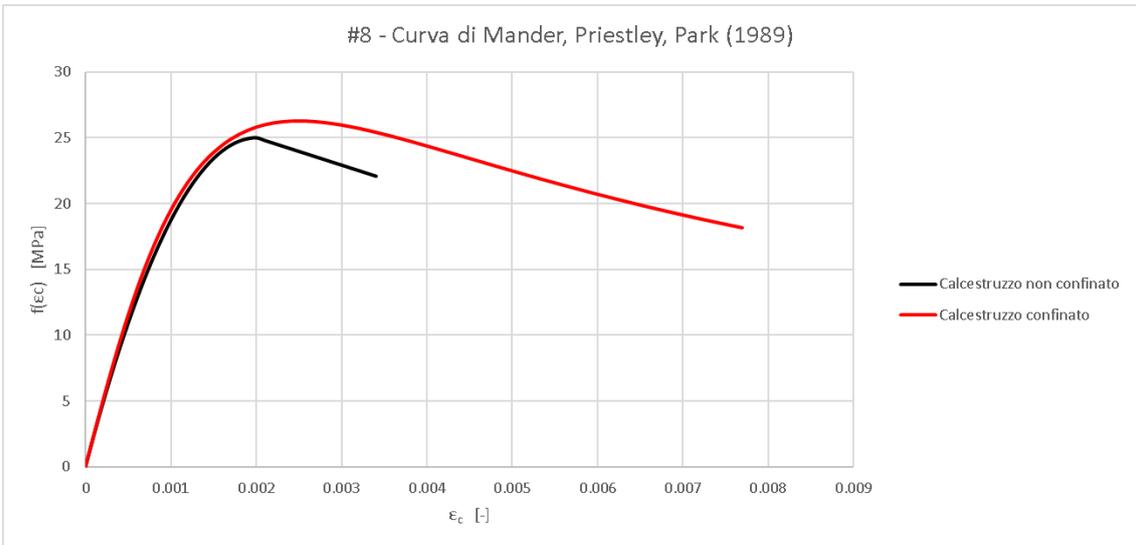
A.1 Provino S1B

Dati di input		
Armatura trasversale	Armatura longitudinale	Geometria
$\Phi_{staffe,x} = 6$ mm	$\Phi_{long} = 10$ mm	$b_c = 200$ mm
$n_{staffe,x} = 2$	$n_{long} = 4$	$h_c = 200$ mm
$\Phi_{legature,x} = 0$ mm	$A_{s,long} = 314.16$ mm ²	$c = 20$ mm
$n_{legature,x} = 0$	$\rho_{s,long} = 0.013$	$b_0 = 154$ mm
$\Phi_{staffe,y} = 6$ mm		$h_0 = 154$ mm
$n_{staffe,y} = 2$		$s = 100$ mm
$\Phi_{legature,y} = 0$ mm		$s' = 94$ mm
$n_{legature,y} = 0$		
$A_{s,x} = 56.55$ mm ²		
$A_{s,y} = 56.55$ mm ²		
$\rho_{sxt} = 0.004$		
$\rho_{syt} = 0.004$		
$\rho_{st} = 0.004$		
	Calcestruzzo	
	$*E_c = 25000$ MPa	
	$E_{c,sec} = 8901.098901$ MPa	
	$f_{c0} = 30$ MPa	
	$\epsilon_{c0} = 0.0026$	
	$\epsilon_{cu} = 0.0035$	
	$\epsilon_{su} = 0.075$	
	$f_y = 450$ MPa	
	*Ec è stimato come 5000 volte la radice quadrata di fc0	

Output di calcolo			
Calcolo K_e	n. barre confinate lato	$w_{i,x}$ [mm]	$w_{i,x}^2/6$ [mm ²]
$K_e = 0.264$	2	128	2730.67
$A_e = 6176.04$ mm ²	0	0	0.00
$A_{cc} = 23401.84$ mm ²	2	128	2730.67
$c_1 = 0.695$	n. barre confinate lato	$w_{i,y}$ [mm]	$w_{i,y}^2/6$ [mm ²]
$c_2 = 0.695$	2	128	2730.67
	0	0	0.00
	2	128	2730.67
			10922.67
Calcolo $f_{lex,y}$			
$f_{lex} = 0.436$ MPa			
$f_{ley} = 0.436$ MPa			
$f_{11}/f_{c0} = 0.015$			
$f_{12}/f_{c0} = 0.015$			
Calcolo dati Curva			
$k = 1.08$			
$f_{cc} = 32.4$ MPa			
$K = 0.08$			
$\epsilon_{cc} = 0.0036$			
$\epsilon_{ccu} = 0.0089$			







B. Script Python per la registrazione del taglio

```
import os
import math
import itertools
import numpy as np
import time
import traceback
import sys

from PyMpc import *
from PyMpc import MpcOdbVirtualResult as vr
from PySide2.QtCore import Qt
from PySide2.QtWidgets import (
    QApplication,
    QMessageBox,
    QDialog,
    QInputDialog,
    QLineEdit,
    QProgressBar,
    QVBoxLayout,
    QListWidget,
    QListWidgetItem,
    QLabel,
    QDialogButtonBox,
)

# get document and active window
App.clearTerminal()
doc = App.postDocument()
win = QApplication.activeWindow()
wtitle = 'Section Cut'

# globals
class _globals:
```

```

# an absolute tolerance
length_tolerance = 1.0e-8
angle_tolerance = 1.0e-10

# a list of tuples for computing angles in 4-node polygons
q4_angle_indices = ((1,3), (2,0), (3,1), (0,2))

# sub-triangles of a quad
qsubs = ((0,1,2), (0,2,3))

# the extraction type
class extraction_type:
    end = 'End'
    end_of_each_stage = 'End of each stage'
    all = 'All Steps'
    options = [end, end_of_each_stage, all]

# progress dialog
class ProgressDialog(QDialog):
    def __init__(self, title='Progress', barmin=0, barmax=100, parent=None):
        super().__init__(parent=parent)
        l = QVBoxLayout()
        bar = QProgressBar(self)
        self.barmin = barmin
        self.barmax = barmax
        bar.setRange(self.barmin, self.barmax)
        bar.setValue(self.barmin)
        bar.setTextVisible(True)
        bar.setAlignment(Qt.AlignCenter)
        l.addWidget(bar)
        self.bar = bar
        self.setLayout(l)
        self.setModal(True)
        self.setWindowTitle(title)
    def setPercentage(self, p):
        self.bar.setValue(self.barmin + (self.barmax-self.barmin)*p)

```

```

# multiple input dialog
class ListMultipleInputDialog(QDialog):
    def __init__(self, title='Select Results', label=None, names = [],
parent=None):
        super().__init__(parent=parent)
        l = QVBoxLayout()
        if label:
            l.addWidget(QLabel(label))
        listwidget = QListWidget(self)
        for item in names:
            listitem = QListWidgetItem(item, listwidget)
            listitem.setCheckState(Qt.Unchecked)
            listwidget.addItem(listitem)
        l.addWidget(listwidget)
        bbox = QDialogButtonBox(QDialogButtonBox.Ok | QDialogButtonBox.Cancel)
        bbox.accepted.connect(self.accept)
        bbox.rejected.connect(self.reject)
        l.addWidget(bbox)
        self.listwidget = listwidget
        self.setLayout(l)
        self.setModal(True)
        self.setWindowTitle(title)
    def getItems(parent, title, label, names):
        d = ListMultipleInputDialog(title, label, names, parent)
        if d.exec_() != QDialog.Accepted:
            return []
        results = []
        for i in range(d.listwidget.count()):
            item = d.listwidget.item(i)
            if item.checkState() == Qt.Checked:
                results.append(item.text())
        d.deleteLater()
        return results

# geom utils

```

```

def point_in_triangle(nodes, trial, lch):
    G = np.asarray([[trial.x],[trial.y], [trial.z]])
    # position matrix
    n = len(nodes)
    X = np.zeros((3,n))
    for i in range(n):
        inode = nodes[i]
        X[0, i] = inode.x
        X[1, i] = inode.y
        X[2, i] = inode.z
    dN = np.asarray([
        [-1.0, -1.0, 0.0],
        [1.0, 0.0, 0.0],
        [0.0, 1.0, 0.0]])
    J = np.matmul(X,dN)
    vx = J[:,0]
    vy = J[:,1]
    vz = np.cross(vx, vy)
    vz /= max(np.linalg.norm(vz), 1.0e-16)
    J[:,2] = vz
    iJ = np.linalg.inv(J)
    J[:,2] = 0.0
    x,y = 0.0, 0.0
    N = np.asarray([[1.0-x-y],[x],[y]])
    P = np.matmul(X,N)
    D = G-P
    L = np.matmul(iJ,D)
    # result
    x,y,z = L[0,0], L[1,0], L[2,0]
    # check for negative values as an error measure
    N = np.asarray([[1.0-x-y],[x],[y]])
    distance = 0.0
    for i in range(3):
        iN = N[i][0]
        if iN < 0.0:

```

```

        distance = max(distance, -iN)
    return distance < 1.0e-2 and abs(z) < 1.0e-4*1ch

# get database
def get_database():
    data = {}
    db = None
    for id, db in doc.databases.items():
        key = '[{}] {}'.format(id, os.path.basename(db.fileName))
        data[key] = id
    if len(data) == 1:
        db_id = list(data.values())[0]
        db = doc.getDatabase(db_id)
    elif len(data) > 1:
        items = list(data.values())
        result, ok = QDialog.getItem(
            win, wtitle, 'Select DB', items, editable=False)
        if ok:
            db_id = data[result]
            db = doc.getDatabase(db_id)
    if db is None:
        QMessageBox.critical(win, wtitle, 'Abort:\nNo Database selected')
    return db

# get a mesh
def get_mesh(db):
    U = db.getNodalResult('Displacement')
    if U is None: return None
    all_stages = db.getStageIDs()
    if len(all_stages) == 0: return None
    last_stage = all_stages[-1]
    all_steps = db.getStepIDs(last_stage)
    if len(all_steps) == 0: return None
    last_step = all_steps[-1]
    opt = MpcOdbVirtualResultEvaluationOptions()

```

```

    opt.stage = last_stage
    opt.step = last_step
    field = U.evaluate(opt)
    if field is None: return None
    return field.mesh

# get selection
def get_selection(mesh):
    # get nodes from selection
    selection = doc.scene.plotSelection
    node_ids = []
    for _, data in selection.items():
        for i in data.info.nodes:
            node_ids.append(i)
    node_ids = list(set(node_ids))
    nodes = [None]*len(node_ids)
    for i in range(len(node_ids)):
        inode = mesh.getNode(node_ids[i])
        if inode is None:
            QMessageBox.critical(win, wtitle, 'Abort:\nNull Node Found')
        nodes[i] = inode
    n = len(nodes)
    if n == 0:
        QMessageBox.critical(win, wtitle, 'Abort:\nNo node selected')
    elif n == 2:
        print('Found 2 points: Line Cut')
        distance = (nodes[1].position - nodes[0].position).norm()
        if distance < _globals.length_tolerance:
            QMessageBox.critical(win, wtitle,
                'Abort:\nThe 2 selected nodes coincide (distance =
{:.2g})'.format(distance))
            nodes = []
    elif n == 3:
        print('Found 3 points: Triangular Surface Cut')
        a = nodes[1].position - nodes[0].position

```

```

b = nodes[2].position - nodes[0].position
area = a.cross(b).norm()/2.0
if math.sqrt(2.0*area) < _globals.length_tolerance:
    QMessageBox.critical(win, wtitle,
        'Abort:\nThe 3 selected nodes form a collapsed triangle (area
= {:.2g})'.format(area))
    nodes = []
elif n == 4:
    print('Found 4 points: Quadrilateral Surface Cut')
    asum = 0.0
    q = [nodes[0], None, None, None]
    others = [1,2,3]
    found = False
    for perm in itertools.permutations(others):
        for i in range(3): q[perm[i]] = nodes[i+1]
        # check this permutation
        asum = 0.0
        for i in range(4):
            aux = _globals.q4_angle_indices[i]
            a = q[aux[0]].position - q[i].position
            b = q[aux[1]].position - q[i].position
            an = a.norm()
            if an < _globals.length_tolerance: continue
            bn = b.norm()
            if bn < _globals.length_tolerance: continue
            a /= an
            b /= bn
            asum += math.acos(a.dot(b))
        error = abs(2.0*math.pi - asum)
        if error < _globals.angle_tolerance:
            found = True
            nodes = q
            break
    if not found:
        QMessageBox.critical(win, wtitle,

```

```
        'Abort:\nThe 4 selected nodes do not form a convex
quadrilateral'.format(n))
```

```
        nodes = []
```

```
    else:
```

```
        QMessageBox.critical(win, wtitle,
```

```
        'Abort:\nInvalid number of nodes ({}).\nOnly 2, 3 or 4 nodes are
allowed'.format(n))
```

```
    # done
```

```
    center = Math.vec3(0.0,0.0,0.0)
```

```
    lch = 0.0
```

```
    if len(nodes) > 0:
```

```
        bbox = FxBndBox()
```

```
        for node in nodes:
```

```
            bbox.add(node.position)
```

```
        center = (bbox.minPoint + bbox.maxPoint)/2.0
```

```
        lch = (bbox.maxPoint - bbox.minPoint).norm()
```

```
    return nodes, center, lch
```

```
# compute triad
```

```
def get_orientation(nodes, center, lch):
```

```
    n = len(nodes)
```

```
    dx = Math.vec3(1.0,0.0,0.0)
```

```
    dy = Math.vec3(0.0,1.0,0.0)
```

```
    dz = Math.vec3(0.0,0.0,1.0)
```

```
    if n == 2:
```

```
        p1 = nodes[0].position
```

```
        p2 = nodes[1].position
```

```
        dy = (p2-p1).normalized()
```

```
        if abs(dy[2]) < 0.99:
```

```
            # not aligned with global Z
```

```
            dx = Math.vec3(0.0, 0.0, 1.0)
```

```
            dz = dx.cross(dy).normalized()
```

```
            dx = dy.cross(dz).normalized()
```

```
        else:
```

```
            dx = Math.vec3(1.0, 0.0, 0.0)
```

```
            dz = dx.cross(dy).normalized()
```

```

        dx = dy.cross(dz).normalized()
elif n > 2:
    p1 = nodes[0].position
    p2 = nodes[1].position
    p3 = nodes[2].position
    dy = (p2-p1).normalized()
    dz = (p3-p1).normalized()
    dx = dy.cross(dz).normalized()
    dz = dx.cross(dy).normalized()
# print and update ...
vrep = None
def make_vrep(vrep):
    if vrep:
        doc.removeCustomDrawableEntity(vrep)
    vrep = FxShape()
    for dir,col in zip( (dx,dy,dz),
                       (Math.vec3(0.8,0.0,0.0),
                        Math.vec3(0.0,0.8,0.0),
                        Math.vec3(0.0,0.0,0.8)) ):
        edge = FxShapeEdge()
        edge.indices.append(0)
        edge.indices.append(1)
        edge.vertices.append(Math.vertex(center, col))
        edge.vertices.append(Math.vertex(center + dir * lch/4.0, col))
        vrep.edges.append(edge)
    mat = FxMaterial()
    mat.lineWidth = 4.0
    mat.coloringMode = FxColoringMode.ColorizeUsingNormals
    mat.lighting = False
    vrep.material = mat
    vrep.commitChanges()
    doc.addCustomDrawableEntity(vrep)
    App.updateActiveView()
    return vrep
vrep = make_vrep(vrep)
axes = {'X':dx, 'Y':dy, 'Z':dz}

```

```

while True:
    answer, ok = QDialog.getItem(win, wtitle,
        'Do you want to rotate about an axis?\nIf Yes, please select the
axis',
        ['X','Y','Z'], editable=False)
    if not ok:
        break
    dir = axes[answer]
    answer, ok = QDialog.getDouble(win, wtitle,
        'Please enter the rotation angle in degrees',
        0.0, -360.0, 360.0, 2, Qt.WindowFlags(), 90.0)
    if not ok:
        break
    angle = answer*math.pi/180.0
    qvec = dir.normalized() * math.sin(angle/2.0)
    qang = math.cos(angle/2.0)
    quat = Math.quaternion(qang, qvec.x, qvec.y, qvec.z)
    quat.normalize()
    dx = quat.rotate(dx)
    dy = quat.rotate(dy)
    dz = quat.rotate(dz)
    vrep = make_vrep(vrep)
# done
return dx,dy,dz

# element info
class element_info_t:
    def __init__(self, ele, node_pos, nodes):
        # the MpcElement object
        self.element = ele
        # a list of positions (0 to len(ele.nodes)-1)
        # of the nodes on the section cut
        self.node_positions = node_pos
        # and the nodes
        self.nodes = nodes

```

```

# expand selection
def expand_selection(poly_nodes, mesh, center, lch):
    nodes = []
    n = len(poly_nodes)
    if n == 2:
        # get all nodes along line
        p1 = poly_nodes[0].position
        p2 = poly_nodes[1].position
        dx = p2-p1
        L2 = dx.dot(dx)
        tol = L2*1.0e-6
        for _, node in mesh.nodes.items():
            if node.id==poly_nodes[0].id or node.id==poly_nodes[1].id:
                nodes.append(node)
            else:
                p3 = node.position
                dy = p3-p1
                if dx.cross(dy).norm() < tol:
                    dp = dy.dot(dx)
                    if dp > -tol and dp < L2+tol:
                        nodes.append(node)
    elif n == 3:
        # get all nodes in triangle
        for _, node in mesh.nodes.items():
            if (node.position - center).norm() <= lch/2.0 +
_globals.length_tolerance:
                if point_in_triangle(poly_nodes, node, lch):
                    nodes.append(node)
    elif n == 4:
        # get all nodes in quad
        T1 = [poly_nodes[i] for i in _globals.qsubs[0]]
        T2 = [poly_nodes[i] for i in _globals.qsubs[1]]
        for _, node in mesh.nodes.items():
            if (node.position - center).norm() <= lch/2.0 +
_globals.length_tolerance:

```

```

node, lch):         if point_in_triangle(T1, node, lch) or point_in_triangle(T2,
nodes.append(node)

# vrep
vrep = FxShape()
counter = 0
for node in nodes:
    vrep.vertices.indices.append(counter)
    vrep.vertices.vertices.append(Math.vertex(node.position))
    counter += 1
mat = FxMaterial()
mat.pointColor = FxColor(0.0, 0.4, 1.0)
mat.pointSize = 5.0
vrep.material = mat
vrep.commitChanges()
doc.addCustomDrawableEntity(vrep)
# done
return nodes

# process selection
def process_selection(selected_nodes, mesh, center, lch, dx, scale):
    t1 = time.time()
    # find all elements sharing nodes with selected_nodes
    ele_infos = {}
    for _, ele in mesh.elements.items():
        cc0 = ele.computeCenter()-center
        if cc0.dot(dx)*scale < -1.0e-8*lch and cc0.norm() <= lch*0.55:
            node_positions = []
            nodes = []
            for node in selected_nodes:
                for node_position in range(len(ele.nodes)):
                    if node.id == ele.nodes[node_position].id:
                        nodes.append(node)
                        node_positions.append(node_position)
            if len(node_positions) > 0:

```

```

        ele_infos[ele.id] = element_info_t(ele, node_positions, nodes)
# select elements for checking
if doc.activePlotGroup and len(doc.activePlotGroup.plots) > 0:
    pid = list(doc.activePlotGroup.plots.keys())[0]
    seldata = doc.scene.plotSelection.get(pid, None)
    if seldata is None:
        seldata = MpcOdpSelectionData()
        doc.scene.plotSelection[pid] = seldata
    for id, _ in ele_infos.items():
        seldata.info.elements.insert(id)
    doc.scene.updateSelectionVisualRepresentationAndGraphics()
    App.updateActiveView()
# check time... this seems expensive
t2 = time.time()
dt = t2-t1
print('Expand selection - elapsed: {:.3g} seconds.'.format(dt))
# done
return ele_infos

# integrate
def integrate(db, ele_infos, center, dx, dy, dz, scale):
    # spatial dimension
    dim = db.info.spatialDimension
    # get all results and map them to their name
    results = {}
    for id in db.getElementalResultIds():
        result = db.getElementalResult(id)
        name = '[{}] {}'.format(id, result.displayName())
        if len(name) > 50:
            name = name[:35] + ' ... ' + name[-15:]
        results[name] = result
    # choose results
    selection = ListMultipleInputDialog.getItems(win, wtitle,
        'Select the results to integrate', list(results.keys()))
    if len(selection) == 0:

```

```

    return None

# choose extraction type
extraction, ok = QDialog.getItem(win, wtitle,
    'Select the extraction method',
    extraction_type.options, editable=False)
if not ok:
    return None

print('Extraction method: {}'.format(extraction))

# stage-step pairs for evaluation
stage_and_steps = []
all_stages = db.getStageIDs()
if extraction == extraction_type.end:
    last_stage = all_stages[-1]
    all_steps = db.getStepIDs(last_stage)
    last_step = all_steps[-1]
    stage_and_steps.append((last_stage, last_step))
elif extraction == extraction_type.end_of_each_stage:
    for stage in all_stages:
        all_steps = db.getStepIDs(stage)
        last_step = all_steps[-1]
        stage_and_steps.append((stage, last_step))
else:
    for stage in all_stages:
        all_steps = db.getStepIDs(stage)
        for step in all_steps:
            stage_and_steps.append((stage, step))

NUM_OUT = len(stage_and_steps)

# open the progress bar
dialog = ProgressDialog(parent=win, title=wtitle)
the_exception = None

try:
    dialog.show()

    # some variables to store temporaries
    F = Math.vec3(0.0, 0.0, 0.0)
    M = Math.vec3(0.0, 0.0, 0.0)

```

```

LF = Math.vec3(0.0, 0.0, 0.0)
LM = Math.vec3(0.0, 0.0, 0.0)
X = Math.vec3(0.0, 0.0, 0.0)
R = (dx, dy, dz)
OUT = np.zeros((NUM_OUT, 6))
# make the evaluation option
opt = MpcOdbVirtualResultEvaluationOptions()
for increment in range(NUM_OUT):
    opt.stage, opt.step = stage_and_steps[increment]
    # for each result
    for ith_selection in selection:
        result = results[ith_selection]
        print('Result = {}'.format(result))
        ncomp = result.size()
        if ncomp < 2: continue
        # evaluate result
        field = result.evaluate(opt)
        # integrate
        for _, info in ele_infos.items():
            elid = info.element.id
            for node_pos, node in zip(info.node_positions,
info.nodes):
                # get node-forces in global coordinates
                try:
                    eleForces = field[MpcOdbResultField.element(elid,
node_pos)]
                except:
                    continue
                F[0] = eleForces[0]
                F[1] = eleForces[1]
                if dim == MpcOdbSpatialDimension.D2:
                    F[2] = 0.0
                    M[0] = 0.0
                    M[1] = 0.0
                    if ncomp > 2:
                        M[2] = eleForces[2]

```

```

        else:
            M[2] = 0.0
    else:
        if ncomp > 2:
            F[2] = eleForces[2]
            if ncomp > 5:
                M[0] = eleForces[3]
                M[1] = eleForces[4]
                M[2] = eleForces[5]
            else:
                F[2] = 0.0
                M[0] = 0.0
                M[1] = 0.0
                M[2] = 0.0

# get forces and location in local coordinates
delta = node.position - center
for i in range(3):
    iR = R[i]
    LF[i] = F.dot(iR)*scale
    LM[i] = M.dot(iR)*scale
    X[i] = delta.dot(iR)

# integrate them
for i in range(3):
    OUT[increment, i] += LF[i]
    OUT[increment, i+3] += LM[i]
* dy - Fy * dz
    OUT[increment, 3] += LF[2]*X[1] - LF[1]*X[2] # Mx = Fz
* dz - Fz * dx
    OUT[increment, 4] += LF[0]*X[2] - LF[2]*X[0] # My = Fx
* dx - Fx * dy
    OUT[increment, 5] += LF[1]*X[0] - LF[0]*X[1] # Mz = Fy

# update
    dialog.setPercentage(float(increment+1)/float(NUM_OUT))
    App.processEvents()
except Exception as ex:
    the_exception = ex

```

```

finally:
    dialog.accept()
    dialog.deleteLater()
# check
if the_exception:
    raise the_exception
# done
return OUT

# main function
def make_section_cut():
    # start
    doc.clearCustomDrawableEntities()
    # get database
    db = get_database()
    if db is None:
        return False
    # get info
    dimension = db.info.spatialDimension
    if dimension != MpcOdbSpatialDimension.D2 and dimension !=
MpcOdbSpatialDimension.D3:
        QMessageBox.critical(win, wtitle,
            'Abort:\nInvalid dimension {}. Only 2D and 3D
allowed'.format(dimension))
        return False
    # get a mesh
    mesh = get_mesh(db)
    if mesh is None:
        QMessageBox.critical(win, wtitle, 'Abort:\nCannot obtain the mesh')
        return False
    # get selection
    nodes, center, lch = get_selection(mesh)
    if len(nodes) == 0:
        return False
    # get orientation
    dx,dy,dz = get_orientation(nodes, center, lch)

```

```

# expand selection
nodes = expand_selection(nodes, mesh, center, lch)
if len(nodes) == 0:
    return False
# process selection
scale = 1.0
ele_infos = process_selection(nodes, mesh, center, lch, dx, scale)
if len(ele_infos) == 0:
    print('Cannot find elements in the -dX direction. Try other side
(scale = -1)')
    scale = -1.0
    ele_infos = process_selection(nodes, mesh, center, lch, dx, scale)
    if len(ele_infos) == 0:
        QMessageBox.critical(win, wtitle, 'Abort:\nNo Elements connected
to the cut nodes')
        return False
# integrate
forces = integrate(db, ele_infos, center, dx, dy, dz, scale)
if forces is None:
    return False
# print
fmt_str = '{:>14s}'*6
fmtflt = '{:14.4g}'*6
print(fmt_str.format('Fx', 'Fy', 'Fz', 'Mx', 'My', 'Mz'))
for i in range(forces.shape[0]):
    print(fmtflt.format(*forces[i,:]))
# run
make_section_cut()

```

C. Valutazione del taglio resistente

C.1 Formulazione di Biskinis

$$V_R = \frac{1}{\gamma_{el}} \left[\frac{h-x}{2L_v} \min(N; 0.55A_c f_c) + (1 - 0.05 \min(0.5; \mu \Delta_{pl})) \left[0.16 \max(0.5; 100\rho_{tot}) \left(1 - 0.16 \min\left(5; \frac{L_v}{h}\right) \right) \sqrt{f_c} A_c + V_w \right] \right]$$

- $\gamma_{el} = 1.15$ per gli elementi primari ed 1.0 per gli elementi secondari
- h è l'altezza totale della sezione;
- x è l'altezza della zona compressa;
- N è lo sforzo normale di compressione (assunto pari a zero se di trazione);
- L_v è la luce di taglio ($L/5$);
- A_c è l'area della sezione pari a ($b \times d$);
- f_c è la resistenza a compressione del calcestruzzo;
- ρ_{tot} è la percentuale geometrica totale di armatura longitudinale;
- V_w è il contributo dell'armatura trasversale per la resistenza a taglio definito come segue:

$$V_w = \rho_{sx} b_w z f_{yw}$$

dove:

- ρ_{sx} è la percentuale geometrica di armatura trasversale;
- z è la lunghezza del braccio di leva interno;
- f_{yw} è la tensione di snervamento dell'acciaio dell'armatura trasversale.

γ_{el}	b	h	d	d	Ac	fc	fy	L	Lv
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[mm]
1	200	200	20	180	40000	25	450	2000	400
N	x	f_{long}	n°f_{long}	A_{slong}	r_{tot}	f_{st}	n°f_{long}	A_{st}	s
[N]	[mm]	[mm]	[-]	[mm ²]	[-]	[mm]	[-]	[mm ²]	[mm]
200000	84	180	4	314	0.00785	6	2	56.52	100
r_{sx}	z	mD	mDpl	b(mDpl)		V₁	V₂	V₃=V_w	V_{tot}
[-]	[mm]	[-]	[-]	[-]		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
0.002826	162	4	3	0.85		29.00	17.1	41.2	78.54

Tabella C.1: Provino S1B: taglio resistente delle colonne calcolato secondo *Biskinis*

γ_{el}	B	H	d	d	Ac	fc	fy	L	Lv
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[mm]
1	177.8	177.8	19.05	159	31612.84	26.8	370	1765.3	353.06
N	x	f_{long}	n°f_{long}	A_{slong}	r_{tot}	f_{st}	n°f_{long}	A_{st}	s
[N]	[mm]	[mm]	[-]	[mm ²]	[-]	[mm]	[-]	[mm ²]	[mm]
146850	70.65	12.7	8	1012.901	0.032041	6.35	2	63.30633	63.5
r_{sx}	z	mD	mDpl	b(mDpl)		V₁	V₂	V₃=V_w	V_{tot}
[-]	[mm]	[-]	[-]	[-]		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
0.0056071	142.88	4	3	0.85		22.28	57.2	52.70	115.74

Tabella C.2: Provino #8: taglio resistente delle colonne calcolato secondo *Biskinis*

γ_{el}	b	h	d	d	Ac	fc	fy	L	Lv
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[mm]
1	350	350	20	330	122500	25	450	3000	600
N	x	f_{long}	n°f_{long}	A_{slong}	r_{tot}	f_{st}	n°f_{long}	A_{st}	s
[N]	[mm]	[mm]	[-]	[mm ²]	[-]	[mm]	[-]	[mm ²]	[mm]
165860	103.6	14	8	1230.88	0.01005	6	2	56.52	200
r_{sx}	z	mD	mDpl	b(mDpl)		V₁	V₂	V₃=V_w	V_{tot}
[-]	[mm]	[-]	[-]	[-]		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]

0.0008074	297	4	3	0.85	34.05	71.5	37.77	126.90
-----------	-----	---	---	------	-------	------	-------	--------

Tabella C.3: Prototipo (section cut 1): taglio resistente delle colonne calcolato secondo *Biskinis*

γ_{el}	b	h	d	d	Ac	fc	fy	L	Lv
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[mm]
1	350	350	20	330	122500	25	450	3000	600
N	x	f_{long}	n°f_{long}	A_{slong}	r_{tot}	f_{st}	n°f_{long}	A_{st}	s
[N]	[mm]	[mm]	[-]	[mm ²]	[-]	[mm]	[-]	[mm ²]	[mm]
235182	103.6	14	8	1230.88	0.01005	6	2	56.52	200
r_{sx}	z	mD	mDpl	b(mDpl)	V₁	V₂	V₃=V_w	V_{tot}	
[-]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	
0.0008074	297	4	3	0.85	46.97	71.5	37.77	139.81	

Tabella C.4: Prototipo (section cut 2): taglio resistente delle colonne calcolato secondo *Biskinis*

γ_{el}	b	h	d	d	Ac	fc	fy	L	Lv
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[mm]
1	350	350	20	330	122500	25	450	3000	600
N	x	f_{long}	n°f_{long}	A_{slong}	r_{tot}	f_{st}	n°f_{long}	A_{st}	s
[N]	[mm]	[mm]	[-]	[mm ²]	[-]	[mm]	[-]	[mm ²]	[mm]
227220	103.6	14	8	1230.88	0.01005	6	2	56.52	200
r_{sx}	z	mD	mDpl	b(mDpl)	V₁	V₂	V₃=V_w	V_{tot}	
[-]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	
0.0008074	297	4	3	0.85	45.52	71.5	37.77	138.37	

Tabella C.5: Prototipo (section cut 3): taglio resistente delle colonne calcolato secondo *Biskinis*

γ_{el}	b	h	d	d	Ac	fc	fy	L	Lv
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[mm]
1	350	350	20	330	122500	25	450	3000	600
N	x	f_{long}	n°f_{long}	A_{slong}	r_{tot}	f_{st}	n°f_{long}	A_{st}	s
[N]	[mm]	[mm]	[-]	[mm ²]	[-]	[mm]	[-]	[mm ²]	[mm]

173822	103.6	14	8	1230.88	0.01005	6	2	56.52	200
r_{sx}	z	mD	mDpl	b(mDpl)		V₁	V₂	V₃=V_w	V_{tot}
[-]	[mm]	[-]	[-]	[-]		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
0.0008074	297	4	3	0.85		14.64	71.5	37.77	107.49

Tabella C.6: Prototipo (section cut 4): taglio resistente delle colonne calcolato secondo *Biskinis*

C.2 Formulazione di Sezen e Moehle

$$V_R = V_s + V_c = k \left(\frac{A_w f_y d}{s} \right) + k \left(\frac{0.5 \sqrt{f_c}}{\frac{L_v}{d}} \sqrt{1 + P / (0.5 \sqrt{f_c} A_g)} \right) 0.8 A_g$$

- A_w è l'area dell'armatura trasversale;
- f_y è la tensione di snervamento dell'acciaio;
- d è l'altezza utile della sezione;
- s è il passo delle staffe;
- f_c è la resistenza a compressione del calcestruzzo;
- L_v è la luce di taglio ($L/5$);
- P è lo sforzo normale di compressione (assunto pari a zero se di trazione);
- A_g è l'area lorda della sezione;
- b è la larghezza della sezione;
- h è l'altezza della sezione;
- Il fattore k è definito uguale a 1,0 per una duttilità allo spostamento inferiore a 2, 0,7 per duttilità allo spostamento superiore a 6 e varia linearmente per duttilità di spostamento intermedio.

b	h	d	d	Ag	fc	fy	L	Lv
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[mm]
200	200	20	180	40000	25	450	2000	400
P	k	f_{st}	n°f_{long}	A_{st}	s	V_s	V_c	V_{tot}
[N]	[-]	[mm]	[-]	[mm ²]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]
200000	1	6	2	56.52	100	38.91	53.00	91.91

Tabella C.7: Provino S1B: taglio resistente delle colonne calcolato secondo *Sezen e Moehle*

b	h	d	d	Ag	fc	fy	L	Lv
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[mm]
177.8	177.8	19.05	158.75	31612.84	26.8	370	1765.3	353.06
P	k	f_{st}	n°f_{long}	A_{st}	s	V_s	V_c	V_{tot}
[N]	[-]	[mm]	[-]	[mm ²]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]
146850	1	6.35	2	63.31	63.5	49.77	41.83	91.60

Tabella C.8: Provino #8: taglio resistente delle colonne calcolato secondo *Sezen e Moehle*

b	h	d	d	Ag	fc	fy	L	Lv
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[mm]
350	350	20	330	122500	25	450	3000	600
P	k	f_{st}	n°f_{long}	A_{st}	s	V_s	V_c	V_{tot}
[N]	[-]	[mm]	[-]	[mm ²]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]
165860	1	6	2	56.52	200	38.91	53.00	91.91

Tabella C.9: Prototipo (section cut 1): taglio resistente delle colonne calcolato secondo *Sezen e Moehle*

b	h	d	d	Ag	fc	fy	L	Lv
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[mm]
350	350	20	330	122500	25	450	3000	600
P	k	f_{st}	n°f_{long}	A_{st}	s	V_s	V_c	V_{tot}
[N]	[-]	[mm]	[-]	[mm ²]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]
235182.5	1	6	2	56.52	200	35.67	152.2937	187.96

Tabella C.10: Prototipo (section cut 2): taglio resistente delle colonne calcolato secondo *Sezen e Moehle*

b	h	d	d	Ag	fc	fy	L	Lv
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[mm]
350	350	20	330	122500	25	450	3000	600
P	k	f_{st}	n°f_{long}	A_{st}	s	V_s	V_c	V_{tot}
[N]	[-]	[mm]	[-]	[mm ²]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]
227220	1	6	2	56.52	200	35.67	151.1697	186.84

Tabella C.11: Prototipo (section cut 3): taglio resistente delle colonne calcolato secondo *Sezen e Moehle*

b	h	d	d	Ag	fc	fy	L	Lv
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[mm]
350	350	20	330	122500	25	450	3000	600
P	k	f_{st}	n°f_{long}	A_{st}	s	V_s	V_c	V_{tot}
[N]	[-]	[mm]	[-]	[mm ²]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]
235182.5	1	6	2	56.52	200	35.67	152.2937	187.96

Tabella C.12: Prototipo (section cut 4): taglio resistente delle colonne calcolato secondo *Sezen e Moehle*

Bibliografia

- [1] F. da Porto, M. Donà, N. Verlato, and G. Guidi, “Experimental Testing and Numerical Modeling of Robust Unreinforced and Reinforced Clay Masonry Infill Walls, With and Without Openings,” *Front Built Environ*, vol. 6, p. 591985, Dec. 2020, doi: 10.3389/FBUIL.2020.591985/BIBTEX.
- [2] G. M. Verderame, P. Ricci, C. del Gaudio, and M. T. de Risi, “Experimental tests on masonry infilled gravity- and seismic-load designed RC frames,” *Brick and Block Masonry: Trends, Innovations and Challenges - Proceedings of the 16th International Brick and Block Masonry Conference, IBMAC 2016*, pp. 1349–1358, Nov. 2016, doi: 10.1201/B21889-167/EXPERIMENTAL-TESTS-MASONRY-INFILLED-GRAVITY-SEISMIC-LOAD-DESIGNED-RC-FRAMES-VERDERAME-RICCI-DEL-GAUDIO-DE-RISI.
- [3] F. Da Porto, G. Guidi, N. Verlato, and M. Dalla Benetta, “(1) (PDF) Combined In-Plane/Out-of-Plane Experimental Behaviour of Reinforced and Strengthened Infill Masonry Walls.” Accessed: Nov. 11, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/274039120_Combined_In-PlaneOut-of-Plane_Experimental_Behaviour_of_Reinforced_and_Strengthened_Infill_Masonry_Walls
- [4] L. Cavaleri and F. Di Trapani, “Cyclic response of masonry infilled RC frames: Experimental results and simplified modeling,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 65, pp. 224–242, 2014, doi: 10.1016/J.SOILDYN.2014.06.016.
- [5] A. V. Bergami and C. Nuti, “(1) (PDF) Experimental tests and global modeling of masonry infilled frames.” Accessed: Nov. 11, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/274646656_Experimental_tests_and_global_modeling_of_masonry_infilled_frames
- [6] R. R. Milanesi, P. Morandi, and G. Magenes, “Local effects on RC frames induced by AAC masonry infills through FEM simulation of in-plane tests,” *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 16, no. 9, pp. 4053–4080, Sep. 2018, doi: 10.1007/S10518-018-0353-5.
- [7] F. Di Trapani and M. Malavisi, “Seismic fragility assessment of infilled frames subject to mainshock/aftershock sequences using a double incremental dynamic analysis approach,” *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 211–235, Jan. 2018, doi: 10.1007/S10518-018-0445-2.
- [8] A. Fiore *et al.*, “About the influence of the infill panels over the collapse mechanisms activated under pushover analyses: Two case studies,” *SDEE*, vol. 39, pp. 11–22, Aug. 2012, doi: 10.1016/J.SOILDYN.2012.02.004.

- [9] G. Uva, D. Raffaele, F. Porco, and A. Fiore, “On the role of equivalent strut models in the seismic assessment of infilled RC buildings,” *Eng Struct*, vol. 42, pp. 83–94, Sep. 2012, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2012.04.005.
- [10] L. Cavaleri, F. Di Trapani, P. G. Asteris, and V. Sarhosis, “Influence of column shear failure on pushover based assessment of masonry infilled reinforced concrete framed structures: A case study,” *SOIL DYNAMICS AND EARTHQUAKE ENGINEERING*, vol. 100, pp. 98–112, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.SOILDYN.2017.05.032.
- [11] I. Koutromanos, A. Stavridis, P. B. Shing, and K. Willam, “Numerical modeling of masonry-infilled RC frames subjected to seismic loads,” *Comput Struct*, vol. 89, no. 11–12, pp. 1026–1037, Jun. 2011, doi: 10.1016/J.COMPSTRUC.2011.01.006.
- [12] L. Cavaleri and F. Di Trapani, “Prediction of the additional shear action on frame members due to infills,” *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 13, no. 5, pp. 1425–1454, May 2015, doi: 10.1007/S10518-014-9668-Z.
- [13] I. Calì and B. Pantò, “A macro-element modelling approach of Infilled Frame Structures,” *Comput Struct*, vol. 143, pp. 91–107, Sep. 2014, doi: 10.1016/J.COMPSTRUC.2014.07.008.
- [14] F. Di Trapani, V. Bogatkina, M. Petracca, and G. Camata, “Evaluation of the additional shear demand due to frame-infill interaction: a new capacity model,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 44, pp. 496–503, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.PROSTR.2023.01.065.
- [15] P. G. Asteris and C. Chrysostomou, “Failure Modes of Infilled Frames,” 2011.
- [16] S. M. N. Adnan, K. Matsukawa, Y. Haga, M. M. Islam, and Y. Nakano, “A nonlinear macromodel for simulating the in-plane behavior of unreinforced masonry (URM) infilled frames,” *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 20, no. 13, pp. 7347–7379, Oct. 2022, doi: 10.1007/S10518-022-01488-8.
- [17] M. HOLMES, “STEEL FRAMES WITH BRICKWORK AND CONCRETE INFILLING.,” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, vol. 19, no. 4, pp. 473–478, Aug. 1961, doi: 10.1680/IICEP.1961.11305.
- [18] M. Papia, L. Cavaleri, and M. Fossetti, “Infilled frames: Developments in the evaluation of the stiffening effect of infills,” *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 16, no. 6, pp. 675–693, 2003, doi: 10.12989/SEM.2003.16.6.675.
- [19] F. J. Crisafulli and A. J. Carr, “Proposed macro-model for the analysis of infilled frame structures,” *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, vol. 40, no. 2, pp. 69–77, Jun. 2007, doi: 10.5459/bnzsee.40.2.69-77.
- [20] “(1) (PDF) Seismic behaviour of reinforced concrete structures with masonry infills.” Accessed: Oct. 23, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/29487883_Seismic_behaviour_of_reinforced_concrete_structures_with_masonry_infills

- [21] W. W. El-Dakhkhni, M. Elgaaly, and A. A. Hamid, "Three-Strut Model for Concrete Masonry-Infilled Steel Frames," *Journal of Structural Engineering*, vol. 129, no. 2, pp. 177–185, Feb. 2003, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:2(177).
- [22] C. Z. CHRYSOSTOMOU, P. GERGELY, and J. F. ABEL, "A SIX-STRUT MODEL FOR NONLINEAR DYNAMIC ANALYSIS OF STEEL INFILLED FRAMES," <https://doi.org/10.1142/S0219455402000567>, vol. 02, no. 03, pp. 335–353, Nov. 2011, doi: 10.1142/S0219455402000567.
- [23] B. Smith, "Behavior of Square Infilled Frames," *Journal of the Structural Division*, 1966.
- [24] A. Furtado, H. Rodrigues, A. Arêde, and H. Varum, "Simplified macro-model for infill masonry walls considering the out-of-plane behaviour," *Earthq Eng Struct Dyn*, vol. 45, no. 4, pp. 507–524, Apr. 2016, doi: 10.1002/EQE.2663.
- [25] G. Mucedero, D. Perrone, E. Brunesi, and R. Monteiro, "Numerical modelling and validation of the response of masonry infilled rc frames using experimental testing results," *Buildings*, vol. 10, no. 10, pp. 1–30, Oct. 2020, doi: 10.3390/BUILDINGS10100182.
- [26] A. B. Mehrabi and P. B. Shing, "Finite Element Modeling of Masonry-Infilled RC Frames," *Journal of Structural Engineering*, vol. 123, no. 5, pp. 604–613, May 1997, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:5(604).
- [27] P. B. Shing and A. B. Mehrabi, "Behaviour and analysis of masonry-infilled frames," *Progress in Structural Engineering and Materials*, vol. 4, no. 3, pp. 320–331, Jul. 2002, doi: 10.1002/PSE.122.
- [28] P. G. Asteris, "Finite Element Micro-Modeling of Infilled Frames," *Electronic Journal of Structural Engineering*, vol. 8, pp. 1–11, Jun. 2008, doi: 10.56748/ejse.894.
- [29] F. Di Trapani, A. Vizzino, G. Tomaselli, A. P. Sberna, and G. Bertagnoli, "A new empirical formulation for the out-of-plane resistance of masonry infills in reinforced concrete frames," *Eng Struct*, vol. 266, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2022.114422.
- [30] T. Li and S. Atamturktur, "Fidelity and Robustness of Detailed Micromodeling, Simplified Micromodeling, and Macromodeling Techniques for a Masonry Dome," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 28, no. 3, pp. 480–490, Jun. 2014, doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000440.
- [31] M. Petracca, F. Candeloro, and G. Camata, "STKO user manual ASDEA Software." 2021. Accessed: Oct. 19, 2023. [Online]. Available: <https://asdea.eu/software/>
- [32] L. Cavaleri and F. Di Trapani, "Cyclic response of masonry infilled RC frames: Experimental results and simplified modeling," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 65, pp. 224–242, Oct. 2014, doi: 10.1016/J.SOILDYN.2014.06.016.

- [33] A. B. Mehrabi, P. B. Shing, M. P. Schuller, and J. L. Noland, “Experimental Evaluation of Masonry-Infilled RC Frames,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 122, no. 3, pp. 228–237, Mar. 1996, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:3(228).
- [34] “Open System for Earthquake Engineering Simulation - Home Page.” Accessed: Oct. 19, 2023. [Online]. Available: <https://opensees.berkeley.edu/>
- [35] M. Petracca, L. Pelà, R. Rossi, S. Zaghi, G. Camata, and E. Spacone, “Micro-scale continuous and discrete numerical models for nonlinear analysis of masonry shear walls,” *Constr Build Mater*, vol. 149, pp. 296–314, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.05.130.
- [36] Fédération internationale du béton., “Fib model code for concrete structures 2010,” p. 436.
- [37] “Plane Stress Material - OpenSeesWiki.” Accessed: Oct. 19, 2023. [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Plane_Stress_Material
- [38] “Quad Element - OpenSeesWiki.” Accessed: Oct. 19, 2023. [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Quad_Element
- [39] “Fiber Section - OpenSeesWiki.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Fiber_Section
- [40] “Steel02 Material -- Giuffrè-Menegotto-Pinto Model with Isotropic Strain Hardening - OpenSeesWiki.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Steel02_Material_-_Giuffr%C3%A9-Menegotto-Pinto_Model_with_Isotropic_Strain_Hardening
- [41] “Force-Based Beam-Column Element - OpenSeesWiki.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Force-Based_Beam-Column_Element
- [42] “3.1.6.16. ASDConcrete3D Material — OpenSees Documentation documentation.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: <https://opensees.github.io/OpenSeesDocumentation/user/manual/material/ndMaterials/ASDConcrete3D.html>
- [43] M. Petracca, G. Camata, E. Spacone, and L. Pelà, “Efficient Constitutive Model for Continuous Micro-Modeling of Masonry Structures,” *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 17, no. 1, pp. 134–146, 2023, doi: 10.1080/15583058.2022.2124133.
- [44] “Elastic Isotropic Material - OpenSeesWiki.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Elastic_Isotropic_Material
- [45] J. B. Mander, M. J. N. Priestley, and R. Park, “Theoretical StressStrain Model for Confined Concrete,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 114, no. 8, pp. 1804–1826, Aug. 1988, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804).

- [46] “3.1.9.19. ASDEmbeddedNode Element — OpenSees Documentation documentation.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: <https://opensees.github.io/OpenSeesDocumentation/user/manual/model/elements/ASDEmbeddedNodeElement.html>
- [47] “Fix command - OpenSeesWiki.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Fix_command
- [48] “Linear TimeSeries - OpenSeesWiki.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Linear_TimeSeries
- [49] “3.3.1. recorder Command — OpenSees Documentation documentation.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: <https://opensees.github.io/OpenSeesDocumentation/user/manual/output/recorder.html>
- [50] “Analysis Command - OpenSeesWiki.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Analysis_Command
- [51] “Constraints Command - OpenSeesWiki.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Constraints_Command
- [52] “Transformation Method - OpenSeesWiki.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Transformation_Method
- [53] “Numberer Command - OpenSeesWiki.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Numberer_Command
- [54] “RCM Numberer - OpenSeesWiki.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/RCM_Numberer
- [55] “System Command - OpenSeesWiki.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/System_Command
- [56] “Algorithm Command - OpenSeesWiki.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Algorithm_Command
- [57] “Krylov-Newton Algorithm - OpenSeesWiki.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Krylov-Newton_Algorithm
- [58] “Test Command - OpenSeesWiki.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Test_Command
- [59] “Norm Displacement Increment Test - OpenSeesWiki.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Norm_Displacement_Increment_Test
- [60] “Integrator Command - OpenSeesWiki.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Integrator_Command
- [61] “Displacement Control - OpenSeesWiki.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Displacement_Control

- [62] “RCM Numberer - OpenSees Wiki.” Accessed: Oct. 04, 2023. [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/RCM_Numberer
- [63] “Algoritmo Cuthill-McKee - Wikipedia.” Accessed: Oct. 20, 2023. [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Algoritmo_Cuthill-McKee
- [64] European Committee for Standardization, *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings*. 2005.
- [65] H. Sezen and J. P. Moehle, “Shear Strength Model for Lightly Reinforced Concrete Columns,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 130, no. 11, pp. 1692–1703, Nov. 2004, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:11(1692).
- [66] “3.2.9. eigen Command — OpenSees Documentation documentation.” Accessed: Nov. 17, 2023. [Online]. Available: <https://opensees.github.io/OpenSeesDocumentation/user/manual/analysis/eigen.html>